



*LA INFLUENCIA DE LA INDUSTRIA 4.0
Y OTROS FACTORES
DETERMINANTES EN LA
IMPLANTACIÓN LEAN*

*Programa de Doctorado en Ciencias
Económicas, Empresariales y Jurídicas*

(Opcional: Espacio para imagen)

Autor: Francisco Javier Alfonso Ruiz

*Director/es: Dra. Eva Martínez Caro /
Dr. Juan Gabriel Cegarra Navarro*



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Campus
de Excelencia
Internacional

**LA INFLUENCIA DE LA INDUSTRIA 4.0 Y
OTROS FACTORES DETERMINANTES EN
LA IMPLANTACIÓN LEAN**

**THE INFLUENCE OF INDUSTRY 4.0 AND
OTHER DRIVERS ON LEAN
IMPLEMENTATION**

Programa de Doctorado en Ciencias Económicas,
Empresariales y Jurídicas

Alumno: Francisco Javier Alfonso Ruiz

Directores: Dra. Eva Martínez Caro y Dr. Juan Gabriel Cegarra

2020

**CONFORMIDAD DE SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN DE DEPÓSITO
DE TESIS DOCTORAL POR EL/LA DIRECTOR/A DE LA TESIS**

D^a. Eva Martínez Caro y D. Juan Gabriel Cegarra Navarro, directores de la Tesis doctoral LA INFLUENCIA DE LA INDUSTRIA 4.0 Y OTROS FACTORES DETERMINANTES EN LA IMPLANTACIÓN LEAN.

INFORMA:

Que la referida Tesis Doctoral, ha sido realizada por **D. Francisco Javier Alfonso Ruiz**, dentro del **Programa de Doctorado en Ciencias Económicas, Empresariales y Jurídicas**, dando mi conformidad para que sea presentada ante el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado para ser autorizado su depósito.

- ✓ Informe positivo sobre el plan de investigación y documento de actividades del doctorando/a emitido por el Director/ Tutor (**RAPI**).

La rama de conocimiento en la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- Ciencias
- Ciencias Sociales y Jurídicas
- Ingeniería y Arquitectura
-

En Cartagena, a 19 de Junio de 2020

Fdo.: Eva Martínez Caro

Fdo.: Juan Gabriel Cegarra Navarro

**EVA|
MARTINEZ|
CARO**

Firmado digitalmente por EVA|MARTINEZ|CARO
Fecha: 2020.06.19 20:52:41 +02'00'

**JUAN GABRIEL|
CEGARRA|
NAVARRO**

Firmado digitalmente por JUAN GABRIEL|CEGARRA|NAVARRO
Nombre de reconocimiento (DN): cn=JUAN GABRIEL|CEGARRA|NAVARRO, serialNumber=██████████, givenName=JUAN GABRIEL, sn=CEGARRA NAVARRO, ou=Ciudadanos, o=ACCV, c=ES
Fecha: 2020.06.20 00:12:35 +02'00'

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

CONFORMIDAD DE DEPÓSITO DE TESIS DOCTORAL **POR LA COMISIÓN ACADÉMICA DEL PROGRAMA**

D. Carmelo Reverte Maya, Presidente de la Comisión Académica del Programa de Doctorado en Ciencias Económicas, Empresariales y Jurídicas.

INFORMA:

Que la Tesis Doctoral titulada “LA INFLUENCIA DE LA INDUSTRIA 4.0 Y OTROS FACTORES DETERMINANTES EN LA IMPLANTACIÓN LEAN”, ha sido realizada, dentro del mencionado Programa de Doctorado, por D. Francisco Javier Alfonso Ruiz bajo la dirección y supervisión de la Dra. Eva Martínez Caro y el Dr. Juan Gabriel Cegarra Navarro.

En reunión de la Comisión Académica, visto que en la misma se acreditan los indicios de calidad correspondientes y la autorización del Director/a de la misma, se acordó dar la conformidad, con la finalidad de que sea autorizado su depósito por el Comité de Dirección de la Escuela Internacional de Doctorado.

- ✓ Evaluación positiva del plan de investigación y documento de actividades por el Presidente de la Comisión Académica del programa (**RAPI**).

La Rama de conocimiento por la que esta tesis ha sido desarrollada es:

- Ciencias
- ✓ Ciencias Sociales y Jurídicas
- Ingeniería y Arquitectura

En Cartagena, a 19 de Junio de 2020

EL PRESIDENTE DE LA COMISIÓN ACADÉMICA

CARMELO|
REVERTE|MAYA

Firmado digitalmente por CARMELO REVERTE|MAYA.
Nombre de reconocimiento (DN):
gn=CARMELO|REVERTE|MAYA,
o=UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA,
ou=COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO,
c=ES
Fecha: 2020.06.19 20:18:19 +0200'

Fdo: Carmelo Reverte Maya

COMITÉ DE DIRECCIÓN ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

AGRADECIMIENTOS

Una tesis es un largo camino que suele conllevar cambios en la persona que la realiza, y que requiere del apoyo de muchas personas para seguir en la senda correcta. En mi caso, estos tres años han vislumbrado mi boda y el nacimiento de mis dos hijas, por lo que podríamos decir que soy una persona totalmente diferente cuando empecé, que ahora que estoy acabando.

El agradecimiento más especial es a mi mujer, Lorena, que siempre me ha apoyado y me ha echado un cable cuando era necesario. Somos una extraña pareja, a la cual le gusta estudiar, y lo tenemos como hobby. Esto sin duda hace que todo sea más sencillo. Ahora es momento de entregarle el testigo y que sea ella la que inicie su camino de la tesis doctoral.

A mis dos hijas, Rocío y Sofía, me gustaría nombrarlas para que cuando lean esto en el futuro encuentren la motivación necesaria y que se apasionen estudiando. El estudio nos moldea como personas y nos hace mejores, y lo más importante, nos aporta conocimiento, que tal vez sea el mayor de los tesoros que se puedan encontrar. El estudio nos da armas para tener un espíritu crítico, y poder disponer de nuestros propios argumentos, no asimilando todo lo que se nos dice sin ponerlo en duda. Os animo hijas a que estudiéis lo máximo que podáis, que no creáis ciegamente lo que oigáis y leáis, y que apliquéis vuestro criterio, que seáis exigentes con vosotras mismas y con el mundo, que no os conforméis.

A mis tutores de tesis, Eva y JuanGa, por ser unos grandes profesionales, y por empujarme cuando era el momento para poder terminar. Perfiles como el de ellos hacen mejor a la UPCT, la hacen diferente, velando porque la Universidad mantenga un alto nivel de excelencia. Ha sido una bonita aventura la que he pasado con ellos, y es un orgullo tener mi nombre puesto junto al de ellos en tres artículos publicados.

No me gustaría despedirme sin tener un recuerdo hacia la empresa Saint-Gobain Weber, que tan amablemente accedió a colaborar en el estudio. Especialmente a David Crespi, Director Industrial internacional, por haberme puesto en contacto con toda la organización multinacional de la empresa, lo cual sin duda fue de gran ayuda para obtener las respuestas y participación que buscábamos.

– There is always something you can improve –

RESUMEN / ABSTRACT

En la empresa actual, y en un entorno globalizado como en el que nos encontramos, resulta de vital importancia tener unos procesos eficientes y eficaces, capaces de suministrar el producto o servicio en el plazo adecuado, en la cantidad adecuada, y con el mínimo coste posible. Desde hace varias décadas, la metodología Lean aporta a las empresas herramientas enfocadas a la mejora gradual y continua de su cadena de valor, haciéndolas más competitivas. Pese a esto, no resulta difícil encontrar implantaciones Lean fracasadas, aún con el esfuerzo e inversión iniciales, lo cual conlleva una gran pérdida de tiempo y dinero.

Por otro lado, la Industria 4.0 se está erigiendo como la nueva revolución industrial, la de los sistemas ciber-físicos, encaminada a la digitalización e interconectividad de los sistemas productivos a través de la aplicación industrial de las tecnologías de la información. Será crítico en las empresas del futuro adaptar de forma adecuada sus procesos/servicios a esta nueva era digital.

El propósito de esta tesis es, por un lado, determinar cuáles son las barreras de implantación de la filosofía Lean más habituales, y por otro, analizar las herramientas de la Industria 4.0 más utilizadas para, posteriormente, centrarse en la interacción entre ambos mundos, el de mejora continua y el digital. Se pretende hacer especial hincapié en la digitalización de los sistemas orientados hacia un Lean digital y adaptados a la realidad futura de los entornos industriales, de manera que no sólo se eviten las fricciones entre ambos enfoques, sino que se aproveche la Industria 4.0 para atenuar las históricas barreras de implementación del Lean Manufacturing, potenciando y mejorando estos sistemas.

Pese a ser un tema de gran interés para las empresas, actualmente no se disponen de estudios científicos que demuestren que la digitalización de las empresas a través de la Industria 4.0 puede atenuar las barreras de implantación de sistemas Lean y mejorar, por tanto, el impacto de estos sistemas de mejora continua en los resultados de las empresas.

A través de un estudio en profundidad realizado dentro de la empresa multinacional Saint-Gobain, mediante el análisis cuantitativo en 93 fábricas distribuidas en más de 10 países, se ha conseguido demostrar estadísticamente la relación positiva que las herramientas digitales tienen en la implantación Lean y, por ende, en los resultados de la empresa.

Los resultados obtenidos son de gran ayuda para aquellas empresas inmersas en proyectos Lean de mejora continua, así como en otras cuyos sistemas hayan perdido relevancia con el paso del tiempo. Además, se suple en parte la falta de conocimiento en esta área, ya que como se ha señalado anteriormente apenas hay artículos científicos que demuestren esta relación positiva. Por último, pero no por eso menos importante, el haber hecho el estudio desde dentro de uno de los grupos industriales mayores a nivel mundial, otorga a esta investigación un grado de aplicabilidad elevado por su estrecha cercanía al mundo de las empresas.

[Palabras Clave]. Lean Manufacturing, Industria 4.0, barreras implantación lean, digitalización, mejora continua, resultados empresariales.

SUMMARY / ABSTRACT

In today's company, and in a globalized environment such as the one we find ourselves in, it is vitally important to have efficient and effective processes, capable of supplying the product or service in the right time, in the right quantity, and at the lowest possible cost. For several decades, the Lean methodology has provided companies with tools focused on the gradual and progressive improvement of their value chain, making them more competitive. Despite this, it is not difficult to find failed Lean implementations, even with the initial effort and investment, which leads to a great loss of time and money.

On the other hand, Industry 4.0 is emerging as the new industrial revolution, the one of the cyber-physical systems, aimed at the digitalization and interconnectivity of production systems through the industrial application of information technologies. It will be critical in the companies of the future adequately adapt their processes/services to this new digital era.

The purpose of this thesis is, on one hand, to determine which are the most common barriers for the implementation of the Lean philosophy, and on the other hand, to analyze the tools of Industry 4.0 most used. Finally, it will be focused on the interaction between both worlds, digital and continuous improvement, with special emphasis on the digitalization of these systems towards a digital Lean and adapted to the future reality of industrial environments, so that not only friction between both approaches is avoided, but also Industry 4.0 is used to mitigate the historical barriers to the implementation of Lean Manufacturing, enhancing and improving these systems.

Despite being a topic of great interest for companies, currently there are no scientific studies showing that the digitalization of companies through Industry 4.0 can mitigate the barriers to Lean implementation, and therefore improve the impact of these systems of continuous improvement in the results of companies.

Through an in-depth study carried out within the multinational company Saint-Gobain, by means of the quantitative analysis in 93 factories distributed in more than 10 countries, it has been possible to statistically demonstrate the positive relationship that digital tools have in the implementation of Lean, and therefore in the results of the company.

The results obtained are of great help for those companies immersed in Lean projects of continuous improvement, as well as in others whose systems have lost relevance over time. In addition, the lack of knowledge in this area is partly solved, since as we said there are hardly any scientific articles that demonstrate this positive relationship. Last, but not least, having made the study from within one of the largest industrial groups worldwide, gives this research a high degree of applicability due to its close proximity to the business world.

[Keywords]. Lean Manufacturing, Industry 4.0, barriers to lean implementation, digitalization, continuous improvement, business results.

ÍNDICES

ÍNDICE GENERAL

<i>CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN</i>	1
1.1 Introducción	3
1.2 Objetivos de la investigación	10
1.3 Descripción de contenidos	12
 <i>CAPÍTULO SEGUNDO: FUNDAMENTOS TEÓRICOS</i>	10
2.1 Herramientas Lean	13
2.2 Barreras Lean.....	16
2.3 Industria 4.0	20
2.4 Herramientas digitales de la Industria 4.0	23
2.5 Interacción Lean / Industria 4.0	30
2.5.1 Factores Externos	31
2.5.2 Factores Internos	35
2.6 Atenuación de las barreras Lean a través de la Industria 4.0	45
2.7 Conclusiones	53
 <i>CAPITULO 3. MARCO CONCEPTUAL: PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS</i>	55
3.1 Introducción	57
3.2 Marco conceptual	57
3.2.1 Relación entre mejora continua y resultados empresariales	57
3.2.2 Papel mediador de la digitalización en la relación entre mejora continua y resultados empresariales	60

<i>CAPÍTULO 4: DISEÑO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</i>	71
4.1 Toma de datos	73
4.2 Medidas	75
4.3 Análisis	77
4.3.1 Valoración del modelo de medida	78
4.3.2 Valoración del modelo estructural	87
<i>CAPITULO 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</i>	91
5.1 Análisis descriptivo	93
5.1.1 Análisis descriptivo de ítems relacionados con el perfil de la muestra	93
5.1.2 Análisis descriptivo de la variable “Mejora Continua”	95
5.1.3 Análisis descriptivo de la variable “Digitalización”	96
5.1.2 Análisis descriptivo de la variable “Resultados Empresariales”	96
5.2 Análisis de los resultados del modelo estructural	97
<i>CAPITULO 6. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES, LIMITACIONES, FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y APORTACIONES</i>	101
6.1 Discusión y conclusiones.....	103
6.2 Implicaciones prácticas	108
6.3 Limitaciones y líneas futuras de investigación.....	111
6.4 Aportaciones derivadas de la tesis.....	112
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	113
<i>ANEXO</i>	127

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Principales plataformas de difusión digital en la Industria 4.0	4
Tabla 2.1. Principales herramientas y/o actividades LEAN, y su digitalización a través del uso de la Industria 4.0	46
Tabla 2.2. Ventajas obtenidas por la aplicación de la Industria 4.0 en la atenuación de las barreras Lean.	55
Tabla 4.1. Listado de ítems de la variable Mejora Continua.	75
Tabla 4.2. Listado de ítems de la variable Digitalización	76
Tabla 4.3. Listado de ítems de la variable Resultados Empresariales.....	76
Tabla 4.4. Tabla 4.4. Análisis multicolinealidad inicial modo B.	80
Tabla 4.5. Valoración de los pesos de los indicadores, modo B	80
Tabla 4.6. Criterios de evaluación modelos PLS-SEM.	81
Tabla 4.7. Análisis fiabilidad individual del ítem (Modo A)	82
Tabla 4.8. Análisis fiabilidad del constructo y validez convergente	84
Tabla 4.9. Análisis de la validez discriminante por el criterio de Fornell-Lacker	85
Tabla 4.10. Análisis de la validez discriminante mediante el ratio HTMT	85
Tabla 4.11. Valoración del modelo de medida (saturado)	86
Tabla 4.12. Bootstrap-based inference statistics of the SRMR.	86
Tabla 4.13. The unweighted least squares discrepancy.....	86
Tabla 4.14. The geodesic discrepancy.	86
Tabla 4.15. Valoración colinealidad variables antecedentes.....	87
Tabla 4.16. Evaluación signo coeficiente Path	88
Tabla 4.17. Varianza explicada.	89
Tabla 4.18. Tamaño del efecto	90
Tabla 5.1. Magnitud coeficiente Path.....	98
Tabla 5.2. Intervalos de confianza del coeficiente Path.	98
Tabla 5.3. Magnitud coeficiente Path efectos indirectos.....	99
Tabla 5.4. Intervalos de confianza del coeficiente Path efectos indirectos.....	99
Tabla 5.5 Aceptación final hipótesis.....	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Principales plataformas de difusión de la I-4.0	4
Figura 2.1. Desperdicios en Lean	15
Figura 2.2. Evolución hacia la Industria 4.0	21
Figura 2.3. El templo de las fases de la I-4.0	22
Figura 2.4. Listado de herramientas principales en I-4.0	25
Figura 2.5. Impacto de la Industria 4.0 en los factores externos	31
Figura 2.6. Impacto de la Industria 4.0 en los factores Internos	35
Figura 2.7. Esquema de integración Lean/Industria 4.0 para la atenuación de las barreras de implantación Lean.	45
Figura 3.1. Modelo teórico planteado.	69
Figura 5.1. Distribución del ítem “Posición Actual”	93
Figura 5.2. Distribución del ítem “Antigüedad en la empresa”	93
Figura 5.3. Distribución del ítem “Personas a cargo”	94
Figura 5.4. Distribución del ítem “Rango de edad”	94
Figura 5.5. Análisis descriptivo del constructo “Mejora Continua”	95
Figura 5.6. Análisis descriptivo del constructo “Digitalización	96
Figura 5.7. Análisis descriptivo del constructo “Resultados empresariales”	97
Figura 5.8. Modelo resultante	100

LISTADO DE SIGLAS

AVE: Average Variance Extracted

AGV: Auto Guided Vehicle

B2C: Business to Consumer

EBITDA: Earnings Before Interests, Taxes, Depreciations and Amortizations

ERP: Enterprise Resource Planning

GMAO: Gestión de Mntenimiento Asistido por Ordenador

HADA: Herramienta Audodiagnóstico Digital Avanzada

HCP: Hoja Control de la Producción

HMI: Human Machine Interface

HTMT: Heterotrait-Monotrait

I-4.0: Industria 4.0

IoT: Internet of Things

JIT: Just In Time

KPI: Key Performance Indicator

LM: Lean Management

MES: Manufacturing Execution System

MRP: Material Requirement Planning

MTBF: Mean Time Between Failure

MTTR: Mean Time To Repair

OEE: Overall Equipment Effectiveness

PLC: Programmable Logic Controller

PLS: Partial Least Squares

PROSA: Production and manufacturing system management

RFID: Radio Frequency Identification

RPA: Robot Process Automation

SMED: Single Minute Exchange of Die

TAKT: tiempo entre el inicio de la producción de una unidad y la siguiente

TPM: Total Productive Maintenance

TPS: Toyota Production System

VSM: Value Stream Mapping

WCM: World Class Manufacturing

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO PRIMERO: INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN.

Los sistemas de fabricación Lean tienen su origen en Toyota allá por la década de 1950, intentando dar respuesta a los acuciantes problemas de falta de calidad y sobrecostos de producción que atravesaba la compañía (Ohno, 1988). Dicha metodología fue recogida con posterioridad en diversas publicaciones (Sugimori et al, 1977; Krafcik, 1988; Womack, Jone y Ross, 1991), dando forma a lo que hoy en día se conoce como Lean Manufacturing. La metodología Lean tiene como objetivo fundamental la eliminación de cualquier desperdicio (Womack, Jone y Ross, 1991), entendiendo como tal a todo aquello que incurre en un gasto y no aporta ningún valor o beneficio desde el punto de vista del cliente.

Desde que Toyota diera a conocer al mundo su sistema de producción (Toyota Production System o Lean Manufacturing), muchas han sido las publicaciones y artículos referidos al mismo tratando de explicar sus bondades y beneficios (por ejemplo, Shah y Ward, 2002; McKone et al., 2001; Womack y Jones 1996; Ohno 1988;).

Pese a que la bibliografía es abundante y es relativamente sencillo encontrar consultores de mejora continua, muchas de las empresas que se embarcan en proyectos para adoptar los conceptos Lean fracasan en su intento (Lucey, Bateman y Hines, 2005; Pay, 2008). Es por esto fundamental una correcta adaptación de dicha metodología a las necesidades reales de la empresa.

Por otra parte, la digitalización de los procesos industriales y la interconexión entre los mismos, está dando lugar a un nuevo paradigma productivo que está llamado a ser la nueva revolución industrial (Rüßmann et al, 2016). A toda esta digitalización tecnológico-industrial se le conoce como Industria 4.0 (I-4.0), y constantemente aumentan las empresas interesadas en invertir sus activos en modernizarse e implementar los sistemas necesarios para alcanzar un nivel digital satisfactorio.

En el ámbito de la I-4.0, cada vez son más los países que desarrollan movimientos para fomentar y financiar su implantación. A modo de ejemplo, en la tabla 1.1, destacamos las principales plataformas de difusión digital.

País	Plataforma	Web
España	Industria Conectada	http://www.industriaconectada40.gob.es/Paginas/index.aspx#inicio
Alemania	Plattform Industrie 4.0	http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/EN/Industrie40/WhatIsIndustrie40/what-is-industrie40.html
USA	Clean Energy Smart Manufacturing Innovation Institute	https://www.cesmii.org/
USA	Industrial Internet Consortium	http://www.iiconsortium.org/iiot-world-tour/index.htm
Italia	Piano Nazionale Industria 4.0	http://www.mise.gov.it/index.php/it/industria40
Francia	Industrie du Futur	http://www.industrie-dufutur.org/

Tabla 1.1. Principales plataformas de difusión digital en la Industria 4.0

En la figura 1.1, se presenta un mapa donde podemos ver con mayor detalle las principales plataformas de difusión de la Industria 4.0 en Europa.



Figura 1.1. Principales plataformas de difusión de la I-4.0. Fuente: Industria conectada.

Parece claro que la revolución digital industrial está tomando forma y que, sin duda, el impacto en la economía mundial será de gran calado. Por ejemplo, se estima que, en

Alemania, el impacto de la I-4.0 en la productividad industrial estará en torno al 40% en 2025 (Müller, 2020), lo que supondrá un aumento más del 2% de PIB germano.

En el caso de España, pese a no encontrarnos todavía al mismo nivel industrial que otros países europeos, se está trabajando en buena línea. En el portal *Industria conectada*, del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo, comentado con anterioridad, podemos encontrar información diversa en la materia, así como también convocatorias de financiación para abordar proyectos de digitalización, programas de asesoramiento para empresas, incluso una herramienta de autodiagnóstico, HADA, enfocada a la evaluación del nivel de implementación de la I-4.0 en las empresas españolas.

Cabe destacar la importancia de la colaboración entre empresas, e incluso entre países, para el intercambio de buenas prácticas en la materia que posibiliten sinergias y aceleren la transformación digital de los procesos industriales. En este sentido destacan las plataformas de difusión que han desarrollado países como USA y Alemania, a través de las cuales es posible ver de forma ágil y sencilla los proyectos relacionados con la Industria 4.0 que se están llevando a cabo en diversas empresas de dichos países, posibilitando la exportación de dichos proyectos a empresas de otros sectores, aumentando de esta forma la productividad y competitividad industrial nacional.

Enfoque clásico: incompatibilidades entre LEAN e Industria 4.0.

Si analizamos la bibliografía existente, nos encontramos con ciertas alusiones a la problemática, al menos a nivel teórico, en la implementación de Lean Management y la Industria 4.0 (Piszczalski, 2000; Rüttimann y Stöckli, 2016). Y es verdad que, bajo cierto punto de vista las fricciones existen y pueden llegar a generar un fracaso en la implementación de estos sistemas si no se manejan adecuadamente.

Para empezar, ambas requieren de muchos recursos para su implantación (Moyano Fuentes et al, 2012), por lo que en muchas ocasiones es necesario optar por implementar Lean Management o Industria 4.0, de cara a evitar el colapso de los equipos, y la inversión excesiva de tiempo y dinero.

Nos encontramos también con una confrontación de base, a nivel puramente conceptual, ya que Lean establece la simplicidad como forma de vida, buscando disponer de la información justa, en el momento justo, y de la motivación y participación del equipo humano en la mejora continua, haciendo que los desperdicios sean visibles para todo el mundo (Womack, 2004; Ohno, 1988). En Lean menos, es más.

En este sentido la digitalización puede generar falta de visibilidad, ya que la información se gestiona y almacena de forma centralizada, (Houy, 2005; Drew, McCallum y Roggenhofer, 2004), pudiendo generarse situaciones en las que los usuarios no dispongan de la misma. Otro problema asociado a la digitalización puede venir del alejamiento de los gestores de la línea de fabricación (Houy, 2005; Sharma y Pankaj, 2016), y es que la disposición de información de forma remota hace que pueda resultar apetecible establecer un control de los indicadores desde el despacho, alejándose de la realidad cotidiana del proceso productivo.

Además, hay que tener en cuenta los denominados fenómenos “*Gold Plating*” y “*Silver-bullet Syndrome*” (Brass et al, 2016). En primero de ellos hace referencia a que durante la implementación de un proyecto de digitalización, usuarios y desarrolladores implementan funciones adicionales a las originalmente previstas, muchas de las cuales son innecesarias y que acaban generando retrasos en la implementación. Es fundamental establecer bien los objetivos desde el inicio y dejar las posibles mejoras para versiones posteriores, una vez se haya lanzado y probado el proyecto. En cuanto al “*Silver-bullet Syndrome*”, se da de forma generalizada en casi todas las implementaciones, y es aquel en el que los usuarios esperan que las nuevas tecnologías resuelvan todos sus problemas, quedando evidentemente defraudados al comprobar la realidad. Es muy importante formar adecuadamente a los usuarios y que estos conozcan las posibilidades reales de los sistemas, así como sus limitaciones. La tecnología ayuda y simplifica el trabajo, pero no es una varita mágica que elimina todos los problemas.

En ocasiones la digitalización provoca que se dificulte la visualización de los procesos, al llevarse a cabo en ordenadores, lo cual genera un factor limitante (Sharma y Pankaj,

2016). Por el contrario, bien aplicado, puede dar lugar a un mayor control al tener una visión global del sistema desde cualquier punto de la línea.

Se ha de tener en cuenta también, que la implementación de las herramientas digitales industriales lleva aparejado un inicio difícil de predecir (Brass et al, 2016), ya que hasta que no se ponen en marcha no se saben cómo van a funcionar al 100%. La fase de testeo es compleja y los cambios difíciles de ver a priori. Los cambios en los entornos digitales y programados son más complejos y a menudo requieren de mano de obra externa, lo que puede ralentizar en exceso las modificaciones y mejoras que se propongan. Son entornos más rígidos en cuanto al cambio y se requiere de una buena definición inicial, la cual es compleja debido a que no se sabe a ciencia cierta el funcionamiento hasta que se ejecuta (Brass et al, 2016). Se sigue un procedimiento de prueba y error, ya que es difícil tener en cuenta todos los factores cuando se está programando.

Enfoque moderno: Industria 4.0 como elemento habilitador en Lean Management.

Frente al enfoque clásico, actualmente se propone una visión más actualizada en la cual las herramientas de digitalización que generan la I-4.0 no sólo no dificultan, sino que, si son bien enfocadas, pueden convertirse en elementos habilitadores en la implementación de la metodología Lean. La idea fundamental radica en focalizar la I-4.0 para contrarrestar las barreras de implementación existentes en Lean.

Las barreras a la hora de implementar Lean Management son variadas, pudiendo destacar, por encima de todas, la falta de compromiso de la dirección, y la falta de implicación y formación de los trabajadores como las más críticas (Upadhye, Deshmukh y Garg, 2016).

Como se ha anticipado antes, si la digitalización de los procesos industriales está bien enfocada las barreras de implementación del Lean Management pueden verse atenuadas. Para empezar, las herramientas digitales facilitan la toma de datos mejorando la capacidad de análisis y toma de decisiones. De esta forma se ofrece un entorno más dinámico en la detección temprana de problemas, y se consigue una mayor velocidad de reacción y eliminación de fuentes de pérdida de eficiencias.

Lo anterior puede generar mayor compromiso de la dirección en la implementación Lean, ya que las herramientas digitales ponen a su servicio información en tiempo real (Houy, 2005), pudiendo focalizar su esfuerzo en los aspectos que consideren más importantes, y encontrando una ventaja para mejorar la eficiencia de sus equipos. No olvidemos que, principalmente, la falta de compromiso de la dirección a la hora de implementar Lean viene dada por no ver éstos un mayor beneficio en dedicar su escaso tiempo a las herramientas implementadas en vez de a su rutina habitual de trabajo. Si somos capaces de aprovechar los entornos digitales para darle un mayor valor añadido a los métodos Lean, conseguiremos un mayor compromiso por parte de la dirección.

Otra de las ventajas es que se conseguirá una mayor interacción de los directivos con el proceso productivo (Houy, 2005), ya que, al disponer de más información y conocimiento, aumentará su implicación en los problemas de la línea, pudiendo emprender acciones de mejora más y mejor relacionadas con los problemas reales de las líneas de fabricación.

La implicación de los trabajadores es fundamental para garantizar el éxito en la implementación Lean (Adler, 1993; Wickens 1987; Parker 2003; Shadur et al. 1995; Vidal 2007). Con la Industria 4.0, el operario puede interactuar más con el sistema (Ward y Zhou, 2006), analizando datos y configurando máquinas sobre la marcha, reduciendo tiempos de ajuste gracias a la automatización. En otras palabras, podemos pasar de simples ejecutores de tareas rutinarias a mano de obra de alto valor añadido.

El uso masivo de pizarras en Lean es sin duda una de las mayores oportunidades de mejora que ofrecen los sistemas digitales. La cantidad de información impresa usada genera un desperdicio en sí misma, que es justo lo que los sistemas Lean tratan de eliminar.

La digitalización también puede mejorar la gestión del conocimiento. Las empresas Lean por norma general tienen un mayor aprovechamiento del conocimiento de los empleados (Sharma y Pankaj, 2016). Además, mediante la digitalización se consigue que las plataformas digitales potencien este factor, facilitando el acceso a la formación.

Si hablamos de factores externos, la relación con los proveedores pasa por ser un elemento de vital importancia para el éxito de la implementación Lean y su filosofía de entregas justo a tiempo, Just in Time (JIT). La interconectividad que ofrecen las herramientas digitales ayuda sin duda a que esta relación mejore notablemente.

La digitalización del Lean a través de la Industria 4.0

Tras lo comentado anteriormente, parece claro que la aportación de la Industria 4.0 hará que los métodos tradicionales del Lean cambien hacia otros más digitales buscando, por un lado, adaptarse a la futura revolución industrial digital y, por otro, aprovechando estas tecnologías para mejorar y pulir sus herramientas. Se ha de ser capaz de transformar en ventaja lo que a priori era un punto de fricción. Además, es fundamental aplicar de forma correcta la digitalización, ya que una misma herramienta puede tener resultados completamente distintos en función de cómo se implemente. Las herramientas Lean clásicas están avanzando hacia el terreno digital y tal vez sea éste un modelo que se adapte mejor al carácter occidental que el importado de Toyota.

En conclusión, la metodología Lean Manufacturing forma parte de la cultura general de mejora continua en infinidad de empresas en todo el mundo. En Lean, menos es más, menos defectos, menos movimientos, menos variabilidad, menos inventario, en definitiva, menos desperdicios, persiguiendo en todo momento la reducción de los mismos para aumentar la eficiencia global de la empresa. Por otro lado, las tecnologías de la información, y su aplicación industrial a través de la Industria 4.0 (I-4.0), han permitido a las empresas organizar mejor sus recursos, contribuyendo a una mejora en la gestión de su información, una mayor flexibilidad y aumento de su capacidad funcional. A priori parece evidente que las herramientas digitales ubicadas dentro de la I-4.0 pueden ayudar a las empresas a mejorar sus resultados, sin embargo, las fricciones entre el mundo Lean y el digital son a menudo frecuentes, ya que, pese a que en ambos casos las mejoras en su aplicación son evidentes, una mala puesta en práctica puede ocasionar resultados indeseados. En la actualidad, no se disponen de estudios rigurosos y contrastados empíricamente que demuestren que la digitalización de las empresas a través de la I-4.0 puede atenuar las barreras de implantación Lean.

