

Paula Morella Avinzano

Indicadores 4.0: estudio, definición e implementación de indicadores en sistemas ciberfísicos

Director/es

Royo Sánchez, Jesús Antonio
Lambán Castillo, María Pilar

EXTRACTO

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>

El presente documento es un extracto de la tesis original depositada en el Archivo Universitario.

En cumplimiento del artículo 14.6 del Real Decreto 99/2011, de 28 de enero, por el que se regulan las enseñanzas oficiales de doctorado, los autores que puedan verse afectados por alguna de las excepciones contempladas en la normativa citada deberán solicitar explícitamente la no publicación del contenido íntegro de su tesis doctoral en el repositorio de la Universidad de Zaragoza. Las situaciones excepcionales contempladas son:

- Que la tesis se haya desarrollado en los términos de un convenio de confidencialidad con una o más empresas o instituciones.
- Que la tesis recoja resultados susceptibles de ser patentados.
- Alguna otra circunstancia legal que impida su difusión completa en abierto.



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral [Extracto]

INDICADORES 4.0: ESTUDIO, DEFINICIÓN E
IMPLEMENTACIÓN DE INDICADORES EN
SISTEMAS CIBERFÍSICOS

Autor

Paula Morella Avinzano

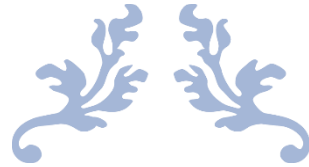
Director/es

Royo Sánchez, Jesús Antonio
Lambán Castillo, María Pilar

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Escuela de Doctorado

Programa de Doctorado en Ingeniería de Diseño y Fabricación

2022



INDICADORES 4.0: ESTUDIO, DEFINICIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE INDICADORES EN SISTEMAS CIBERFÍSICOS

Autora: Paula Morella
Directores: Pili Lambán y Jesús Royo



**Departamento de
Ingeniería de
Diseño y Fabricación
Universidad Zaragoza**



OCTUBRE DE 2022
UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

*“Lo que no se puede medir no se puede controlar;
lo que no se puede controlar no se puede gestionar;
lo que no se puede gestionar no se puede mejorar”*

Peter Drucker

Agradecimientos

Puede que esta sea la última oportunidad que tenga para dar las gracias a toda la gente que me ha acompañado durante estos años en, así que permitidme que me explye porque este trabajo no es mío, sino nuestro.

En primer lugar, quiero dar las gracias a mis directores, Pili y Jesús por darme la oportunidad de ser parte de su grupo de trabajo y acogerme como una más dentro de su familia en UNIZAR.

Jesús, si supieras la de veces que cuando mencionabas el MOPL y el doctorado yo pensaba: “bastante tengo con terminar el máster de industriales...”. Luego llegaste un día hablándome de un centro de investigación, me enseñaste unos datos de una máquina en tiempo real y aquí estoy unos cuantos años después agradeciéndote que me hablastes del MOPL, del doctorado y que contases conmigo casi al comienzo de la colaboración con TECNALIA, pero sobre todo, que hayas sido tan generoso de compartir todo lo que sabes y eres conmigo. Si algo más tengo que agradecerte enormemente, es que me presentaras a Pili, primero profesora, tutora, directora y desde hace tiempo también amiga. Gracias, Pili, porque estoy segura de que sin ti no hubiera llegado hasta aquí. Tanto en lo profesional como en lo personal eres una gran persona y espero que recojas todos los méritos que has sembrado en estos años y tengamos muchas cosas que celebrar dentro de poco.

A todo el equipo de TECNALIA por colaborar siempre que ha sido necesario, muy en especial a Juan Carlos por la ayuda, la confianza y por apoyar siempre las ideas que han surgido a través de la cátedra.

Agradecer también al personal del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación por ayudarme siempre que lo he necesitado, especialmente a la gente del taller por su colaboración.

A todos mis amigos por estar siempre ahí, en especial a Helena y a Mario, por ser siempre un gran apoyo.

Y a los mejores padres que alguien podría desear, gracias por ponérmelo siempre tan fácil.

Resumen

La llegada de la cuarta revolución industrial, acuñada como Industria 4.0, supone un cambio de paradigma para el entorno industrial. Cada vez son más las empresas que buscan obtener una ventaja competitiva a través de la implementación de tecnologías propias de la Industria 4.0.

En particular, este trabajo se centra en el estudio de la implementación de sistemas ciberfísicos para la adquisición de datos en tiempo real con los que desarrollar y calcular indicadores novedosos y redefinir los ya existentes adaptándolos a este tipo de cálculos y sistemas, y permitiendo su visualización en tiempo real en dashboards.

Los indicadores que se han definido atienden a tres ámbitos que se consideran clave hoy en día para la toma de decisiones en el entorno industrial y que son: el ámbito productivo, el medioambiental y el económico. La visualización de estos indicadores en tiempo real no solo aporta dinamismo y flexibilidad a la toma de decisiones, sino que permite evaluar la situación atendiendo a estos tres ámbitos al mismo tiempo, pudiendo determinar si una acción impacta positiva o negativamente en ellos.

En definitiva, este trabajo propone una metodología para la implementación de sistemas ciberfísicos siguiendo un estándar, así como la definición y caracterización de una serie de indicadores que pueden ser implementados en estos sistemas para su visualización en tiempo real, ofreciendo también una propuesta de metodología estándar a la hora de llevar a cabo esa definición y caracterización. De manera que, la metodología propuesta y desarrollada en este trabajo puede servir de guía para la implementación de este tipo de sistemas en cualquier entorno.

Finalmente, la metodología propuesta se ha puesto en práctica en cuatro casos de uso, dos de ellos en un entorno de laboratorio y otros dos en entornos industriales reales. De esta forma, se aportan al mundo investigador diferentes casos de éxito de implementación de sistemas ciberfísicos para el cálculo y la visualización de indicadores en tiempo real, puesto que hasta el momento se había detectado una falta de casos de éxito en la literatura analizada. Además, se pone de manifiesto la transferencia del estudio llevado a cabo en el laboratorio a entornos industriales y como la implementación de este tipo de proyectos resulta valiosa para el tejido industrial.

Contenido

Agradecimientos.....	IV
Resumen.....	VI
Índice de figuras	X
Índice de tabla	XII
Listado de abreviaturas	XIV
1. Introducción.....	1
1.1. Objetivos y alcance	1
2. Estado del arte.....	4
2.1. La industria 4.0.....	4
2.2. Los sistemas ciberfísicos	5
2.2.1. Proceso de implementación de un CPS.....	7
2.3. El nuevo paradigma de la cadena de suministro: la cadena de suministro verde	9
2.3.1. ¿Qué es la cadena de suministro verde?	9
2.3.2. ¿Está la cadena de suministro verde ligada a la teoría de Lean Manufacturing?	10
2.3.3. ¿Qué hay de la Industria 4.0?.....	11
2.4. Key Performance Indicators y la importancia del tiempo real.....	14
2.5. Consideraciones finales	17
3. Definición del modelo.....	19
3.1. Implementación de CPS	19
3.1.1. Nivel 1: conexión inteligente.....	19
3.1.2. Nivel 2: transformación de datos en información.....	19
3.1.3. Nivel 3: cibernético	21
3.1.4. Nivel 4: cognición	21
3.1.5. Nivel 5: configuración.....	21
3.2. Definición y caracterización de KPIs.....	22
3.2.1. KPIs productivos	23
3.2.2. KPIs económicos.....	31
3.2.3. KPIs de sostenibilidad.....	43
4. Casos de uso	53
4.1. Caso A) Máquina fresadora HAAS.....	53
Nivel 1: conexión inteligente	53
Nivel 2: transformación de datos en información	54
Nivel 4: cognición.....	58
Nivel 5: configuración	71
4.2. Caso B) Máquina torno PINACHO	73
Nivel 1: conexión inteligente	73
Nivel 2: transformación de datos en información	74

Nivel 4: cognición.....	76
Nivel 5: configuración	89
4.3. Caso C) Máquina repujadora en empresa X.....	91
Nivel 1: conexión inteligente	91
Nivel 2: transformación de datos en información	92
Nivel 4: cognición.....	93
Nivel 5: configuración	97
4.4. Caso D) Máquina trituradora en empresa Y	97
Nivel 1: conexión inteligente	97
Nivel 2: transformación de datos en información	98
Nivel 4: cognición.....	99
Nivel 5: configuración	101
5. Conclusiones, líneas futuras y resultados de la investigación	102
6. Bibliografía	107
Anexos	119
Anexo A. Análisis de la revisión de la literatura	120
Anexo B. Desarrollo de software	126
B.1. Diagramas de flujo para el cálculo de indicadores productivos	126
B.2. Diagramas de flujo para el cálculo de indicadores económicos	131
B.3. Diagrama de flujo para el cálculo de indicadores sostenibles	134