Por tanto, la finalidad de esta tesis es, por un lado, determinar cuáles son las barreras de implantación de la filosofía Lean más habituales, y por otro, analizar las herramientas de la I-4.0 más utilizadas. Posteriormente nos centraremos en la interacción entre ambos mundos, el de mejora continua y el digital, haciendo especial hincapié en la digitalización de los sistemas hacia un Lean digital y adaptado a la realidad futura de los entornos industriales, de manera que no sólo se eviten las fricciones entre ambos enfoques, sino que se aproveche la I-4.0 para atenuar las históricas barreras de implementación del Lean Manufacturing, potenciando y mejorando estos sistemas. Para ello, relacionaremos las principales herramientas de mejora continua con herramientas digitales para establecer una posible relación entre ambas que será contrastada posteriormente de manera empírica.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo general de esta tesis radica en poder aportar más información en este campo de conocimiento ya que apenas se han encontrado artículos científicos que demuestren empíricamente la influencia de la I-4.0 en la implementación Lean. Para ello, determinaremos los elementos clave en la implementación del Lean Management para establecer una guía de buenas prácticas y, por consiguiente, contribuir a aumentar el porcentaje de éxito en su puesta en marcha. Además, profundizaremos en la contribución del factor I-4.0 como elemento habilitador del Lean, siendo la I-4.0 el principal aspecto diferenciador respecto a otros estudios previos realizados en este ámbito.

Desde el primer momento, se ha pretendido desarrollar una tesis muy vinculada a la actividad industrial, obteniendo información de primera mano de un grupo industrial multinacional. intentando reducir el “gap” que en muchas ocasiones existe entre el mundo académico y el empresarial.

De manera específica, se enumeran los siguientes objetivos:

- Evaluar el impacto de los diferentes factores que influyen en la implantación Lean.
- Identificar aspectos clave que garanticen el éxito en la implantación Lean.
- Analizar la influencia de las barreras de entrada en la implantación Lean.

- Relacionar la implantación Lean con las nuevas metodologías englobadas en la corriente de la I-4.0 señalando en qué modo éstas influyen en el proceso.
- Plantear un modelo Lean que evite los factores limitantes, y que consiga una mayor efectividad en su implantación.
- Testar el modelo teórico desarrollado en un entorno multinacional para dotar a la investigación de un grado de aplicabilidad en la industria elevado.
- Aportar nuevo conocimiento científico en esta área, ya que apenas hay estudios científicos que demuestren empíricamente la relación entre la Industria 4.0 y la implantación Lean.
- Servir de guía para empresas que vayan a emprender o se encuentren inmersas en proyectos Lean, de manera que éstas se beneficien de las implicaciones prácticas que se desprendan de esta tesis.

1.3 DESCRIPCIÓN DE CONTENIDOS

La presente tesis se ha estructurado en seis capítulos convenientemente diferenciados, los cuales pasamos a detallar a continuación.

En el primer capítulo se realiza una introducción a los sistemas tradicionales de mejora continua, así como también a la nueva corriente de digitalización industrial llamada Industria 4.0, dejando patente la importancia de ambos para garantizar el futuro de las empresas en un mercado tan competitivo y globalizado como el actual, y justificando haber elegido este tema para el estudio. Se expone la necesidad de analizar cómo interaccionan ambos mundos y los distintos enfoques que a día de hoy existen, introduciendo el planteamiento de que la Industria 4.0 puede atenuar las históricas barreras de implantación Lean.

En el segundo capítulo se analizan en profundidad los distintos conceptos relacionados con la Industria 4.0 y la implantación Lean, así como la interacción entre ellos, haciendo una exhaustiva revisión de la literatura. Se constata que no hay apenas artículos en la actualidad que hablen de la interacción entre ambos conceptos, y menos aún con carácter científico. En este capítulo, se exponen las principales barreras de implantación Lean, así como las herramientas que actualmente más se están desarrollando en la Industria 4.0. Finalmente se relacionan las barreras Lean y las herramientas digitales que pueden ayudar a eliminarlas, y se exponen los beneficios teóricos de la digitalización en la implantación de los sistemas Lean.

En el tercer capítulo se expone el marco conceptual para el desarrollo de nuestro modelo de investigación mediante el planteamiento de las hipótesis de este estudio, cuyas variables principales son: Mejora continua, Digitalización, y Resultados Empresariales.

En el capítulo cuarto se detalla la metodología de investigación que hemos utilizado, detallando la muestra y los instrumentos de medida. Además, se selecciona la técnica de análisis, que en nuestro caso está fundamentada en los modelos de ecuaciones estructurales basados en la varianza (PLS).

En el capítulo quinto se analizan los resultados y se valida el modelo, contrastando las hipótesis propuestas en los capítulos anteriores, y constatando que la teoría propuesta tiene validez científica.

En el capítulo sexto y último, se muestran las conclusiones finales de la tesis y se aborda un debate de los resultados obtenidos. Para cerrar este capítulo nos focalizamos en las implicaciones desde el punto de vista empresarial, haciendo especial hincapié en dar un enfoque práctico que sirva de ayuda a las empresas a la hora de implantar sus sistemas de mejora continua. No olvidamos las posibles líneas futuras de investigación, así como las limitaciones del estudio que pudieran ser subsanadas en otras investigaciones.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO SEGUNDO: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. HERRAMIENTAS LEAN

Lean Manufacturing, en líneas generales, puede ser descrito como un enfoque, una forma de ver la gestión productiva de una empresa, a través de la cual se identifican los procesos de valor añadido desde el punto de vista del cliente (Womack, 1990) para ser transferidos y optimizados a través de herramientas concretas de mejora continua (Sha y Ward, 2007). En su origen, Lean Manufacturing procede del sistema de producción originalmente establecido por Toyota (Ohno, 1988), y que fue bautizado como *Toyota Production System* (TPS) y conceptualizado por su precursor Taichii Ohno. El concepto central proviene de suministrar productos y/o servicios al ritmo que demanda el cliente eliminando progresivamente todo tipo de desperdicio (Womack, 1990). Desde su origen, el Lean Manufacturing cambia para siempre la forma trabajar de la gente, generando ambientes de trabajo retadores y participativos, con un mayor reparto de proyectos y responsabilidades, y posibilitando mayores y más rápidos ascensos y crecimientos de carrera profesional (Womack, 1990).

En la metodología Lean existe una base metodológica basada en el modelo Genba kanri (Handyside, 1997), mediante el cual se establecen las 3 bases (llamadas 3s), que generan todas las acciones: control de conocimientos, procedimientos estándares y grupos de mejora (Kaizen). Otro de los elementos fundamentales es la parte de gestión, que puede generalizarse en 5 áreas (Upadhye et al, 2016): liderazgo sólido, cultura basada en el trabajo en equipo, sistemas de comunicación, desarrollos de mejoras simultáneos y aplicación concisa y exhaustiva de la mejora continua.

Basándonos en la escala dimensional establecida por Sha y Ward (2007), podemos establecer una cuantificación conceptual del Lean Manufacturing mediante el uso de diez factores:

1. Retroalimentación de los proveedores: todas las reclamaciones de los productos y servicios recibidos de los clientes para ser comunicados periódicamente a los proveedores, para una transferencia efectiva de información.

2. Entrega "justo a tiempo" (JIT) por parte de los proveedores: Sólo se requiere la cantidad de productos que deben ser entregados por los proveedores a la hora especificada cuando los clientes los requieren.
3. Desarrollo de proveedores: Los proveedores se desarrollarán (crecerán en su negocio) junto con el fabricante, para evitar inconsistencias o desajuste en los niveles de competencia.
4. Implicación del cliente: Los clientes son los principales impulsores de un negocio, sus necesidades y expectativas debe tener una alta prioridad (enfoque al cliente).
5. Tirar de la producción: Establecer un sistema "pull" en que el proceso que sucede al anterior, tira de él en función al sistema Kanban. Es la base de la producción JIT.
6. Flujo continuo: Se debe establecer un flujo racionalizado de productos sin grandes paradas a través de la fábrica.
7. Reducción del tiempo de preparación: El tiempo necesario para adaptar los recursos a las variaciones de los productos debe ser mantenida lo menos posible.
8. Mantenimiento productivo/preventivo total: El fallo de las máquinas y equipos debe evitarse mediante procedimientos eficaces de mantenimiento periódico. En caso de fallo, el tiempo de reparación se habrá de reducir al máximo.
9. Control estadístico del proceso: La calidad de los productos a la primera es fundamental, se ha de detectar y filtrarse, anticipándonos al error.
10. Participación de los empleados: Con la motivación y el foro participativo adecuados, los empleados deben estar facultados para una contribución general a la empresa.

Una vez comentados los diez factores que pueden definir al Lean Manufacturing, consideramos de vital importancia hablar del concepto de "Muda" o desperdicio. Hemos comentado anteriormente que el enfoque Lean radica en la detección y eliminación progresiva de los desperdicios detectados, los cuales se pueden clasificar en 7 grandes bloques (Womack, 1996):

1. Exceso de inventario. El cual se da por tener más cantidad de material en stock que la que realmente solicita la demanda. Es un claro indicador de que el flujo no es continuo.

2. Sobreproducción. Generado por fabricar más cantidad que la que se necesita, motivado generalmente por sobrecapacidad de los equipos instalados.
3. Tiempo de espera. Son aquellos tiempos muertos que se generan en los procesos mal diseñados, y con cadencias distintas, contribuyendo en ocasiones a ver operarios sin carga y otros saturados de trabajo.
4. Movimientos innecesarios. En líneas generales todo movimiento es un desperdicio, ya que no aporta valor desde el prisma del cliente, por lo que habremos de reducir al máximo las distancias a cubrir en nuestros procesos.
5. Defectos. Que es el producido por problemas e incidencias en la calidad del producto, que acaba generando rechazos y/o retrabajos.
6. Transporte. Similar al de movimientos innecesarios, pero asociado a los movimientos que realizan con los productos o materias primas.
7. Sobre procesado. Desperdicio generado cuando se realiza más trabajo en una pieza que lo requerido por nuestro cliente.



Figura 2.1. Desperdicios en Lean. Fuente: Giralt, 2016.

A todos estos desperdicios, se le suele añadir un octavo (Liker y Meier, 2006), que proviene del no aprovechamiento del talento y capacidad de las personas. Es fundamental generar ambientes y dinámicas de trabajo en las que los equipos puedan participar y aportar sus conocimientos.

Los sistemas de producción Lean contribuyen a una mayor y más rápida respuesta a los cambios del entorno (Ohno, 1988), y ayuda a configurar sistemas más competitivos en

entornos cambiantes (Womack et al, 2007) si los comparamos con las tradicionales producciones en masa. Si bien es cierto que, en los últimos años, debido a los entornos de mercados customizados a clientes, de lotes pequeños y gran flexibilidad, surgen fricciones entre el Lean Manufacturing clásico y la necesidad de rápida adaptación a los clientes, debido sobre todo a que ciertas herramientas Lean requieren de ajustes continuos para no generar desperdicios, como los sistemas de tarjetas Kanban (Dickmann, 2007). Se empieza a desprender que pese a que Lean Manufacturing es claramente una herramienta que aporta valor a las empresas, en los últimos tiempos se requiere de una actualización de la misma, para adaptarse a los entornos de fabricaciones customizadas y digitales.

2.2 BARRERAS LEAN

Nadie pone en duda la capacidad de las herramientas de Lean Manufacturing para la obtención de excelentes resultados en el rendimiento de las empresas mediante la eliminación progresiva de las fuentes de desperdicio, si bien es cierto que en incontables ocasiones se observan proyectos de implantación que acaban fracasando (Lodgaard et al, 2016).

Estos fracasos se deben a multitud de factores de diversa índole, y están englobados dentro de lo que se conoce como barreras Lean. Dichas barreras se pueden atribuir a factores internos y externos, entendiendo como internos a todos aquellos en los cuales la empresa puede controlar de forma directa con sus propios recursos, y los externos como aquellos que no dependen de forma directa de la gestión de sus recursos (Lodgaard et al, 2016)

De todas las barreras Lean analizadas, vamos a señalar las principales y con mayor impacto en el desarrollo de los programas de mejora continua, acorde a los estudios más recientes. Tras una revisión exhaustiva de la bibliografía existente, y basándonos en los artículos de autores como Lodgaard et al. (2016), Alhuraish y Robledo (2017), Antony & Banuelas Coronado (2002), Brun (2011) o Naslund (2008), hemos resumido las barreras principales en la implantación Lean Manufacturing en las diez siguientes:

1. Falta de compromiso de la dirección.
2. Falta de involucración y formación de los trabajadores.

3. Ausencia de proveedores implicados en la mejora continua.
4. Falta de rendimiento operacional (OEE).
5. Ausencia de un sistema de control de inventarios.
6. Elevada tasa de rechazos productivos.
7. Elevados tiempos de entrega (lead time).
8. Falta de información y estructura de datos.
9. Elevados tiempos de ajuste.
10. Ausencia de expertos internos (facilitador Lean)

Vamos a analizar en profundidad cada una de las barreras comentadas con anterioridad, ya que será fundamental en la presente tesis su relación con las herramientas digitales englobadas con la industria 4.0.

1. Falta de compromiso de la dirección.

Tal vez sea la pieza angular que establece el devenir de cualquier proyecto que se inicia en una empresa. Si no existe la implicación y participación de la dirección de la empresa, toda iniciativa estará abocada al fracaso (Upadhye, Deshmukh y Garg, 2016). Hay que tener en cuenta que la gestión de los recursos viene dada por sus decisiones, y en base a esto se establecerá la secuencia de inversiones, planes de formación, seguimiento, análisis y publicidad de los resultados, resultando con carácter general pieza clave para poner garantizar la continuidad del proyecto. Dicho esto, no sólo basta con el compromiso de la dirección, ya que son incontables las ocasiones en las que una dirección comprometida se ha mostrado incapaz de desarrollar un proyecto Lean por otros motivos, los cuales comentaremos a continuación.

2. Falta de involucración y formación de los trabajadores.

Para la implantación de un sistema Lean hace falta generar una cultura de mejora continua que se extienda por toda la organización y que garantice la sostenibilidad del sistema, para ello es necesario que todos los miembros del equipo estén formados en las herramientas Lean, y que además se involucren de forma activa en las acciones de mejora emprendidas. En caso contrario, el sistema estará abocado al fracaso (Dhiman y Mohanty, 2010). Es necesario dar a los trabajadores el espacio para que puedan liderar proyectos de

análisis y resolución de problemas, que deriven en la gestión diaria de su trabajo bajo el prisma de la mejora continua.

3. Ausencia de proveedores implicados en la mejora continua.

Lean Manufacturing requiere que los actores de la cadena de suministro tengan objetivos alineados con los de la empresa (Narayanan y Raman, 2004), para lo cual es fundamental que se creen relaciones a largo plazo y establecer con los proveedores objetivos comunes basados en el trabajo diario y el análisis conjunto de incidencias. Es necesario involucrar a los proveedores en la dinámica de mejora continua, de esta manera las empresas sean capaces de reducir su lead time y mejorar su nivel de stocks, consiguiendo tener lo necesario, en el momento adecuado y en la cantidad requerida (Drolet et al, 2008).

4. Falta de rendimiento operacional.

Uno de los indicadores principales de una planta es la eficiencia global de los equipos (Overall Equipment Effectiveness, OEE). En caso de no disponer de un nivel aceptable de OEE será complicado obtener capacidad suficiente para disponer de una predicción de fabricación adecuada, por lo que la variabilidad de los resultados hará difícil gestionar las herramientas de mejora (Díaz y Lozano, 2008). Es cierto que mediante el uso de Lean se consigue una mejora progresiva de este indicador, pero hasta que no se tenga cierto nivel, será complicado crear un entorno de trabajo adecuado para la implantación progresiva de las herramientas de mejora continua.

5. Ausencia de un sistema de control de inventarios.

Sin un sistema de control y gestión de inventarios adecuado será complicado poder establecer objetivos y realizar un seguimiento de los mismos, siendo ésta una de las principales fuentes de desperdicio que se puede tener en la empresa (Hua et al, 2008). El exceso de inventario es sinónimo de capital inmovilizado, obsolescencias, falta de previsión y de trabajo de mejora continua. En una implantación Lean, la ausencia de sistemas de control de inventarios dificultará enormemente la posibilidad de gestionar y optimizar el flujo productivo y equilibrar la demanda.

6. Elevada tasa de rechazos productivos.

En un entorno de fabricación donde la ratio de rechazos sea elevada es muy complicado establecer un sistema Lean, ya que los re-trabajos son constantes y la falta de previsión de calidad del producto afectará finalmente a la relación con los clientes, haciendo muy difícil la supervivencia de la empresa en un entorno competitivo (Diallo et al, 1995). Será lógico entender que una fábrica con este índice fuera de control tendrá un gran obstáculo para poder establecer un orden y seguimiento de las herramientas de mejora continua asociadas al sistema Lean Manufacturing.

7. Elevados tiempos de entrega (lead time).

Entendiendo lead time como el tiempo que transcurre desde que la empresa recibe un pedido hasta que éste está disponible para ser enviado al cliente, parece claro que, si una empresa se mueve en tiempos de entrega elevados, tendrá dificultades para adaptarse a entornos de mercado dinámicos y cambiantes (Cheng y Podolsky, 1993). Empresas con lead times altos a menudo están relacionadas con una mala gestión de operaciones, falta de capacidad de línea y *lay-out* inadecuados, dificultando estos factores enormemente la implantación y consolidación de los sistemas Lean.

8. Falta de información y estructura de datos.

Una parte fundamental de todo sistema de mejora continua radica en la obtención rápida y fiable de datos para poder ser reactivos y emprender acciones correctoras en caso de desviaciones (Tarn et al., 2002). La mayoría de herramientas asociadas a las implantaciones Lean, tales como el mantenimiento productivo total (TPM), los sistemas de cambio rápido (SMED) o las entregas justo a tiempo (JIT), requieren de un volumen de datos suficiente para poder establecer análisis y acciones de mejora; en caso de no tener la estructura de datos adecuada, será muy complicado poder establecer sólidas herramientas para la ejecución del Lean Manufacturing (Martínez y Bedia, 2004).

9. Elevados tiempos de ajuste.

Un sistema de producción basado en máquinas con tiempos de ajuste elevados, dificultará enormemente la posibilidad de tener un flujo continuo y, por tanto, lead time bajos, acompañados de niveles de stocks adecuados (Shingo, 1989). Una empresa capaz de

convertir los tiempos de preparación interna en externos, haciendo que el proceso de producción se vea menos penalizado (Funk, 1995) tendrá mayor capacidad de absorción de herramientas de mejora continua y, por tanto, una mayor probabilidad de éxito en la implantación de un sistema Lean Manufacturing.

10. Ausencia de expertos internos (facilitador Lean).

Todo sistema de implantación Lean requiere de expertos internos en la materia para dar sostenibilidad al sistema y que la implantación no tenga altibajos (Poksinska et al, 2013), sobre todo pasada la fase inicial de puesta en marcha que suele venir acompañada por el trabajo externo de una consultoría. Son muchas las empresas que habiendo implantado satisfactoriamente las herramientas Lean al inicio, transcurridos unos años vuelven al estado inicial, generando al mismo tiempo una visión desmotivadora de los sistemas de mejora continua en los operarios. La figura del experto interno (facilitador Lean) es fundamental para dotar a la empresa de esa continuidad y evitar el fracaso del proyecto en el medio plazo (Alukal, 2006).

2.3. INDUSTRIA 4.0

La industria 4.0 (I-4.0) es considerada como la cuarta revolución industrial, y se basa fundamentalmente en la aplicación de los sistemas ciber-físicos, internet y sistemas inteligentes en los entornos industriales y productivos. Supone un salto cualitativo en la forma de producir, ya que habilita la interconectividad de todos los elementos y unidades integradas en la cadena de valor de la empresa, posibilitando la gestión y recopilación de información de cada unidad productiva (Lasi et al, 2014). El término I-4.0 se acuñó por primera vez en Alemania, concretamente en la feria Hannover de 2011, considerándose a este país pionero en la adaptación e integración de los sistemas digitales en los procesos industriales. De acuerdo con los fabricantes alemanes, la industria 4.0 persigue la optimización de la cadena de suministro mediante la implementación de sistema productivos autónomos y dinámicos (Koberg y Zühlke, 2015).

La I-4.0 posibilita la creación de una red en la que todos los sistemas están interconectados, creando un entorno inteligente y predictivo (Valdez et al, 2015). Este entorno digital permite que las máquinas, los sistemas de almacenamiento y las instalaciones de producción inteligentes desarrollados digitalmente tengan una

integración basada en sistemas de información y comunicación a lo largo de toda la cadena de suministro, desde la logística de entrada hasta la producción, la comercialización, la logística de salida y el servicio, facilitando además una mejor cooperación entre empleados y resto de agentes del negocio (Kagermann et al, 2013).

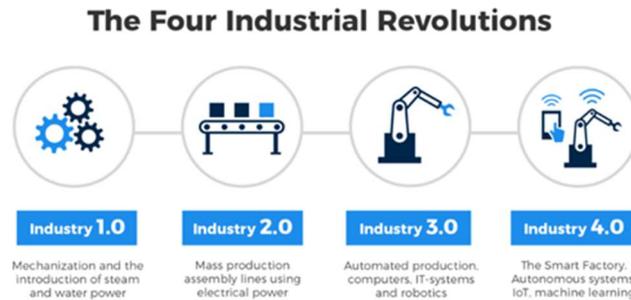


Figura 2.2. Evolución hacia la Industria 4.0. Fuente: Spectral Engines.

La nueva tendencia marcada por la I-4.0 influenciará de forma clara en los ambientes productivos, generando un cambio radical en la forma de ser concebidos (Wan et al, 2015). Por ejemplo, si comparamos los sistemas tradicionales de gestión de aprovisionamiento con los nuevos modelos inteligentes, podremos pasar de una planificación basada en previsiones, y que se fundamentan en históricos, a una planificación en tiempo real que genere planes de producción optimizados y retroalimentados entre sí. En este sentido, la introducción de los sistemas de información y comunicación en los entornos industriales también posibilita un paso más en el nivel de automatización de las plantas, generando más autonomía y posibilidades en los robots y tecnologías automatizadas (Spath et al, 2013). Mediante el equipamiento con microcontroladores, actuadores, sensores e interfaces de comunicación, los sistemas ciberfísicos pueden trabajar de forma autónoma e interactuar con su entorno productivo (Broy, 2010), generando como resultado la llamada fábrica “inteligente”.

El grado de implantación de la I-4.0 a través de la existencia de estrategias de desarrollo concretas está aún a niveles bajos (Weiss et al, 2014). En general, las empresas necesitan explorar las posibilidades y beneficios asociados en la integración de la digitalización en las operaciones de planta, lo cual no sólo concierne a los aspectos técnicos sino también a la forma de gestionar (Sanders y Wulfsberg, 2015).

Bajo nuestro punto de vista, la I-4.0 no se puede implementar de forma integral en todos sus niveles, sino que más bien se ha de hacer por fases. A modo ilustrativo, en la figura 2.3 se muestran las fases que, a nuestro modo de ver, integran la Industria 4.0:

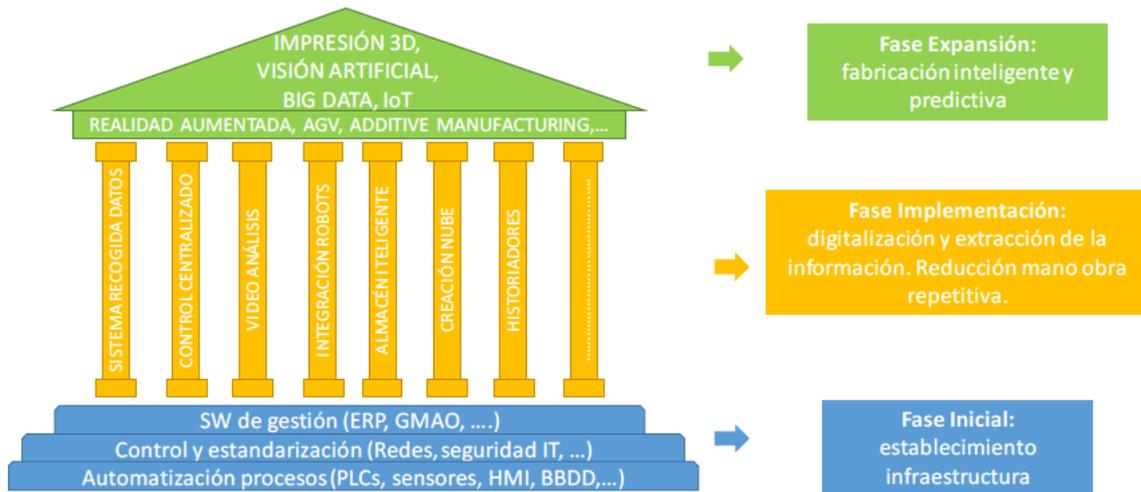


Figura 2.3. El templo de las fases de la I-4.0. Fuente: Elaboración propia

Dichas fases son las siguientes:

- **Fase Inicial:** En primer lugar, las bases del sistema, es decir, su infraestructura, que integra todas las herramientas y equipos de control y automatización de los procesos de negocio.

Es una parte crítica para la futura implementación digital, en la cual se han de instaurar unas bases sólidas y con criterio normalizado de cara a poder sacar rendimiento de las siguientes fases. La fase inicial trata principalmente de hardware y equipos, haciendo especial hincapié en la parte de electrónica industrial y automatización de los procesos a través de la instauración de PLCs (*Programmable Logic Controller*, autómatas programables), programación, pantallas HMI (Interfaz Hombre-Máquina), redes e interconexiones entre equipos, etc, es decir, toda aquella infraestructura física encaminada a la posterior explotación de la información en fases posteriores.

La integración de software básico de gestión, como MRP (Planificación de Requerimientos de Material) o GMAO (Gestión de Mantenimiento Asistido por Ordenador), también se realizaría en esta parte, si bien a nivel de software habrá facetas de los mismos que serán implementadas más adelante, sobre todo en lo

relativo a interconectividad y explotación de información. Esta fase está más relacionada con el cambio en la operativa, pasando de un entorno clásico a un entorno digital.

- **Fase de Implementación:** En esta fase se inicia realmente la I-4.0 y es donde se saca rendimiento a todo lo implementado en la etapa anterior. Es el momento de extraer y explotar la información que nos ofrecen los sistemas de la infraestructura, con el objeto de analizarla y establecer acciones de mejora, y de aumentar el control automático de los procesos para reducir la mano de obra repetitiva y de bajo valor añadido.
- **Fase de Expansión:** La parte final es aquella en la que tienen cabida las herramientas tanto actuales como futuras, y que busca la generación de sistemas autónomos capaces de interactuar con su entorno, predecir funcionamientos y actuar en consecuencia.

2.4 HERRAMIENTAS DIGITALES DE LA INDUSTRIA 4.0

La I-4.0 se puede definir como la confluencia de 3 grandes ejes de digitalización - *Smart operator*, *Smart product* y *Smart machine* (Kolberg y Zühlke, 2015), de manera que podamos clasificar cada una de las herramientas de digitalización dentro cada uno de los ejes comentados. En este apartado veremos una definición de cada eje de digitalización, para dar luego paso a una breve exposición de las herramientas de la Industria 4.0 más comúnmente utilizadas.

1) *Smart Operator* (trabajador conectado).

En las fábricas es fundamental que cuando se produce un error se notifique de forma inmediata, reduciendo de esta forma al máximo el impacto del problema (Longo et al, 2017). En una empresa con I-4.0, los operadores de planta están interconectados en todo momento, mediante aplicaciones móviles o relojes inteligentes, que posibilitan la rápida notificación en caso de error o avería en el proceso.

Los operadores de planta pueden usar herramientas avanzadas de simulación de procesos, como las gafas de realidad aumentada, mediante las cuales serán capaces de conocer en tiempo real el estado del proceso, comparar el rendimiento con el estándar esperado, y en definitiva tener información justo a tiempo de cómo se está ejecutando el proceso. Gracias a estos dispositivos se puede formar y preparar a los empleados desde el punto de vista práctico antes de abordar el trabajo real en planta, obteniendo una gran ventaja por la proximidad al entorno real que luego encontrarán durante jornada de trabajo.

2) *Smart Product* (producto conectado)

En este contexto de conocimiento y aplicación del mismo para la mejora continua, los productos inteligentes son capaces de recolectar información en tiempo real durante y después de ser producidos (Dhungana et al, 2015). Esta información puede ser analizada y utilizada para mejorar los procesos de fabricación y analizar los hábitos de consumo de los clientes, lo cual permitirá un mayor grado de capacidad de reacción de los fabricantes. Imaginamos también productos con sensores RFID capaces de comunicar en todo momento su posición y grado de uso, estableciendo con los usuarios una red de información que mejorará la eficiencia y utilización de dichos productos.

3) *Smart Machine* (máquina conectada)

Dentro de la era de la digitalización, las máquinas pueden ir equipadas con sensores y sistema de comunicación capaces de reportar en tiempo real la información del proceso y además reconfigurarse de forma adaptativa para mejorar su rendimiento (Radziwon et al, 2014).

Las estaciones de trabajo modulares e interconectadas permiten la rápida adaptación ante cambios en las configuraciones de los productos, dotando a las plantas industriales de una mayor flexibilidad y posibilidad de personalización de los productos fabricados problema (Longo et al, 2017). Además, se pueden ejecutar cambios de versión en una menor cantidad de tiempo debido a la simplificación de los procesos y estandarización de los elementos.

Los responsables de gestión tendrán información en tiempo real del estado de la máquina, reduciendo notablemente la inversión de recursos en la recopilación y análisis de los resultados para emprender acciones de mejora (Kolberg y Zühlke, 2015).

A continuación, se plantea un listado de herramientas pertenecientes a la corriente de la Industria 4.0, y con la que se pretende hacer un breve repaso al estado del arte en este campo.



Figura 2.4. Listado de herramientas principales en I-4.0. Fuente: Digital Factories

Sistemas de integración y normalización

Antes de abordar un proceso de automatización es fundamental establecer una pauta clara y bien definida en cuanto a la estandarización de los elementos a ser implementados en las distintas fábricas, ya que de lo contrario luego será casi imposible la integración de dichos sistemas (Lu, 2017). Esto pasa por la compra centralizada y unificada de PLCs, sistemas de control y resto de componentes electrónicos e informáticos (sensores, pantallas HMI, servidores, redes, etc).

En cuanto a la programación interna, la creación de nuevos programas electrónicos que comanden las líneas de fabricación, facilita el poder acometer modificaciones en el futuro (Lu, 2017). Éste es un punto clave en la I-4.0 ya que, si somos capaces de dominar la programación de la maquinaria implementada, será más sencilla la integración de las distintas herramientas que se adquieran en el futuro.

Visión artificial

La visión artificial consiste en un conjunto de herramientas enfocadas en la obtención de imágenes de un proceso para su posterior procesado y análisis automático mediante

computador (Paelke, 2015). Es una herramienta muy potente, ya que permite automatizar la detección y control de calidad de las piezas y la toma de decisiones automáticas por parte de las máquinas mediante la comparación de la imagen tomada con el patrón establecido.

En la actualidad el uso de las herramientas de visión artificial está muy extendido en la industria, siendo complicado imaginar ciertos procesos sin esta tecnología. El impacto en porcentaje de piezas rechazadas, y por tanto en costes de producción ha sido muy elevado, habiéndose extendido su uso en prácticamente todos los sectores industriales.

Simulación - Machine Learning

La técnica de Machine Learning se basa en la reconfiguración automática de los parámetros de una máquina en base a los datos medidos en su entorno (Candanedo et al, 2018). Se encuadra dentro del campo de la inteligencia artificial, siendo el sistema capaz de variar su funcionamiento si observa fallos, o si predice que va a ver uno. En resumidas cuentas, las máquinas “aprenden”, es decir, que son capaces de desarrollar trabajos para los cuales no estaban programadas en un inicio, mediante la aplicación de algoritmos computacionales complejos que dan a la máquina la capacidad de adaptarse a su entorno.