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama de planificación de la tesis	3
Figura 2. Tecnologías 4.0.....	4
Figura 3. Mapa conceptual de un CPS. (Asare et al., 2012)	6
Figura 4. Evolución temporal de publicaciones sobre CPS.....	6
Figura 5. Manufacturing Hype-Cycle Gartner 2018 (Gartner, 2018).	7
Figura 6. 5 niveles de implementación de la arquitectura de un CPS.....	8
Figura 7. Seis grandes pérdidas de Nakajima	10
Figura 8. Tipo de publicación a lo largo del tiempo	13
Figura 9. Analizador de red CVM-MINI	19
Figura 10. Gráfico descriptivo sobre el cálculo del OEE.....	24
Figura 11. Diagrama de flujo para el cálculo del OEE.....	25
Figura 12. Visualización del cálculo de la SMR.....	26
Figura 13. Diagrama de flujo para el cálculo de la SMR.....	27
Figura 14. Diagrama de flujo para el cálculo del MTBF.....	28
Figura 15. Diagrama de flujo para el cálculo del MTTR.....	29
Figura 16. Diagrama de flujo para el cálculo de la vida de la herramienta	30
Figura 17. Diagrama de flujo para el cálculo del FF	31
Figura 18. Desglose de costes de fabricación	32
Figura 19. Diagrama de flujo para el cálculo de coste de fabricación.....	35
Figura 20. Diagrama de bloques del coste de mantenimiento	36
Figura 21. Diagrama de flujo del coste de mantenimiento.....	38
Figura 22. Diagrama de bloques para cálculo CLI	43
Figura 23. Diagrama de flujo para el cálculo de huella de carbono.....	44
Figura 24. Diagrama de flujo para el cálculo del EEOI.....	45
Figura 25. Diagrama de flujo para el cálculo del ECL	47
Figura 26. Diagrama de bloques para cálculo LCC	48
Figura 27. CBS del LCC.....	49
Figura 28. Diagrama de flujo para el cálculo del LCC	52
Figura 29. (a) Haas VF-3. (b) Trunnion TR 160.	53
Figura 30. Instalación de dispositivos para la implementación de CPS en HAAS.....	54
Figura 31. Descripción de operaciones de la pieza del ensayo.....	57
Figura 32. Esquema de cálculo de KPIs en máquina HAAS	59
Figura 33. Visualización OEE Máquina HAAS en Grafana.....	60
Figura 34. Visualización SMR Máquina HAAS en Grafana.....	60
Figura 35. Visualización de MTBF y MTTR Máquina HAAS en Grafana.....	61
Figura 36. Visualización vida útil herramienta Máquina HAAS en Grafana	62
Figura 37. Visualización FF Máquina HAAS en Grafana	63
Figura 38. Visualización coste fabricación Máquina HAAS en Grafana.....	65
Figura 39. Visualización coste de mantenimiento Máquina HAAS en Grafana	66
Figura 40. Visualización CLI Máquina HAAS en Grafana	67
Figura 41. Visualización huella de carbono Máquina HAAS en Grafana	68
Figura 42. Visualización ECL Máquina HAAS en Grafana	69
Figura 43. Visualización LCC Máquina HAAS en Grafana	71
Figura 44. División de los paneles KPIs para HAAS en Grafana.....	71
Figura 45. Panel producción HAAS.....	72
Figura 46. Panel mantenimiento HAAS.....	72

Figura 47. Panel huella de carbono HAAS	72
Figura 48. Panel pérdidas HAAS	73
Figura 49. Torno Pinacho Rayo 180.....	73
Figura 50. Colocación de sistemas para la implementación de un CPS en PINACHO	74
Figura 51. Referencia 900 de PINACHO para realización de ensayos	75
Figura 52. (a) Referencia 901 (b) Referencia 902 para realización de ensayo en PINACHO	76
Figura 53. Visualización OEE Máquina PINACHO en Grafana	78
Figura 54. Visualización SMR para Máquina PINACHO en Grafana	79
Figura 55. Visualización MTBF y MTTR para Máquina PINACHO en Grafana	80
Figura 56. Visualización de vida útil de la herramienta para Máquina PINACHO en Grafana	80
Figura 57. Visualización FF para Máquina PINACHO en Grafana	81
Figura 58. Visualización coste fabricación Máquina PINACHO en Grafana	84
Figura 59. Visualización coste de mantenimiento Máquina PINACHO en Grafana	85
Figura 60. Visualización CLI Máquina PINACHO en Grafana	86
Figura 61. Visualización huella de carbono Máquina PINACHO en Grafana.....	87
Figura 62. Visualización EEOI Máquina PINACHO en Grafana	88
Figura 63. Visualización ECL Máquina PINACHO en Grafana	89
Figura 64. División de los paneles KPIs para PINACHO en Grafana	89
Figura 65. Panel producción PINACHO.....	90
Figura 66. Panel mantenimiento PINACHO.....	90
Figura 67. Panel sostenibilidad PINACHO	90
Figura 68. Panel pérdidas PINACHO	91
Figura 69. Estructura de los archivos adquiridos por el sistema.....	92
Figura 70. Visualización de tiempos productivos e improductivos en XData	94
Figura 71. Visualización de los tres aspectos que componen el OEE en XData	94
Figura 72. Visualización de la SMR en XData	95
Figura 73. Visualización de la Huella de carbono en XData	96
Figura 74. Visualización del coste energético en XData.....	97
Figura 75. Visualización del OEE para el molino en Grafana.....	100
Figura 76. Visualización de huella de carbono para molino en Grafana.....	101
Figura 77. Visualización del OEE y huella de carbono mensual para molino en Grafana	101
Figura 78. Diagrama de flujo para el cálculo del OEE.....	126
Figura 79. Diagrama de flujo para el cálculo de la SMR.....	127
Figura 80. Diagrama de flujo para el cálculo del MTBF y el MTTR.....	128
Figura 81. Diagrama de flujo para el cálculo de la vida útil de la herramienta.....	129
Figura 82. Diagrama de flujo para el cálculo de la FF.....	130
Figura 83. Diagrama de flujo para el cálculo del coste de fabricación.....	131
Figura 84. Diagrama de flujo para el cálculo del coste de mantenimiento	132
Figura 85. Diagrama de flujo para el cálculo del CLI	133
Figura 86. Diagrama de flujo para el cálculo de la huella de carbono	134
Figura 87. Diagrama de flujo para el cálculo del EEOI.....	135
Figura 88. Diagrama de flujo para el cálculo del ECL	136
Figura 89. Diagrama de flujo para el cálculo del LCC	137

Índice de tabla

Tabla 1. Variables adquiridas a través del analizador de red.....	20
Tabla 2. Tabla descriptiva para la definición de KPIs	23
Tabla 3. Descripción OEE.....	25
Tabla 4. Descripción SMR.....	27
Tabla 5. Descripción MTBF	28
Tabla 6. Descripción del MTTR.....	29
Tabla 7. Descripción vida de la herramienta	30
Tabla 8. Descripción FF.....	31
Tabla 9. Descripción cálculo del coste de fabricación.....	34
Tabla 10. Descripción cálculo de coste de mantenimiento	38
Tabla 11. Relación de costes con parámetros del OEE	40
Tabla 12. Descripción CLI	42
Tabla 13. Descripción huella de carbono	44
Tabla 14. Descripción EEOI.....	45
Tabla 15. Descripción ECL.....	47
Tabla 16. Descripción LCC	52
Tabla 17. Variables adquiridas del PLC de la HAAS.....	54
Tabla 18. Tiempos adquiridos manualmente de la observación del ensayo	57
Tabla 19. Equivalencia entre variables para el cálculo del OEE en la HAAS.....	59
Tabla 20. Equivalencia entre variables para el cálculo de la SMR en la HAAS	60
Tabla 21. Equivalencia entre variables para el cálculo de MTBF y MTTR en HAAS	61
Tabla 22. Equivalencia entre variables para el cálculo de Vida útil de la herramienta en HAAS	62
Tabla 23. Tipos de fallo y duración.....	63
Tabla 24. Equivalencia entre variables para el cálculo de coste de fabricación en HAAS	64
Tabla 25. Equivalencia entre variables para Coste mantenimiento en HAAS.....	66
Tabla 26. Equivalencia entre variables para CLI en HAAS.....	67
Tabla 27. Equivalencia entre variables para Huella de carbono en HAAS	68
Tabla 28. Equivalencia entre variables para ECL en HAAS	69
Tabla 29. Equivalencia entre variables para LCC en HAAS.....	70
Tabla 30. Adquisición de variables del PLC del Pinacho.....	74
Tabla 31. Descripción temporal del ensayo en PINACHO	76
Tabla 32. Equivalencia entre variables para el cálculo del OEE en el PINACHO	77
Tabla 33. Equivalencia entre variables para el cálculo de la SMR en el PINACHO.....	78
Tabla 34. Equivalencia entre variables para el cálculo de MTBF y MTTR en PINACHO	79
Tabla 35. Equivalencia entre variables para el cálculo de Vida útil de la herramienta en PINACHO	80
Tabla 36. Tipos de fallo y duración PINACHO.....	81
Tabla 37. Equivalencia entre variables para el cálculo de coste de fabricación en PINACHO	83
Tabla 38. Equivalencia entre variables para Coste mantenimiento en PINACHO	85
Tabla 39. Equivalencia entre variables para CLI en PINACHO	86
Tabla 40. Equivalencia entre variables para Huella de carbono en PINACHO	87
Tabla 41. Equivalencia entre variables para EEOI en PINACHO	87
Tabla 42. Equivalencia entre variables para ECL en PINACHO	88
Tabla 43. Variables del sistema de máquinas repujadoras.....	92
Tabla 44. Equivalencia entre variables para el cálculo del OEE en la repujadora.....	94
Tabla 45. Equivalencia entre variables para el cálculo de la SMR en la repujadora	95

Tabla 46. Equivalencia entre variables para el cálculo de la huella de carbono en la repujadora	96
Tabla 47. Variables adquiridas del sistema en el molino	98
Tabla 48. Equivalencia entre variables para el cálculo del OEE en el molino	99
Tabla 49. Equivalencia entre variables para Huella de carbono en molino	100

Listado de abreviaturas

BEC	Consumo energético por averías
C_{Op fab}	Coste operacionales de fabricación
C_a	Coste de almacenamiento
C_{adq}	Coste de adquisición
C_{AdqRI}	Coste de adquisición de repuestos iniciales
C_{AdqSoft}	Coste de adquisición de software
CBS	Cost breakdown structure
C_{cons}	Coste consumibles
C_{dis pza}	Coste diseño pieza
CE	Circular economy
C_{eli}	Coste de eliminación
CEP	Coste estudio previo
CEPI	Circular economy performance indicator
C_{eq inf}	Coste equipos informáticos
C_{esp-rep}	Coste del espacio ocupado por el repuesto
CEV	Coste estudio de viabilidad
C_{f prev}	Coste fase previa
C_{fab}	Coste fabricación
C_{fallo}	Coste de fallos
C_i	Coste de intervención
C_{Im}	Coste de implementación
C_{Inf}	Coste infraestructura
C_{inp}	Coste de ingresos no percibidos
C_{inv}	Coste de inventario
CLI	Cost Loss Indicator
C_m	Coste de mantenimiento
C_{maq}	Coste máquina
C_{mod}	Coste mano de obra directa
C_{mp}	Coste materia prima
C_{MRI}	Coste materiales de repuesto iniciales
C_{nave}	Coste de la nave
C_{obs}	Coste de obsolescencia
C_{Op}	Coste operario
C_{oper}	Coste operacionales
C_{Oport}	Coste de oportunidad
C_{perd}	Coste de pérdidas
CPI	Cost performance indicator
CPR	Cost performance ratio
C_{prog}	Coste programación
CPS	Cyber-Physical System
C_{rep}	Coste de repuestos
C_{RI}	Coste de repuestos iniciales
C_{si}	Coste de sobreinversión
C_{soft}	Coste de software
C_{SP}	Coste selección de proveedor

D	Disponibilidad
EC	Consumo energético
ECL	Energy consumption losses
EEOI	Energy Efficiency Operational Indicator
FF	Frecuencia de fallo
GEI	Gases de efecto invernadero
GSC	Green supply chain
HC	Huella de carbono
IoT	Internet of things
KPI	Key Performance Indicator
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Life Cycle Cost
MTBF	Mean time before failure
MTTR	Mean time to repair
Nd-alm	Número de días almacenado
n^o_{eq}	Número de equipos
n^o_{op}	Número de operarios
ODS	Objetivo de desarrollo sostenible
OECL	Overall Equipment Cost Loss
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PBC	Performance Based Cost
PC	Pérdidas de coste
PD	Pérdidas por disponibilidad
PM	Pérdidas de material
P_{maq 2ª opción}	Precio máquina segunda opción
P_{maq comprada}	Precio máquina comprada
PNP	Paradas no planificadas
PO	Pérdidas de oportunidad
PQ	Pérdidas por calidad
PR	Pérdidas por rendimiento
Q	Calidad
R	Rendimiento
RAEE	Real Decreto de Aparatos Eléctrico y Electrónicos
R_{jEC}	Consumo energético por rechazo
RQs	Research questions
RSEC	Consumo energético por velocidad reducida
RwEC	Consumo energético por rework
SLR	Systematic literature review
SMR	Serie mínima rentable
SSEC	Consumo energético por microparadas
SUEC	Consumo energético asociado a esperas
t_{prep}	tiempo preparación
t_{prod}	tiempo producción
WoS	Web of Science

1. Introducción

La industria 4.0, o cuarta revolución industrial, supone un cambio en el modelo de industria tradicional que existía hasta ahora. Las nuevas tecnologías 4.0 aportan dinamismo y flexibilidad a las empresas, sin embargo, su implementación y uso no está tan avanzado. Todavía resulta complicado encontrar casos de éxito en la literatura en los que se presente una metodología completa de implementación de tecnologías habilitadoras de la industria 4.0 para el cálculo y la visualización de indicadores en tiempo real.

Este trabajo se centra en emplear la tecnología Internet of Things (IoT) y los sistemas ciberfísicos (CPS, por sus siglas inglés Cyber-Physical Systems) para la captura de datos en tiempo real de sistemas industriales, principalmente sistemas de fabricación, con los que desarrollar nuevos indicadores en tiempo real, o bien, proponer nuevas metodologías de cálculo de los ya existentes para implementar finalmente todos estos indicadores en un panel de visualización o dashboard.

La implementación de tecnologías de la industria 4.0 contribuye a que las empresas puedan responder de forma más rápida y flexible a los cambios en el mercado (Bayhan et al., 2020). En concreto, la incorporación de tecnologías CPS en el equipo logístico interno puede reducir los costes operativos y logísticos y los tiempos del ciclo de producción según afirma PwC (una de las consultoras Big Four), que lo considera como uno de los beneficios de la implementación de CPS (PwC, 2016).

El desarrollo de indicadores se centra en tres partes fundamentales a día de hoy en las empresas que son: la parte productiva, la parte económica y la parte medioambiental. La implementación de indicadores para estas tres áreas permite profundizar en la búsqueda de sistemas de medida multicriterio que atiendan a estas tres áreas al mismo tiempo. También se presta atención a la parte de indicadores de mantenimiento que puede desarrollarse más fácilmente gracias a la industria 4.0 y al uso de datos en tiempo real.

En definitiva, este trabajo busca combinar el diseño y la definición de indicadores con la implementación de CPS, ya que estos permiten trabajar en tiempo real con las variables que componen los indicadores y, por tanto, definiendo nuevos indicadores o redefiniendo los ya existentes se pueden llevar a cabo y mostrar sus cálculos en tiempo real. Además, este trabajo también busca la toma de decisiones multidisciplinar a través de la definición de indicadores que atiendan al mismo tiempo a la parte productiva, la medioambiental y la económica, en lugar de atender de forma individual a alguno de estos criterios.

1.1. Objetivos y alcance

Los objetivos generales planteados para el desarrollo de esta tesis son:

- Aplicar las tecnologías de la industria 4.0 para el desarrollo de CPS.
- Profundizar y estandarizar las fases de implementación de dichos sistemas.
- Emplear los CPS para adquirir datos en tiempo real y monitorizar los sistemas.
- Procesar y trabajar los datos adquiridos en tiempo real.
- Estudiar y analizar los indicadores existentes y su uso actual, identificando las limitaciones que tiene la literatura y los estándares al respecto.
- Desarrollar indicadores e implementarlos en los CPS para obtener información valiosa en tiempo real, facilitando y agilizando la toma de decisiones.

- Emplear y promover el uso de las tecnologías 4.0 para un desarrollo de las empresas más sostenible, a través de la implementación de indicadores de sostenibilidad, como, por ejemplo, el cálculo de la huella de carbono y del consumo energético.
- Facilitar la toma de decisiones en las empresas a partir de indicadores que permitan atender a tres ámbitos distintos (económico, productivo y medioambiental) a la vez y en tiempo real.
- Plasmar todos los indicadores en un panel de control, aportando diagramas y otros recursos que permitan la fácil comprensión de las máquinas por parte del usuario en tiempo real.

Estos objetivos se han desarrollado y se plasman en este trabajo a través de 4 casos de estudio, dos de ellos desarrollados en un entorno de investigación y otros dos en un entorno industrial. Respecto a los casos del entorno de investigación (casos A y B en el futuro desarrollo del trabajo), estos se han llevado a cabo en un laboratorio, denominado Lab 4.0, que está situado en el taller del Departamento de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza y que nace fruto de la colaboración entre la Universidad de Zaragoza y el Centro de Investigación TECNALIA a través de la Cátedra TECNALIA. Los otros dos casos de implementación son el comienzo de la transferencia de los conocimientos desarrollados en este Lab 4.0 al ámbito industrial.

Para el cumplimiento de estos objetivos se ha planteado la siguiente metodología de trabajo distribuida en los siguientes hitos (H), logros (L) y tareas (T) a lo largo de los años como puede verse en la Figura 1.

Finalmente, el presente documento está estructurado de la siguiente forma. En la sección 2 se plasma todo el análisis llevado a cabo en el transcurso de este trabajo sobre el estado del arte y los conceptos clave para el desarrollo del mismo. La sección 3 propone una metodología que pueda servir de estándar para la implementación de CPS, así como, para la definición, caracterización e implementación de indicadores. Una vez explicada toda la metodología, en la sección 4 pueden verse los casos de éxito que se han obtenido de este trabajo. El documento termina con la sección 5 en la que se exponen las conclusiones del trabajo, se proponen nuevas líneas de investigación con las que continuar y se plasman todos los resultados de la investigación hasta la fecha.

		CURSO 2020-2021								CURSO 2021-2022															
		9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8
H1. Estudio del estado del arte actual	L1.1. Estado del arte de la Industria 4.0, profundizando en los CPS.																								
	<i>T1.1.1. Búsqueda de fuentes bibliográficas sobre Industria 4.0 y CPS.</i>																								
	L1.2. La aplicación de la industria 4.0 en la cadena de suministro sostenible.																								
	<i>T1.2.1. Búsqueda de literatura sobre Industria 4.0 y cadena de suministro sostenible</i>																								
H2. Implementación de sistemas ciberfísicos	L1.3. Investigación sobre los principales indicadores calculados actualmente.																								
	<i>T1.3.1. Búsqueda de fuentes bibliográficas sobre KPIs</i>																								
	<i>T1.3.2. Búsqueda sobre indicadores de mantenimiento y mantenimiento 4.0.</i>																								
	L2.1. Conocimiento del proceso.																								
H3. Planteamiento de nuevos indicadores y caracterización de existentes	<i>T2.1.1. Definición y caracterización de los CPS</i>																								
	<i>T2.1.2. Definición y caracterización de la implementación de un CPS</i>																								
	<i>T2.1.3. Selección e instalación del hardware necesario*</i>																								
	L2.2. Análisis y filtrado de las variables que proporciona el propio sistema.*																								
H4. Desarrollo de software para la implementación de indicadores en tiempo real	<i>T2.2.1. Análisis y caracterización de todas las variables que proporciona el sistema</i>																								
	<i>T2.2.2. Filtrado y selección de variables a adquirir</i>																								
	<i>T2.2.3. Realización de pruebas de implementación y corrección de fallos</i>																								
	<i>T2.2.4. Retroalimentación para el buen funcionamiento del sistema</i>																								
H5. Redacción del documento final	L3.1. Búsqueda bibliográfica para la definición de indicadores innovadores																								
	<i>T3.1.1. Identificación de gaps en la literatura</i>																								
	L3.2. Identificación de indicadores																								
	<i>T3.2.1. Identificación de indicadores en tres ámbitos</i>																								
H5. Redacción del documento final	<i>T3.2.2. Definición y caracterización de nuevos indicadores</i>																								
	<i>T3.2.3. Identificación de indicadores de mantenimiento</i>																								
	L4.1. Aprendizaje y familiarización con el software de desarrollo (Python).																								
	<i>T4.1.1. Realización de cursos y seminarios</i>																								
H5. Redacción del documento final	L4.2. Desarrollo de software*																								
	<i>T4.2.1. Desarrollo del software necesario para el cálculo de todos ellos</i>																								
	<i>T4.2.2. Pruebas y ensayos para validar el software desarrollado</i>																								
	<i>T4.2.3. Desarrollo de herramientas para la toma de decisiones</i>																								
H5. Redacción del documento final	L4.3. Desarrollo de visualizador*																								
	<i>T4.3.1. Selección de diagramas que reflejen la información adecuadamente</i>																								
	<i>T4.3.2. Implementación de indicadores y diagramas en un dashboard en tiempo real</i>																								
	<i>T4.3.3. Mejora de la captura de datos (bases de datos)</i>																								
H5. Redacción del documento final	<i>T4.3.4. Revisión del software y actualización con los nuevos datos adquiridos</i>																								
	<i>T4.3.5. Desarrollo final de la plataforma de visualización en tiempo real</i>																								
	L5.1. Redacción del documento final																								
	<i>T.5.1.1. Redacción</i>																								