Simulación - Fabricación autónoma

En esta línea de la I-4.0, se persigue la automatización progresiva de las tareas repetitivas y susceptibles de poder realizarse por máquinas (Cortés et al, 2017). Incluiríamos en este apartado el uso de vehículos auto guiados (AGV) para la manipulación y transporte del producto acabado, o la inclusión de robots colaborativos (Cobots) para la realización de tareas en entornos de trabajo compartidos con humanos, sobre todo aquellas tareas de poco valor añadido y que no requieren de aplicación de criterios lógicos.

Dispositivos de realidad aumentada.

La realidad aumentada es una tecnología que básicamente combina el entorno real con un entorno digital, como imágenes, videos y textos, a través del uso de gafas de

realidad aumentada o *Smart glasses* (Masood y Egger, 2019). De esta manera se consigue una superposición de imágenes que simulan entornos digitales de forma precisa, y que permiten aumentar la información que tenemos de un proceso, pudiendo la persona que las utiliza disponer de datos en tiempo real para facilitar su trabajo. Es una práctica cada vez más extendida y que está consiguiendo reducir los tiempos de ejecución, sobre todo en líneas de montaje como las que hay en las industrias de automoción y aeronáutica (Masood y Egger, 2019).

Big Data

La tecnología basada en Big Data se aplica en sistemas que trabajan con un volumen de datos masivo y no estructurados, siendo capaces de explotar la información para obtener conocimientos que ayuden en la toma de decisiones estratégicas (Sahal, Breslin y Ali, 2020). En la Industria 4.0, esta tecnología se aplica principalmente debido al Internet de las cosas, que constituye una red de sensores que recogen información en tiempo real de las diferentes partes de cada proceso. Estos datos son tratados y generan una potente base de información en la que apoyarse para la toma de decisiones. Otro rol fundamental es el poder analizar tendencias de procesos y consumos, de manera que se pueda reorientar la fabricación y la personalización de los productos hacia patrones más alineados con la tendencia actual del mercado, de forma rápida y predictiva.

Automatización Robótica de Procesos (RPA)

Los robots de software son los encargados de asumir tareas repetitivas que siguen un patrón común y que se realizan en un ordenador (Gao et al, 2020). Con estas generalidades, existen una gran cantidad de trabajos administrativos y de reporting que a día de hoy son realizados por personas, y que podrían ser perfectamente sustituidos por robots. Se estima que entre un 40-50% de las tareas administrativas de una empresa son susceptibles de hacerse mediante el uso de esta tecnología (Gao et al, 2020), consiguiendo una mayor eficacia y rapidez, ya que los robots trabajan sin descanso todos los días del año, reduciendo además la tasa de equivocaciones asociada al trabajo con humanos.

Fabricación aditiva (Impresión 3D)

La fabricación aditiva es aquella basada en la fabricación de piezas mediante impresión 3D, superponiendo capas de material de forma sucesiva hasta conferir la forma final de la pieza diseñada por ordenador. Esto permite una gran capacidad de personalización de productos fabricados, así como una reducción considerable de los tiempos de desarrollo necesarios desde la fase de diseño hasta la fase de ejecución final (Fox y Subic, 2019). Aplicando esta tecnología, los fabricantes son capaces de reducir notablemente su stock de producto acabado y ser extremadamente flexibles a la hora de introducir cambios en los productos. Otra de las ventajas es que los entornos productivos pueden reducir el espacio necesario para el desarrollo de sus operaciones.

Es un tipo de fabricación que acaba con el enfoque tradicional de producción en masa y poco flexible, pudiendo fabricarse lotes muy pequeños, incluso unitarios, sin que esto tenga un gran impacto en el coste final de la pieza (Shahrubudin et al, 2019). Además, debido a su proceso de fabricación aditivo, permite la fabricación de piezas complejas en una sola vez, eliminando la necesidad del ensamblado posterior.

Cloud computing y acceso remoto.

Otra de los aspectos fundamentales es la accesibilidad a los distintos elementos de las líneas de producción de forma remota, pudiendo controlar, modificar y restaurar los sistemas que lo requieran sin necesidad del desplazamiento in-situ de los técnicos (O'Donovan et al, 2019). En una industria conectada, éste factor constituye un elemento crítico para la mantenibilidad del sistema.

Internet de las cosas

El internet de las Cosas, o *Internet of Things* (IoT) en inglés, es un concepto referido a miles de millones de objetos conectados digitalmente entre sí, permitiendo la interconectividad y control de los mismos, así como la optimización de su funcionamiento (Gregori et al, 2018). Podríamos concretizarlo como una ilimitada secuencia de objetos permanentemente conectados en un escenario digital, con el objetivo de que todo sea inteligente mediante la gestión de grandes cantidades de información (Trappey et al, 2017).

Sin duda, la conexión hombre-máquina es uno de los campos con más capacidad de desarrollo del IoT, creando ecosistemas interconectados que habiliten de forma más clara y fructífera la inteligencia artificial. Éste sería su fin último, creando equipos capaces de tomar decisiones de forma autónoma en base a los inputs que reciben de su entorno (Colakovic et al, 2018).

El crecimiento de esta tecnología está siendo exponencial, y las previsiones es que en 2020 se superen los 30mil millones de objetos conectados en todo el mundo (Aheleroff et al, 2020).

Ciberseguridad

El concepto de ciberseguridad se fundamenta en la defensa de ordenadores, servidores, teléfonos móviles, redes y otros sistemas que manejan datos, de ataques cuya intención sea la de poner en peligro la vulnerabilidad del sistema, dando lugar a que se vea comprometida la información compartida y almacenada en estos dispositivos electrónicos (Roldán-Molina et al, 2017).

En la actualidad, debido a la masiva cantidad de datos y dispositivos conectados, se hace indispensable disponer de sistemas de defensa que puedan evitar la intrusión de agentes maliciosos en estos dispositivos (Roldán-Molina et al, 2017).

Pese a que hay herramientas dentro de la I-4.0 que claramente aportan mejoras en la forma de gestionar los procesos industriales, se echa en falta un marco de trabajo que integre a todas las herramientas englobadas en esta corriente (Takeda, 2006). Actualmente la mayoría de las empresas trabajan con herramientas de digitalización implementadas de forma aislada, sin una integración común.

El potencial de los sistemas ciber-físicos no está todavía totalmente desarrollado. Las primeras aproximaciones están basadas en arquitecturas orientadas al servicio y son descritas de forma genérica (Hu et al, 2016). En el entorno de la fabricación y producción, hace años que se generaron marcos de trabajos basados en arquitecturas como por ejemplo PROSA (Van Brussel et al, 1998). Cabe destacar también el marco existente en el campo del transporte de materiales (Lewandowski et al, 2013).

Sin embargo, no existe como tal una integración global que dé solución y describa cómo pueden integrarse los sistemas ciber-físicos (Schlick et al, 2014), partiendo de la base de considerar la parte tecnológica, humana y de organización (Deuse et al, 2015).

2.5 INTERACCIÓN LEAN - INDUSTRIA 4.0

Llegados a este punto, hemos podido analizar en profundidad el estado actual de las herramientas Lean, para luego abordar la nueva corriente de digitalización promovida por la I-4.0. Es turno ahora de evaluar la interacción entre ambos mundos.

Antes de avanzar en este bloque, donde se verán ejemplos concretos de herramientas Lean digitalizadas mediante la implementación de la I-4.0, queremos reflexionar acerca de ciertas cuestiones prácticas que se han de tener en cuenta previamente a abordar proyectos de digitalización, ya que es de vital importancia que las TIC estén bien implementadas, porque de lo contrario las ventajas comentadas anteriormente no se obtendrán.

Revisando la literatura previa, se deduce que las empresas que han implementado Lean Manufacturing son más capaces de abordar la digitalización de la Industria 4.0 con mayores garantías de éxito que las que no lo tienen (Ward y Zhou, 2006), debido sobre todo a los hábitos adquiridos en cuanto a estandarización y trabajo en equipo, los cuales actuarán como elementos potenciadores a la hora de abordar proyectos de digitalización. Además, visto desde otro punto de vista, se puede deducir que empresas con Lean pueden obtener beneficios pese a no tener I-4.0, pero en el caso de las empresas 4.0 sin las bases de Lean, sobre todo a nivel de estandarización y metodología, es probable que no obtengan los beneficios esperados (Ward y Zhou, 2006).

La flexibilidad a las modificaciones de los sistemas implementados es también fundamental (Brass et al, 2016). Si cada pequeño cambio requiere de peticiones a personal externo, y el operario no lo puede llevar a cabo, es sin duda una fuente potencial de fracaso. Es por tanto básico que las herramientas I-4.0 puedan ser modificables (interactuables) con los operarios para evitar esto.

La integración entre ambos mundos, Lean e I-4.0 es un importante campo de investigación para ser ampliamente explorado. De hecho, el sistema de producción de

Toyota, TPS, que acuñó la metodología Lean, establece que los dos pilares en los que se fundamenta son: *Just in time* y la automatización (Ohno, 1988). Toyota estableció que la automatización iría encaminada a eliminar la interacción humana durante el proceso productivo de manera que, cuando un error sucede, el sistema se detiene automáticamente. Tan solo cuando se detecta el error, aparece la interacción humana para subsanarlo y ponerle solución. Es por este motivo que creemos que la aplicación de la industria 4.0 a la metodología lean tiene bastante sentido, aunque aún a día de hoy hay bastante gente que ponga en duda la interacción de ambos mundos (Kolberg y Zühlke, 2015).

Este apartado será por tanto el epicentro de la presente tesis, ya que en él buscaremos las interacciones entre ambos mundos y plantearemos cómo la digitalización está transformando las herramientas Lean de mejora continua.

Nuestro objetivo no es el de profundizar en el contenido teórico de cada herramienta, sino más bien mostrar de qué manera la filosofía Lean está evolucionando en las empresas que tienen una fuerte digitalización del proceso productivo.

Tomando como base el trabajo realizado por Sanders et al. (2016), dividiremos los factores en externos, que son aquellos que interrelacionan a la fábrica con su entorno, e internos, que son los que afectan a los procesos productivos internos. En las figuras 2.5 y 2.6 podemos ver un esquema general.

2.5.1 FACTORES EXTERNOS

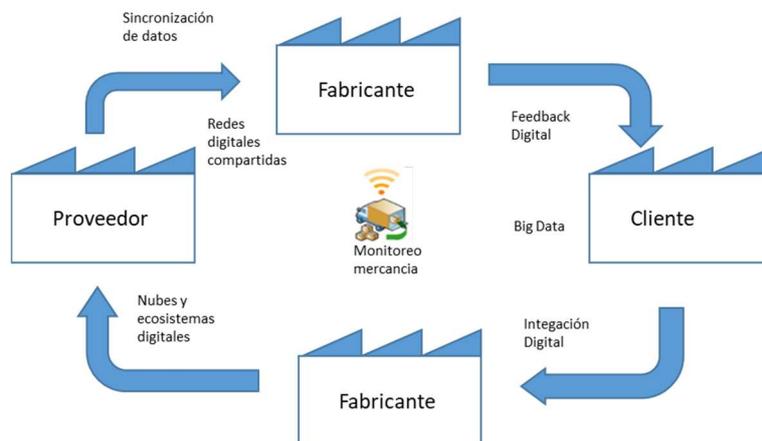


Figura 2.5. Impacto de la Industria 4.0 en los factores externos. Fuente: Elaboración propia.

1. Relaciones con agentes externos.

Una inapropiada transmisión de la información entre el fabricante y el proveedor puede significar una importante generación de desperdicio e ineficiencias. Los proveedores necesitan estar informados de forma regular, veloz y precisa acerca del estado de los productos que suministran, lo cual genera una respuesta inmediata en caso de aparezcan errores o discrepancias con el producto facilitado. El problema radica en la dificultad de interconectar la información de operaciones y mantenimiento entre los fabricantes y los proveedores, ya que no todas las industrias tienen un grado de interconexión que lo permita.

La digitalización genera las herramientas que necesitamos para que ese feedback se produzca de forma automática y en tiempo real. La información de productos y procesos de fabricación puede pasar fácilmente entre los distintos actores de negocio, posibilitando la sincronización entre proveedor y fabricante (Bettel et al, 2014). Los tradicionales mecanismos de comunicación han dado paso a la nube de datos y los servicios de información móviles.

Tan solo con móviles y tablets conectados a internet y con un sistema de nube común, podemos integrar fácilmente a cualquier actor que forme parte del negocio (Schmidt et al, 2015), logrando de esta manera a través de la digitalización un mayor integración y obtención de feedback entre fabricantes y proveedores.

2. Entregas en el momento y cantidad adecuadas.

Esta filosofía promovida por Toyota en su origen persigue tener un nivel de inventario lo más cercano posible a cero. Tan solo la cantidad necesaria de productos llegarán a ser producidos, en el momento adecuado, y usando los recursos adecuados, evitando el desperdicio que supone tener grandes cantidades de dinero inmovilizadas en inventario. En la realidad esto no es siempre posible debido a las ineficiencias del proceso productivo y de aprovisionamiento, tales como errores de planificación y previsión de consumos, fallos en los tiempos de entrega, retrasos en las líneas productivas, etcétera.

Digitalizando de la cadena productiva a través del internet de las cosas las empresas serán capaces de aumentar la integración de los diferentes eslabones de la cadena de suministro (Caballero-Gil et al, 2013), ya que cada ítem se podrá digitalizar y hacer un seguimiento

individualizado de su estatus, posibilitando la reactividad de todos los integrantes de la cadena de suministro que abastecen de producto mediante el etiquetado digital de los mismos.

Se puede saber en tiempo real si surgen retrasos o problemas en las entregas aumentando la velocidad de reacción y pudiendo de esta manera reubicar los recursos y reorientar el proceso productivo (Bose y Pal, 2005).

En conclusión, mediante la asociación de cada ítem al internet de las cosas, con sistemas de monitorización y seguimiento habilitados por la digitalización de la cadena de suministro, las empresas pueden mejorar las entregas justo a tiempo y aumentar su competitividad

3. Desarrollo y crecimiento de empresas colaboradoras.

Uno de los pilares básicos de Lean establece la necesidad de que los proveedores crezcan y evoluciones a la par de la empresa (Ohno, 1996). Esto tiene su lógica ya que, en caso contrario, el avance de una empresa y su mejora en la eficiencia a través de la implantación de herramientas de mejora continua se verá mermada por el rendimiento dispar de sus proveedores, lo cual al final acabará impactando en los resultados. A través de la digitalización que aporta la I-4.0, se pueden generar redes digitales de conocimiento para ser compartidas entre fabricantes y proveedores. Dentro de esa fuente de conocimiento se pueden integrar acciones de formación, información técnica, analizar y solventar problemas mediante grupos de trabajo, en definitiva, se puede aumentar el grado de conocimiento y cooperación entre la empresa y sus proveedores.

En este tipo de ecosistema digital, el objetivo es hacer crecer a los proveedores de manera que mejoren sus procesos para que el crecimiento de la empresa se vea correspondido, generando un ritmo de mejora similar (Tepes et al, 2015).

En este sentido, pueden surgir problemas de incompatibilidades entre sistemas de hardware y software entre proveedores y fabricantes. En los entornos digitales que aporta la I-4.0 se hace necesaria la estandarización y la regulación normativa de los protocolos de comunicación. Por esta razón muchos fabricantes de sistemas de información y comunicación están trabajando en la generación de estándares y protocolos englobados dentro de la corriente industria 4.0 (Weyer et al, 2015).

4. Enfoque al cliente.

En muchas ocasiones el enfoque al cliente se reduce a la simple generación y envío de multitud de productos a los clientes, sin hacerlos partícipes en ninguna de las fases del desarrollo de producto. En el enfoque Lean la parte cliente se cuida con esmero, intentando focalizar el negocio hacia lo que aporta valor desde el punto de vista del mismo. Todo lo demás se considera desperdicio (Womack, 1996).

En la actualidad, incluso cuando el cliente participa activamente en el desarrollo del producto, una vez que éste está fabricado se pierde casi toda posibilidad de modificación o alteración del diseño. La digitalización puede aportar un carácter de personalización de producto mucho mayor, permitiendo la personalización incluso cuando la fase productiva ya haya sido iniciada. Esto puede ser conseguido mediante la implementación de sistemas de gestión de la producción digitalizados (MES), plataformas y aplicaciones orientadas al cliente (B2C), de manera que se provea al cliente de un sistema de comunicación bidireccional en el que las modificaciones y personalizaciones de producto son realizables (Cannata, 2008).

Esto entierra la histórica frase de “vender y olvidar”, tan arraigada en muchos fabricantes todavía hoy día. El nuevo enfoque basado en la personalización permitirá llegar a un mayor número de clientes y aumentar la heterogeneidad de los mismos (Ganiyusufoglu, 2013).

En los últimos años está habiendo grandes cambios en las técnicas de análisis y búsquedas de mercados mediante la aplicación del Big data, que posibilita el procesado masivo de información para detectar nuevas tendencias y necesidades de clientes (Li Tao et al, 2015). Esto permite la integración de los productos vendidos en entornos digitales generando “*Smart products*” los cuales retroalimentan a los fabricantes. Dichos fabricantes recogen y analizan esta información para generar categorías de clientes y detectar las necesidades y comportamientos de los mismos para finalmente poder proveer servicios y soluciones más personalizadas (Shrouf et al, 2014).

2.5.2 FACTORES INTERNOS

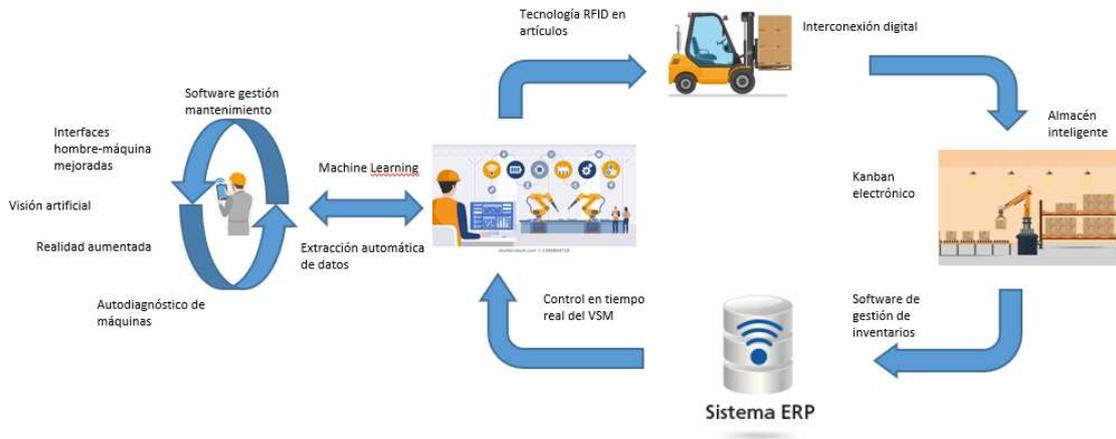


Figura 2.6. Impacto de la Industria 4.0 en los factores Internos. Fuente: Elaboración interna.

1. Hoja de control de producción (HCP).

Con esta herramienta se persigue llevar un control de lo que se produce, relacionándolo con el TAKT time (tiempo entre el inicio de la producción de una unidad y la siguiente), de cara a equilibrar la producción con la demanda y detectar rápidamente desviaciones entre lo fabricado y lo planificado (Mourtzis et al, 2017). A través de la I-4.0, se han introducido sistemas de recogida de datos que han permitido la ejecución de esa HCP de forma automática, haciendo la toma de datos más precisa y fiable, reduciendo el tiempo de reacción y permitiendo la exportación de los datos a otros sistemas para su posterior análisis (Joppen et al, 2019).

2. Poka-Yoke.

Por definición poka-yoke significa técnica a prueba de errores y consiste en establecer un diseño que evite el fallo en un sistema. La I-4.0 está generando herramientas digitales capaces de detectar y corregir errores antes de que se produzcan como, por ejemplo, los sistemas de visión artificial, que permiten analizar productos descartando los no válidos, e incluso prediciendo fallos futuros y cambiando la configuración de la máquina en consecuencia (Pugna et al, 2016).

3. Instrucciones de trabajo, rutinas de trabajo estandarizado y auto-mantenimiento.

Este apartado está enfocado en el desglose de las tareas relacionadas con un puesto de trabajo, destacando los puntos críticos y estableciendo, en algunos casos, el tiempo asociado a cada tarea (Saurin y Ferreira, 2009). A través de la I-4.0 se pueden introducir las rutinas de trabajo digitales, mediante el uso de un software específico, y el seguimiento mediante dispositivos móviles (tablets) en el propio lugar de trabajo. De esta forma las rutinas de trabajo, mantenimiento o trabajo estandarizado, se pueden consultar y supervisar digitalmente. Los cambios en las mismas se actualizan de forma inmediata, permitiendo generar una base de datos común para todas las plantas.

4. Tablones de implementación y seguimiento.

En todo desarrollo Lean hay una parte enfocada a la gestión visual de las herramientas implementadas mediante el uso de tablones en los que se integra toda la documentación generada (Riebezos et al, 2009). Entendemos que es ciertamente útil en tanto en cuanto se genera una zona de interacción entre operarios y gestores para el análisis de problemas y el establecimiento de planes de acción, pero con mucha frecuencia se cae en el abuso de información y número de tablones, generándose finalmente un efecto contrario al que se quiere eliminar, es decir, un desperdicio.

Es habitual que los certificadores Lean fundamenten su nota en base a la lógica observada en estos tablones, además evidentemente del estado visual de las instalaciones, lo cual genera en ocasiones un abuso en cuanto al montante de información impresa.

La I-4.0 y su digitalización, permite reducir el uso indiscriminado de papeles y generar pizarras con indicadores y planes de acción digitales, los cuales permiten además la actualización inmediata y la reducción del tiempo necesario para actualizarlos.

5. Gemba Walk.

Esta terminología se refiere a que para entender los problemas y detectar los desperdicios, hay que estar donde éstos ocurren, es decir, hay que bajar a la línea/almacén/proceso (Gemba en japonés), y ver de primera mano lo que está ocurriendo (Dombrowki y Mielke, 2014).

Con la digitalización promovida dentro de la I-4.0, se potencia el control de indicadores de forma remota, mediante herramientas de gestión y visualización de datos, que permiten focalizar el tiempo y esfuerzo de los responsables del centro, de cara a acudir a las partes de la línea cuando se necesita, donde se necesita y sabiendo lo que se necesita. Se podría considerar como un Gemba Walk 4.0, y lejos de alejar a los responsables de la realidad del proceso productivo, si se enfoca bien, puede contribuir a un aumento de su implicación y motivación, sobre todo porque disponen de información que permite detectar rápidamente situaciones anómalas y actuar en consecuencia.

6. Sistemas Kanban

En la filosofía Lean, se fabrica, se aprovisiona o se expide cualquier bien o servicio siempre que haya detrás una demanda del mismo, y ésta vendrá dada por el mercado (TAKT time). A este modo de gestionar se le conoce como sistemas pull (Womack, 1996), y es una de las bases fundamentales de todo sistema Lean. Los tradicionales sistemas basados en previsiones (sistemas push) acarrear un extra de inventario, tanto de materia prima como de producto acabado, generando un sobrecoste en la cadena de aprovisionamiento y un mayor fondo de maniobra (Monden, 2011). A nivel conceptual el sistema pull establece que sea el mercado el que con su propio consumo “tire” de la fabricación, generando órdenes de pedido en base al consumo real que está habiendo.

Uno de los mejores sistemas para la monitorización y ejecución de acciones de aprovisionamiento basadas en la demanda real es el sistema kanban, que, mediante el uso de tarjetas visuales, permite la gestión de cuando iniciar las operaciones en cada punto de la cadena de valor.

Los sistemas de información permiten aplicar un sistema kanban electrónico, el cual funcionará de un modo idéntico al tradicional, pero con una regulación automática en base a sensores de medición de stock que lanzan automáticamente la orden de aprovisionamiento cuando surge la necesidad real. Una vez digitalizadas las tarjetas kanban, se abre la puerta del control y seguimiento remoto y por ordenador, lo cual habilita el análisis y optimización de todo el sistema de una forma rápida y sencilla (Kolberg y Zühlke, 2015).

Los sistemas actuales integran además control por etiquetas RFID que permiten una monitorización más precisa y uniforme de todos los ítems inventariables. Esto aporta un valor añadido al cliente ya que puede saber en todo momento el estado de su artículo y, una vez en su poder, puede hacer inventarios online sin ningún esfuerzo adicional. En este sentido, cualquier cambio en la programación será rápidamente detectado, posibilitando una respuesta más rápida y eficaz (Kouri et al, 2008).

En resumen, toda la cadena de suministro puede integrarse en un sistema pull digital mediante el uso de herramientas digitales englobadas en la I-4.0.

La introducción de sistemas MRP que permiten la optimización del proceso de planificación, reduciendo el control manual de stocks y permitiendo un mayor grado de eficiencia y de interconexión con proveedores, choca en cierto modo con el uso de tarjetas kanban, y es en ocasiones objeto de controversia y debate entre los facilitadores LEAN y las empresas con MRP implantado, sobre todo porque, según ellos, los sistemas de gestión de stock establecen hipótesis de venta que en ocasiones no se cumplen.

Si se ejecuta bien y se integra en la I-4.0, el sistema MRP puede generar un modelo de gestión pull de alto nivel, sin tanta manualidad y con la posibilidad de la integración de clientes y proveedores en el sistema.

7. Value Stream Mapping (VSM).

En los sistemas Lean se persigue que el flujo desde que se receptiona un pedido hasta que el bien o servicio es expedido al cliente (lead time) sea lo más continuo posible. La herramienta que visualiza desde el principio hasta el final todo el proceso se conoce como VSM (flujo de la cadena de valor) y engloba el tiempo total o lead time. En la teoría Lean, ese flujo continuo se fundamenta en que cada eslabón de la cadena aporta valor al producto y cada proceso es realizado sin que haya esperas entre ellos, defectos o grandes cifras de inventario.

Las herramientas digitales y de seguimiento del proceso, tipo MES (manufacturing execution system), posibilitan una visualización en tiempo real de toda la cadena de suministro, identificando aquellos puntos que rompen el flujo continuo y posibilitando la rápida reacción de los controladores de gestión (Raki, 2014). Con estos sistemas también se verán beneficiados nuestros proveedores, ya que, al ser interconectados con nosotros,

podrán hacer un seguimiento online de nuestros requerimientos inmediatos, pudiendo anticiparse, y ajustar su producción de forma conveniente para evitar retrasos (Wiendahl y Lutz, 2002).

8. Filosofía SMED para reducir los tiempos de ajuste.

Otra de las grandes herramientas de mejora continua, y que posibilitan que el proceso se agilice enormemente para poder acercarnos a las entregas “*just in time*”, es el conocido como el sistema SMED (Single Minute Exchange of Die), que básicamente consiste en el análisis pormenorizado de cada paso dentro de un cambio o ajuste de maquinaria, para poder reducir el tiempo total mediante la eliminación, externalización (máquina en marcha) o reducción de cada una de las tareas asociadas (Womack, 1996). Es una herramienta crucial, ya que posibilita reducir nuestros lotes sin generar excesivas pérdidas, lo cual a su vez da lugar a una reducción de los stocks y un mejor tiempo de respuesta ante cambios en el mercado.

Gracias a la digitalización aportada por la I-4.0, podemos trabajar con máquinas regulables, que posibiliten la programación para flexibilizar los cambios, y además podremos agilizar enormemente los análisis paso a paso del sistema SMED, mediante el uso de programas específicos por computador, permitiendo la reducción de los tiempos de análisis y exportando las rutinas de trabajo estandarizadas de forma automática. En los últimos años estamos viendo la irrupción de los sistemas de “*machine learning*” en los que la propia máquina se auto-regula en función de los inputs que recibe. El resultado es una mayor reducción de los tiempos de cambio y ajuste que contribuyen a un mayor rendimiento de la instalación (Brettel et al, 2014).

9. TPM (total productive maintenance).

Un apartado fundamental que contribuye al correcto funcionamiento de las máquinas es el sistema de gestión de mantenimiento, que puede ser englobado dentro de la filosofía global de gestión de los recursos de mantenimiento dentro del mantenimiento productivo total (TPM). En este sentido, es prioritario para una empresa ser capaz de gestionar sus activos para evitar los paros no programados y favorecer de esta manera a una mayor eficiencia de toda la instalación.

En una fábrica inteligente, digitalizada con herramientas de industria 4.0, todas las máquinas están interconectadas entre sí y también de forma centralizada a una base de datos, que es capaz de monitorizar la actividad de las mismas, incluidos su rendimiento y disponibilidad. En caso de que suceda algo que interrumpa su actividad, el sistema es capaz de detectarlo y saber dónde se ha producido el error. Esta información es básica para establecer acciones de mejora continua que eviten la recurrencia de estos problemas. En paralelo, el sistema de gestión de la producción puede re-planificar los pedidos en base a la detección de dichos paros (Lucke et al, 2008).

En un paso más, los sistemas digitales comprendidos en la I-4.0 podrán analizar los datos obtenidos de las máquinas y poder trabajar el aspecto predictivo de la instalación (Lee et al, 2014). En este sentido la fábrica inteligente se retroalimentará con los datos disponibles del sistema y podrá cambiar los patrones de mantenimiento para anticiparse al error en base a cálculos estadísticos y algoritmos de predicción (Haddara y Elragal, 2015).

Desde el punto de vista Lean, la gestión del mantenimiento pasa por eliminar todas las pérdidas asociadas a los funcionamientos anómalos de los equipos originados por averías, generando un plan de mantenimiento que ataque todos los frentes. Mediante el uso de software de gestión del mantenimiento (GMAO), y la integración de las distintas fábricas en el mismo, pueden planificar las tareas y llevar a cabo un seguimiento de los indicadores fundamentales, tales como MTBF (*mean time between failure*), MTTR (*mean time to repair*), tasa de averías, ...etc. Además, se puede implementar un almacén virtual de repuestos críticos integrado en el software y gestionado con códigos de barras. De esta manera se dispone de un control de stock de repuestos con todas las fábricas interconectadas y además se generan órdenes de pedido automáticas a los proveedores cuando el número de repuestos es menor de un límite determinado (kanban electrónico).

10. Control Seis Sigma

La gestión estadística de los datos del proceso para poder reducir la variabilidad de los resultados es una técnica muy usada en la metodología Lean Six Sigma. Es una forma de combinar analítica avanzada con sistemas de inteligencia de negocio a través de la gestión

de los flujos productivos, dando como resultado un elevado nivel en trazabilidad, visibilidad y control de procesos (Nicoletti, 2013).

Estas técnicas se han visto notablemente mejoradas con la irrupción de la industria 4.0 (Schuh et al, 2015), debido a las mejoras en los interfaces de máquina-operario, la aplicación de la tecnología RFID que permite una configuración automática del proceso en base a la lectura de la etiqueta que lleva el producto, y la aplicación del internet de las cosas que posibilita la integración de los diferentes elementos que componen el proceso mediante la extracción de la información proveniente de las máquinas.

En el entorno productivo actual, con lotes pequeños y gran personalización de los productos servidos, es de vital importancia contar con estas herramientas digitales que permitan la configuración del sistema Seis Sigma de forma rápida y precisa, permitiendo absorber rápidamente los cambios del entorno y estar de nuevo configurado de forma prácticamente instantánea.

11. Participación y crecimiento de los empleados

Otro de los pilares fundamentales en los que descansa la metodología Lean radica en que los trabajadores de la empresa participen activamente en el sostenimiento del sistema (Ohno, 1988) mediante el seguimiento diario de los indicadores, el análisis de problemas y el planteamiento de acciones de mejora. Para conseguir un alto grado de participación, es fundamental crear un entorno de trabajo atractivo para el trabajador, ya que de lo contrario se caerá en una rutina desmotivadora que afectará al rendimiento de la persona, y, por ende, al de todo el sistema de mejora continua (Sanders y Wulfsberg, 2015).