* Tiempo total de implementación de los 4 casos planteados en la tesis

Figura 1. Diagrama de planificación de la tesis

2. Estado del arte

2.1. La industria 4.0

La Industria 4.0, también conocida como la 4ª revolución industrial, nace durante la feria de Hannover del 2011, y comienza a extenderse por Europa, haciendo que numerosas empresas se focalicen en ella para mejorar sus sistemas de producción (Ghobakhloo, 2018). La Industria 4.0 ha supuesto una nueva etapa industrial, en la que se integran los sistemas de producción con tecnologías de información y comunicación (Dalenogare et al., 2018).

Se espera que la Industria 4.0 aumente drásticamente el nivel de industrialización, información y digitalización de las industrias para lograr una mayor eficiencia y competitividad en el mercado desarrollando procesos de fabricación más flexibles y que puedan analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real para mejorar y agilizar la toma de decisiones. La Industria 4.0 ha traído consigo el desarrollo de tecnologías innovadoras, conocidas como tecnologías 4.0, que han permitido y facilitado el desarrollo de esta cuarta revolución industrial (Sigov et al., 2022). La Figura 2 muestra las tecnologías 4.0, en particular para el desarrollo de esta tesis, se considera fundamental el uso de tecnologías como IoT, la analítica de datos y el cloud computing.



Figura 2. Tecnologías 4.0

Además, de estas tecnologías, los CPS son una parte fundamental de este trabajo y de la Industria 4.0. Esta tecnología es capaz de integrar y coordinar elementos físicos y computacionales, permitiendo la comunicación máquina a máquina y la optimización de la producción mediante la descentralización de los sistemas de control (Xu, 2020). Dicha tecnología integra la tecnología IoT que permite la comunicación e intercambio de información entre objetos físicos para coordinar la toma de decisiones. La analítica de datos permite procesar y analizar toda la información adquirida en tiempo real con esas tecnologías (Gilchrist, 2016) y desarrollar en tiempo real los indicadores necesarios para conocer el estado de un sistema y facilitar y agilizar la toma de decisiones. Esta información puede visualizarse en tiempo real gracias a la tecnología cloud computing (Deepa. B et al., 2018) que utiliza Internet y un servidor remoto para mantener los datos y las aplicaciones (Divya & Jeyalatha, 2012). Autores, como Frank et al. (2019), consideran que la implementación en conjunto de estas tecnologías permite mejorar la eficiencia, la productividad y la competitividad del proceso en el que se implementen.

2.2. Los sistemas ciberfísicos

El término CPS fue acuñado en 2006 por Helen Gill en la Fundación Nacional de Ciencia de los Estados Unidos. Aunque el término ciberespacio se le atribuye a William Gibson por emplearlo en su novela *Neuromancer*, las raíces del término son mucho más antiguas. El término proviene de la raíz “ciberbética” acuñada por Norbert Wiener, un matemático estadounidense que tuvo gran importancia en el Desarrollo de la Teoría de Sistemas de Control, quien la derivó del término griego kubern (kybernetes), que significa timón o piloto (E. A. Lee, 2015).

Los CPS se definen como la integración entre sistemas físicos y sistemas de comunicación, computación y control (E. Lee, 2010). Los procesos físicos son controlados por computadoras y redes integradas que los monitorean, normalmente empleando bucles de retroalimentación que hacen que los procesos físicos afecten a la computación y viceversa. Las características fundamentales que definen este tipo de sistemas son (J. Lee et al., 2015; Wan et al., 2011):

- Integran profundamente los procesos físicos con la computación.
- Poseen redes a escalas múltiples, es decir, estos sistemas incluyen redes cableadas, inalámbricas, Wi-Fi, Bluetooth, y muchas más, así como categorías de dispositivos muy variadas.
- Las escalas temporales y espaciales son múltiples, los componentes de los CPS poseen una granularidad desigual de tiempo y espacio, que está restringida por la capacidad en tiempo real de dichos sistemas.
- Poseen capacidades adaptativas, ya que son sistemas muy complejos y de gran escala.
- Tienen un alto grado de automatización y control de circuitos cerrados, favorecen la interacción hombre-máquina y las tecnologías avanzadas de control de retroalimentación se aplican de forma amplia a estos sistemas.
- La operativa debe ser fiable y estar certificada en algunos casos, puesto que algunas operaciones poseen una complejidad muy alta.

El departamento de Ingeniería Eléctrica y Computer Science de la Universidad de Berkeley ha desarrollado un mapa conceptual de los sistemas ciberfísicos (Figura 3) que resume a la perfección lo que son y, sus aplicaciones y requerimientos (Asare et al., 2012).

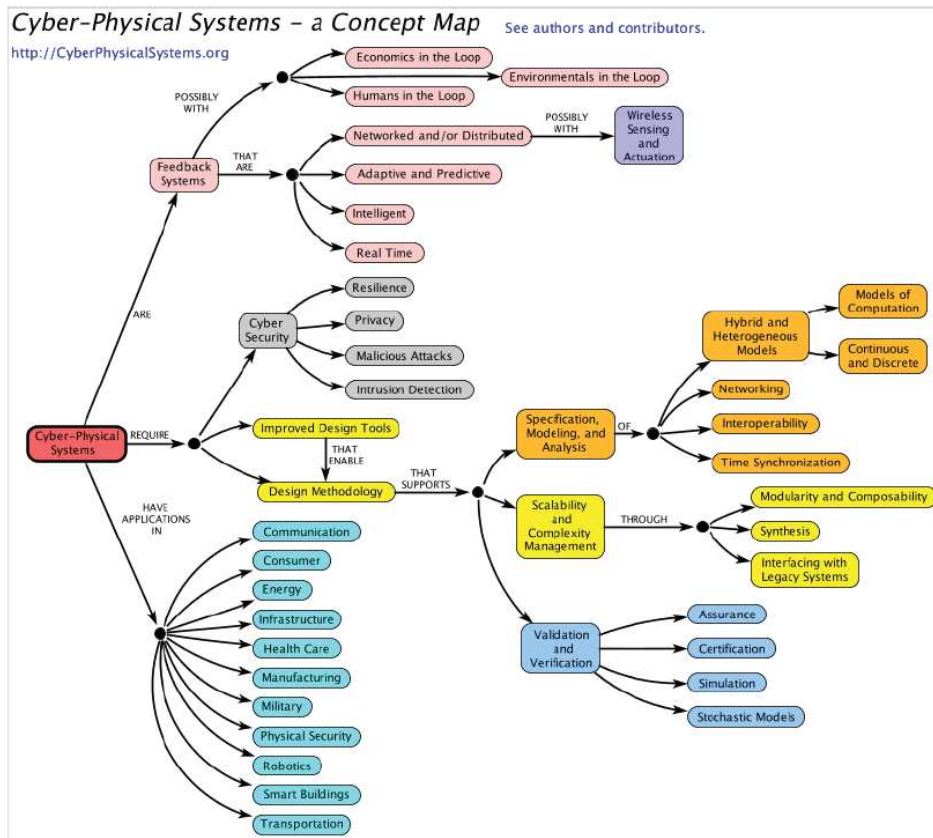


Figura 3. Mapa conceptual de un CPS. (Asare et al., 2012)

Para demostrar la relevancia que tienen los CPS en el ámbito de la investigación se ha llevado a cabo un análisis sobre la evolución temporal de los artículos publicados en la Web of Science sobre este tema. La Figura 4 muestra como han crecido exponencialmente las publicaciones realizadas sobre este tema desde 2008.

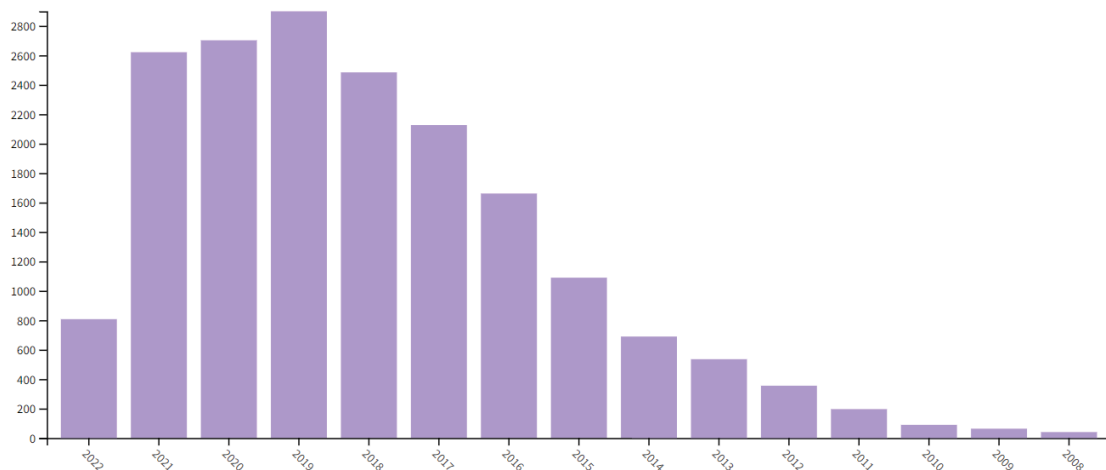


Figura 4. Evolución temporal de publicaciones sobre CPS

Focalizándose en un análisis más industrial, analizando el Hype Cycle for Manufacturing Operations Strategy de Gartner, una representación gráfica de la madurez, adopción y aplicación comercial de tecnologías relacionadas con las operaciones de fabricación (Big Data Marketer, 2016). Desde 2018 (Figura 5), puede verse que sitúa los CPS como una tecnología emergente,

sin embargo, en el año 2019 (Gartner, 2019) los sitúa como una tecnología en crecimiento y ya en 2020 (Gartner, 2020) los sitúa en el pico de la gráfica, lo que se conoce como el pico de expectativas sobredimensionadas, lo que significa que habrá que continuar investigando sobre esta tecnología a la espera de ver cómo evoluciona en el futuro.

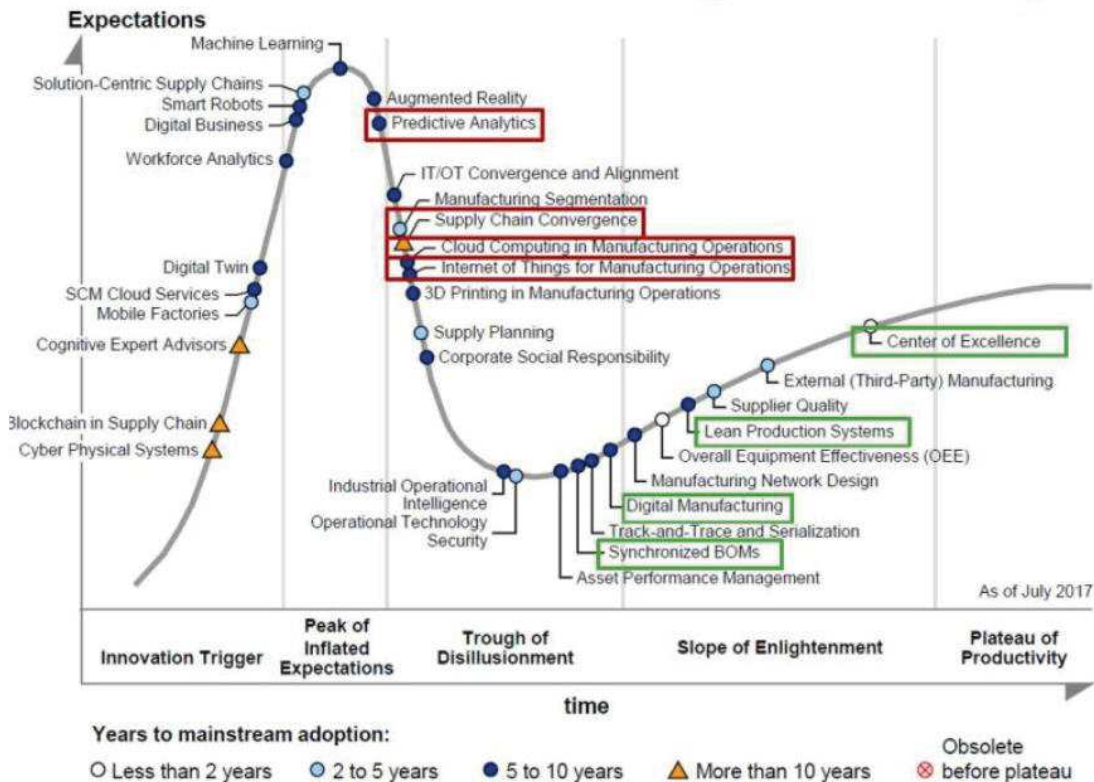


Figura 5. Manufacturing Hype-Cycle Gartner 2018 (Gartner, 2018).

Además, existen numerosas organizaciones interesadas en esta tecnología. La NFS comenzó en 2006 un proyecto denominado “Ciencia de Integración para CPS” en conjunto con universidades e institutos estadounidenses, mientras que en Europa se comenzó en 2004 el proyecto de Investigación y Tecnologías Avanzadas para Inteligencia y Sistemas Embebidos (ARTEMIS) con el objetivo de abordar los desafíos estructurales y de investigación a los que se enfrenta la industria europea, definiendo e implementando una agenda de investigación para sistemas informáticos. En otros países, como China y Corea, también está aumentando la relevancia de las investigaciones sobre CPS (Wan et al., 2011).

2.2.1. Proceso de implementación de un CPS

Aunque en los últimos años se ha extendido la implementación de CPS en la industria, todavía no hay una metodología estándar para su implementación, de manera que todavía queda por resolver una serie de retos que faciliten la integración del mundo físico con el cibernético (Wan et al., 2013).

La ISA (International Society of Automotion) ha propuesto una arquitectura conocida como ISA-95 que divide el CPS en niveles del 0 al 4. Estando el nivel 0 relacionado con los procesos físicos reales, el 1 con la detección y manipulación de los procesos físicos, el 2 con la supervisión de la monitorización y el control de procesos físicos, el 3 con las actividades de flujo de trabajo para

producir los productos finales especificados y el 4 con el negocio y las actividades necesarias para la gestión de la organización (Gifford & Daff, 2017).

Otros autores han propuesto un modelo más sencillo basado en una arquitectura distribuida en 5 niveles (conocida como arquitectura 5C). Estos niveles se basan en la implementación de un CPS paso a paso desde la adquisición de datos hasta el análisis final y la creación de valor (Kim & Lee, 2021).

A continuación se describe la metodología de implementación en estos 5 niveles por ser la metodología seguida durante este trabajo para la implementación de CPS (ver Figura 6).



Figura 6. 5 niveles de implementación de la arquitectura de un CPS

Nivel 1: conexión inteligente

El primer paso en la implementación de un CPS es la adquisición precisa y fiable de datos de las máquinas y sus componentes. Estos datos pueden ser adquiridos de varias formas: a través de sensores u obtenidos de controladores o sistemas de la empresa como sistemas ERP o MES.

En este nivel es importante la selección de los sensores y la transferencia de datos a un servidor central en el que un protocolo específico como MTConnect sea capaz de unificar los diversos tipos de datos y la forma de adquisición (Bagheri et al., 2015).

Nivel 2: conversión de datos en información

En este segundo nivel, la información más relevante se obtiene de los datos. Para ello pueden emplearse numerosas aplicaciones, puesto que en los últimos años se ha focalizado en el desarrollo de algoritmos capaces de pronosticar y comprobar el estado de los sistemas (J. Lee et al., 2015). Este nivel es capaz de dotar de “autoconocimiento” a los CPS (Bagheri et al., 2015).

Nivel 3: cibernético

El nivel cibernético actúa como hub de información en la arquitectura de los sistemas ciberfísicos. La información adquirida por cada máquina es almacenada en este nivel, formando una red de máquinas, que permite extraer información adicional al poder comparar el estado individual de una máquina con el resto de la flota y analizar el rendimiento y los datos históricos de la máquina pudiendo realizar un mantenimiento predictivo de las máquinas (J. Lee et al., 2015).

Nivel 4: cognición

La implementación de este nivel aporta un minucioso conocimiento del sistema que se está monitorizando, por ello, es importante que la información que se considere más relevante se represente de forma adecuada para transferir de forma correcta esa información a los usuarios (J. Lee et al., 2015).

Esta información puede mostrarse a través de dashboards, en los que se puede representar de diferente forma toda la información obtenida de los datos que pueda ayudar a tomar decisiones. Estas visualizaciones deben ser detalladas pero a la vez deben transmitir la información de manera sencilla. Por este motivo, debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar un visualizador que no es mejor por representar un mayor número de indicadores, sino por la calidad que tienen estos (TuDashboard, 2022).

Nivel 5: configuración

El último nivel es la retroalimentación entre el ciberespacio y el espacio físico, se encarga de la supervisión de las máquinas, haciéndolas “autoconfigurables” y “autoadaptativas”. Se dice que esta etapa actúa como RSC (sistema de control de resiliencia) que permite aplicar decisiones correctivas o preventivas que han sido tomadas en el cuarto nivel, el de cognición (J. Lee et al., 2015).

2.3. El nuevo paradigma de la cadena de suministro: la cadena de suministro verde

2.3.1. ¿Qué es la cadena de suministro verde?

Al mismo tiempo que avanza la tecnología, las empresas están cada vez más concienciadas sobre el impacto social y ambiental que pueden provocar sus operaciones. La Agenda 2030 de la Asamblea General de las Naciones Unidas ha propuesto 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS) para un desarrollo sostenible, algunos de los cuales están directamente relacionados con el mundo empresarial, como pueden ser: la reducción de pérdidas en un proceso, la mejora de la eficiencia temporal y la reducción de tiempos de espera (Tăucean et al., 2019).