Con la digitalización y las nuevas herramientas que aporta la industria 4.0, se consiguen innumerables ejemplos que potencian la participación y crecimiento de los trabajadores. En un entorno 4.0, el operario es capaz de dar un feedback en tiempo real acerca del estado del proceso, mediante el uso de terminales móviles interconectados entre sí y a las máquinas, de esta manera se consigue una participación activa y una mayor concienciación en la mejora y buen funcionamiento de los procesos (Schuh et al, 2015). En estos terminales sirven también para un rápido seguimiento por parte de los mandos medios, ya que es más fácil evaluar el rendimiento global del proceso y actuar

rápidamente para coordinar el personal en función del estado de la planta (Spath et al, 2013).

Un apartado aparte tiene la formación en esta época digital, ya que se contribuye de forma directa a generar entornos de formación técnica especializada (Brauner y Ziefle, 2015). Gracias a las nuevas plataformas de gemelos virtuales o Digital Twin, los cuales permiten simular con sistemas virtuales que son réplica de los reales, un operador será capaz de practicar y entrenar sus habilidades en un entorno digital, de manera que cuando se enfrente al entorno industrial real haya tenido una formación previa de características muy similares a la realidad.

Con la digitalización a través del e-learning, se abre la puerta a que tanto el mapa de actividades diarias, como la matriz de polivalencias (capacitaciones) y el plan de formación, se generen de forma personalizada para cada integrante del equipo, pudiendo acceder cada uno de ellos libremente a través de la plataforma web. Es una formación a la carta, no planificada y con evaluación del rendimiento. Los contenidos específicos relacionados con Lean cada vez son impartidos en mayor medida mediante el uso de plataformas virtuales o bien videoconferencia, a través de formadores internos y/o externos, aumentando enormemente la flexibilidad y eficacia formativa.

La motivación de los empleados es también una parte importante para garantizar el éxito de los sistemas Lean (Schuh et al, 2015). Todas estas nuevas herramientas digitales al servicio de los empleados crean un entorno de trabajo mucho más dinámico y que garantice la formación de calidad, posibilitando además la rápida reacción y participación del personal en la mejora continua. La aplicación de estas herramientas contribuye activamente a la mejora de la motivación, y, por tanto, del rendimiento de la plantilla.

Como podemos ver, la digitalización de los sistemas Lean contribuye de forma evidente a que las mejoras implementadas se puedan exportar de forma rápida y sencilla, obteniendo un impacto mucho mayor. Además, se reducen notablemente los tiempos de ejecución de la metodología, sobre todo a nivel de análisis y de generación de documentos, los cuales, en la mayoría de casos, acaban por convertirse en un grave

problema a la hora de, ya no de implementar inicialmente, sino de mantener el sistema Lean actualizado.

En la tabla 2.1, se resumen las principales herramientas y/o actividades Lean, y su digitalización a través del uso de la Industria 4.0.

Herramienta Lean	Digitalización con I-4.0	Ventaja Obtenida
Participación empleados	Terminales móviles interconectados a máquinas. Formación elearning. Datos en tiempo real del proceso productivo.	Mayor capacitación para realizar el trabajo y posibilidad de interactuar activamente con el proceso, reduciendo tiempos de respuesta. Aumento motivación por trabaja más valor.
Control estadístico de procesos (seis sigma)	Mejoras de interfaces máquina-operario. Aplicación tecnología RFID. Machine Learning.	Configuración automática del proceso en base a datos en tiempo real.
Total productive Maintenance (TPM)	Monitorización e interconexión del parque de máquinas. Introducción de un GMAO para la gestión del mantenimiento en planta. Machine learning para el autoaprendizaje de máquinas en base a datos.	Control de indicadores en tiempo real, planes de acción preventivos, correctivos y predictivos. Interconexión entre fábricas y proveedores.
SMED	Máquinas regulables y machine learning. Introducción de software específicos para la aplicación del método.	Reducción del tiempo de análisis, exportación de rutinas de trabajo estandarizadas, generación de mejores prácticas para compartir entre fábricas.
Value Stream Mapping (VSM)	Sistemas digitales de gestión y seguimiento, tipo MES.	Visualización en tiempo real de la cadena de suministro. Rapidez de reacción.
Pull system (kanban)	Kanban electrónico. Tecnología RFID en ítems inventariables. Introducción de sistemas ERP	Seguimiento stocks en tiempo real. Optimización del proceso de planificación, reduciendo el control manual de stocks y permitiendo un mayor grado de eficiencia.
Entregas Justo a Tiempo (JIT)	Internet de las cosas. Aumento integración cadena productiva. Digitalización y monitoreo sistema.	Control en tiempo real de toda la cadena de suministro. Reducción de tiempos de reacción y mejora competitividad.
Hoja control producción	Introducción de sistemas de recolección de datos que permitan la ejecución del parte de producción de forma automática.	Toma de datos más precisa y fiable, reduciendo el tiempo de reacción y permitiendo la exportación de los datos a otros sistemas para su análisis
Desarrollo proveedores	Redes digitales compartidas proveedor-fabricante. Creación de ecosistema digital. Feedback digital.	Mejora continua procesos proveedores. Ritmo de crecimiento similar. Mayor integración.
Poka yoke	Con herramientas digitales se están generando sistemas a prueba de errores. Por ejemplo, la visión artificial ayuda a descartar productos anómalos de forma instantánea, evitando que lleguen al cliente final.	Mayores oportunidades a la hora de configurar los sistemas. Mayor adaptabilidad a cambios producto. Más velocidad, sin interrupción de flujo productivo.
Instrucciones de trabajo	Rutinas de trabajo digitales, mediante el uso de software y seguimiento con dispositivos móviles (tablets). Dispositivos de realidad aumentada.	Permite que las rutinas de trabajo, mantenimiento o trabajo estandarizado, se puedan consultar y supervisar digitalmente. Los cambios en las mismas se actualizan de forma inmediata, permitiendo generar una base de datos común para las distintas plantas.
Automantenimiento		
Trabajo Estandarizado		
5s	Creación de plataformas digitales para el lanzamiento de proyectos 5s, su seguimiento y posterior re-aplicación en otras áreas.	Mejores prácticas compartidas en fábricas y posibilidad de seguimiento remoto de proyectos 5S.
Evaluación de riesgos	Análisis de situaciones inseguras vía vídeo, mediante dispositivos móviles y análisis in-situ.	Participación activa del equipo de trabajo, posibilidad de compartir entre centros. Vídeo aporta más información.
Matriz polivalencias	La formación e-learning	Formación a la carta, no planificada y con evaluación del rendimiento.
Tablones de seguimiento	Reducción de la masiva cantidad de información escrita y puesta en pizarras que históricamente genera la metodología LEAN. Las pizarras con KPI's y Planes de Acción digitales permiten la actualización inmediata y la reducción del tiempo necesario para tenerlas al día	Eliminación de uno de los mayores desperdicios de la metodología LEAN: el uso indiscriminado de papeles.

<p>Gemba Walk</p>	<p>Control de KPIs de forma remota, mediante herramientas de gestión, que permiten focalizar el tiempo y esfuerzo de los responsables del centro, de cara a acudir a las partes de la línea cuando se necesita, donde se necesita y sabiendo lo que se necesita. Es un Gemba Walk 4.0.</p>	<p>Aumentar el grado de participación y compromiso de la Dirección, ya que permite el ahorro de tiempo y la detección prematura de problemas</p>
--------------------------	--	--

Tabla 2.1. Principales herramientas y/o actividades LEAN, y su digitalización a través del uso de la Industria 4.0. Fuente: Elaboración Propia.

2.6. ATENUACIÓN DE LAS BARRERAS LEAN A TRAVÉS DE LA I-4.0

En vista a lo comentado anteriormente, parece clara la oportunidad de cambiar el enfoque hacia una visión en el cual las herramientas industriales que generan la I-4.0 no sólo no dificulten, sino que, puedan convertirse en elementos habilitadores en la implementación de la metodología Lean mediante un enfoque inhibitor de las barreras de implantación comentadas anteriormente. En la literatura previa tanto sobre Lean como acerca de la I-4.0, no existen artículos científicos que avalen dicha relación entre ambas, por lo que nos parece de gran interés abordar este tema empezando por el establecimiento a nivel teórico de la relación entre cada barrera para la implantación de Lean y la herramienta digital de la I-4.0 que puede derribarla.

Basándonos en el trabajo realizado por Sanders et al. (2016), un posible esquema de integración Lean/Industria 4.0 sería el mostrado en la Figura 2.7.

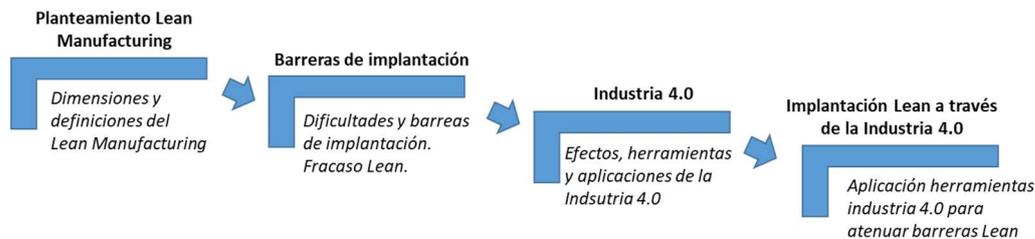


Figura 2.7. Esquema de integración Lean/Industria 4.0 para la atenuación de las barreras de implantación Lean. Fuente: elaboración propia.

A modo de recordatorio, éstas son las principales barreras que hemos descrito anteriormente:

1. Falta de compromiso de la dirección.
2. Falta de involucración y formación de los trabajadores.
3. Ausencia de proveedores implicados en la mejora continua.
4. Falta de rendimiento operacional (OEE).
5. Ausencia de un sistema de control de inventarios.

6. Elevada tasa de rechazos productivos.
7. Elevados tiempos de entrega (lead time).
8. Falta de información y estructura de datos.
9. Elevados tiempos de ajuste.
10. Ausencia de expertos internos (facilitador Lean)

Una de las principales barreras introducidas fue la ***falta de compromiso de la dirección*** (Upadhye, Deshmukh y Garg, 2016) que es considerada tal vez como la más importante de todas. Se puede considerar que con la digitalización de las herramientas Lean se conseguirá un mayor compromiso de la dirección porque verá de forma más rápida las ventajas del sistema. Para empezar, los directivos dispondrán de información en tiempo real gracias a las herramientas digitales, lo cual acelerará la toma de decisiones (Houy, 2005), reduciendo de esta manera el tiempo necesario para aplicar acciones. Por otro lado, gracias a los sistemas de Business Intelligence, podrán disponer de todos los indicadores fundamentales de negocio de forma precisa y actualizada, de manera que podrán establecer las estrategias de acción y seguimiento de forma mucho más dinámica. Por último, los directivos dispondrán de una mayor capacidad de monitorización del proceso productivo, ya que será mucho más fácil contar con información actualizada del mismo, lo que acabará generando una mayor interacción de éstos con su entorno de producción (Houy, 2005).

Otra de las grandes barreras en la implantación Lean, y que suele estar detrás de la mayoría de fracasos, es la ***implicación y capacitación de los trabajadores*** (Dhiman y Mohanty, 2010), ya que constituyen la piedra angular de todo el sistema y son los responsables de su mantenimiento activo y lógico. En caso de no adquirir un alto grado de motivación y formación de los empleados, será imposible materializar y garantizar la continuidad de los sistemas de mejora continua (Adler, 1993; Wickens 1987; Parker 2003; Shadur et al. 1995; Vidal 2007).

La I-4.0 nos ofrece innumerables herramientas que, bien enfocadas, nos ayudarán a paliar en gran medida este problema. Los dispositivos inteligentes permitirán dar un feedback en tiempo real de lo que sucede en el proceso, consiguiendo una mayor motivación de los

empleados debido al mayor grado de interacción con el sistema (Ward y Zhou, 2006). El valor añadido de los empleados también mejorará con la automatización de tareas rutinarias mediante la inclusión de robots colaborativos (cobots), los cuales darán más tiempo a los trabajadores a aportar sus conocimientos en tareas de mayor valor añadido. Gracias a esto y a las mejores interfaces de comunicación hombre/máquina, daremos un salto cualitativo en la forma de trabajar, pasando de operarios ejecutores a operarios controladores, siendo capaces de interactuar con el sistema y aportar sus conocimientos en pro de la mejora continua.

Las empresas Lean son reconocidas por sacar más rendimiento que otras en la gestión del conocimiento de sus empleados (Sharma y Pankaj, 2016). Gracias a las nuevas técnicas digitales de formación y los dispositivos de realidad aumentada, las empresas serán capaces de dar una formación y cualificación a los empleados de mayor nivel, eficacia y contenido, permitiendo de esta manera un mayor aprovechamiento de las horas invertidas en formación. Las plataformas virtuales permitirán la formación en cualquier momento y lugar, y los dispositivos de realidad aumentada permitirán reducir los tiempos de cualificación y actuación, ya que permiten simular el entorno de trabajo y dinamizar mucho el aprendizaje y ejecución de tareas a pie de máquina.

Uno de los factores externos que puede penalizar la implantación Lean es la ***ausencia de proveedores implicados en la mejora continua***. La I-4.0 aporta herramientas enfocadas a paliar la falta de experiencia y recursos de algunos proveedores, como la estandarización de interfaces. Además, mediante las plataformas compartidas con información en tiempo real, una empresa puede conseguir que sus proveedores se anticipen a las necesidades de la empresa ya que están interconectados en todo momento. De esta manera los objetivos de los proveedores pueden estar alineados con los de la empresa lo cual es un requerimiento en la implantación Lean (Narayanan y Raman, 2004).

Se ha comprobado en estudios previos que la ***falta de rendimiento operacional (OEE)*** tiene una relación directa con el fracaso de los sistemas Lean (Díaz y Lozano, 2008). Esto parece evidente, ya que costará más trabajo poder implementar herramientas y forma de trabajo novedosas en aquellas plantas productivas con bajos rendimientos y, por ende, con problemas de capacidad productiva, paros no programados y demás contratiempos.

La I-4.0 pone al servicio de las empresas muy buenas herramientas para mejorar su eficiencia. Por ejemplo, mediante la comunicación avanzada hombre-máquina se mejora la calidad y cantidad de información disponible para el operario facilitando que éste pueda ser más reactivo a la hora de actuar ante cualquier problema. Los nuevos paradigmas de fabricación basados en el machine learning permitirán a las máquinas funcionar con sistemas de inteligencia artificial que redunden en el aprendizaje y mejora autónomos en base a los inputs que obtienen del sistema. Esto va ligado a la posibilidad de que las máquinas se autorregulen consiguiendo una gran reactividad de las mismas y optimizando los procesos autónomamente. Por último, los sistemas de mantenimiento preventivo y predictivo permitirán la gestión integral de los equipos obteniendo una mejora en la disponibilidad.

Otra de las barreras expuestas fue la *ausencia de un sistema de control de inventarios*, ya que un inventario descontrolado genera grandes cantidades de ineficiencias que dificultarán la aplicación de herramientas de mejora continua (Hua et al, 2008). Mediante la aplicación de herramientas digitales, como por ejemplo los sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP), se consigue la gestión informatizada de toda la cadena de suministro, generando una especie de sistema pull electrónico (kanban electrónico) que mejorará notablemente la capacidad de gestión en este apartado. Otra herramienta de gran utilidad son los almacenes automatizados e inteligentes, los cuales permitirán reducir los tiempos de búsqueda y puesta en servicio de los bienes disponibles. Por último, y relacionado con las herramientas comentadas anteriormente, se puede disponer de un control de stocks en tiempo real, lo cual mejorará notablemente la anticipación y reducción del lead time.

Avanzando en el resto de barreras, vimos que una *elevada tasa de rechazos productivos* genera entornos de fabricación poco propicios para implementar herramientas nuevas (Diallo et al, 1995). Es evidente que un proceso que albergue continuos fallos y reprocesados dificultará la absorción e implantación de algo nuevo. Sin embargo, mediante las herramientas digitales contenidas dentro de la corriente 4.0 podremos solucionar en parte este problema.

Los sistemas de control y monitorización del proceso permitirán la detección prematura de fallos, reduciendo drásticamente el tiempo entre que se produce un error y éste es detectado. Esto último tiene un impacto importante en la cantidad de material no válido generado. La autorregulación de las máquinas permitirá la corrección de su parametría cuando se detecten fallos de proceso, permitiendo al igual que antes reducir los tiempos de detección y puesta en marcha de medidas correctoras. Además, siendo las máquinas las que se autorregulan, no se depende de la interacción humana para la puesta en práctica de dichas medidas.

Abordamos ahora la séptima barrera que expusimos en los bloques anteriores, la de *elevados tiempos de entrega (lead time)*, y en la que dejamos patente que una empresa con elevados tiempos de entrega será sinónimo de gran cantidad de pérdidas e ineficiencias durante toda la cadena de suministro, dificultando la implantación Lean por lo que la empresa tendrá difícil competir en entornos dinámicos y cambiantes (Cheng y Podolsky, 1993).

En este punto encontramos numerosas herramientas digitales que pueden ayudar a optimizar los tiempos de entrega. Por ejemplo, los sistemas Wireless de monitorización permitirán hacer una mejor gestión de cargas y descargas debido a la digitalización de los mismos. Podremos reducir gran parte de los trabajos burocráticos y repetitivos, siempre que éstos se rijan por una norma procedimentada, mediante la automatización robótica de proceso (RPA) con los llamados robots digitales que permitirán reducir los tiempos ejecutando de forma automática las tareas comentadas anteriormente. La aplicación de sistemas RFID en los ítems que componen la cadena de suministro, sobre todo los de producto acabado, permitirá controlar en tiempo real los bienes inventariables, tanto cuando éstos estén en el fabricante como cuando hayan salido hacia los clientes. Finalmente, gracias a los sistemas de reubicación de lotes inteligentes, se puede hacer una rápida adaptación de los procesos de aprovisionamiento en función de las necesidades que se detecten en tiempo real.

La *falta de información y estructura de datos* constituye el talón de Aquiles de muchas empresas a la hora de abordar una implantación Lean, ya que su ausencia impide la capacidad de reacción y el análisis para poder emprender acciones de mejora (Tarn et al,

2002). Muchas de las herramientas de mejora continua se nutren de datos para poder abordar la fase inicial de análisis y planteamiento del problema, así como para constatar que las acciones tomadas han tenido el impacto esperado.

Gracias a las herramientas de la I-4.0 podremos tener un control en tiempo real de todo el sistema, permitiendo de esta manera digitalizar y parametrizar los distintos puntos clave y, por ende, disponer de la información necesaria para analizar y ejecutar acciones correctoras. En los últimos años ha aparecido la figura del gemelo virtual, mediante la cual podemos disponer de una virtualización digital de un proceso y experimentar con ella sin poner el riesgo el normal desarrollo del negocio, consiguiendo de esta manera poder anticiparnos a posibles problemas y plantear y probar mejoras sin riesgo. En esta corriente de los últimos años, la presencia de las técnicas de Big data van copando el interés de las empresas por analizar cantidades masivas de datos en pro de tener un análisis predictivo de las tendencias de los mercados y/o procesos, habiéndose convertido en una herramienta vital para anticiparse a los competidores e ir un paso por delante con respecto al resto. Toda esta digitalización y uso de información hace necesario disponer de un protocolo de comunicación, de manera que podamos interconexionar los distintos ítems que componen la empresa.

Hemos visto como las empresas con *elevados tiempos de ajuste* serán menos propicias que otras a la hora de implementar Lean manufacturing, ya que normalmente esto tendrá una relación directa con un proceso de producción ineficiente (Funk, 1995). En el campo de la digitalización, encontramos posibilidades para reducir los tiempos de ajuste como, por ejemplo, programas específicos para la aplicación informatizada de la metodología SMED, que dotarán al grupo de análisis una mayor potencia, velocidad y, por tanto, un menor tiempo de ejecución para la puesta en marcha de las acciones de mejora. Volviendo al campo del *machine learning*, se abrirá la posibilidad de que las máquinas se autorregulen en función del aprendizaje que vayan adquiriendo, permitiendo que los ajustes de máquina se adapten rápidamente cuando se cambien los lotes de producto. A esto habría que añadir el control de procesos en tiempo real, el cual conferirá una mayor reactividad y puesta en marcha de las acciones a llevar a cabo, reduciendo la velocidad de implantación de cambios del tiempo de ajuste.

Finalmente, hemos querido añadir una barrera más, la cual no suele estar documentada en ningún artículo científico de esta índole, que es la *ausencia de expertos internos (facilitador Lean)* en los proyectos de mejora. Este factor es a menudo descuidado por las empresas que acaban por poner a cargo del proyecto a gente con un background inadecuado, abocando al fracaso al proyecto una vez el consultor externo haya terminado su trabajo. En el entorno digital, se abren puertas para generar una corriente de conocimiento y formación digital que permita que los recursos internos se formen y se conviertan en expertos, usando plataformas elearning de formación. Las plataformas digitales de gestión de proyectos permitirán a los consultores externos hacer un seguimiento de los avances del proyecto una vez su aportación presencial haya terminado.

A modo de resumen, en la siguiente tabla podremos ver una relación entre cada barrera Lean detectada y soluciones aporta la I-4.0, así como la ventaja que se puede obtener con la implantación de dichas soluciones.

Barrera de implantación LEAN	Soluciones aportadas por I-4.0	Ventaja obtenida
Falta de compromiso de la dirección.	Información en tiempo real	Acelera toma decisiones
	Aplicaciones de Business Intelligence	KPIs de seguimiento de negocio
	Monitorización proceso	Facilidad para seguir proceso productivo
Falta de involucración y formación de los trabajadores.	Dispositivos inteligentes	Dar feedback en tiempo real de lo que sucede en el proceso
	Cobots en tareas rutinarias	Reducción de tareas sin valor añadido
	Plataformas virtuales de formación e-learning	Facilidad de aprendizaje
	Dispositivos de realidad aumentada	Reducir tiempos cualificación
	Interfaz de comunicación hombre/máquina	Dinamiza el trabajo del operario, evitando caer en la monotonía
Ausencia de proveedores implicados en la mejora continua.	Estandarización de interfaces	Paliar la falta de experiencia y recursos de algunos proveedores
	Información en tiempo real	Permite a proveedores anticiparse a nuestras necesidades
Falta de rendimiento operacional (OEE).	Comunicación hombre-máquina	Aumenta el conocimiento de los trabajadores

	Machine learning	Las máquinas son capaces de aprender y mejorar autónomamente
	Auto regulación de las máquinas	Los settings de máquina se autoregulan, reduciendo el tiempo de reacción
	Sistemas de mantenimiento preventivo y predictivo	Permiten la gestión integral de los equipos en pos de mejorar la disponibilidad
Ausencia de un sistema de control de inventarios.	Sistemas ERP	Permiten la gestión informatizada de toda la cadena de suministro. Kanban electrónico.
	Almacenes automatizado e inteligentes	Reducen los tiempos de búsqueda y puesta en servicio.
	Control de stocks en tiempo real	Anticipación y reducción lead time
Elevada tasa de rechazos productivos.	Sistema de control y monitorización del proceso	Detección prematura de defectos
	Auto regulación de las máquinas	Corrección de settings, paliando el impacto y reduciendo pérdidas
Elevados tiempos de entrega (lead time).	Sistemas Wireless de monitorización	Gestión de cargas y descargas digitales
	Automatización robótica de procesos (RPA)	Ejecución automática de tareas que permite reducir tiempos
	Digitalización cadena de suministro. Sistemas RFID.	Control en tiempo real de los bienes, cliente y fabricante.
	Sistema de reubicación de lotes inteligentes	Adaptación automática en base a necesidades
Falta de información y estructura de datos.	Control en tiempo real de todo el sistema	Digitalización y parametrización del sistema
	Gemelo Virtual	Analizar y definir posibles mejoras
	Big Data	Análisis predictivos con volumen masivo de datos
	Protocolos de comunicación	Interconexión e implementación de maquinaria y sistemas
Elevados tiempos de ajuste.	Softwares específicos SMED	Mayor potencia de análisis y menor tiempo de ejecución
	Machine learning	Máquinas autoajustables en función de aprendizaje autónomo
	Control de procesos en tiempo real	Mayor reactividad y puesta en marcha de acciones
Ausencia de expertos internos (facilitador Lean)	Formación virtual y elearning	Plataformas digitales para la formación y desarrollo
	Seguimiento remoto de proyectos	Seguimiento remoto del consultor externo

Tabla 2.2. Ventajas obtenidas por la aplicación de la Industria 4.0 en la atenuación de las barreras Lean. Fuente: Elaboración Propia.

2.7 CONCLUSIONES

Como resumen final tras lo comentado en los bloques anteriores, podemos argumentar que puede existir una correlación positiva entre las herramientas de mejora continua y la digitalización obtenida a través de la I-4.0. Dicha correlación deberá ser contrastada con datos en los capítulos posteriores, lo cual será el epicentro de la tesis doctoral. En este sentido, no hemos encontrado artículos científicos que demuestren de forma empírica esta relación positiva, por lo que entendemos que el interés del artículo es bastante elevado, máxime teniendo en cuenta la gran actualidad de la temática tratada.

Durante el capítulo hemos podido dar un repaso a la filosofía Lean, focalizándonos sobre todo en las barreras que, en la mayoría de casos, son responsables de que muchos proyectos Lean no tengan continuidad y acaben cayendo transcurridos uno o dos años desde su lanzamiento. Creemos por tanto que es de vital importancia entender la idiosincrasia de estas barreras, e intentar paliar sus efectos mediante la digitalización.

Se ha podido constatar de forma teórica que cada una de las barreras Lean tienen su posible contrapunto en herramientas digitales dentro de la corriente de la I-4.0, y que por tanto la aplicación en paralelo de ambas puede resultar beneficiosa. Es por tanto de vital importancia poder comprobar mediante contraste de hipótesis que lo argumentado en este capítulo tiene validez estadística, y se puede convertir en un argumento aplicable de forma general.

Dentro de los aspectos convencionales de Lean Manufacturing, está comúnmente aceptado el hecho de que si una empresa se convierte en Lean, todas las actividades que no aportan valor se verán reducidas. Esta reducción de desperdicios se verá reflejada en una reducción de costes asociados al proceso productivo. Ahora el esfuerzo viene dado a través de la implementación de las herramientas digitales contenidas en la I-4.0. Mediante su implementación, conseguiremos un mayor control del proceso, lo cual repercutirá de forma conjunta en la reducción de costes mediante la identificación de las ineficiencias del proceso. Existe por tanto un objetivo común entre ambas corrientes, Lean e I-4.0, y creemos que no sólo no se molestarán, si no que existirá una sinergia entre ambas que las hará mejores.

En los capítulos siguientes haremos el planteamiento y contraste de las hipótesis, de manera que podremos verificar empíricamente si los argumentos mostrados tienen validez científica.

**CAPÍTULO 3. MARCO CONCEPTUAL:
PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS.**

CAPÍTULO 3. MARCO CONCEPTUAL: PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS.

3.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es el desarrollo de un marco conceptual para nuestro modelo de investigación. Se incluyen tres variables principales, que son la Mejora Continua, la Digitalización y por último los Resultados empresariales.

La elección de estas variables se fundamenta en la influencia que puede tener la digitalización de procesos industriales conseguida a través de la Industria 4.0 en la ya consabida relación positiva entre la mejora continua y los resultados de la empresa.

Analizaremos la relación entre las distintas variables, para finalmente plantear las hipótesis del modelo resultante, el cual será sometido a estudio empírico.

3.2 MARCO CONCEPTUAL

3.2.1 Relación entre mejora continua y resultados empresariales

Los sistemas de producción basados en la mejora continua se fundamentan en la incesante búsqueda de ineficiencias en el proceso productivo (desperdicios) para establecer planes de acción que los eliminen (Hicks, 2007). Esto hace que los sistemas Lean generen una mejoría en los procesos productivos (Naslund, 2008), lo cual acaba aumentando la competitividad de las empresas que optan por la implementación del Lean management dentro de su estrategia competitiva (Damrath, 2012).

Lean también significa marcar objetivos claros a cada departamento y que dichos objetivos estén alineados con la estrategia global de la empresa (Ho, 2010). Esto es conocido como la filosofía Hosin Kanri y establece uno de los pilares fundamentales en la implantación Lean (Handyside, 1997). Gracias a esto, conseguiremos el alineamiento de cada eslabón de la cadena de negocio hacia un objetivo común y, por tanto, aumentaremos la capacidad de la empresa en la consecución de dichos objetivos.

Las empresas Lean tienen una mejor orientación hacia el cliente (Lindfords, 2002), ya que todos sus procesos están alineados estratégicamente hacia un objetivo común (Cortés

et al, 2016). Esto hace que en cada acción que se tome en la empresa el cliente tenga un papel dominante y sea tenido en cuenta a la hora de tomar decisiones. Además, como hemos visto anteriormente, el enfoque Lean establece que la consideración de desperdicio se hace siempre teniendo en cuenta todo aquello por lo que el cliente no pagaría, por lo que su punto de vista es claramente tenido en cuenta a la hora de la detección y eliminación progresiva de las ineficiencias que pueden afectarle de alguna manera.

La relación con los proveedores es otro de los elementos diferenciadores en las empresas Lean (Narayanan and Raman, 2004), ya que se intenta desde el inicio que proveedor y fabricante crezcan de la mano, para evitar desincronizaciones que puedan llevar a fallos en la cadena de suministro. Esto tendrá una influencia positiva en los tiempos de entrega y en la optimización del flujo proveedor-cliente, permitiendo a las empresas un mejor aprovechamiento de sus recursos (Martinez-Jurado et al, 2011).

La empresa Lean tiene como filosofía de trabajo la reducción de los inventarios hasta el valor más cercano posible a cero (Hua et al, 2008), de forma que sólo se aprovisione y se fabrique lo que es necesario acorde con la demanda actual del mercado. De esta manera se evita la gran cantidad de problemas relacionados con los stocks elevados y las sobreproducciones, como la obsolescencia de los componentes y materia prima, los daños de los bienes en el stock, la mayor dificultad para tener controlado el total inventariado, etc. Esto tiene un impacto en el capital inmovilizado de la empresa (Jędrzejczak, 2017), ya que es necesario tener menos cantidad de dinero invertida para hacer funcionar la compañía, y se elimina además gran cantidad de desperdicios asociados a los stocks elevados y, por ende, pérdidas económicas, aumentando la rentabilidad y la capacidad económica de la empresa.

Un efecto claro en las empresas Lean, debido a las herramientas de mejora implantadas, es la constatación gradual de la mejora en las condiciones de trabajo (Dos Santos et al, 2015). Esto es debido a la incesante aplicación de acciones correctoras para la mejora del entorno de trabajo haciendo que la velocidad de avance de las empresas con sistemas de mejora continua implantados sea mayor que el resto (Jimenez et al, 2019). Como consecuencia hay un impacto en los resultados diarios y en la adaptación progresiva de los puestos y condiciones de trabajo hacia la optimización y el desarrollo progresivo de cada área.

Siguiendo un argumento similar al anteriormente expuesto, el aspecto visual de la planta en las empresas Lean es un rasgo diferenciador (Ribeiro et al, 2019). Los proyectos de 5s y mejora de las condiciones de orden y limpieza hacen que estas empresas tengan un nivel visual superior al resto (Veres et al, 2018). Esto tiene consecuencias directas en el desarrollo diario del trabajo (Abreu y Ferreira, 2009), ya que una empresa visualmente Lean, tiene rutas de trabajo definidas, es más fácil detectar cuando algo no va bien, y es más fácil tener una rutina optimizada de trabajo. Debido a lo anterior, el rendimiento de las empresas con plantas visuales y con flujos optimizados crece y el número de ineficiencias asociadas al proceso se ve reducido (Heras et al, 2009).

Otro de los rasgos diferenciadores de las empresas Lean es la mayor formación y capacitación de los empleados (Dhiman y Mohanty, 2010), ya que se apuesta desde el inicio porque los trabajadores asuman un rol activo en la detección y resolución de los problemas del día a día de la planta. Es fundamental para esto establecer rutinas y planes de formación y capacitación de los empleados (Foulloy et al, 2019), de cara a que sean capaces de desarrollar autónomamente los análisis y planteamientos de acciones de mejora. Sin duda esto lleva a que las empresas Lean tengan unos empleados más formados y con mayor conocimiento de sus entornos de trabajo y problemas asociados, así como un mayor rendimiento individual y colectivo.