Uno de los conceptos más globales y extendidos en el ámbito de la sostenibilidad es la Economía Circular (conocida como CE por sus siglas en inglés, Circular Economy). A pesar de que la CE es un concepto paraguas difícil de englobar en una definición, algunos autores han trabajado en una definición consensuada, estableciendo que la EC es: "Un sistema económico que representa un cambio de paradigma en la forma en que la sociedad humana se interrelaciona con la naturaleza y que tiene como objetivo evitar el agotamiento de los recursos, cerrar los bucles energéticos y materiales, y facilitar el desarrollo sostenible a través de su aplicación a nivel micro (empresas y consumidores), meso (agentes económicos integrados en simbiosis) y macro (ciudades, regiones y gobiernos). Alcanzar este modelo circular requiere innovaciones ambientales cíclicas y regenerativas en la forma en que la sociedad legisla, produce y consume" (Prieto-Sandoval et al., 2018).

Dentro de los conceptos más importantes que se han desarrollado a partir de la EC, en el ámbito de la cadena de suministro está el concepto de cadena de suministro verde (GSC, por su nombre en inglés green supply chain). La GSC hace referencia a todas las políticas, procedimientos y procesos relacionados con la reducción de los impactos negativos que se producen en la cadena de suministro, lo cual implica actividades como: el reciclaje, la reducción del consumo energético y, por tanto, la mejora de la eficiencia energética o el cálculo de los costes del ciclo de vida de un producto (Kazancoglu et al., 2018). Según sugieren Ying & Li-jun (2012) la GSC pretende

abordar las siguientes problemáticas: la gestión de la cadena de suministro, la protección medioambiental y la optimización de los recursos, mientras que, la cadena de suministro tradicional solo presta atención a la parte de gestión. La GSC añade a los objetivos principales de la cadena de suministro tradicional (tiempo, calidad, coste y nivel de servicio) dos nuevos objetivos: el medio ambiente y los recursos (Zsidisin et al., 2001).

Aunque pueda parecer que la GSC solo añade la dimensión medioambiental a la cadena de suministro tradicional, lo cierto es que este nuevo concepto es capaz de aunar tres dimensiones: la productiva, la económica y, como es lógico, la medioambiental. Son varios los autores que sostienen que la GSC no solo se focaliza en el medioambiente, sino que también busca la eficiencia operacional, logística y económica (Kazancoglu et al., 2018; Micheli et al., 2020), otros van más allá afirmando que la reducción del impacto medioambiental de las operaciones productivas supone una mejora del rendimiento operacional (Vanalle et al., 2017).

2.3.2. ¿Está la cadena de suministro verde ligada a la teoría de Lean Manufacturing? Los conceptos y características propios de la GSC están relacionados con otros conceptos importantes de la cadena de suministro, como es el caso del Lean Manufacturing.

Lean Manufacturing es una estrategia de producción en la que se pretende emplear menos recursos y con menos costes para obtener productos mejores, mejorando al mismo tiempo los objetivos organizacionales (Wahab et al., 2013). La idea clave del lean manufacturing es minimizar toda clase de desperdicios (recursos, tiempo, energía, materiales...) para mejorar la eficiencia del proceso productivo (Narasimhan et al., 2006). Esta idea está estrechamente relacionada con las que defiende la cadena de suministro verde, por tanto, se puede afirmar que la teoría lean y la GSC comparten conceptos como la protección del medio ambiente y la reducción de residuos y emisiones (Tăucean et al., 2019).

En línea con la reducción de desperdicios, un concepto de Lean Manufacturing que es clave en el desarrollo de varios KPIs (Key Performance Indicators) dentro de esta tesis es el de las 6 grandes pérdidas de Nakajima. Las pérdidas se definen como actividades que consumen recursos sin añadir valor (Muchiri & Pintelon, 2008). Nakajima clasifica estas pérdidas en tres grandes bloques: pérdidas de tiempo, de velocidad y de calidad, que se describen de la siguiente manera (Figura 7) (Jonsson & Lesshammar, 1999).

- Averías
- Puesta a punto y ajustes
- Microparadas: paradas menores durante la producción
- Reducción de la velocidad
- Retrabajos: productos con defectos menores que pueden volver a trabajarse
- Rechazos: productos con defectos que no pueden ser reaprovechados



Figura 7. Seis grandes pérdidas de Nakajima

Estas 6 grandes pérdidas son el origen del KPI que mide la productividad de los equipos individuales en una fábrica, denominado OEE (Overall Equipment Effectiveness). En el desarrollo de esta tesis no solo se ha definido e implementado para un CPS este KPI, sino que se ha

trasladado el concepto de las 6 grandes pérdidas a los ámbitos medioambiental y económico definiendo y desarrollando dos KPIs que evalúan el impacto medioambiental y económico que suponen estas pérdidas y que se podrán ver en la sección 3.2.

2.3.3. ¿Qué hay de la Industria 4.0?

¿Puede la industria 4.0 facilitar la adopción de prácticas propias de la GSC? Según varios autores (Rehman Khan et al., 2021; Sony, 2019; Umar et al., 2022) las tecnologías asociadas con la industria 4.0 permiten la adopción de este tipo de prácticas. Ghobakhloo (2020) considera que la transformación digital contribuye de forma positiva a minimizar los residuos, las actividades sin valor añadido, las ineficiencias y las emisiones. Beier et al. (2020) y Sharma et al. (2020) afirman que las tecnologías 4.0 son fundamentales para la toma de decisiones sobre aspectos sostenibles gracias a su capacidad para optimizar recursos y reducir el impacto medioambiental. Particularizando al uso de los CPS que se ha comentado anteriormente, el intercambio de información y los datos de adquisición en tiempo real son cruciales para el crecimiento y la mejora de los procesos ecológicos (Bag et al., 2020; V. Kumar et al., 2022), ya que mejoran la productividad y la flexibilidad y reducen el desperdicio de materiales a lo largo del ciclo de vida del producto (Cañas et al., 2020).

El análisis de la literatura llevado a cabo durante este trabajo ha identificado numerosos autores que consideran que la Industria 4.0 puede ayudar a la industria a incorporar iniciativas para el desarrollo de una GSC (Anser et al., 2020; Dev et al., 2020; Luthra & Mangla, 2018; Zhang et al., 2020; J. Zhao et al., 2020). Sin embargo, la mayoría de los estudios se han centrado en identificar el vínculo entre la Industria 4.0 y la GSC como conceptos generales. Se ha prestado muy poca atención al uso de las tecnologías asociadas a la Industria 4.0 y a su utilidad en aspectos específicos de la GSC. A modo de ejemplo, Birkel & Müller (2021) realizaron un *systematic literature review* (SLR) sobre la potencialidad de la Industria 4.0 para la gestión de la cadena de suministro con respecto al concepto sostenible de triple bottom line (un concepto sostenible en el que se analizan aspectos medioambientales, económicos y sociales (Elkington, 1999)) pero no estudian en profundidad qué tecnologías son específicamente más útiles para los aspectos medioambientales. Además, varios autores reconocen la importancia de estas tecnologías de vanguardia para obtener una cadena de suministro más verde pero se centran solo en una en concreto. Por ejemplo, Chiappetta Jabbour et al. (2020) analizaron el uso de big data en entornos sostenibles, mientras que Lim et al. (2020) destacaron las acciones sostenibles que permiten las tecnologías de simulación.

Por otra parte, los estudios en los que se analiza más en detalle el vínculo entre la GSC y el 4.0 están limitados por el número de trabajos analizados, así como, por las fuentes de donde provienen, como por ejemplo, los trabajos de Cwiklicki & Wojnarowska (2020); Fritzsche et al. (2018) y Machado et al. (2020) donde se analizan menos de 40 trabajos obtenidos únicamente de artículos revisados por pares. Además, los análisis bibliométricos, como los realizados por Borregan-Alvarado et al. (2020); Furstenau et al. (2020) y Gajdzik et al. (2020), ponen de manifiesto la evolución de la relación entre la Industria 4.0 y la GSC, pero no llevan a cabo una investigación profunda, ya que sólo se centran en el análisis cuantitativo.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se ha llevado a cabo una revisión más exhaustiva de la literatura que relaciona el uso de las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 con la GSC. Para ello, se ha realizado un SLR, un análisis muy empleado para identificar limitaciones en la literatura, identificar, evaluar e interpretar toda la información relevante y disponible para analizar el tema de interés, sugerir áreas que deben ser investigadas y proporcionar un marco

para posicionar nuevas actividades de investigación (Denyer & Tranfield, 2009; Kitchenham, 2007). Siguiendo las directrices de estos autores, se ha llevado a cabo un estudio que combina una visión bibliométrica de la literatura más relevante y un análisis conceptual guiado por Research Questions (RQs) y que en el momento de redacción de este trabajo se encuentra en revisión en una revista de alto impacto.

A continuación, se muestra un resumen de la metodología empleada en el artículo y los resultados más relevantes.

Para guiar el SLR se han propuesto las siguientes RQs:

RQ1: ¿cómo contribuyen las tecnologías 4.0, ya sea de forma individual como combinada, a la implementación de un GSC según la literatura?

RQ2: ¿en qué aspectos de la GSC se estudia la implementación de las tecnologías asociadas a la Industria 4.0? ¿Cuáles son los beneficios de esta implementación?

RQ3: ¿qué retos de la implementación de tecnologías relacionadas con la Industria 4.0 en una GSC se han identificado a partir de la literatura?

Una vez definidas estas cuestiones, se ha llevado a cabo una búsqueda de literatura en dos bases de datos Web of Science (WoS) y Scopus empleando la siguiente combinación de palabras clave “(green) and (supply chain OR supply-chain) and (Industry 4.0 OR I 4.0 OR smart manuf*)” en los últimos 15 años (2007-2022). Esta búsqueda no se ha limitado solo a artículos revisados por pares sino que se han tenido en cuenta todo tipo de artículos siguiendo la propuesta de autores como Anderson et al. (2020) que asegura que la revisión de solo artículos revisados por pares no es suficiente para proporcionar una idea completa sobre un tema.