En los tiempos en los que nos encontramos, en los que la competitividad entre las distintas empresas es cada vez mayor, toman ventaja aquellos que son capaces de adaptarse a las condiciones de los mercados, normalmente cambiantes. Las empresas con sistemas de mejora continua serán capaces de adaptarse mejor, ya que el Lean contribuye a una mayor y más rápida respuesta a los cambios del entorno (Ohno, 1988). Se desprende, por tanto, que la competitividad de las empresas Lean en las condiciones de mercado actuales es mayor que las empresas que no disponen de un sistema de mejora continua implantado (Womack et al, 2007).

En la parte de gestión empresarial, y tal como introducíamos en el inicio de la tesis, Lean manufacturing aporta a las empresas cinco elementos fundamentales para su correcta gestión (Upadhye et al, 2016): liderazgo sólido, cultura basada en el trabajo en equipo, sistemas de comunicación e información, desarrollos de mejoras simultáneos y aplicación concisa y exhaustiva de la mejora continua. Un liderazgo sólido es un elemento clave a

la hora de manejar las vicisitudes del día a día de la empresa, siendo necesaria una gran capacidad de gestión y transmisión de las acciones a los equipos (Mendoza Martínez et al, 2014). Al hilo de lo anterior, el trabajo en equipo es necesario para coger los objetivos marcados por dirección y generar el trabajo diario que haga que éstos se cumplan (Muñoz et al, 2018). Los sistemas de comunicación e información tienen el cometido de poder generar la información en el momento preciso para dar soporte a la toma de decisiones, ya que de lo contrario el tiempo de reacción aumentaría, y la capacidad de análisis disminuiría considerablemente (Moyano-Fuentes et al, 2012). En cuanto a los dos últimos puntos, son el resultado de los anteriores, ya que de ser correctamente aplicados tendremos garantizado en la empresa una corriente incesante de iniciativas de mejora continua que derivará en proyectos de mejora simultáneos, y que habrán de ser desarrollados mediante la correcta implantación de la metodología de mejora continua.

Basados en los argumentos anteriores, proponemos la primera de nuestras hipótesis:

Hipótesis 1. La mejora continua tiene una relación positiva con los resultados de la empresa.

3.2.2 Papel mediador de la digitalización en la relación entre mejora continua y resultados empresariales.

Hasta hace pocos años, la digitalización y las herramientas Lean de mejora continua chocaban, pudiendo llegar incluso a platearse como algo incompatible (Piszczalski, 2000) debido sobre todo a que Lean busca la visualización y la exposición de los problemas y estándares de trabajo (Womack, 2004) mientras que las herramientas digitales tienden por naturaleza a generar flujos de información de uso más autónomo y con una menor interacción en el día a día de la planta (Houy, 2005; Drew, McCallum y Roggenhofer, 2004).

Es cierto también que la digitalización a través de la I-4.0 y la implantación de los sistemas Lean de mejora continua, son grandes consumidores de recursos internos (Moyano Fuentes et al, 2012), por lo que se ha de tener cuidado en la secuencia de implantación de ambos sistemas en el sentido de no generar un volumen de nuevos proyectos imposible de llevar a la práctica y, por tanto, condenar el éxito de las implantaciones.

En un enfoque más actual, y en línea con los trabajos realizados por Kolber y Zühlke (2015) y Brass et al (2016), la relación entre Lean Manufacturing e Industria 4.0 puede tener más ventajas que desventajas, debido sobre todo a que la existencia de una beneficia de algún modo la existencia de la otra, teniendo un efecto dinamizador e integrador.

En línea con las teorías de Ward y Zhou (2006), las empresas que han implantado Lean Manufacturing tienen una mayor predisposición a abordar la digitalización de la Industria 4.0 con mayores garantías de éxito que las que no lo han hecho. Esto se fundamenta principalmente en el hecho de que las empresas Lean son más rápidas en la gestión del cambio lo cual es positivo en entornos digitales que analizan los procesos y mercados y aportan datos que requieren acometer cambios rápidos y reorientaciones para cubrir las necesidades de los clientes. Además, los procesos de digitalización requieren del seguimiento exhaustivo de una metodología y planificación de fases de ejecución con un seguimiento riguroso y que, por tanto, necesitan de gran capacidad de absorción e integración de metodologías nuevas de trabajo. Las empresas maduras en Lean aportan esa capacidad de adaptación al cambio y la forma de trabajar ordenada y secuencial, la cual podría facilitar en gran medida la implementación de herramientas digitales.

En las empresas Lean, la relación con los proveedores es un elemento básico en el desarrollo del negocio, y creemos que en un entorno digital la relación con ellos se podría ver beneficiada, ya que la información de cada proceso productivo puede pasar rápidamente entre los distintos departamentos, posibilitando una sincronización simultánea entre proveedores y productores (Bettel et al, 2014). Además, la capacidad de integración de los mismos gracias a la existencia de los dispositivos móviles permite la interconexión efectiva entre cada uno de ellos (Schmidt et al, 2015). Se pueden generar plataformas digitales compartidas para el intercambio de información, así como para interactuar de forma rápida y sencilla ante cualquier eventualidad no planificada, aumentando el grado de integración entre fabricantes y proveedores. En este ecosistema digital, las empresas Lean pueden hacer crecer a sus proveedores de forma más rápida y dinámica, de manera que se potencien entre ambos y se genere un ritmo de mejora parejo (Tepes et al, 2015).

Otro de los pilares fundamentales del Lean es la filosofía Justo a Tiempo (JIT). Según Caballero-Gil et al (2013), gracias a la digitalización de la cadena productiva se pueden

optimizar los diferentes eslabones de la cadena de suministro, debido sobre todo a que se puede hacer un seguimiento de cada ítem de forma individualizada y mejor el grado de control y la capacidad de reacción, optimizando de esta manera los flujos productivos y de aprovisionamiento. Además, en caso de que surjan imprevistos, se pueden detectar en tiempo real y reubicar los recursos para paliar dichas deficiencias (Bose y Pal, 2005).

La experiencia del cliente, otro de los elementos claves del Lean, también puede mejorar gracias a la digitalización de los procesos productivos (Cannata, 2008), ya ésta permite dotar al cliente de un canal de información bidireccional, permitiendo incluso la personalización de los productos en tiempo real. Gracias a esta digitalización, se puede llegar a un mayor número de clientes y aumentar la diversidad de los mismos (Ganiyusufoglu, 2013). De forma más reciente, la aplicación de herramientas de análisis de datos masivos posibilita la detección prematura de nuevas tendencias (Li Tao et al, 2015), permitiendo la reorientación de las herramientas de mejora continua hacia entornos flexibles de producción enfocados a las necesidades cambiantes de los clientes (Shrouf et al, 2014).

Aparentemente, los sistemas kanban tradicionales pueden resultar contrarios a la digitalización, ya que se basan en la existencia de tarjetas físicas con el objetivo de establecer un control visual del stock y lanzar los puntos de pedido. En este sentido, la controversia es aún mayor cuando se introducen softwares de gestión de inventarios, tipo MRP, ya que funcionan en base a algoritmos de previsión y esto puede ocasionar estrategias dispares a las del sistema pull clásico establecido por las tarjetas kanban.

Como contrapunto, mediante el uso de los sistemas de información, se puede digitalizar la metodología kanban, obteniendo un mejor control y capacidad de análisis de todo el sistema (Kolberg y Zühlke, 2015). En lo que a planificación, seguimiento y programación de la planificación se refiere, los sistemas digitales ofrecen un mayor nivel de profesionalización, además de potenciar ciertos aspectos imposibles de obtener con herramientas manuales, dando como resultado una respuesta más rápida y eficaz (Kouri et al, 2008). Se posibilita además la visualización en tiempo real de toda la cadena de suministro, lo cual genera una mayor capacidad de reacción y una reducción en los tiempos de ejecución por parte de los encargados de gestionar el aprovisionamiento (Raki, 2014). En este sentido, se puede ampliar ese grado de control y capacidad de reacción a

otros actores externos intervinientes en la cadena de aprovisionamiento de la empresa como, por ejemplo, los proveedores de servicios que mediante la interconectividad que aportan los sistemas digitales pueden establecer un control más cercano y aumentar su capacidad de reacción (Wiendahl y Lutz, 2002).

Los nuevos programas de control de procesos pueden permitir un mayor aumento en el rendimiento de la instalación (Brettel et al, 2014). Es por esto que creemos que a través de dichos programas se puede establecer un mayor grado de eficiencia y velocidad de implantación de algunas técnicas de mejora continua, como la filosofía SMED, para la reducción de los tiempos de cambio, o el control estadístico de los procesos, para la rápida detección de anomalías en el proceso productivo. Los sistemas de gestión de la producción podrán readaptar la secuencia productiva en base a las necesidades reales del mercado (Lucke et al, 2008), lo cual llevará al uso de las técnicas Lean para ser rápidos y flexibles en dichos cambios. En consecuencia, las empresas enfocadas a la mejora continua pueden sacar más rendimiento a ciertas herramientas digitales que requieren de una alta flexibilidad en los procesos.

El establecimiento de planes de mantenimiento preventivo y de análisis de averías para generar acciones correctoras es una de las herramientas Lean fundamentales (Womack, 1998). En una fábrica digital, hay un aumento considerable de los datos disponibles, permitiendo anticiparse a los errores en base a los algoritmos de predicción establecidos (Haddara y Elragal, 2015). Esto es de gran utilidad para potenciar los modelos TPM, ya que se puede disponer de una retroalimentación de datos que permitirán, bien enfocados, la mejora continua de los sistemas de gestión del mantenimiento, estableciendo nuevas periodicidades en base a datos en tiempo real, y analizando los patrones de conducta de la maquinaria mediante los algoritmos de análisis de las herramientas digitales. En su conjunto, conseguiremos una optimización de los sistemas de gestión de mantenimiento, estableciendo en cierto modo un modelo que en parte es capaz de auto gestionarse y reorientar su contenido.

La capacidad de disponer de datos en tiempo real se ha visto enormemente mejorada con la integración de la Industria 4.0 en los entornos industriales (Schuh et al, 2015). Esto sin duda es un gran aliciente para las herramientas de mejora continua, ya que permite satisfacer una de los mayores requerimientos de todo sistema Lean: los datos. Gracias a

estas herramientas se puede disponer de infinidad de datos de los procesos productivos y logísticos, permitiendo establecer la base necesaria donde construir los análisis que habrán de llevar al establecimiento de acciones correctoras. Es base a esto se plantea que la digitalización aportará una ventaja añadida para que los análisis de mejora continua sean más rápidos y precisos.

La participación de los empleados es vital para que cualquier proyecto de mejora continua que se ejecute en una empresa lo haga satisfactoriamente (Sanders y Wulfsberg, 2015). Mediante la digitalización se puede conseguir una mayor participación debido a que se ponen herramientas al alcance de las personas para que sus posibilidades de tomar parte en el desarrollo de las actividades sean mayores, pudiendo conseguir un alto grado de participación activa y una mayor involucración en la mejora de todo el proceso. La motivación de los empleados es también una parte importante para garantizar el éxito de los sistemas Lean (Schuh et al, 2015). Todas estas nuevas herramientas digitales al servicio de los empleados permiten la creación de un entorno de trabajo mucho más dinámico y que garantice la formación de calidad, posibilitando además la rápida reacción y participación del personal en la mejora continua. Por tanto, la aplicación de estas herramientas puede contribuir activamente a la mejora de la motivación y, en consecuencia, al rendimiento de la plantilla.

Como expusimos en los capítulos introductorios, a priori consideramos que la digitalización puede suavizar las barreras de implantación Lean y, por tanto, optimizar las garantías para abordar con éxito un proyecto de mejora continua llevando a una mejora de los resultados empresariales.

Una de las principales barreras identificadas fue la falta de compromiso de la dirección (Upadhye, Deshmukh y Garg, 2016) y es considerada tal vez como la más importante de todas. Como ya comentamos, es posible que gracias a la digitalización se consiga una mayor y más efectiva participación de los directivos en los proyectos de mejora continua, ya que les permitirá disponer de gran cantidad de información en tiempo real (Houy, 2005). La virtualización de ciertas herramientas como reuniones de análisis y seguimiento hará posible que los directivos se unan más a dichas reuniones, produciendo un efecto de “*engagement*” en las partes implicadas.

Muchos autores anteriormente han establecido que si no existe un elevado índice de motivación de los trabajadores será muy complicado no sólo implementar un programa de mejora continua, sino también mantenerlo una vez haya finalizado la fase de implantación (Adler, 1993; Wickens 1987; Parker 2003; Shadur et al. 1995; Vidal 2007). Es por esto de vital importancia mantener un alto grado de implicación en los equipos. La digitalización a través de la industria 4.0 puede tener la llave para conseguir dicho objetivo ya que mediante la aplicación de herramientas digitales que permiten la mayor autonomía en interacción de la plantilla con su entorno, conseguiremos un mayor grado de participación y capacitación del personal (Ward y Zhou, 2006). A más participación y capacitación, más motivación, consiguiendo de esta manera atenuar otra de las clásicas barreras de implantación Lean, derivada de la falta de participación e involucración de la plantilla en la mejora continua (Dhiman y Mohanty, 2010).

Además, se puede producir un efecto potenciador en las empresas Lean gracias a la digitalización ya que estas empresas normalmente se caracterizan por sacar un mayor rendimiento que otras en la gestión del conocimiento de sus empleados (Sharma y Pankaj, 2016). Gracias a las herramientas digitales, las empresas pueden ser capaces de formar y capacitar a los trabajadores de una forma más rápida, sencilla, gradual y a la carta, obteniendo un rédito mayor de esta característica que es intrínseca de las empresas con un sistema de mejora continua consolidado.

El alineamiento de objetivos entre los proveedores y la empresa es otro elemento fundamental en el correcto desarrollo de un proyecto Lean de mejora continua (Narayanan y Raman, 2004), y éste se puede ver claramente mejorado gracias a la Industria 4.0 debido a la implementación y puesta en marcha de plataformas virtuales para compartir información entre proveedor-cliente, o la integración de dichos proveedores en los sistemas de gestión informática, de cara a establecer un vínculo digital en el que se sepa en todo momento cuáles son las necesidades e incidencias en tiempo real. Por tanto, la digitalización es un elemento integrador que otorgará una mayor eficiencia a los proveedores y su relación con la empresa.

Una de las lacras a la hora de abordar un proyecto de mejora continua es la aplicación de las herramientas en entornos no optimizados y con bajo rendimiento, ya que se ha demostrado que en este tipo de empresas hay una relación directa entre el fracaso Lean y esa falta de optimización (Díaz y Lozano, 2008). Es curioso, porque precisamente las herramientas de mejora continua ayudan a la mejora del rendimiento, pero a su vez cuanto más bajo sea el punto de partida de la empresa en cuanto a rendimiento, más costará que las partes implicadas puedan absorber los nuevos conocimientos, produciéndose un bucle en el que en ocasiones es muy difícil salir. La digitalización puede ser un elemento de ayuda ya que puede aportar herramientas de captura de datos y detección temprana de errores que harán más fácil actuar y corregir en caso de que aparezca un problema y, por tanto, suavizará la transición de una empresa poco eficiente a una empresa enfocada a la mejora continua.

Un efecto similar al anteriormente comentado se producirá en aquellas empresas con un deficiente sistema de control de inventarios, ya que esto generará ineficiencias que dificultarán enormemente la implantación de los sistemas Lean (Hua et al, 2008). En este sentido, las herramientas digitales también aportarán soluciones a estas deficiencias, sobre todo gracias a la integración de programas tipo ERP que posibiliten en mayor medida el control de los inventarios y, por ende, faciliten el acople en la organización de las nuevas prácticas de trabajo englobadas dentro de los sistemas Lean.

Una empresa con elevados tiempos de entrega (lead time) tendrá también difícil abordar con éxito un proyecto de implantación Lean ya normalmente estará relacionada con la existencia de numerosas pérdidas e ineficiencias durante toda la cadena de suministro. Esto la convertirá en una empresa con dificultades para adaptarse a entornos dinámicos y cambiantes (Cheng y Podolsky, 1993). En este punto, y tal y como vimos en los capítulos anteriores, la corriente de digitalización promovida por la Industria 4.0 puede aportar herramientas enfocadas a optimizar toda la cadena de suministro, generando una empresa capaz de paliar las ineficiencias comentadas anteriormente y allanando el camino a la implantación Lean. Se podrán reducir enormemente los procedimientos de gestión manuales mediante el uso de herramientas digitales (Correa-Espinal et al, 2010) y focalizar a la plantilla a las tareas de mayor valor añadido. Además, tal y como hemos

visto en puntos anteriores, la existencia de softwares específicos de gestión de la cadena de suministro tendrá un impacto positivo en la reducción de los tiempos de entrega (Milne et al, 2015), contribuyendo a su vez a que la empresa sea más propicia a la implantación de las nuevas formas de trabajo contenidas dentro de los proyectos Lean.

La falta de información y estructura de datos es otro elemento que contribuye enormemente a los fracasos de los sistemas Lean de mejora continua (Tarn et al, 2002), ya que su ausencia dificulta en gran medida la reactividad y la posibilidad de análisis, que son ejes fundamentales a la hora de abordar proyectos de mejora continua y resolución de problemas (Meister et al, 2019). Gracias a la incipiente aparición de herramientas digitales contenidas en la Industria 4.0, podremos paliar esta falta de información y estructura de datos, ya que muchas aplicaciones permitirán la extracción directa y en tiempo real de información procedente del sistema, generando una fuente de conocimiento que bien enfocada puede alimentar a los sistemas Lean y paliar la falta de información anteriormente comentada.

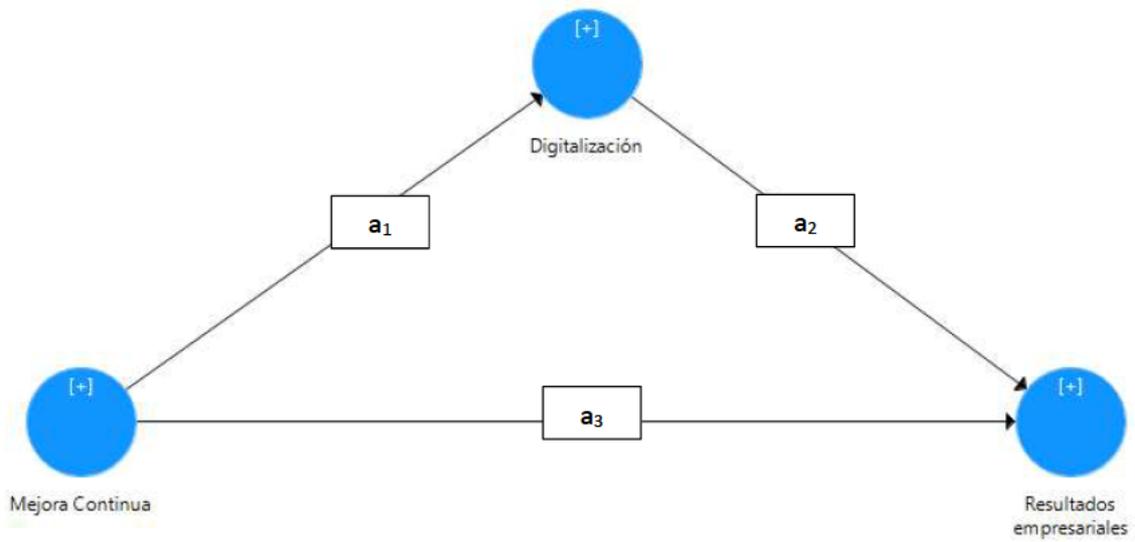
Los elevados tiempos de ajuste y configuración de maquinaria están detrás de muchos fracasos de implantación Lean, ya que tendrán una relación directa con un proceso de fabricación ineficiente (Funk, 1995). Esto tiene relación a lo comentado con anterioridad, ya que pese a que las herramientas Lean están orientadas a la obtención de un mayor rendimiento operacional, en empresas en las que dicho rendimiento sea demasiado bajo, tendremos más posibilidades de fracaso debido a que resultará más complicado poder absorber con garantías las nuevas técnicas de trabajo (Caldera et al, 2019). Es un bucle del que cuesta salir, y que puede verse aliviado en parte gracias a la Industria 4.0. En lo que ajustes se refiere, la digitalización 4.0 aporta herramientas directamente relacionadas con la mejora y la reducción de tiempos (Benesova et al, 2019) como, por ejemplo, las aplicaciones de *machine learning* que hace que las máquinas se autorregulen en base al algoritmo que llevan y la información y conocimientos que vayan adquiriendo. Otras herramientas digitales enfocadas a optimizar rápidamente las máquinas mediante sistemas de control e información en tiempo real también paliarán en parte el problema comentado anteriormente.

En definitiva, gracias a la digitalización las empresas podrán abandonar, o al menos suavizar, la espiral negativa de implementar herramientas Lean en entornos no propicios para ello.

A modo de resumen, hemos planteado que la digitalización aporta ventajas y herramientas que facilitan la integración de datos, seguimiento y análisis en las empresas, y por añadido generará entornos más eficientes, o al menos más propicios para abordar ciertos proyectos. Por tanto, puede considerarse que la digitalización juega un papel fundamental en la relación entre mejora continua y resultados empresariales, de manera que a más digitalización se obtienen mejores resultados. En ese sentido, se plantea la segunda hipótesis de esta investigación:

Hipótesis 2. La digitalización de la I-4.0 media la relación entre la mejora continua y los resultados de la empresa.

La relación entre las distintas hipótesis planteadas puede verse en el modelo de la figura 3.1.



$$H1 = a_3$$

$$H2 = a_1 * a_2$$

Figura 3.1. Modelo teórico planteado.

CAPÍTULO 4. DISEÑO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO 4. DISEÑO Y METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

4.1 TOMA DE DATOS

Con el objetivo de verificar las hipótesis planteadas en el anterior capítulo, esta tesis se ha fundamentado en la recogida de datos a través de la multinacional Francesa Saint-Gobain Weber (<https://www.saint-gobain.com/en/weber>). Saint-Gobain está considerado como uno de los 100 grupos industriales mayores a nivel mundial y está presente en 68 países de los 5 continentes, empleando a más de 170.000 personas. El sello de identidad de Saint-Gobain es el hábitat sostenible, mediante el diseño, fabricación y distribución de materiales que posibilitan la creación de los espacios que nos rodean. Podemos encontrar productos de la marca Saint-Gobain en nuestra vida cotidiana: edificios, transportes, aplicaciones industriales e infraestructuras principalmente; estando concebidos para la construcción sostenible, el aumento de la eficiencia de las edificaciones y combatir el cambio climático. La facturación de Saint-Gobain en 2019 ascendió a 42.600 Millones €, con un EBITDA de 4.870 Millones €, y un beneficio operativo de 3.390 Millones de €, lo cual representa un crecimiento del 5,7% con respecto al año anterior.

Uno de los pilares básicos de la empresa es su enfoque hacia la mejora continua, habiendo seguido rigurosamente la implantación de la filosofía Lean desde hace más de una década. Esto ha contribuido que los indicadores de eficiencia e innovación se sitúen en las cotas más elevadas, siendo considerada la empresa como unas de las 50 empresas de Europa con mayor ratio de innovación. Existe un programa de mejora continua llamado *World Class Manufacturing* (WCM), en el cual se implementan herramientas con el asesoramiento de consultores externos y la ejecución en cada fábrica de un experto Lean que pilota el proyecto. Las bases que fundamentan la mejora continua son las 5S, los análisis para la resolución de problemas y el establecimiento de indicadores alineados con la estrategia en cada departamento; a partir de ahí se llevan a cabo proyectos de mejora focalizada de distintos niveles. En primer lugar, existen los proyectos *Yellow Belt*, con un impacto medio en la organización y un mes de plazo para su ejecución. A continuación, pasamos al nivel *Green Belt*, que son proyectos de mayor calado, y cuya ejecución se realiza durante 6 meses. Finalmente existen los proyectos *Black Belt*, de gran impacto y

2 años de ejecución. Debido a la extensión de estos últimos, la práctica habitual es dividir los hitos en 3 proyectos *Green Belt*, que en su conjunto tienen un impacto en cuenta de resultados similar al *Black Belt*.

En los últimos años se ha apostado claramente por la digitalización en la empresa, convirtiéndose en caldo de cultivo para proyectos de Industria 4.0 enfocados en la optimización y en la generación de entornos virtuales en los que integrar al ingente número de fábricas distribuidas por el mundo. Se han generado una plataforma de incubación de proyectos 4.0 que testea las diferentes herramientas antes de expandirlas al resto del grupo. Son ejemplos de esta incubadora la fabricación aditiva 3D, la aplicación del Big Data para el análisis de procesos, o la inclusión de la realidad aumentada para el manejo de máquinas en remoto. Creemos por tanto que Saint-Gobain se ajusta perfectamente al ámbito de este estudio, ya por un lado es una empresa madura en Lean y que está potenciando enormemente la digitalización a través de la Industria 4.0, y por otro lado la gran cantidad de fábricas distribuidas a nivel mundial genera una plataforma de estudio muy atractiva para nosotros.

Para la elaboración del cuestionario, se decidió en primera instancia contactar con un panel de expertos perteneciente al equipo de dirección. La idea era contrastar inicialmente que la información que contenía la encuesta tenía coherencia bajo el prisma de la dirección de la empresa. Además, de esta manera conseguiríamos un mayor grado de implicación de los mismos en el estudio y, por ende, una mayor distribución y participación del resto de empleados.

La información fue recogida durante los meses de julio y agosto de 2018, mediante el envío de un cuestionario. Se eligió el formato electrónico (cuestionario digital) para el envío de dicho cuestionario, dando también la opción de imprimirlo y recogerlo en papel. Finalmente se obtuvieron un 80% de respuestas vía *google forms* (<https://www.google.com/intl/es/forms/about/>) y el resto en papel. El detalle de la muestra se describe de la siguiente manera: el 40% de los encuestados ocupaban puestos de dirección, el 33% eran mandos medios, y el resto eran responsables de equipos. En el momento en el que se hizo la encuesta, más del 40% de los participantes tenían una experiencia acumulada en Saint-Gobain superior a 15 años; además, el 60% se situaban en la franja de edad entre 36 y 50 años. Todos los participantes tenían gente a su cargo.

La muestra se obtuvo de un total de 200 fábricas del Grupo distribuidas a nivel mundial, todas ellas con programas Lean implementados, aunque en diferente grado, obteniendo respuesta de 93 de ellas, lo cual significa una ratio de respuesta del 46,5%, con un factor de error del 7,45% para $p=q=50\%$ y un nivel de fiabilidad del 95,5%. Teniendo en cuenta que la encuesta involucraba a integrantes senior de la alta dirección, el grado de respuesta obtenido es bastante superior que el habitual del 15 al 25% sugerido por Menon (1996).

4.2 MEDIDAS

Las medidas que han sido utilizadas en esta tesis se fundamentan en una profunda revisión de la bibliografía existente, estando avaladas por estudios científicos previos que iremos viendo a continuación. Las entrevistas que se fueron realizando a directivos y responsables de Saint-Gobain Weber nos han proporcionado una fuente de conocimiento en las medidas de mejora continua, digitalización y resultados empresariales. Algunos de los ítems fueron modificados, y se hizo un test previo de la encuesta antes de lanzarla a la población elegida. Todos los ítems se pueden ver en el anexo. Se utilizó para la encuesta una escala tipo Likert (1="totalmente en desacuerdo", 7="totalmente de acuerdo"). Los constructos del cuestionario se establecieron de la siguiente manera:

- Las medidas que establecen la mejora continua están basadas en los estudios previos de Sha y Ward (2007), Talavera (2004) y Gómez-Bernabeu y Palací (2003). La versión final de la escala de medida consiste en 8 ítems, los cuales están referidos a medir el grado de implantación de la mejora continua en una organización.

Mejora Continua	
CI1	Están claramente involucrados en la mejora continua dentro de la compañía.
CI2	Tienen como objetivo importante el desarrollo de un sistema de gestión de mejora continua
CI3	Los empleados se forman multidisciplinariamente
CI4	A menudo estamos en estrecho contacto con nuestro cliente, tratando de medir sus necesidades y su nivel de satisfacción
CI5	Las decisiones que se toman se basan en datos
CI6	Los datos e indicadores del rendimiento de las operaciones se integran en la elaboración de estrategias de mejora continua
CI7	Analiza continuamente el trabajo para encontrar mejores formas de hacer las cosas
CI8	Las reuniones de seguimiento se realizan regularmente

Tabla 4.1. Listado de ítems de la variable Mejora Continua.

- La medida de digitalización está basada en los estudios previos de Bowersox et al (2005), Salo (2006) y Bharadwaj et al (2013), los cuales están sintetizados en un estudio de reciente publicación que aglutina todos ellos (Martinez-Caro et al, 2020). Las preguntas se enfocan en el modo en el que los sistemas de información y herramientas digitales de una organización generan datos en tiempo real a través de la cadena de valor de la empresa y potencian la trazabilidad de la información durante todo el proceso productivo, generando entornos de trabajo con un alto grado de calidad de la información obtenida.

Digitalización	
DIG1	Los sistemas de información de su organización generan datos en tiempo real a lo largo de la cadena de valor (información de maquinaria o procesos)
DIG2	Hay un alto grado de trazabilidad de la información durante el proceso de producción de su empresa
DIG3	El nivel de calidad de la información generada por los sistemas de información de su organización es alto

Tabla 4.2. Listado de ítems de la variable Digitalización

- Finalmente, los resultados empresariales fueron medidos usando ítems provenientes de estudios previos de Judge & Douglas (1998), y Quinn & Rohrbaugh (1983). La versión final de esta escala consta de 3 ítems para medir los resultados empresariales.

Resultados Empresariales	
OP1	Está creciendo más
OP2	Es más rentable
OP3	Tiene una mayor productividad

Tabla 4.3. Listado de ítems de la variable Resultados Empresariales.

Se realizaron tres pruebas estadísticas para evitar la no presencia de sesgo en nuestras respuestas (Podsakoff, MacKenzie, Lee, y Podsakoff, 2003). En primer lugar, un análisis factorial de todas las variables para garantizar la ausencia de sesgo de respuesta mostró cuatro factores con valores propios superiores a “1.0” con una varianza explicada del 65.89%. En segundo lugar, se procedió a comparar la primera y la última respuesta (1 = temprana y 2 = tardía) en términos de la digitalización de la I-4.0, la mejora continua y los resultados de la empresa, la prueba t de muestras independientes no reveló diferencias significativas entre las primeras y las últimas respuestas ($p=0.864$, $p=0.700$, y $p=0.440$,

respectivamente). Finalmente, realizamos la prueba de factor único de Harman (Podsakoff et al., 2003). Los resultados mostraron que el ajuste fue considerablemente peor para el modelo unidimensional que para el modelo de medición, mientras que el modelo de un factor generó un valor de Satorra-Bentler $\chi^2(77)= 251.03$; $\chi^2/d.f=3.26$, el modelo de medición produjo un valor Satorra-Bentler $\chi^2(74)= 171.22$; $\chi^2/d.f=2.31$. Todos estos resultados sugieren que no existe un sesgo sustancial de la muestra (Armstrong y Overton, 1977).

4.3 ANÁLISIS

El análisis del modelo anteriormente expuesto se va a realizar usando el software SmartPLS, en su versión 3.2.8. Hay numerosas razones para justificar el uso de esta metodología para el análisis de nuestro modelo, las cuales vamos a enumerar a continuación:

- PLS permite una buena determinación de la puntuación agregada (scores) de las variables latentes (Cepeda-Carrión, Cegarra-Navarro, y Cillo, 2018).
- PLS no impone ninguna suposición de distribución específica (p.e. normalidad) para los indicadores y no necesita que las observaciones sean independientes unas de otras (Chin, 2010).
- Al haberse construido el modelo con el propósito de probar hipótesis causales, es necesario un análisis confirmatorio y una verificación del modelo global (Henseler, 2018).
- PLS evita dos serios problemas (Fornell, 1982):
 - Soluciones inadmisibles o impropias.
 - Indeterminación de los factores.
- PLS establece mínimos requerimientos sobre escalas de medida:
 - Nominal, ordinal, por intervalos o ratios (Wold, 1985).
 - No requiere uniformidad en las escalas de medida (Sosik et al, 2009)
- Comparado con CBSEM, PLS puede estimar modelos estructurales con muestras pequeñas (Chin & Newsted, 1999; Reinartz et al., 2009; Henseler, 2018; Henseler, Hubona & Ray, 2016; Henseler, Ringle & Sarstedt, 2015).

- PLS puede estimar modelos con medidas estimadas en Modo A (tradicionalmente reflectivas) y en Modo B (tradicionalmente formativas) sin ningún problema de identificación (Chin, 2010).
- PLS es bastante robusto frente a tres insuficiencias (Cassel, Hackl y Westlund, 1999):
 - Distribuciones sesgadas en las variables manifiestas en vez de simétricas.
 - Multi-Colinealidad tanto entre variables latentes como entre indicadores.
 - Incorrecta especificación del modelo estructural (omisión de regresores).

El análisis del modelo en PLS será realizado e interpretado en dos etapas (Barclay et al., 1995):

- Valoración de la validez y fiabilidad del modelo de medida. El modelo de medida trata de analizar si los conceptos teóricos están medidos correctamente a través de las variables observadas. Este análisis se realiza respecto a los atributos validez (mide realmente lo que se desea medir) y fiabilidad (lo hace de una forma estable y consistente).
- Valoración del modelo estructural. El modelo estructural evalúa el peso y la magnitud de las relaciones entre las distintas variables. Esta secuencia asegura que tengamos medidas válidas y fiables antes de intentar extraer conclusiones referentes a las relaciones existentes entre los constructos.

4.3.1 Valoración del modelo de medida

4.3.1.1 Valoración del modelo de medida (Modo B)

Según Roldán y Cepeda, 2019, la valoración del modelo de medida para los constructos formativos (estimación en Modo B), se hace siguiendo la pauta siguiente:

- Validez externa o convergente. Correlación entre la variable latente medida formativamente y reflectivamente $\geq 0,8$ (Chin, 2010), $\geq 0,7$ (Hair et al, 2017).
- Valoración de multicolinealidad. Factor de inflación de la varianza (VIF) $\leq 3,3$ (Hair et al, 2017).
- Valoración relevancia (Magnitud) de los pesos. Máximo valor = $1/\sqrt{n}$
- Valoración significación de los pesos. Bootstrapping, test 2 colas, $p < 0.05$

Debido a que las medidas formativas no necesitan estar correlacionadas y se asume que están libres de error, la evaluación tradicional de la fiabilidad y validez se considera que no es aplicable (Bagozzi, 1994). De esta manera, el examen de validez debe ser realizado con base al razonamiento teórico y la opinión de los expertos (Diamantopoulos y Winklhofer, 2001).

Considerando lo anterior, y tomando como referencia a Hair et al (2017) y Chin (2010), la evaluación de los modelos de medida formativos se realiza según los siguientes pasos:

- Valoración de la posible multicolinealidad.
- Valoración de la magnitud de los pesos (weights) y su significación.

Análisis de multicolinealidad.

La multicolinealidad se refiere a las intercorrelaciones lineales existentes entre dos o más indicadores formativos. Una alta colinealidad entre indicadores produciría estimaciones inestables, puesto que sería difícil separar el efecto distintivo de cada indicador sobre el constructo emergente.

Según Roldán y Cepeda, altos niveles de colinealidad afectan a los resultados en dos formas:

- Incrementa los errores estándar y reduce por tanto la capacidad para demostrar que los pesos estimados son significativamente distintos de cero.
- Puede dar lugar a que los pesos sean estimados incorrectamente, y en casos extremos cambiando los signos.

Lanzamos análisis de multicolinealidad en SmartPLS:

	VIF
CI1	3,168
CI2	3,415
CI3	1,226
CI4	1,235
CI5	2,062
CI6	1,885
CI7	1,537

CI8	1,186
DIG1	2,107
DIG2	2,207
DIG3	2,240
OP1	1,786
OP2	1,718
OP3	1,370

Tabla 4.4. Análisis multicolinealidad inicial modo B. SmartPLS.

Me salen los ítems CI1 y CI2 con una elevada colinealidad, pero dentro del límite. Opto por mantenerlos, ya que fueron obtenidos de una escala previamente utilizada.

Valoración de pesos

Nos permite comprender la estructura o composición de cada variable latente, ya que los pesos proporcionan información sobre cómo cada indicador contribuye a su respectivo constructo. Además, los pesos nos permiten jerarquizar los indicadores formativos de un constructo en el contexto de una red nomológica particular.

A medida que aumenta el número de indicadores formativos, disminuirá el valor medio de los pesos, y por tanto tendremos más posibilidad de encontrarnos con pesos no significativos.

	Mejora continua	Digitalización	Resultados empresariales
CI1	0,093		
CI2	0,021		
CI3	0,314		
CI4	0,077		
CI5	0,074		
CI6	0,533		
CI7	0,243		
CI8	0,153		
DIG1		0,386	
DIG2		0,403	
DIG3		0,342	
OP1			0,412
OP2			0,342
OP3			0,461

Tabla 4.5. Valoración de los pesos de los indicadores, modo B. SmartPLS.

Los resultados mostrados en la tabla de pesos resultan interesantes desde el punto de vista empresarial, ya que nos informa de la influencia de cada magnitud. En nuestro caso, podemos observar como el indicador CI6 destaca por encima de todos en su peso. Si recordamos su significado:

CI6	Los datos e indicadores del rendimiento de las operaciones se integran en la elaboración de estrategias de mejora continua
-----	--

Es decir, desde el punto de vista de la gestión, y la aplicación de la mejora continua en una organización, habremos de prestar especial atención al apartado de integrar los datos e indicadores del rendimiento operacional para el desarrollo de las estrategias de mejora continua asociadas.

4.3.1.2 Valoración del modelo de medida (Modo A)

Siguiendo con los criterios establecidos por Roldán y Cepeda, (2019), la valoración del modelo de medida en constructos reflectivos (estimación Modo A), se realiza mediante la comprobación de los siguientes criterios:

Criterio	Umbral
Fiabilidad indiv. indicador	• Carga externa: $\lambda \geq 0,707$
Fiabilidad constructo(consistencia interna)	• Alfa de Cronbach $\geq 0,7$
	• Fiabilidad compuesta (ρ_c) $\geq 0,7$
	• Dijkstra-Henseler's (ρ_A) $\geq 0,7$
Validez convergente	• Varianza extraída media (AVE) $\geq 0,5$
Validez discriminante	• Cargas cruzadas
	• Fornell-Larcker: $\sqrt{AVE} >$ correlación resto constr.
	• HTMT ratio $\leq 0,85 \leq 0,9$
	HTMTinference: ¿0,9 dentro IC 95%? -> No

Tabla 4.6. Criterios de evaluación modelos PLS-SEM. JL Roldán & G. Cepeda. Julio 2019 *Nota: HTMT (heterotrait-monotrait ratio of correlations)

Fiabilidad individual del ítem

Es valorada examinando las cargas (l) o correlaciones simples, de las medidas o indicadores con su respectivo constructo.

Según Carmines y Zeller (1979) $\lambda \geq 0,707$:

- La comunalidad de un indicador (I2) representa cuánto de la variación de un ítem es explicada por el constructo.
- $\lambda \geq 0,707$ que la varianza compartida entre el constructo y sus indicadores es mayor que la varianza debida al error.
- Sin embargo, diversos investigadores piensan que esta regla heurística no debería ser tan rígida:
 - En etapas iniciales de desarrollo de escalas (Chin 1998) y cuando las escalas se aplican a contextos diferentes (Barclay et al. 1995).
 - La inclusión de ítems débiles ayudará a extraer la información útil que está disponible en el indicador para crear una mejor puntuación de la variable latente.
 - Hair et al. (2011) indican que los indicadores débiles en ocasiones son retenidos sobre la base de su contribución a la validez de contenido.

	Mejora continua (Modo B)	Digitalización (Modo A)	Resultados empresariales (Modo A)
CI1	0,307		
CI2	0,363		
CI3	0,629		
CI4	0,392		
CI5	0,716		
CI6	0,843		
CI7	0,68		
CI8	0,449		
DIG1		0,881	
DIG2		0,894	
DIG3		0,877	
OP1			0,848
OP2			0,807
OP3			0,814

Tabla 4.7. Análisis fiabilidad individual del ítem (Modo A). SmartPLS.

Como comentábamos en el apartado anterior, debido a que las medidas formativas no necesitan estar correlacionadas y se asume que están libres de error, la evaluación tradicional de la fiabilidad y validez se considera que no es aplicable (Bagozzi, 1994). De

esta manera, el examen de validez debe ser realizado con base al razonamiento teórico y la opinión de los expertos (Diamantopoulos y Winklhofer, 2001).

Fiabilidad del constructo y validez convergente

Determina si los ítems que miden un constructo son similares en sus puntuaciones y evalúa con qué rigurosidad están midiendo las variables manifiestas la misma variable latente.

Medidas:

- Coeficiente alfa de Cronbach.
- Fiabilidad compuesta (*composite reliability*) (ρ_c) (Werts, et al., 1974). La fiabilidad compuesta es más adecuada que al alfa de Cronbach para PLS ya que no asume que todos los indicadores reciben la misma ponderación (Chin, 1998b).
- Dijkstra-Henseler's (ρ_A) (Dijkstra and Henseler, 2015b). La única medida de fiabilidad consistente.

Guías:

- Nunnally y Bernstein (1994) sugieren 0,7 como un nivel adecuado para una fiabilidad 'modesta' en etapas tempranas de investigación, y un más estricto 0,8 o 0,9 para etapas más avanzadas de investigación.
- Valores $> 0,95$ pueden sugerir patrones de respuestas indeseables (e.g. línea recta).

En cuanto a la Validez convergente implica que un conjunto de indicadores representa un único constructo subyacente, pudiendo esto ser demostrado por medio de su unidimensionalidad (Henseler, et al., 2009). Siendo además el grado con el que un constructo converge en explicar la variación de sus indicadores (Hair, Risher, Sarstedt y Ringle, 2019).

Medida:

- Varianza extraída media (*average variance extracted- AVE*) (Fornell y Larcker, 1981). Proporciona la cantidad de varianza que un constructo obtiene de sus indicadores con relación a la cantidad de varianza debida al error de medida. Es una medida más conservadora que la fiabilidad compuesta (ρ_c).

Guías:

- $AVE \geq 0,50$. Esto significa que cada constructo explica al menos el 50% de la varianza de los indicadores asignados.

Resultados en SmartPLS:

	Alfa de Cronbach	rho_A	Fiabilidad compuesta	Varianza extraída media (AVE)
Continuous Improvement		1		
Digitalization	0,861	0,866	0,915	0,782
Operational Performance	0,764	0,773	0,863	0,677

Tabla 4.8. Análisis fiabilidad del constructo y validez convergente. SmartPLS.

Validez discriminante

Indica en qué medida un constructo dado es empíricamente diferente de los otros constructos incluidos en el modelo estructural.

Existían dos métodos clásicos para su valoración.

A) El análisis de cargas cruzadas:

Ningún ítem debería cargar más fuertemente sobre otro constructo que sobre aquel constructo que trate de medir (Barclay et al. 1995).

A su vez, cada constructo debería cargar más sobre sus indicadores asignados que sobre otros ítems.

El análisis de cargas cruzadas se lleva a cabo calculando las correlaciones entre las puntuaciones de los constructos y los datos estandarizados de los indicadores (Gefen y Straub, 2005).

B) Criterio de Fornell y Larcker (1981):

La cantidad de varianza que un constructo captura de sus indicadores (AVE) debería ser mayor que la varianza que dicho constructo comparte con otros constructos en el modelo (i.e., la correlación al cuadrado entre los dos constructos).

Con el ánimo de facilitar esta valoración, la raíz cuadrada del AVE de cada variable latente debería ser mayor que las correlaciones que tiene éste con el resto de variables latentes del modelo.

	Mejora continua	Digitalización	Resultados empresariales
Mejora continua			
Digitalización	0,463	0,884	
Resultados empresariales	0,416	0,421	0,823

Tabla 4.9. Análisis de la validez discriminante por el criterio de Fornell-Lacker. SmartPLS.

El examen de las cargas cruzadas y del criterio Fornell-Larcker presenta deficiencias:

- Ambos no son lo suficientemente sensibles para detectar problemas de validez discriminante.
- Ambos sólo funcionan bien con tamaños muestrales altos y con patrones de cargas muy heterogéneos.

Henseler, Ringle & Sarstedt (2015) desarrollaron estudios de simulación para demostrar que la falta de validez discriminante se detecta mejor por medio de la ratio heterotrait-monotrait (HTMT) que ellos desarrollaron. En un modelo bien ajustado, las correlaciones heterotrait deberían ser más pequeñas que las correlaciones monotrait, lo que implica que la ratio HTMT debería estar por debajo de 1.

	Digitalización	Resultados empresariales
Digitalización		
Resultados empresariales	0,502	

Tabla 4.10. Análisis de la validez discriminante mediante el ratio HTMT. SmartPLS.

4.3.1.3 Valoración del modelo de medida (saturado)

Nos basaremos en el criterio de Henseler (2017), para establecer la valoración del modelo de medida:

- $SRMR \leq 0,08$
- Tests de ajustes exactos basados en *bootstrap*:
 - *Bootstrap-based inference statistics of the SRMR*
 - $SRMR \leq 95\%$ bootstrap quantile (HI95 of SRMR)
 - $SRMR \leq 99\%$ bootstrap quantile (HI99 of SRMR)
 - *The unweighted least squares discrepancy*
 - $d_{ULS} \leq 95\%$ bootstrap quantile (HI95 of d_{ULS})
 - $d_{ULS} \leq 99\%$ bootstrap quantile (HI99 of d_{ULS})

- The geodesic discrepancy (d_G)
 - $d_G \leq 95\%$ bootstrap quantile (HI95 of d_G)
 - $d_G \leq 99\%$ bootstrap quantile (HI99 of d_G)

Si cualquiera de estos índices (SRMR, d_{ULS} , d_G) supera estos valores, es improbable que el modelo de medida sea verdadero.

	Modelo saturado	Modelo estimado
SRMR	0,073	0,073
d_{ULS}	0,563	0,563
d_G	0,220	0,220
Chi-cuadrado	76,054	76,054
NFI	0,833	0,833

Tabla 4.11. Valoración del modelo de medida (saturado). SmartPLS. Notas: bootstrapping (5000 submuestras, *bootstrapping* completo, una cola, 0.05)

SRMR				
	Muestra original (O)	Media de la muestra (M)	95%	99%
Modelo saturado	0,073	0,052	0,067	0,077
Modelo estimado	0,073	0,052	0,068	0,077

Tabla 4.12. *Bootstrap-based inference statistics of the SRMR*. SmartPLS.

d_{ULS}				
	Muestra original (O)	Media de la muestra (M)	95%	99%
Modelo saturado	0,563	0,290	0,476	0,630
Modelo estimado	0,563	0,294	0,486	0,624

Tabla 4.13. *The unweighted least squares discrepancy*. SmartPLS.

d_G				
	Muestra original (O)	Media de la muestra (M)	95%	99%
Modelo saturado	0,220	0,173	0,233	0,267
Modelo estimado	0,220	0,174	0,235	0,271

Tabla 4.14. *The geodesic discrepancy*. SmartPLS.

Tras estos resultados, confirmamos que no hay más información que la que el modelo transmite, por tanto, el modelo es válido en investigación confirmatoria, según Henseler.

4.3.2 Valoración del modelo estructural

Siguiendo con lo planteado por Roldán y Cepeda (2019), la valoración del modelo estructural estará constituida por los siguientes pasos:

1. Valoración de posibles problemas de colinealidad en el modelo estructural
2. Evaluación del signo algebraico, magnitud y significación estadística de los coeficientes *path*
3. Valoración del coeficiente de determinación (R^2). Descomposición de la varianza
4. Valoración de los tamaños de los efectos (f^2)

Valoración de la colinealidad

Dado que la estimación de los coeficientes *path* se hace con base en regresiones OLS, al igual que en una regresión múltiple, debemos de evitar la presencia de multicolinealidad entre las variables antecedentes de cada uno de los constructos endógenos.

De acuerdo con Hair, Risher, Sarstedt y Ringle (2019) los valores de VIF deberían ser idealmente $\leq 3,3$

	VIF
CI1	3,168
CI2	3,415
CI3	1,226
CI4	1,235
CI5	2,062
CI6	1,885
CI7	1,537
CI8	1,186
DIG1	2,107
DIG2	2,207
DIG3	2,240
OP1	1,786
OP2	1,718

Tabla 4.15. Valoración colinealidad variables antecedents. SmartPLS.

Evaluación del signo algebraico, magnitud y significación de los coeficientes *path*

Los coeficientes *path* (coeficientes de regresión estandarizados) muestran las estimaciones de las relaciones del modelo estructural, es decir, de las relaciones hipotetizadas entre constructos.

Se analizará el signo algebraico, la magnitud y la significación estadística.

Aquel *path* cuyo signo sea contrario al signo postulado en la hipótesis, conducirá a que ésta no sea soportada

Magnitud: Los coeficientes *path* se muestran como valores estandarizados entre +1 y -1

- Mayores valores absolutos denotan mayores relaciones (predictivas) entre constructos
- Cuanto más cercano a cero es el valor, más débil es la relación.
- Valores muy bajos, cercanos a cero, son habitualmente no significativos, es decir, no significativamente diferente de cero.

Signo coeficiente <i>path</i>		
	Digitalización	Resultados empresariales
Mejora continua	0,463	0,282
Digitalización		0,291

Tabla 4.16. Evaluación signo coeficiente *Path*. SmartPLS.

Todos los signos se corresponden con las hipótesis planteadas.

Valoración del nivel de R² y Q²:

El coeficiente de determinación (R²) representa una medida de poder predictivo. Indica la cantidad de varianza de un constructo que es explicada por las variables predictoras de dicho constructo endógeno en el modelo. Los valores de R² oscilan entre 0 a 1. Cuanto más alto es el valor, más capacidad predictiva tiene el modelo para dicha variable.

Los valores de R² deberían ser suficientemente altos para que el modelo alcance un nivel mínimo de poder explicativo

- Falk y Miller (1992): Como mínimo $\geq 0,10$
- Chin (1998): 0,67 Sustancial; 0,33 Moderado; 0,19 Débil

- Hair et al. (2014) (Marketing): 0,75 Sustancial; 0,5 Moderado; 0,25 Débil

Una vez determinado el poder de predicción de los constructos, pasaremos a medir la relevancia predictiva de los constructos dependientes. En este apartado aplicaremos el Test de Stone-Geisser o Q2, también llamado “*Cross Validated Redundancy*”. En dicho test, que el modelo establecido tenga relevancia predictiva el valor de Q2 debe ser superior a “0”, de no serlo carecería de poder predictivo alguno (Shmueli, Ray, Velasquez Estrada y Chatla, 2016).

Como vemos en la tabla 4.17, todos los constructos tienen una Q2 superior a “0”, con lo cual el modelo predictivo tiene relevancia. Por tanto, se dispone de un modelo estructural que permite el contraste de las hipótesis planteadas.

	R ²	Q ²
Digitalización	0,214	0,156
Resultados empresariales	0,24	0,183

Tabla 4.17. Varianza explicada. Smart PLS.

Valoración de los tamaños de los efectos (f²):

Tamaño del efecto, f² (Cohen, 1988) valora el grado con el que un constructo exógeno contribuye a explicar un determinado constructo endógeno en términos de R².

- $f^2 = (R^2 \text{ incluida} - R^2 \text{ excluida}) / (1 - R^2 \text{ incluida})$,

Donde R² incluida y R² excluida son los valores R² de la variable latente endógena cuando una variable latente exógena es incluida o excluida del modelo.

El cambio en los valores de R² se calculan estimando el modelo PLS dos veces:

- Una con la variable latente exógena incluida (generando R² incluida)
 - Y la segunda vez con la variable latente exógena excluida (generando R² excluida).
- Reglas heurísticas (Cohen, 1988):
 - $0.02 \leq f^2 < 0.15$: Efecto pequeño
 - $0.15 \leq f^2 < 0.35$: Efecto moderado
 - $f^2 \geq 0.35$: Efecto grande

TAMAÑO DEL EFECTO			
	Mejora continua	Digitalización	Resultados empresariales
Mejora continua		0,272	0,082
Digitalización			0,088
Resultados empresariales			

Tabla 4.18. Tamaño del efecto. Smart PLS.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo vamos a proceder a analizar los resultados obtenidos mediante el análisis del modelo propuesto. Empezaremos por un análisis descriptivo de las variables del estudio y, a continuación, realizaremos un contraste de las hipótesis planteadas para dictaminar si se aceptan o no.

5.1 ANÁLISIS DESCRIPTIVO

En este apartado vamos a realizar el análisis descriptivo de las variables que integran nuestro modelo. Para tal misión, analizaremos la media, mediana y moda de cada uno de los ítems que componen las variables, con el objeto de determinar posibles conclusiones y/o patrones descriptivos interesantes.

Antes de acometer el análisis de las variables principales del modelo, se va a realizar también un análisis descriptivo de algunos de los ítems de la encuesta, más concretamente los de “Posición actual”, “Antigüedad en la empresa”, “Personas a cargo” y “Rango de edad”. De esta manera queremos profundizar en el detalle de los perfiles que han respondido a nuestra encuesta.

5.1.1 Análisis descriptivo de ítems relacionados con el perfil de la muestra.

Posición actual:

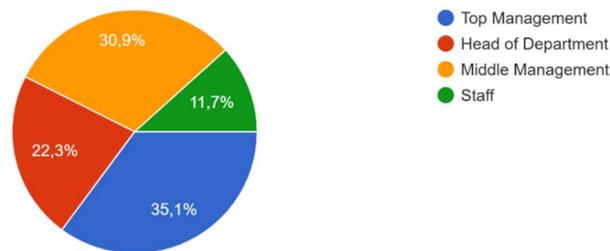


Figura 5.1. Distribución del ítem “Posición Actual”. Fuente: Elaboración propia.

Como vemos en el gráfico, hay una predominancia clara de respuestas provenientes de responsables y directivos, lo cual aporta gran valor a los datos obtenidos, ya que nos asegura una visión global de la empresa y unos amplios conocimientos en las materias sujetas a cuestión. Especialmente relevante es que más de un tercio de los encuestados proviene de la alta dirección, haciendo todavía más valiosa la información obtenida.

Antigüedad en la empresa:

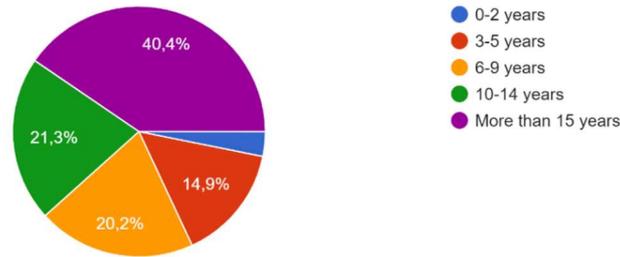


Figura 5.2. Distribución del ítem “Antigüedad en la empresa”. Fuente: encuesta vía google forms.

Como vemos en el gráfico, la práctica totalidad de los encuestados contaban con una amplia experiencia en la compañía, lo cual confiere de bastante rigor a la hora de establecer opiniones y juicios valorativos respecto a las preguntas planteadas. Destacamos que más del 40% de los encuestados cuentan con una antigüedad superior a los 15 años en la empresa.

Personas a cargo:

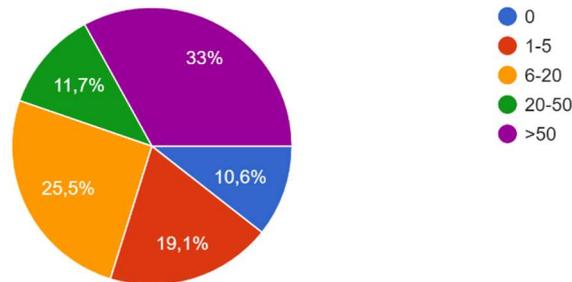


Figura 5.3. Distribución del ítem “Personas a cargo”. Fuente: encuesta vía google forms.

Como vemos en el gráfico, un tercio de los encuestados tiene bajo su responsabilidad a más de 50 personas, mostrando una vez más la valía de las respuestas obtenidas, ya que el hecho de tener gente a cargo aporta una visión más directa en relación a las ventajas obtenidas mediante la aplicación de las herramientas de mejora continua y digitalización.

Rango de edad:

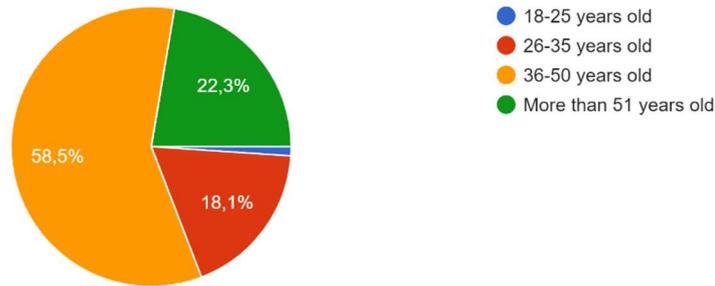


Figura 5.4. Distribución del ítem “Rango de edad”. Fuente: encuesta vía google forms.

Como vemos en el gráfico, más del 80% de los encuestados tienen una franja de edad que supera los 36 años, dando muestra de nuevo de que el nivel de madurez de los encuestados fue notable, otorgando una mayor seguridad en la obtención de respuestas con rigor basadas en la experiencia.

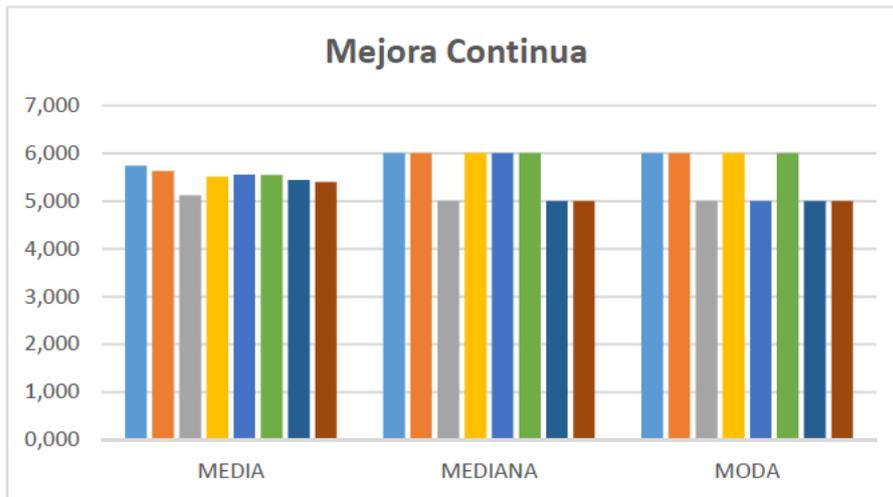
5.1.2 Análisis descriptivo de la variable “Mejora Continua”

Según el análisis realizado hay ciertos ítems cuyos valores están por encima del resto, si bien es cierto que todos poseen valores superiores a 5 en la escala Likert. Destaca por ejemplo el ítem que destaca el compromiso e involucración de los directivos en la mejora continua, así como también el hecho de que tengan como un objetivo importante dentro de sus tareas el desarrollar un sistema de mejora continua en la organización.

El ítem que relaciona a la empresa con los clientes tratando de medir su índice de satisfacción también presenta valores por encima del resto, siendo uno de los más valorados en la encuesta.

Por último, el hecho de integrar los datos de desarrollo de la actividad de operaciones en pro del desarrollo de las estrategias de mejora continua, es considerado también un elemento de mayor relevancia comparativamente con el resto.

En la figura 5.5 podemos ver la comparativa de los diversos ítems que integran el constructo “continuous improvement”.



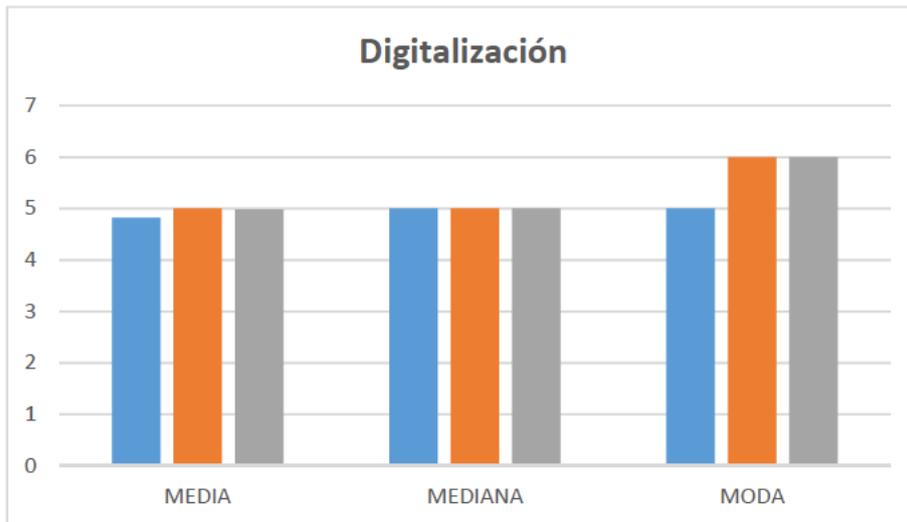
Mejora Continua		MEDIA	MEDIANA	MODA
C11	Están claramente involucrados en la mejora continua dentro de la compañía.	5,74	6	6
C12	Tienen como objetivo importante el desarrollo de un sistema de gestión de mejora continua	5,62	6	6
C13	Los empleados se forman multidisciplinariamente	5,12	5	5
C14	A menudo estamos en estrecho contacto con nuestro cliente, tratando de medir sus necesidades y su nivel de satisfacción	5,51	6	6
C15	Las decisiones que se toman se basan en datos	5,55	6	5
C16	Los datos e indicadores del rendimiento de las operaciones se integran en la elaboración de estrategias de mejora continua	5,54	6	6
C17	Analiza continuamente el trabajo para encontrar mejores formas de hacer las cosas	5,44	5	5
C18	Las reuniones de seguimiento se realizan regularmente	5,40	5	5

Figura 5.5. Análisis descriptivo del constructo “Mejora Continua”. Elaboración propia.

5.1.3 Análisis descriptivo de la variable “Digitalización”

En cuanto al apartado de digitalización, observamos 2 ítems con una mayor relevancia en los resultados, como son el hecho de que haya una mayor tasa de trazabilidad de la información durante el proceso productivo, así como también que el nivel de calidad generada por los sistemas de información es elevado. En ambos casos esto muestra la importancia de disponer de sistemas de toma de datos fiables a lo largo de los procesos que integran la cadena de valor de la empresa.

En la siguiente figura podremos ver el detalle de cada ítem:



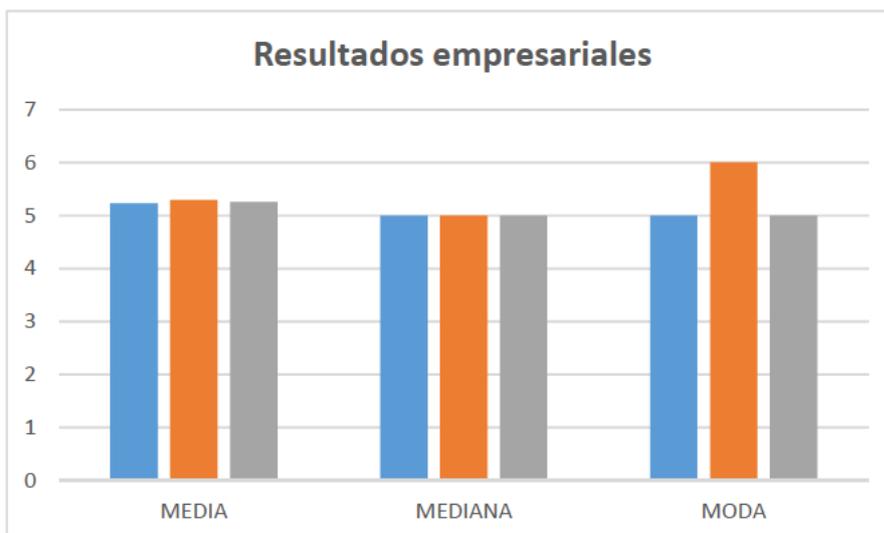
Digitalización		MEDIA	MEDIANA	MODA
DIG1	Los sistemas de información de su organización generan datos en tiempo real a lo largo de la cadena de valor (información de maquinaria o procesos)	4,82	5	5
DIG2	Hay un alto grado de trazabilidad de la información durante el proceso de producción de su empresa	5,00	5	6
DIG3	El nivel de calidad de la información generada por los sistemas de información de su organización es alto	4,98	5	6

Figura 5.6. Análisis descriptivo del constructo “Digitalización”. Elaboración propia.