De esta búsqueda se han obtenido inicialmente 172 documentos a los que se han aplicado unos criterios de refinamiento (artículos duplicados o artículos que no cumplían el objetivo del análisis) para finalmente llevar a cabo el análisis sobre 75 documentos (el análisis completo puede verse en el Anexo A. Análisis de la revisión de la literatura).

En primer lugar, para el análisis bibliométrico se han clasificado los documentos por tipo de publicación, año y fuente. El análisis de los documentos muestra que el tipo de publicación predominante es el artículo (81% de los trabajos). Analizando la fecha de publicación (ver Figura 8) de artículos puede verse que el comienzo de las publicaciones sobre este tema es en 2011 coincidiendo con la aparición del término Industria 4.0 durante la Hannover Messe. Además, se puede ver que durante los tres últimos años ha aumentado el número de trabajos publicados sobre este ámbito, lo que demuestra un creciente interés sobre él en el ámbito investigador.

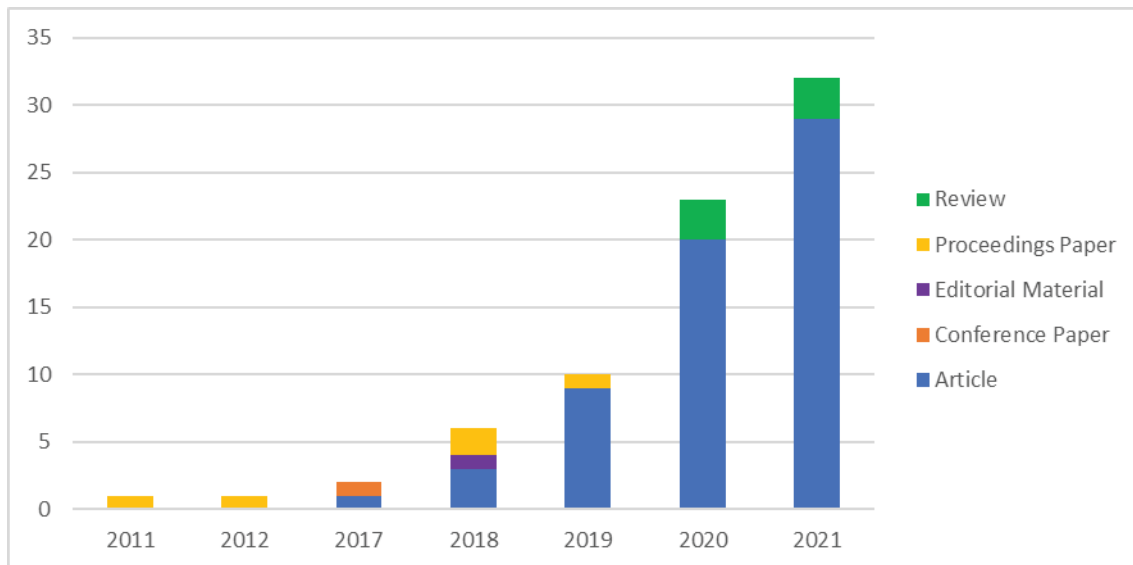


Figura 8. Tipo de publicación a lo largo del tiempo

Tras este análisis, se pasa a dar respuesta a las RQs planteadas previamente.

Respecto a la contribución de las tecnologías en la implementación de la GSC (RQ1), se ha observado que las tecnologías que más se mencionan son: IoT, Big Data, CPS y AM. Concretamente, para el trabajo llevado a cabo en esta tesis, es reseñable que la combinación de tecnologías que más se ha estudiado es la de IoT, CPS, cloud computing y big data, la cual se considera clave para el desarrollo de fábricas inteligentes y sostenibles (Gajdzik et al., 2020), ya que permiten el tratamiento de los datos para conseguir información valiosa que puede mostrarse a través de plataformas en la nube (Y. Li et al., 2020; Machado et al., 2020; Raji et al., 2021; Umar et al., 2021), potenciando el desarrollo de indicadores que sirvan para evitar el despilfarro y reducir las emisiones (John et al., 2021).

Atendiendo a la cuestión de los aspectos de la GSC en los que se implementan las tecnologías 4.0 (RQ2), cabe destacar que las tecnologías CPS e IoT se consideran importantes en la mejora y optimización del consumo energético, por permitir la monitorización en tiempo real (Ghobakhloo et al., 2021). Por el mismo motivo se consideran también importantes para la mejora de la eficiencia productiva pudiendo acelerar y mejorar la toma de decisiones (Bag et al., 2020; de Sousa Jabbour et al., 2018; Manavalan & Jayakrishna, 2019)

Finalmente, el análisis de los retos a los que se enfrenta la implementación de tecnologías 4.0 en la GSC (RQ3) revela que estos pueden clasificarse en retos económicos, educativos y políticos. El principal reto económico es el alto coste de inversión unido a la incertidumbre de los beneficios económicos de la digitalización (Saraji et al., 2021; Sindhwani et al., 2019). Entre los educativos destaca la falta de conocimientos técnicos sobre la implementación de tecnologías y la ausencia de conciencia medioambiental. La literatura propone modelos de implantación, pero son pocos los casos de éxito presentados y aún menos los implantados en entornos industriales (Ciliberto et al., 2021; P. Kumar et al., 2021). Como último punto, se ha identificado como uno de los principales retos políticos el hecho de que los gobiernos no apoyen la automatización de procesos a través de las tecnologías asociadas a la Industria 4.0 (Leong et al., 2020; Yadav et al., 2020). Además, no hay evidencia en la literatura estudiada de protocolos, normas y directrices para implementar las tecnologías de la Industria 4.0 en la GSC o para medir los beneficios obtenidos de esta implementación.

2.4. Key Performance Indicators y la importancia del tiempo real

Los KPIs son indicadores que reflejan el estado y progreso de un proceso productivo de forma compacta y proporcionan la información necesaria para realizar un análisis rápido de la situación, es decir, pueden emplearse como una herramienta de control (Joppen et al., 2019). Esta herramienta permite identificar el mal rendimiento y el potencial de mejora del sistema que se está midiendo, alcanzando una mayor eficiencia, un mayor rendimiento y ofreciendo una visión general de los mismos (Kaganski et al., 2017). Actualmente, esa visión general se suele realizar a través de un dashboard en el que se muestran los KPIs que son más importantes y que proporcionan información precisa sobre la situación actual y permiten compararla con la situación previa (Hedvicáková & Král, 2019).

Hay numerosos KPIs que pueden definirse en un proceso productivo, no obstante, existe un estándar para el cálculo de KPIs, la norma ISO 22400 que proporciona una visión general de los conceptos, la terminología y los métodos para describir e intercambiar los KPIs con el fin de gestionar las operaciones de fabricación (Organización Internacional de Normalización [ISO], 2014). La normativa describe 34 KPIs considerados como los más importantes y utilizados en la gestión de la fabricación (Fukuda & Patzke, 2010). Aunque se pretende que el estándar sea aplicable a todo tipo de industrias, Lindberg et al. (2015) afirma que esta principalmente centrado en evaluar el rendimiento de la industria discreta. Además, según (Zhu et al., 2018) existe un desfase entre la investigación de la norma y las necesidades industriales, puesto que algunos KPIs no proporcionan información útil o no pueden ser calculados en procesos continuos y propone llevar a cabo una revisión de la norma para evaluar el rendimiento de forma adecuada y precisa. Otro de los gaps que presenta esta normativa es que no está especificado cómo debe de intercambiarse realmente la información (Brandl & Brandl, 2018), las descripciones de los distintos elementos que componen los KPIs tienen un alto nivel de abstracción y a menudo son ambiguos e imprecisos (Varisco et al., 2018).

En el ámbito sostenible, la mayoría de los KPIS están definidos de forma específica para cada empresa (Ameta et al., 2011), es decir, no hay un estándar definido. Varias organizaciones han definido indicadores para medir el impacto de actividades industriales. Por un lado, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, 2011) ha desarrollado unos Indicadores Ambientales Básicos que incluyen 46 indicadores para medir el impacto de las actividades industriales en el medio ambiente en países industrializados. Por otra parte, la Comisión de Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible (2007) identifica 96 indicadores para abordar el deterioro del medio ambiente debido a las actividades humanas. Estos indicadores se han definido para empresas, compañías y fábricas; sin embargo, hay pocos indicadores disponibles a nivel operativo para procesos individuales. En el ámbito normativo, no existe una norma específica para el cálculo de KPIs relacionados con la sostenibilidad o la GSC (Kibira et al., 2018). Lo más parecido que puede encontrarse en este sentido es la evaluación del ciclo de vida (LCA, Life Cycle Assessment), por sus siglas en inglés) puesto que se considera una herramienta robusta para describir y analizar los impactos ambientales de los productos y servicios a lo largo del ciclo de vida (Rinaldi et al., 2014). El LCA se define en las normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006a, 2006b). Su uso muestra con transparencia los impactos ambientales de un producto durante toda su vida y permite la comparativa de impactos entre diferentes productos (Hagen et al., 2020).

Para incorporar una visión económica al LCA, se ha desarrollado el concepto de coste del ciclo de vida (LCC, Life Cycle Cost) (Settanni, 2008) y se considera crucial para el desarrollo de la sostenibilidad debido a su perspectiva del ciclo de vida junto con la económica (Kambanou &

Sakao, 2020). Según Woodward (1997) el LCC pretende optimizar los costes totales generados por el activo identificando y cuantificando todos los gastos significativos que surgen a lo largo de su ciclo de vida. Sus principales objetivos son mejorar la evaluación de las opciones de inversión; tener en cuenta el impacto del coste global en lugar de sólo los costes de adquisición y mejorar la elección entre las alternativas que compiten. Aunque el LCC es una herramienta interesante y ampliamente utilizada, faltan estudios de investigación publicados en los que se ejemplifique el uso del LCC y la adquisición de datos para su aplicación en entornos de fabricación. Además, los casos de uso no están estandarizados y, por lo general, no se consideran los costes de fin de vida o de mantenimiento (Bengtsson & Kurdve, 2016). El análisis de los casos propuestos en la literatura muestra que estos casos se centran en algunas de las fases del LCC en lugar de atender a todas ellas y dar un valor completo del LCC (Kambanou, 2020). Por ejemplo, Enparantza et al. (2006) se centra en la predicción del coste del ciclo de vida en las fases de oferta y diseño utilizando datos reales del estado de la máquina herramienta. Mientras que otros (por ejemplo, Lad & Kulkarni (2012)) sólo se centran en el coste de mantenimiento.