5.1.4 Análisis descriptivo de la variable “Resultados empresariales”

En cuanto al constructo de resultados empresariales, se observa una homogeneidad en los resultados, destacando levemente por encima del resto el ítem relacionado con la mayor rentabilidad de la empresa, si bien es cierto que todos los ítems muestran valores medianamente altos.

En la figura mostrada a continuación podemos ver el detalle de los mismos:



Resultados empresariales		MEDIA	MEDIANA	MODA
OP1	Está creciendo más	5,23	5	5
OP2	Es más rentable	5,29	5	6
OP3	Tiene una mayor productividad	5,25	5	5

Figura 5.7. Análisis descriptivo del constructo “Resultados empresariales”. Elaboración propia.

5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL MODELO ESTRUCTURAL

En este apartado vamos a ver los resultados del análisis del modelo estructural, en el cual se analizará el peso y la magnitud de las relaciones entre las distintas variables, así como su significancia estadística.

Valoración de la significación de los efectos por medio de *bootstrapping*:

- *Bootstrapping* nos permite responder a la siguiente pregunta: ¿Son las relaciones significativamente diferentes de cero?
- *Bootstrapping* valora la precisión de las estimaciones de PLS.
- Es una técnica no paramétrica de remuestreo
 - Consiste en una técnica de muestreo repetido aleatorio con reposición de la muestra original para crear un número de muestras bootstrap (Hair et al., 2011).
 - Se sugiere un mínimo de 5000 muestras y el número de casos debe ser igual al número de observaciones en la muestra original
 - Streukens y Leroi-Werelds (2016) recomiendan actualmente 10.000 muestras *bootstrap*
 - Como resultado de este proceso, se obtienen los errores estándar, los estadísticos t y los intervalos de confianza de los parámetros, lo cual permitirá los tests de hipótesis.
- *Bootstrap* ofrece el error estándar (se) de un coeficiente estimado. Esta información permitirá determinar el valor empírico de t para un coeficiente *path* en particular (p.ej., pc1)
 - $t = pc1 / sepc1$
- El enfoque más simple de test estadístico de una hipótesis implica usar el estadístico t, obtenido de *bootstrap*, con n-1 grados de libertad (donde n es el

número de submuestras) para testar $H_0 : \beta_1 = 0$ (un coeficiente *path*) frente a la hipótesis alternativa $H_1 : \beta_1 \neq 0$.

	Muestra original (O)	Media de la muestra (M)	Desviación estándar (STDEV)	Estadísticos t (O/STDEV)	
Mejora continua -> Digitalización	0,463***	0,521	0,091	5,079	0,000
Mejora continua -> Resultados empresariales	0,282*	0,314	0,162	1,738	0,041
Digitalización -> Resultados empresariales	0,291**	0,277	0,119	2,441	0,007

Tabla 5.1. Magnitud coeficiente *Path*. Smart PLS. Nota: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; $t(0.05;4999) = 1.6451$; $t(0.01;4999) = 2.327$; $t(0.001;4999) = 3.092$, T-*bootstrapping* completo, 5000 submuestras, una cola.

	Muestra original (O)	Media de la muestra (M)	5.0%	95.0%
Mejora continua -> Digitalización	0,463***	0,521	0,362	0,658
Mejora continua -> Resultados empresariales	0,282*	0,314	0,035	0,548
Digitalización -> Resultados empresariales	0,291**	0,277	0,089	0,461

Tabla 5.2. Intervalos de confianza del coeficiente *Path*. Nota: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; $t(0.05;4999) = 1.6451$; $t(0.01;4999) = 2.327$; $t(0.001;4999) = 3.092$, T-*bootstrapping* completo, 5000 submuestras, una cola.

Efectos indirectos específicos

	Muestra original (O)	Media de la muestra (M)	Desviación estándar (STDEV)	Estadísticos t (O/STDEV)	P Valores
Mejora continua -> Digitalización -> Resultados empresariales	0,135*	0,145	0,071	1,898	0,029

Tabla 5.3. Magnitud coeficiente *Path* efectos Indirectos.

Intervalos de confianza

	Muestra original (O)	Media de la muestra (M)	5.0%	95.0%
Mejora continua -> Digitalización -> Resultados empresariales	0,135*	0,145	0,043	0,265

Tabla 5.4. Intervalos de confianza del coeficiente *Path* efectos Indirectos.

Tal y como se muestra en las tablas 5.3 y 5.4, los coeficientes *path* entre mejora continua, digitalización y resultados empresariales son estadísticamente significativos (*p* valor inferior a 0,05). Además, si observamos el intervalo de confianza para estos coeficientes *path*, determinados mediante el uso de *bootstrapping* (5000 submuestras) no incluyen el valor cero (Hair, Ringle y Sarstedt, 2013; Hayes y Scharkow, 2013). A este respecto es importante subrayar que cuando el intervalo de confianza no contiene el valor cero, entonces hay un efecto indirecto significativo. Con el fin de contrastar el tamaño de los efectos indirectos en el modelo de mediación, se ha utilizado la medida *Kappa-squared* (Preacher y Kelley, 2011) que mide en términos relativos el máximo efecto indirecto posible que pudiese tener lugar. Según Preacher y Kelley (2011) se pueden tomar las referencias establecidas por Cohen (1988) para determinar si el tamaño del efecto indirecto es pequeño, mediano o grande, las cuales son 0,01, 0,09, y 0,25, En nuestro caso respectivamente tal como recoge la tabla 5.4 es 0.135 ($0,463 \cdot 0,291 = 0.135$), por consiguiente, estamos hablando de un efecto indirecto medio-alto.

En base a lo anteriormente comentado, podemos concluir que las tres hipótesis encuentran soporte estadístico, y por tanto son aceptadas.

Hipótesis	Apoyo empírico
H1: La mejora continua tiene una relación positiva con los resultados de la empresa.	Sí
H2: La digitalización de la I-4.0 media la relación entre la mejora continua y los resultados de la empresa.	Sí

Tabla 5.5 Aceptación final hipótesis.

Modelo resultante

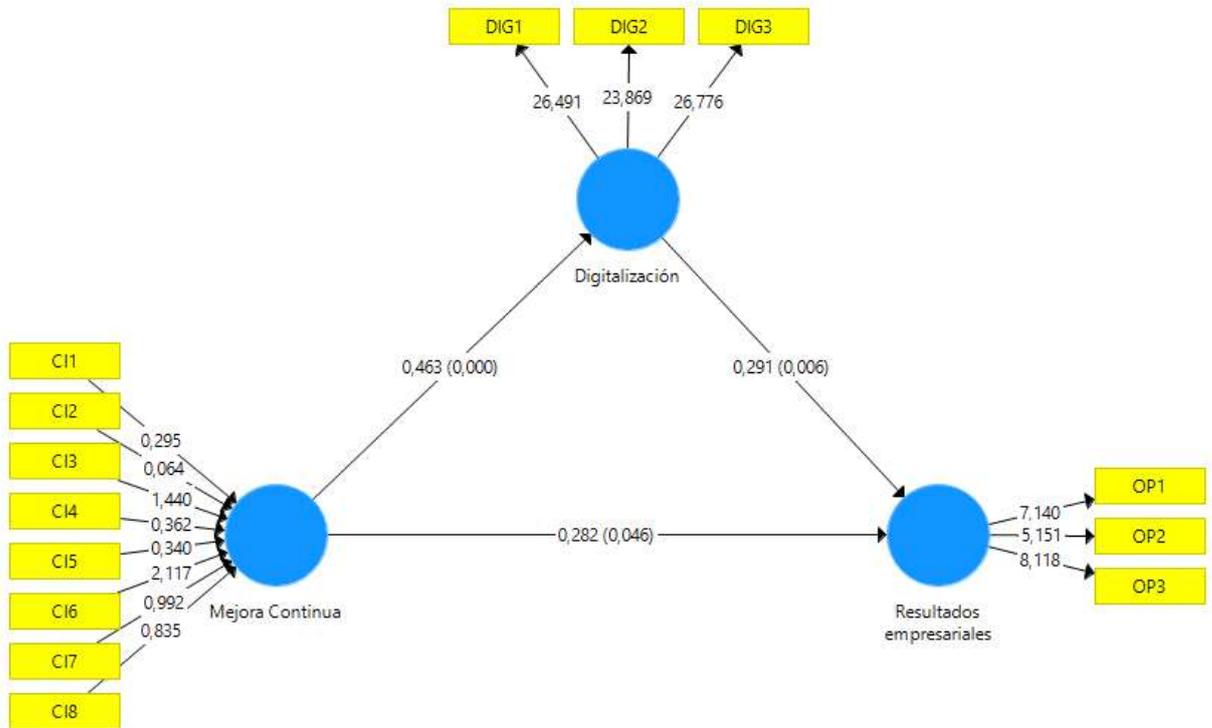


Figura 5.8. Modelo resultante. Smart PLS.

**CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN, IMPLICACIONES
PRÁCTICAS, LIMITACIONES, FUTURAS LÍNEAS DE
INVESTIGACIÓN Y APORTACIONES.**

CAPITULO 6. DISCUSIÓN, IMPLICACIONES PRÁCTICAS, LIMITACIONES, FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y APORTACIONES.

6.1 Discusión y conclusiones

En este trabajo se ha analizado la interacción entre los mundos del Lean Manufacturing y el de la Industria 4.0 y, más concretamente, la influencia de este último a modo de digitalización de las herramientas Lean para una mejor implementación de éstas.

En primer lugar, se ha querido mostrar el estado del arte de la I-4.0, asunto en plena efervescencia y de futuro prometedor, mediante la exposición detallada y estructurada de las distintas herramientas que componen y fundamentan la digitalización que engloba la I-4.0, para dar paso a la estrategia de implementación enfocada a garantizar el éxito a la hora de abordar proyectos digitales.

Otra parte fundamental del trabajo ha sido la exposición de la metodología Lean, sus principales herramientas, así como también las clásicas barreras que se dan durante su implantación y que originan gran cantidad de fracasos en muchas de las empresas que apuestan por el Lean como herramienta de mejora continua.

Posteriormente se ha profundizado en la interacción Lean – I-4.0, partiendo inicialmente del enfoque clásico, más dado a destacar las incompatibilidades entre ambos, para posteriormente abordar un enfoque más moderno, en el que la I-4.0 actúe como habilitador Lean, enfocando sus herramientas digitales en la atenuación y/o eliminación de las barreras de implementación.

En base a lo comentado anteriormente, se ha elaborado un modelo estadístico para contrastar las dos hipótesis que plantea el trabajo, las cuales están enfocadas a profundizar y establecer una relación empírica entre las tres variables que componen el estudio: mejora continua, digitalización y resultados empresariales. De especial interés es el rol moderador de la digitalización entre la relación mejora continua y resultados empresariales, ya que buscamos de esta manera dilucidar si mediante la aplicación de estrategias digitales podemos influir positivamente en la implantación Lean.

Para la obtención de datos del estudio empírico, se ha contado con la inestimable colaboración de la empresa multinacional Saint-Gobain, pudiendo hacer extensible una encuesta a 200 fábricas a nivel mundial. Se ha obtenido un ratio de respuesta cercano al 50%, bastante superior que el habitual del 15 al 25% sugerido por Menon (1996). Este hecho aporta un carácter eminentemente práctico a la tesis, ya que se ha podido indagar en profundidad dentro de un grupo multinacional que es considerado como uno de los conglomerados industriales más grandes del mundo, estando a la vanguardia en Lean, Industria 4.0 y otros proyectos innovadores que confieren a dicha empresa un perfil atractivo para el abordaje de las cuestiones planteadas en la tesis.

Finalmente, tras el análisis de los datos obtenidos, hemos podido constatar la aceptación de las dos hipótesis planteadas, lo cual genera una serie de contribuciones asociadas a este estudio, la cuales serán expuestas más adelante.

En base a la revisión exhaustiva de la bibliografía, se han identificado las siguientes conclusiones:

1. Hay un enfoque clásico en la interacción Lean con la digitalización, en el cual se muestra una confrontación conceptual de base, a través de la cual las herramientas digitales pueden dificultar enormemente la implantación Lean, llegando incluso a comprometer sus posibilidades de éxito.

Numerosos autores en artículos de diversa índole suscriben este enfoque. Ohno (1988), Piszczalski (2000), Womack (2004), Drew, McCallum y Roggenhofer (2004), Houy (2005), Moyano Fuentes et al (2012), Brass et al (2016), Rüttimann y Stöckli (2016), son algunos de los ejemplos que se han mostrado en los primeros capítulos, y que abogan por una corriente en la cual la digitalización puede resultar una barrera a la hora de abordar proyectos Lean de mejora continua.

Ya sea por el elevado número de recursos que ambos proyectos consumen, por la necesidad de disponer de personal cualificado, o bien porque en ocasiones la digitalización virtualiza en exceso los procesos productivos llegando a ocasionar un alejamiento de los analistas de procesos del día a día de la fábrica, el consejo que muchos autores expertos en la materia han proporcionado tradicionalmente es que estos dos mundos, el digital y el Lean, tienen ciertas incompatibilidades

que pueden abocar al fracaso los proyectos que en estas materias aborden las empresas.

2. Encontramos también corrientes modernas que enfocan el problema de diferente manera, abogando por la digitalización como elemento habilitador del Lean. En esta línea encontramos autores como Ward y Zhou (2006), Sharma y Pankaj (2016) Sanders et al (2016), que establecen bases para que la digitalización se convierta en un factor positivo para la implantación de herramientas de mejora continua. En este sentido, gracias a la digitalización podemos generar situaciones favorables que faciliten de algún modo el desarrollo de proyectos de mejora continua, sobre todo en base a constituir entornos más “amigables” para que las herramientas de mejora encuentren un ecosistema digital que facilite el poder llevar dichas herramientas a cabo con una mayor garantía de éxito. Estos autores coinciden en el hecho de considerar la digitalización como un elemento potenciador del Lean, pero no lo corroboran desde el punto de vista empírico.
3. En relación al punto anterior, en esta tesis se plantea un análisis empírico que avale las corrientes modernas que abogan por una relación positiva entre Lean manufacturing y la Industria 4.0. Este apartado es de especial relevancia, ya que no se han encontrado artículos científicos que demuestren estadísticamente dicha relación, haciendo que este punto sea la mayor contribución de esta tesis, tal y como veremos más adelante.
4. Todavía a día de hoy siguen estando presentes los fracasos Lean, asociados sobre todo a las barreras que se dan durante la implantación de los proyectos de mejora continua, y que conducen inexorablemente a su fracaso (Abigli et al, 2014). Es por esto que consideramos de especial relevancia dar una solución a los problemas que aún en la actualidad perduran a la hora de implantar un sistema Lean de mejora continua. Por otro lado, nos encontramos con que, debido a la globalización de los mercados y el aumento de la competitividad, se hace necesario más que nunca orientar los procesos de las industrias hacia un entorno de mejora continua en el cual aumenten su capacidad productiva y de innovación.

5. La Industria 4.0 y todo lo que la relaciona está en plena efervescencia. Son muchos los artículos que nos encontramos en los dos o tres últimos años que hablan de esta corriente de digitalización. Consideramos en base a esto que la temática elegida para la tesis es atractiva en cuanto genera un foro de debate en una parte del conocimiento que está siendo explorada actualmente y, por consiguiente, las conclusiones obtenidas de la tesis tendrán aplicabilidad en la empresa actual.

Esta tesis aporta una serie de contribuciones muy interesantes, sobre todo desde el punto de vista empresarial, más concretamente a empresas que estén inmersas en proyectos de mejora continua y de digitalización, lo cual hoy día es casi una obligación en el entorno competitivo y de optimización de costes en el que nos encontramos. Podemos enumerar las siguientes contribuciones:

1. Una primera aportación de la tesis radica en demostrar que la mejora continua favorece los resultados de la empresa. Al igual que en el punto anterior, esta contribución va en línea con otras publicaciones anteriores (por ejemplo, Alarcón y Moyano-Fuentes, 2007; Womack, 2004), pudiendo concluir que la mejora continua garantiza la obtención de unos mejores resultados. Es por esto de vital importancia que las empresas sean capaces de conducir de forma exitosa los proyectos de implantación Lean, ya que está demostrado que, en el caso de conseguir su desarrollo correcto, la empresa obtendrá un rédito en su rendimiento operativo. Aquí cobra importancia el hecho de conseguir establecer las pautas y procedimientos que permitan alcanzar de forma exitosa una implantación Lean duradera y eficaz, siendo esto último el principal reto al que se enfrentan las empresas de hoy día.
2. La segunda, y más destacable contribución, es que esta tesis aporta un gran avance en este campo del conocimiento mediante la demostración del papel mediador que juega la digitalización en la relación entre mejora continua y los resultados empresariales. En nuestro modelo se ha generado una mediación parcial, lo cual significa que parte de la influencia de la mejora continua se nota directamente en los resultados, sin embargo, otra parte de esa mejora continua necesita ser digitalizada a través de las herramientas digitales. En este sentido, este estudio propone que lo hace mediante dos vías.

La primera vía es a partir de la digitalización progresiva de las herramientas Lean, lo cual repercute en una mayor efectividad y mantenibilidad de dichas herramientas, así como también en una mayor empleabilidad en su uso, lo cual favorece su extensión a los distintos actores que componen las empresas. Entendemos que es una contribución de gran utilidad, ya que no sólo plantea esta relación positiva, sino que también aporta una guía práctica que relaciona cada herramienta Lean y su versión digital mediante la aplicación progresiva de la Industria 4.0, convirtiéndose de esta manera en una especie de manual de herramientas Lean digitales, asociando además las ventajas obtenidas en cada una de ellas.

La segunda vía planteada es mediante el efecto atenuador que la Industria 4.0 puede tener en las barreras de implantación Lean. Ésta es sin duda otra gran aportación de la tesis, ya que además de demostrar empíricamente la relación positiva entre ambas aportamos una guía práctica que relaciona cada una de las barreras que históricamente han conducido al fracaso a multitud de proyectos Lean, con aquellas soluciones vía herramientas de Industria 4.0 enfocadas a la atenuación de dichas barreras. Se convierte de esta manera en una guía relacional de barreras y soluciones aportadas por la I-4.0.

Entendemos que es de especial relevancia esta contribución, ya que no hemos encontrado en la literatura existente ningún artículo que demuestre empíricamente este papel mediador que la Industria 4.0 juega en la relación Lean y resultados. Tal y como se ha planteado en la tesis, y se ha comentado previamente en las contribuciones, la influencia de la digitalización en las herramientas Lean acaba por tener un efecto positivo en los resultados empresariales. Por tanto, concluimos que, a más digitalización, mayor rendimiento Lean obtendremos y, por tanto, se producirán unos mejores resultados empresariales.

3. La tercera contribución de esta tesis ha sido demostrar existe una relación entre los sistemas de mejora continua Lean y la digitalización de la Industria 4.0. En línea con las teorías de Ward y Zhou (2006), las empresas que han implantado

Lean Manufacturing tienen una mayor predisposición a abordar la digitalización de la Industria 4.0 con mayores garantías de éxito que las que no lo han hecho. Esto se fundamenta principalmente en el hecho de que las empresas Lean son más rápidas en la gestión del cambio lo cual es positivo en entornos digitales que analizan los procesos y mercados y aportan datos que requieren acometer cambios rápidos y reorientaciones para cubrir las necesidades de los clientes. Además, los procesos de digitalización requieren del seguimiento exhaustivo de una metodología y planificación de fases de ejecución con un seguimiento riguroso y que, por tanto, necesitan de gran capacidad de absorción e integración de metodologías nuevas de trabajo. Las empresas maduras en Lean aportan esa capacidad de adaptación al cambio y la forma de trabajar ordenada y secuencial, la cual podría facilitar en gran medida la implementación de herramientas digitales.

4. La cuarta contribución de la tesis es confirmar que la digitalización favorece los resultados de la empresa. En este sentido, hemos demostrado empíricamente esta relación positiva, lo cual va en línea de otras investigaciones previas (por ejemplo, Rübmann et al, 2016; Li et al, 2020; Müller, 2020). De esta manera dejamos patente que la inversión en Industria 4.0 se verá amortizada mediante el impacto positivo que se tendrá en los resultados de la empresa, obteniendo un doble beneficio en aquellas empresas que la implemente. Por un lado, se mejora la competitividad de la empresa debido a la mejora en sus resultados, y por otro se contribuye a una adaptación digital de dicha empresa, lo cual repercutirá de forma positiva en su continuidad futura.

6.2 Implicaciones prácticas

Actualmente, en el entorno económico y globalizado en el que las empresas compiten, es esencial que se aborden proyectos de mejora continua para garantizar la competitividad y capacidad de reacción de dichas empresas (Lewis, 2000). Es más, las organizaciones con una estructura Lean y enfocadas a la mejora continua tendrán más probabilidades de éxito que otras sin estas características (Gibbons, 2006). Es fundamental también que las empresas sean capaces de adaptar sus medios a la era digital para la consecución de los objetivos marcados, debido a que la digitalización generará nuevas formas de trabajar y,

por ende, aumentará las posibilidades de crecimiento y liderazgo competitivo (Cassiman & Golvko, 2011).

En los últimos años, las empresas están abordando proyectos de digitalización a través de la nueva corriente que promueve la Industria 4.0 (Rüßmann et al, 2016), por lo que las implicaciones prácticas de esta tesis son de vital importancia para obtener una mejor implantación de dichas técnicas, así como poder hacerlas coexistir con los proyectos de mejora ya iniciados y conseguir finalmente una ventaja competitiva para las empresas.

La primera implicación práctica de relevancia para los gestores de las empresas radica en que las conclusiones derivadas de la tesis pueden evitar los fracasos en la implantación Lean. Se estima que el 70% proyectos Lean fracasan (Pedersen and Huniche, 2011) por lo que establecer desde el inicio los mecanismos para poder reducir en la medida de lo posible las probabilidades de fracaso es fundamental. En esta tesis se establecen pautas, se analizan barreras y se proponen acciones para que las empresas puedan evitar caer en el fracaso Lean anteriormente comentado.

La segunda implicación práctica de la tesis consiste en haber demostrado que se pueden optimizar las herramientas Lean mediante la digitalización de las mismas, contribuyendo de esta manera a una mejor y más eficiente implantación. Es un avance de gran relevancia, ya que hasta la fecha se teorizaba con el efecto positivo de la digitalización en las herramientas Lean, pero sin dar un rigor científico a las afirmaciones propuestas. En esta tesis se ha desarrollado un listado detallado de cómo las principales herramientas Lean pueden converger hacia un entorno digital mediante la aplicación de la Industria 4.0. En la tabla 2.1 se puede ver el detalle de dicha relación, y puede ser una guía de gran utilidad para las empresas con proyectos Lean en fase de implantación, o proyectos ya maduros que requieran de una renovación y adaptación a los tiempos modernos.

La tercera implicación práctica de la tesis viene a raíz de la demostración de que es posible atenuar las barreras Lean mediante la digitalización. Es decir, ya no solo hablamos de la digitalización de las herramientas Lean para la obtención de un mayor rendimiento, sino que además la digitalización puede contribuir directamente a atenuar o eliminar las barreras de implantación Lean es pro de una mejor y más fiable construcción de los proyectos de mejora continua. Esta es sin duda otra gran aportación, ya que directamente

estamos relacionando las barreras Lean detectadas en base a la revisión exhaustiva de la literatura, con herramientas digitales contenidas dentro de la corriente I-4.0, y su consiguiente beneficio obtenido. Los gestores de las empresas podrán encontrar esta relación en la tabla 2.2, en la cual, para cada barrera Lean existente, disponemos de las herramientas digitales enfocadas a su atenuación o eliminación. Entendemos que será de gran ayuda para empresas que atraviesen dificultades en sus proyectos Lean, o que simplemente quieran asegurar una mayor ratio de éxito en sus implantaciones de mejora continua.

La cuarta implicación práctica, y relacionada con las dos anteriores, es la demostración de que es posible que Lean e I-4.0 cohabiten y se retroalimenten mutuamente. De esta manera estamos cambiando el enfoque clásicamente extendido de que las herramientas Lean y las digitales no son compatibles. Este enfoque será de utilidad para las empresas, ya que anima a las mismas a abordar nuevos proyectos Lean o digitalización sin el estigma de pensar que pueden ser incompatibles.

La quinta implicación práctica de la tesis es dar a las empresas una secuencia lógica de implantación Lean e Industria 4.0. Bajo nuestro punto de vista, es aconsejable empezar con las bases del Lean antes de abordar proyectos de digitalización de niveles superiores, pero sí que creemos oportuno que la base estructural de los sistemas digitales (infraestructura de la I-4.0) se implemente en paralelo, o incluso antes que la implementación Lean. Se debería de trabajar en la base del templo (fig.2.3), pero antes de pasar a la fase de implementación de la I-4.0, sería mejor establecer la metodología Lean. Habría que tener en cuenta también la necesidad de establecer una hoja de ruta de implementación en la cual se integren herramientas Lean con I-4.0, de manera que gradualmente se implemente todo el proyecto, pero con un enfoque Lean en el uso de las herramientas digitales como requisito fundamental para obtener éxito en su implantación. Es básico además tener recursos internos durante todo el proyecto, capaces de focalizar las herramientas a la estrategia y modelo de negocio de la empresa. Éste es un error habitual en los sistemas Lean e I-4.0 liderados por consultores externos, sin el apoyo necesario de recursos internos empresa.

La sexta implicación práctica radica en el hecho de haber demostrado el papel mediador de la Industria 4.0 entre la implantación Lean y los resultados empresariales. Esto

conducirá a que los responsables de las empresas encuentren atractivo impulsar la digitalización como ventaja competitiva y, por tanto, para la obtención de mejores resultados empresariales, sirviendo como mecanismo dinamizador Lean y teniendo un impacto positivo en la organización.

Como conclusión final, consideramos que esta tesis tiene aportaciones de gran relevancia para los gestores de las empresas, enfocadas a una mejor y más eficiente implantación Lean, además de aportar ejemplos y guías concretas para su aplicación práctica.

6.3 Limitaciones y líneas futuras de investigación

Esta tesis presenta algunas limitaciones y posibles líneas futuras de investigación. Una de ellas es que, incluso considerando que el estudio se ha desarrollado en colaboración estrecha con una gran multinacional, está muy focalizado en una sola empresa. Entendemos que sería de utilidad replicar este estudio en otras empresas para obtener una visión más amplia de la realidad. Además, también sería interesante incluir empresas de menor tamaño, de cara a ver si existen diferencias con respecto a las grandes empresas, principalmente debido a la menor dotación de recursos.

Otra limitación al hilo de la anterior, es que la tesis se ha desarrollado en un ambiente industrial, por lo que en futuros estudios se podría ampliar el espectro a empresas no industriales, por ejemplo, tecnológicas o financieras. De esta manera podríamos constatar empíricamente los resultados en otros entornos.

A tener en cuenta también es que el grado de madurez Lean de la empresa sometida a estudio, aunque con diferencias en los distintos centros, era relevante, por lo que convendría tener en cuenta en futuros estudios la integración de empresas con un menor nivel Lean implantado, de cara a observar si los resultados obtenidos en la tesis son extrapolables

Otra vía de mejora podría derivarse a través de la eliminación de la subjetividad en las respuestas mediante la inclusión de indicadores más objetivos. Por ejemplo, se podrían

usar KPIs (*Key performance indicators*) obtenidos de forma empírica para ser incluidos en la encuesta, y que de esta forma se elimine el sesgo en las respuestas.

La inclusión de otras variables moderadores podría también tenerse en cuenta como una posible vía de investigación futura, ya que existen otras variables susceptibles de tener influencia en la gestión de proyectos de mejora continua. Al hilo de esto, se deberían abordar estudios que relacionen dichas variables y su influencia en la implantación Lean, aportando de esta manera nuevas vías de desarrollo Lean que aumenten el porcentaje de éxito en su implantación.

6.4 Aportaciones derivadas de la tesis

- Asistencia como líder a la **primera Cumbre de Innovación tecnológica y Economía Circular celebrada en Madrid en 2018**, con la asistencia de Mr. Barack Obama, gracias al proyecto de mejora de eficiencia y reducción del impacto ambiental mediante la digitalización de las herramientas Lean. Elegido como uno de los 300 líderes en España con más influencia en este campo.
- Ponente en la UCPT dando charla “**El rol del Ingeniero Industrial en eso que llaman Economía Circular**”, dentro del curso “Introducción al ejercicio profesional”, en colaboración con el COIIRM. 22/11/2018
- **Coautor artículo publicado en revista Economía Industrial**, perteneciente al Ministerio de Industria.

Alfonso-Ruiz, F.J., Martínez-Caro, E., Cegarra-Navarro, J.G. 2018. *La transformación digital de los sistemas Lean a través de la Industria 4.0. Un caso práctico*. Economía Industrial 409, 25-35.

- **Coautor en artículo publicado en la revista Journal of Business Research.**

Cegarra-Navarro, J.G., Alfonso-Ruiz, F.J., Martínez-Caro, E., García-Perez, A. 2019. *Turning heterogeneity into improved research outputs in international R&D teams*. Journal of Business Research, en prensa. (<https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.05.023>)

Indexada en JCR. Factor de impacto: 4.028, cuartil Q1, posición 30/147, categoría Business.

- **Coautor en artículo publicado en la revista *Technological Forecasting & Social Change*.**

Martinez-Caro, E., Cegarra-Navarro, J.G. Alfonso-Ruiz, F.J. 2020. *Digital technologies and firm performance: The role of digital organizational culture*.

Technological Forecasting & Social Change.

<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119962>)

Indexada en JCR. Factor de impacto: 3.815, cuartil Q1, posición 32/147, categoría Business.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abreu and Ferreira, 2008. The impacts of lean production on working conditions: A case study of a harvester assembly line in Brazil. *International Journal of Industrial Ergonomics*. Volume 39, Issue 2, 2009, 403-412
- Adler, P. 1993, "Time and motion study regained", *Harvard Business Review*, Vol. 71 No. 1, Pages. 97-198.
- Aheleroff et al, 2020. IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: A case study. *Advanced Engineering Informatics* Volume 43, January 2020, 101-143.
- Alarcón & Moyano-Fuentes, 2007. Lean production: estado actual y desafíos futuros de la investigación. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*. Vol. 13, Nº 2, 2007, 179-202.
- Albliwi et al, 2014. Critical failure factors of Lean Six Sigma: a systematic literature review. *International Journal of Quality & Reliability Management*. Vol. 31 No. 9, 1012-1030
- Alhuraish & Robledo, 2017. A comparative exploration of lean manufacturing and six sigma in terms of their critical success factors. *Journal of cleaner production* 2017 v.164, 325-337
- Alukal, 2006. Keeping Lean Alive. *Quality Progress*; Milwaukee Tomo 39, N.º 10, 2006, 67-69.
- Armstrong, J. S., & Overton, T. S. (1977). Estimating Nonresponse Bias in Mail Surveys. *Journal of Marketing Research*, 14(3), 396. <https://doi.org/10.2307/3150783>
- Antony & Banuelas Coronado, 2002; Critical success factors for the successful implementation of Six Sigma projects in organizations. *The TQM Magazine* 14(2):92-99
- Bagozzi, R. P. (1994). Structural equation models in marketing research: Basic principles. In Bagozzi, R. P. (Ed.), *Principles of marketing research*. 317–385
- Barclay, D., Higgins, C., & Thompson, R. (1995). The partial least squares (PLS) approach to causal modelling: Personal computer adoption and use as an illustration. (Special Issue on Research Methodology). *Technology Studies*, 2(2), 285–309.
- Bharadwaj, A., El Sawy, O.A., Pavlou, P.A., Venkatraman, N., 2013. Digital business strategy: toward a next generation of insights. *MIS Q.* 37 (2), 471–482.
- Benesova et al, 2019. Determination of Changes in Process Management within Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*. Volume 38, 2019, 1691-1696
- Benitez, J., Henseler, J., & Roldán, J. L. (2016). How to Address Endogeneity in Partial Least Squares Path Modeling. *Twenty-Second Americas Conference on Information Systems*, (Tanriverdi 2005), 1–10.

- Bose & Pal, 2005. Auto-ID: managing anything, anywhere, anytime in the supply chain. *Communications of the ACM*. Volume 48, Issue 8, 102-113
- Bowersox, D.J., Closs, D.J., Drayer, R.W., 2005. The digital transformation: technology and beyond. *Suppl. Chain Manage. Rev.* 9 (1), 22–29.
- Brass et al, 2016. The Duality of Technology: ICT as an enabler and inhibitor in Business Process improvement. San Diego: Twenty-second Americas Conference on Information Systems
- Brauner & Ziefle, 2015. On the Visual Design of ERP Systems The – Role of Information Complexity, Presentation and Human Factors. *Procedia Manufacturing*. Volume 3, 2015, 448-455
- Brettel et al, 2014. How Virtualization, Decentralization and Network Building Change the Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective. *Journal of Information and Communication Engineering*”, 2014, V. 8, N.1. 47-62
- Broy, 2010. Cyber-Physical Systems. *Innovation durch softwareintensive eingebettete Systeme*. Seiten 13-15.
- Brun, 2011. Las tecnologías de la información y las comunicaciones en la formación inicial docente de América Latina. *Serie políticas sociales*. Vol 72, 73-75.
- Caballero-Gil et al, 2013. Design and Implementation of an Application for Deploying Vehicular Networks with Smartphones. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. Volume: 9 issue: 12, 180-192
- Caldera et al, 2019. Evaluating the enablers and barriers for successful implementation of sustainable business practice in ‘lean’ SMEs. *Journal of Cleaner Production*. Volume 218, 1 May 2019, Pages 575-590
- Candanedo et al, 2018. Machine Learning Predictive Model for Industry 4.0. *Knowledge Management in Organizations*,501-510
- Cannata, 2008. An embedded artificial skin for humanoid robots. 2008 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems.
- Carmines & Zeller (1979) *Reliability and Validity Assessment*. SAGE publications. ISBN 978-0-8039-1371-4
- Cassel, Hackl y Westlund, 1999. Robustness of partial least-squares method for estimating latent variable quality structures *Journal of Applied Statistics* Volume 26, 1999 - Issue 4, 435-446
- Cassiman & Golovko, 2011. Innovation and internationalization through exports. *Journal of International Business Studies* volume 42, 56–75.

- Cepeda-Carrion, Gabriel, Juan-Gabriel Cegarra-Navarro, and Valentina Cillo. 2018. "Tips to Use Partial Least Squares Structural Equation Modelling (PLS-SEM) in Knowledge Management." *Journal of Knowledge Management*, JKM-05-2018-0322. doi:10.1108/JKM-05-2018-0322
- Cheng & Podolsky, 1993. *Just in time manufacturing: An introduction*. 2nd edition. Published by Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row. London.
- Chin, W. W. (1998). The partial least squares approach to structural equation modelling. In Marcoulides, G. A. (Ed.), *Modern methods for business research*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum. 295–336.
- Chin, W. W. (2010). How to write up and report PLS analyses. In Esposito Vinzi, V., Chin, W. W., Henseler, J., & Wang, H. (Eds.), *Handbook of partial least squares: Concepts, methods and applications* Berlin, Germany: Springer-Verlag, 655–690
- Chin, W. W., & Newsted, P. R. (1999). Structural equation modeling analysis with small samples using partial least squares. In Hoyle, R. (Ed.), *Statistical strategies for small samples research* Thousand Oaks, CA: Sage. 307–341
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Colakovic et al, 2018. Internet of Things (IoT): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues. *Computer Networks* Volume 144, 24 October 2018, 17-39
- Correa-Espinal et al, 2010. Warehouse management and information and communication technology. *Estudios Gerenciales*. Volume 26, Issue 117, October–December 2010, 145-171
- Cortés et al, 2016. Strategic Lean Management: Integration of operational Performance Indicators for strategic Lean management. *IFAC-PapersOnLine*. Volume 49, Issue 12, 2016, 65-70
- Cortés et al, 2017. El entorno de la industria 4.0 Implicaciones y perspectivas futuras. *ConCiencia Tecnológica*, ISSN-e 1405-5597, N°. 54 (julio-diciembre), 2017,. 33-45
- Damrath, 2012. *Increasing competitiveness of service companies: developing conceptual models for implementing Lean Management in service companies*.
- Deuse et al, 2015. *Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0*. Institut für Produktionssysteme, Technische Universität Dortmund, Dortmund, Germany. 99-109.
- Dhiman and Mohanty, 2010. HRM Practices, Attitudinal Outcomes and Turnover Intent: An Empirical Study in Indian Oil and Gas Exploration and Production Sector. *South Asian Journal of Management* . Oct-Dec2010, Vol. 17 Issue 4, 74-104.

- Dhungana et al, 2015. Smart factory product lines: a configuration perspective on smart production ecosystems. Proceedings of the 19th International Conference on Software Product Line July 2015, 201–210
- Diallo et al, 1995. Cost of quality in the new manufacturing environment. Management Accounting [USA], vol. 77, no. 2. 20-32
- Diamantopoulos, A., & Winklhofer, H. M. (2001). Index Construction with Formative Indicators: An Alternative to Scale Development. *Journal of Marketing Research*, 38(2), 269–277
- Díaz and Lozano, 2008. Comportamiento de la bibliotecología y las ciencias de la información en Cuba en el período 2005-2008. *ACIMED* v.18 n.6, 202-209
- Dickmann, 2007. Measuring the return on investment in international assignments: an action research approach. *The International Journal of Human Resource Management*. Volume 23, 2012 - Issue 16. Pages 3434-3454.
- Dijkstra, T.K. & Henseler, J. (2015). Consistent and asymptotically normal PLS estimators for linear structural equations. *Computational Statistics & Data Analysis*, 81(1), 10-23.
- Dijkstra, T.K., & Henseler, J. (2015) Consistent Partial Least Squares Path Modeling. *MIS Quarterly* 39 (2), 297 – 316
- Dombrowki & Mielke, 2014. Lean Leadership – 15 Rules for a Sustainable Lean Implementation. *Procedia CIRP* Volume 17, 2014, 565-570
- Dos Santos et al, 2015. Lean Manufacturing and Ergonomic Working Conditions in the Automotive Industry. *Procedia Manufacturing*. Volume 3, 2015, 5947-5954
- Drew, McCallum & Roggenhofer, 2004, *Objectif Lean*, Editions d'Organisation. Pacgrave Mcmillan. Houndsmills, Basingstoke, Hampshire RG21 6XS. ISBN 1-4039-1307-2
- Drolet et al, 2008. Regional mapping of gross light-use efficiency using MODIS spectral indices. *Remote Sensing of Environment* Volume 112, Issue 6, 16 June 2008, 3064-3078
- Falk, R. F., & Miller, N. B. (1992). *A primer for soft modeling*. Akron, OH: The University of Akron
- Foulloy et al, 2019. A fuzzy temporal approach to the Overall Equipment Effectiveness measurement. *Computers & Industrial Engineering*. Volume 127, January 2019, Pages 103-115
- Fornell, C. (1982). A second generation of multi- variate analysis: an overview. In Fornell, C. (Ed.), *A second generation of multivariate analysis* Vol. 1, 1–21
- Fornell, C., & Larcker, D. F. (1981). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *JMR, Journal of Marketing Research*, 18, 39–50.

- Fox & Subic, 2019. An Industry 4.0 Approach to the 3D Printing of Composite Materials. *Engineering Volume* 5, Issue 4, August 2019, 621-623
- Funk, 1995. Barriers and facilitators of research utilization An Integrative Review. *Nursing clinics of North America*. Volumen 30. Number 3. 395-407
- Ganiyusufoglu, 2013. How the industrial internet of things changes business models in different manufacturing industries. *International Journal of Innovation Management* Vol. 20, No. 08, 1640015 (2016)
- Gao et al, 2020. From Industry 4.0 to Robotics 4.0 - A Conceptual Framework for Collaborative and Intelligent Robotic Systems. *Procedia Manufacturing* Volume 46, 2020, 591-599
- Gefen, D., Rigdon, E. E., & Straub, D. (2011). An updated and extension to SEM guidelines for administrative and social science research. *Management Information Systems Quarterly*, 35(2), iii–xiv.
- Gibbons, 2006. Improving overall equipment efficiency using a Lean Six Sigma approach. Print ISSN: 1479-2494 Online ISSN: 1479-2753
- Gómez Bernabeu & Palací, 2003. El constructo «Orientación a la calidad total» y su medida: el Cuestionario OCT. *Psicothema* 2003. Vol. 15, nº 3, 433-439
- Gregori et al, 2018. Improving a production site from a social point of view: an IoT infrastructure to monitor workers condition. *Procedia CIRP* Volume 72, 2018, 886-891
- Haddara & Elragal, 2015. The Readiness of ERP Systems for the Factory of the Future. *Procedia Computer Science* Volume 64, 2015, 721-728
- Hair, J. F., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2011). PLS-SEM: Indeed a silver bullet. *Journal of Marketing Theory and Practice*, 19(2), 137–149.
- Hair, J. F., Sarstedt, M., Ringle, C. M., & Mena, J. A. (2012). An assessment of the use of partial least squares structural equation modeling in marketing research. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 40(3), 414-433.
- Hair Jr, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C., & Sarstedt, M. (2017). A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). 2nd edition. Sage Publications
- Hair, J., Hollingsworth, C. L., Randolph, A. B., & Chong, A. Y. L. (2017). An updated and expanded assessment of PLS-SEM in information systems research. *Industrial Management & Data Systems*, 117(3), 442–458.
- Handyside, 1997. *Genba Kanri: the discipline of real leadership in the workplace*. British Library Cataloguing in Publication Data. Handyside. ISBN 0-566-07898-8

- Hayes, A.F., Scharkow, M., 2013. The relative trustworthiness of inferential tests of the indirect effect in statistical mediation analysis. *Psychological Science* 24 (10), 1918–1927.
- Henseler, J. (2017a). Bridging Design and Behavioral Research With Variance-Based Structural Equation Modeling. *Journal of Advertising*, 46(1), 178–192.
- Henseler, J., Ringle, C. M., & Sinkovics, R. R. (2009). The use of partial least squares path modeling in international marketing. *Advances in International Marketing*, 20, 277-319.
- Henseler, J. (2018). Partial least squares path modeling: Quo vadis. *Quality & Quantity*.
- Henseler, J., Hubona, G., & Ray, P. A. (2016). Using PLS path modeling in new technology research: updated guidelines. *Industrial Management & Data Systems*, 116(1), 2–20.
- Henseler, J., Ringle, C.M. & Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 43 (1), 115-135
- Heras et al, 2009. Impacto competitivo de las herramientas para la gestión de la calidad. *Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa*. Volume 12, Issue 41, December 2009, 7-35
- Hicks, 2007. Lean information management: Understanding and eliminating waste. *International Journal of Information Management* Volume 27, Issue 4, August 2007, 233-249
- Ho K.M., 2010. Integrated lean TQM model for global sustainability and competitiveness. *The TQM Journal*, Vol. 22 No. 2, 143-158
- Hou Y, 2005. ICT and Lean Management: Will They Ever Get Along? *Communications & Strategies*, no. 59, 3rd quarter 2005, 53-68
- Hu et al, 2016. Cobalt-catalyzed sulfate radical-based advanced oxidation: A review on heterogeneous catalysts and applications. *Applied Catalysis B: Environmental* Volume 181, February 2016, 103-117
- Hua et al, 2008. Tract probability maps in stereotaxic spaces: Analyses of white matter anatomy and tract-specific quantification. *NeuroImage* Volume 39, Issue 1, 1 January 2008, 336-347
- J. Womack, D. Jones, D. Roos, 1991 *The Machine that Changed the World: The Story of Lean Production*. New York: 1st Harper Perennial Ed.
- Jędrzejczak, 2017. Net Working Capital Management Strategies in the Construction Enterprises Listed on the NewConnect Market. *Procedia Engineering* Volume 182, 2017, 306-313
- Jimenez et al, 2019. Improvement of Productivity and Quality in the Value Chain through Lean Manufacturing – a case study. *Procedia Manufacturing*. Volume 41, 2019, 882-889

- Joppen et al, 2019. Key performance indicators in the production of the future. *Procedia CIRP* Volume 81, 2019, 759-764
- José Moyano Fuentes, Pedro José Martínez Jurado, Juan Manuel Maqueira Marín, y Sebastián Bruque Cámara (2012). *Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa* 15 (2012) 105–116.
- Judge, W., Douglas, T., 1998. Performance implications of incorporating natural environmental issues into the strategic planning process: an empirical assessment. *J.Manage. Stud.* 35 (2), 241–262.
- Kagermann et al, 2013. Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group
- Koberg & Zühlke, 2015. Industry 4.0, Digitalisation and Artificial Intelligence (AI): Impact and implications for quality and environment management
- Kouri et al, 2008. The Principles And Planning Process Of An Electronic Kanban System. *Novel Algorithms and Techniques In Telecommunications, Automation and Industrial Electronics* 99-104
- Krafcik JF. 1988. Triumph of the lean production system. *Sloan Management Review.* 30(1), 41-52.
- Lasi et al, 2014. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering* volume 6, 239–242
- Lee et al, 2014. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment. *Product Services Systems and Value Creation. Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems*
- Lewandowski et al, 2013. Sequence-Specific Peptide Synthesis by an Artificial Small-Molecule Machine. *Science* 11 Jan 2013:Vol. 339, Issue 6116, 189-193
- Lewis, 2000. Lean production and sustainable competitive advantage. *International Journal of Operations & Production Management*, Volume 20, Number 8, 2000, 959-978
- Lindfords & Leiringer, 2002. Creating lean enterprises through process orientation. *Models for new business opportunities. First International Conference on Construction in the 21 st Century (CITC2002) “Challenges and Opportunities in Management and Technology”* 25-26 April, 2002, Miami, Florida, USA
- Li et al, 2020. The impact of digital technologies on economic and environmental performance in the context of industry 4.0: A moderated mediation model. *International Journal of Production Economics.* Volume 229.
- Li Tao et al, 2015. Silicene field-effect transistors operating at room temperature. *Nature Nanotechnology* volume 10, 227–231
- Lodgaard et al, 2016. Barriers to Lean Implementation: Perceptions of Top Managers, Middle Managers and Workers. *Procedia CIRP* Volume 57, 2016, 595-600

- Longo et al, 2017. Smart operators in industry 4.0: A human-centered approach to enhance operators' capabilities and competencies within the new smart factory context. *Computers & Industrial Engineering* Volume 113, November 2017, 144-159
- Lu, 2017. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration* Volume 6, June 2017, 1-10
- Lucey J, Bateman N, Hines P. 2005. Why major lean transitions have not been sustained. *Management Service*. 49(2), 9-13.
- Lucke et al, 2008. Smart Factory - A Step towards the Next Generation of Manufacturing. *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier* 115-11
- M. Rübmann et al. 2016 Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries.
- Martínez & Bedia, 2004. Is the hotel classification system a good indicator of hotel quality?: An application in Spain. *Tourism Management* Volume 25, Issue 6, December 2004, 771-775
- Martínez-Caro, Cegarra-Navarro & Alfonso-Ruiz, 2020. Digital technologies and firm performance: The role of digital organizational culture. *Technological Forecasting & Social Change* 154 (2020) 119962.
- Martínez Jurado & Moyano Fuentes. Lean production y gestión de la cadena de suministro en la industria aeronáutica. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa*. Volume 17, Issue 1, January–April 2011, 137-157
- Masood & Egger, 2019. Augmented reality in support of Industry 4.0—Implementation challenges and success factors. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Volume 58, August 2019, 181-195
- McKone, K.E., Schroeder, R.G., Cua, K.O. 2001. The impact of total productive maintenance on manufacturing performance. *Journal of Operations Management* 19 (1), 39–58.
- Meister et al, 2019. Manufacturing Analytics for problem-solving processes in production. *Procedia CIRP*. Volume 81, 2019, 1-6
- Mendoza-Martínez et al, 2014. Liderazgo y su Relación con Variables De Resultado: un Modelo Estructural Comparativo entre Liderazgo Transformacional y Transaccional en una Empresa de Entretenimiento en México. *Acta de Investigación Psicológica*. Volume 4, Issue 1, April 2014, 1412-1429
- Menon, A., Bharadwaj, S.G., Howell, R., 1996. The quality and effectiveness of marketing strategy: effects of functional and dysfunctional conflict in intra-organizational relationships. *J. Acad. Market. Sci.* 24 (4), 299–313

- Milne et al, 2015. Optimizing planned lead times for enhancing performance of MRP systems. *International Journal of Production Economics*. Volume 167, September 2015, 220-231
- Monden, 2011. *Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-In-Time*, 4th Edition. Institute of Industrial Engineers. ISBN 978-1-4665-0451-6.
- Mourtzis et al, 2017. Lean rules extraction methodology for lean PSS design via key performance indicators monitoring. *Journal of Manufacturing Systems* Volume 42, January 2017, 233-243
- Moyano Fuentes et al, 2012. El papel de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) en la búsqueda de la eficiencia: un análisis desde Lean Production y la integración electrónica de la cadena de suministro. *Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa*. Volume 15, Issue 3, July–September 2012, 105-116
- Müller, 2020. Industry 4.0 in the Context of the Triple Bottom Line of Sustainability: A Systematic Literature Review. *Customer Satisfaction and Sustainability Initiatives in the Fourth Industrial Revolution*. Pages 1-20.
- Muñoz et al, 2018. ¿Cómo mejorar las reuniones de un equipo de trabajo? *FMC - Formación Médica Continuada en Atención Primaria*. Volume 25, Issue 7, August–September 2018, 390-396
- Naslund, 2008. Lean, six sigma and lean sigma: fads or real process improvement methods? *Business Process Management Journal*. Vol. 14 No. 3, 269-287.
- Narayanan and Raman, 2004. *Aligning Incentives in Supply Chains*. *Harvard Business Review*. Issue November 2004.
- Naslund, 2008. Lean, six sigma and lean sigma: fads or real process improvement methods?. *Business Process Management Journal*. Vol. 14 No. 3, 269-287
- Nicoletti, 2013. Lean Six Sigma and digitize procurement. *International Journal of Lean Six Sigma*. Vol. 4 No. 2, 184-203
- Nunnally, J. C., & Bernstein, I. H. (1994). *Psychometric theory* (3rd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Liker & Meier, 2006. *The Toyota Way Fieldbook: a practical guide for implementing Toyota's 4Ps*. McGraw Hill. ISBN 0-07-144893-4
- Ohno T. 1988. *Toyota Production System: beyond large-scale production.*, New York: Productivity Press. XIX, 143 s.
- Paelke, 2015. *Augmented reality in the smart factory: Supporting workers in an industry 4.0. environment*. *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*

- Parker, S. 2003, "Longitudinal effects of lean production on employee outcomes and the mediating role of work characteristics", *Journal of Applied Psychology*, Vol. 88 No. 4, 620-34.
- Pay R. 2008. Everybody's jumping on the lean bandwagon, but many are being taken for a ride. *Industry Week*. 503-780-2014.
- Pedersen and Huniche, 2011. Determinants of lean success and failure in the Danish public sector: A negotiated order perspective. *International Journal of Public Sector Management*. Vol. 24 No. 5, 403-420
- Piszczalski, M. 2000. Lean versus information systems. *Automotive Manufacturing and Production* 112 (8), 26–28.
- Podsakoff, P. M., MacKenzie, S. B., Lee, J. Y., & Podsakoff, N. P. (2003). Common method biases in behavioral research: a critical review of the literature and recommended remedies. *Journal of Applied Psychology*, 88(5), 879–903. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.88.5.879>
- Poksinca et al, 2013. The daily work of Lean leaders – lessons from manufacturing and healthcare. *Total Quality Management & Business Excellence*. Volume 24, 2013 - Issue 7-8: QMOD 2011–2012
- Pugna et al, 2016. Using Six Sigma Methodology to Improve the Assembly Process in an Automotive Company. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* Volume 221, 7 June 2016, 308-316
- Quinn, R.E., Rohrbaugh, J., 1983. A spatial model of effectiveness criteria: towards a competing values approach to organizational analysis. *Manage. Sci.* 29 (3), 363–377.
- Rachna Shah a, Peter T. Ward. 2002 "Lean manufacturing: context, practice bundles, and performance" *Journal of Operations Management* 21 (2003) 129–149.
- Radziwon et al, 2014. The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions. *Procedia Engineering* Volume 69, 2014, 1184-1190
- Raki, 2014. An application of RFID in supply chain management to reduce inventory estimation error. *Uncertain Supply Chain Management*. Volume 2 Issue 2, 97-104
- Riebezos et al, 2009. Lean Production and information technology: Connection or contradiction? *Computers in Industry* Volume 60, Issue 4, May 2009, 237-247
- Reinartz, W., Haenlein, M., & Henseler, J. (2009). An empirical comparison of the efficacy of covariance-based and variance-based (SEM). *International Journal of Research in Marketing*, 26(4), 332–344.
- Ribeiro et al, 2019. The Impact of the Application of Lean Tools for Improvement of Process in a Plastic Company: a case study. *Procedia Manufacturing*. Volume 38, 2019, 765-775

- Roldán-Molina et al, 2017. A Comparison of Cybersecurity Risk Analysis Tools. *Procedia Computer Science* Volume 121, 2017, 568-575
- Rüttimann & Stöckli. 2016. Lean and Industry 4.0—Twins, Partners, or Contenders? A Due Clarification Regarding the Supposed Clash of Two Production Systems. *Journal of Service Science and Management*, 2016, 9, 485-500.
- Sahal, Brelin & Ali, 2020. Big data and stream processing platforms for Industry 4.0 requirements for a predictive maintenance use case. *Journal of Manufacturing Systems* Volume 54, January 2020, 138-151
- Salo, J., 2006. Business relationship digitisation: what do we need to know before embarking on such activities? *J. Electron. Comm. Organ.* 4 (4), 75–93.
- Sanders et al, 2016. Industry 4.0 Implies Lean Manufacturing: Research Activities in Industry 4.0 Function as Enablers for Lean Manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*. Vol. 9, Iss. 3, 811-833.
- Sanders & Wulfsberg, 2015. Industrie 4.0: Shopfloor Management im Wandel. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*: Vol. 110, No. 10, 653-656.
- Saurin & Ferreira, 2009. The impacts of lean production on working conditions: A case study of a harvester assembly line in Brazil. *International Journal of Industrial Ergonomics* Volume 39, Issue 2, March 2009, 403-412
- Schmidt et al, 2015. Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results. *International Conference on Business Information Systems*. Business Information Systems 16-27
- Schuh et al, 2015. Promoting Work-based learning through Industry 4.0. The 5th conference of learning factories 2015. *Procedia CIRP* 32. 82-87.
- Shadur, M., Rodwell, J. and Bamber, G. 1995. “Factors predicting employees’ approval of lean production”, *Human Relations*, Vol. 48 No. 12,. 1403-26.
- Shah & Ward, 2002. Aligning supply chain management characteristics and interorganizational information system types: an exploratory study. *IEEE Transactions on Engineering Management*. Volume: 49 , Issue: 3, 282 - 292
- Shah & Ward, 2007. Defining and developing measures of lean production. *Journal of Operations Management* Volume 25, Issue 4, June 2007, 785-805
- Shahrubudin et al, 2019. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing* Volume 35, 2019, 1286-1296

- Shadur et al. 1995; Factors Predicting Employees' Approval of Lean Production. ADLER, P. S. Time-and-motion regained. *Harvard Business Review*, 1993, 71(1), 97-108.
- Sharma & Pankaj, 2016. Scope of Optimising I.C.T Objectives Applying Lean Principles: An Exploratory Review.
- Shingo, 1989. A study of the Toyota production system: From an Industrial Engineering Viewpoint. Published October 1, 1989 by Productivity Press. ISBN 9780915299171
- Shmueli, G., Ray, S., Velasquez Estrada, J.M., Chatla, S.B., 2016. The elephant in the room: Predictive performance of PLS models. *Journal of Business Research* 69 (10), 4552–4564. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.03.049>.
- Shrouf et al, 2014. Smart factories in Industry 4.0: A review of the concept and of energy management approached in production based on the Internet of Things paradigm. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*.
- Spath et al, 2013. Produktionsarbeit der Zukunft –Industrie 4.0. Fraunhofer-Institut für Arbeit und organization IAO. ISBN: 978-3-8396-0570-7
- Sosik, J. J., Kahai, S. S., & Piovosio, M. J. (2009). Silver bullet or voodoo statistics?: A primer for using the partial least squares data analytic technique in group and organization research. *Group and Organization Management*, 34(1), 5-36.
- Sugimori Y, Kusunoki K, Cho F, Uchikawa S. 1977. Toyota Production System and kanban system materialization of just-in-time and respect-for-human system. *International Journal of Production Research*, 15(6), 553-564.
- Streukens, S., & Leroi-Werelds, S. (2016). Bootstrapping and PLS-SEM: A step-by-step guide to get more out of your bootstrap results. *European Management Journal*, 34(6), 618–632.
- Takeda, 2006. Method and program of collecting performance data for storage network. Performance evaluation by tracing or monitoring for systems. US7107273B2
- Talavera, 2004. Development and validation of TQM constructs. *Gadjah Mada International Journal of Business* September 2004, Vol. 6, No. 3, 335—381
- Tarn et al, 2002. Exploring the rationales for ERP and SCM integration. *Industrial Management & Data Systems*. Vol. 102 No. 1, 26-34.

- Tepes et al, 2015. Smart tool, machine and special equipment: overview of the concept and application for the toolmaking factory of the future. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* volume 37, 1039–1053
- Trappey et al, 2017. A review of essential standards and patent landscapes for the Internet of Things: A key enabler for Industry 4.0. *Advanced Engineering Informatics* Volume 33, August 2017, 208-229
- Upadhye, Deshmukh & Garg. 2016 Lean manufacturing system implementation barriers: an interpretive structural modelling approach. *Int. J. Lean Enterprise Research*, Vol. 2, No. 1, 46–65.
- Valdez et al, 2015. Quality and innovation as drivers for manufacturing competitiveness of automotive parts suppliers. *The TQM Journal*. Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print, 100-112
- Van Brussel et al, 1998. Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. *Computers in Industry* Volume 37, Issue 3, November 1998, 255-274
- Veres et al, 2018. Case study concerning 5S method impact in an automotive company. *Procedia Manufacturing* Volume 22, 2018, 900-905
- Vidal, M. 2007, “Lean production, worker empowerment, and job satisfaction”, *Critical Sociology*, Vol. 33, 247-78.
- Wan et al, 2015. A review of industrial wireless networks in the context of Industry 4.0. *Wireless Networks* volume 23, 23–41
- Ward & Zhou. 2006. Impact of Information Technology Integration and Lean/Just-In-Time Practices on Lead-Time Performance. *Decision Sciences* Volume 37 Number 2, 260-274
- Weiss et al, 2014. Digital service innovation and smart technologies: developing digital strategies based on Industry 4.0 and product service systems for the renewal and energy sector. *RESER*, University of Naples "Federico II" 2016 274-291
- Werts, C. E., Linn, R. L., & Jöreskog, K. G. (1974). Interclass reliability estimates: testing structural assumptions. *Educational and Psychological Measurement*, 34, 25–33.
- Weyer et al, 2015. Towards Industry 4.0 - Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *IFAC-Papers online* Volume 48, Issue 3, 2015, 579-584
- Wickens, P. 1987, *The Road to Nissan*. London: Macmillan.
- Wiendahl & Lutz, 2002. Production in Networks. *CIRP Annals* Volume 51, Issue 2, 2002, 573-586
- Wold, H. (1985). Systems analysis by partial least squares. In Nijkamp, P., Leitner, H., & Wrigley, N. (Eds.), *Measuring the unmeasurable* (pp. 221–251). Dordrecht, The Netherlands: Martinus Nijhoff.

Womack, 1990. The machine that changed the world: The story of lean production--Toyota's secret weapon in the global car wars that is now revolutionizing world industry.

Womack JP, Jones DT. Lean thinking, 1996. New York: Simon & Schuster, Inc.

Womack JP. 2004. "Lean Information Management", e-letter from the Lean Enterprise Institute, November.

ANEXO

CONTINUOUS IMPROVEMENT CULTURE, DIGITAL TRANSFORMATION AND INTERNATIONAL WORK DEVELOPMENT SURVEY

INSTRUCTIONS AND REMARKS:

- The survey will be totally anonymous.
- Please, answer all the questions. if you are not sure about the answer, it doesn't matter, we are interested about your estimation.
- There aren't right or wrong answers, the aim is only to know your opinion about these topics.
- The majority of the questions are about to answer from 1 (totally disagree) to 7 (totally agree). Please select the most appropriate value in each case.
- If you have any doubt, don't hesitate to contact us.

If you wish to receive a copy of the final results of the survey, please indicate an email address here: _____

PRELIMINAR QUESTIONS

Please, indicate your current position: <input type="checkbox"/> Top Management <input type="checkbox"/> Head of Department <input type="checkbox"/> Middle Management <input type="checkbox"/> Staff <input type="checkbox"/> Other	How long have you been working for the company? <input type="checkbox"/> 0-2 years <input type="checkbox"/> 3-5 years <input type="checkbox"/> 6-9 years <input type="checkbox"/> 10-14 years <input type="checkbox"/> More than 14 years	How many people you are managing? <input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> 1-5 <input type="checkbox"/> 6-20 <input type="checkbox"/> 10-14 years <input type="checkbox"/> More than 14 years
Please, indicate your nationality: <input type="checkbox"/> _____	Please, indicate your range of age: <input type="checkbox"/> 18-25 years old <input type="checkbox"/> 26-35 years old <input type="checkbox"/> 36-50 years old <input type="checkbox"/> More than 51 years old	Please, indicate your department/field: <input type="checkbox"/> _____

CONTINUOUS IMPROVEMENT CULTURE MATURITY

P1. The managers of my Company...	Totally Disagree	Totally Agree
Are clearly involved with the continuous improvement inside the company	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/>	
Have as an important target the development of a continuous improvement management system	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/>	
P2. In my Company...	Totally Disagree	Totally Agree
Shop-floor employees undergo cross functional training	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/>	
We frequently are in close contact with our customer, trying to measure their needs and satisfaction level	1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/>	

Decisions taken are based on data	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
Operations performance data and indicators are integrated in the development of continuous improvement strategies	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
P3. My Company...	Totally Disagree			Totally Agree			
Continuously analyzes the job to find better ways to do the things	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
Follow-up meetings are performed regularly	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>

DIGITAL TRANSFORMATION / DIGITALIZATION

P4. In my company....	Totally Disagree			Totally Agree			
The information systems of your organization generate data in real time along the value chain (information from machinery or processes)	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
There is a high degree of traceability of information during the production process of your company	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
The level of quality of the information generated by the information systems of your organization is high	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>

RESULTS

P5. In comparison with other companies, my Company...	Totally Disagree			Totally Agree			
It is growing more	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
It's more profitable	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>
It has higher productivity	1 <input type="checkbox"/>	2 <input type="checkbox"/>	3 <input type="checkbox"/>	4 <input type="checkbox"/>	5 <input type="checkbox"/>	6 <input type="checkbox"/>	7 <input type="checkbox"/>