Otro aspecto importante del cálculo del LCC es la adquisición de datos para obtener un resultado fiable. Estos costes dependen del estado y el comportamiento de la máquina, especialmente durante la fase de funcionamiento, y por tanto son difíciles de calcular basándose en métodos deterministas (Herrmann et al., 2011). Además, los fabricantes no suelen recibir información de sus clientes, lo que les dificulta determinar los costes de forma fiable y precisa durante la fase de funcionamiento y mantenimiento (Korpi & Ala-Risku, 2008). Siguiendo con esta idea, la incorporación de sensores inteligentes en las máquinas-herramienta y la analítica de datos en la fabricación permiten la obtención de datos en tiempo real que pueden utilizarse para el cálculo preciso y fiable del LCC (Daniyan et al., 2021). La Industria 4.0, los sistemas ciberfísicos y las tecnologías habilitadoras como el IoT o el big data son claves para desarrollar herramientas que permitan calcular y actualizar el LCC en tiempo real. De esta manera, los fabricantes pueden tener acceso a la información sin necesidad de comunicarse directamente con los usuarios. La norma UNE-EN 60300-3-3:2017 (Una Norma Española [UNE], 2017) define el LCC como "un proceso de análisis económico para evaluar el coste de un artículo a lo largo de su ciclo de vida o de una parte del mismo". Hay que tener en cuenta que el LCC puede analizarse desde diferentes puntos de vista: el proveedor, el usuario o incluso la sociedad. Según Bengtsson & Kurdve (2016) los principales costes se producen en la fase de uso del equipo de producción. Por lo tanto, es crucial contar con un enfoque de LCC en una fase temprana del proceso de gestión del equipo para la toma de decisiones, ya que si sólo se tiene en cuenta el coste de adquisición, puede haber un gran aumento de costes durante la fase de funcionamiento, que es la más dinámica (Thiede et al., 2012).

En la literatura se pueden encontrar algunos ejemplos de KPIs relacionados con aspectos sostenibles, por ejemplo, Olugu et al. (2011) elaboraron un indicador de la industria del automóvil derivado de elementos como la sostenibilidad de los proveedores, el coste ecológico, el coste total de las operaciones ambientalmente sostenibles, el nivel de material reciclado en un producto y los costes asociados al consumo de energía. Zhao et al. (2017) propusieron un cálculo de las emisiones totales de gases de efecto invernadero a lo largo de toda la cadena de suministro. Domingo & Aguado (2015) y Durán et al. (2018) añadieron una dimensión de sostenibilidad al OEE multiplicándolo por un factor de sostenibilidad. Sassanelli et al. (2019) mostraron un indicador de rendimiento de la economía circular (CEPI) capaz de medir la energía mínima requerida para el proceso de fabricación de un producto. Como se puede observar, existe una amplia gama de KPIS pero no hay un estándar que seguir (Banasik et al., 2018).

Si se pone el foco en la parte económica, es fundamental tener KPIs que permitan controlar y reducir los costes. Es más, dada la elevada competencia que hay actualmente en el mercado, tener unos costes de producción muy elevados supone una clara desventaja frente a los competidores (Brüggemann et al., 2015). Estos KPIs no tienen por qué ser complejos, es suficiente con tener desarrollado un buen modelo de costes que pueda proporcionar información relevante (Dogan & Aydin, 2011). Como ejemplo, Panicker et al. (2019) desarrollaron un modelo de coste de producción que se compone de los siguientes elementos: coste de las instalaciones, coste de capital, coste de los servicios públicos, coste de las materias primas, coste de la mano de obra y coste de mantenimiento, que dependen de factores como la ubicación de la fabricación, el tipo de proceso de fabricación, las materias primas utilizadas, el origen de las materias primas y los modos de transporte. Otros autores han desarrollado KPIs económicos, como por ejemplo, el coste basado en rendimiento (PBC, Performance Based Cost) que se centra en el rendimiento en lugar de en las actividades. El PBC identifica las áreas de negocio que son capaces de añadir valor a una organización y calcula los materiales directos, la mano de obra o los gastos generales para estimar con precisión el coste de producción (Gunasekaran et al., 2005). Christen et al. (2016) desarrollaron una curva de rendimiento de costes (CPI, Cost Performance Indicators) que se basa en la representación del coste frente a una variable que interviene en el mismo, de manera que se puede observar la evolución del coste en función de dicha característica. Windmark et al. (2018) definieron una ratio de rendimiento de costes (CPR, Cost Performance Ratio) que describe un coste con respecto a su rendimiento y el valor que tiene para el usuario. Por último, Wudhikarn et al. (2010) desarrollaron un KPI de costes basado en los tres elementos que representan el OEE pero en unidades monetarias (OECL, Overall Equipment Cost Loss).

La combinación y comparación de KPIs en estos tres ámbitos (productivo, económico y medioambiental) proporciona un análisis multidisciplinar a la hora de tomar decisiones y permite conocer el impacto que una decisión tiene en los tres aspectos. Esa multidisciplinariedad aporta mucha más fiabilidad a un análisis que aquel que se hace atendiendo a un único factor, y por ello, se considera que las decisiones tomadas en torno a procesos productivos deben involucrar distintos parámetros y variables (Windmark et al., 2018).

Además, el nuevo paradigma que supone la cuarta revolución industrial afecta al cálculo de KPIs que se estaba realizando hasta el momento, puesto que los CPS permiten la adquisición de datos en tiempo real que al analizarse y procesarse pueden convertirse en información valiosa para las empresas a través del desarrollo de KPIs en tiempo real (Bayhan et al., 2020; G. Li et al., 2009). Es más, este tipo de adquisición es mucho más precisa y por tanto, el cálculo de los KPIs es más exacto, puesto que no es necesario llevar a cabo los cálculos a través de valores medios basados en datos históricos que podrían no representar la actualidad (de Sousa Jabbour et al., 2018). El cálculo de KPIs en tiempo real puede reducir, o incluso eliminar, los cálculos complejos y permitir respuestas en tiempo real a fallos imprevistos. Una vez desarrolladas e implementadas las ecuaciones de los KPIs, gracias a la digitalización, el cálculo en tiempo real es inmediato. Además, el uso de dashboards para la visualización de los KPIs permite conocer la situación actual de las máquinas. Aunque esta información en tiempo real permite generar acciones de mejora y evaluar los cambios en nuestra cadena de suministro y la toma de decisiones en tiempo real, autores como (Braglia et al., 2022; Xie et al., 2020) afirman que todavía hay una falta de estudios sobre los KPIs adaptados a esta nueva revolución industrial.

2.5. Consideraciones finales

Teniendo en cuenta todos los temas abordados a lo largo de este capítulo, este último apartado pretende agrupar las consideraciones que justifiquen las aportaciones de esta investigación.

En la actualidad el entorno industrial está en continua evolución. Por un lado, la llegada de la Industria 4.0 supone un cambio de paradigma en el que las nuevas tecnologías juegan un papel fundamental en la evolución de las empresas en el ámbito productivo, aportando flexibilidad y agilidad, y permitiendo ser más competitivos. Por otra parte, cada vez se presta más atención al ámbito sostenible, puesto que lo demandan tanto clientes como entidades y gobiernos, y por tanto, es más importante que sus objetivos estén alineados con la reducción del impacto medioambiental que provocan sus actividades. A todo esto hay que añadirle el aspecto económico que buscan todas las empresas, pues su actividad debe ser rentable y deben obtener un beneficio de su actividad. La importancia que estos tres ámbitos (productivo, económico y sostenible) tienen en el mundo industrial está muy presentes en el desarrollo de este trabajo. Además, no se han encontrado estudios en los que se muestren KPIs que combinen estos ámbitos para facilitar el estudio del impacto que tiene en estos un cambio, mejora o problema en un proceso o sistema. Por este motivo, los KPIs definidos y caracterizados prestan atención a estos aspectos y buscan poder atender a ambos al mismo tiempo a la hora de tomar decisiones para lograr un equilibrio entre los tres y que ninguno de ellos se imponga sobre el resto, por lo menos, no de forma inconsciente.

La implementación de CPS permite la adquisición de variables en tiempo real y facilita el desarrollo de KPIs que puedan actualizarse y evaluarse de forma instantánea. Una buena selección tanto de los KPIs como de su visualización permiten agilizar la toma de decisiones y mejorar la eficiencia dentro de un proceso productivo. No obstante, no se han identificado en la literatura casos de estudio en los que se visualicen KPIs en tiempo real.

Con respecto a los KPIs, aunque existe un estándar sobre KPIs en el ámbito productivo, la definición de estos es muy teórica y no deja claro las variables que deben emplearse para el cálculo de estos. En otros aspectos como el sostenible o el económico ni siquiera hay una estandarización. Este trabajo aporta una serie de KPIs en los tres ámbitos que siguen la misma metodología a la hora de ser definidos e implementados y que por tanto podrían considerarse como un estándar de definición e implementación de KPIs para las empresas. Además, se ha observado que el OEE es un indicador clave en el aspecto productivo pero con el que no se tienen en cuenta el resto de los aspectos, por lo que se han definido y caracterizado nuevos indicadores que aportan al mundo investigador una nueva forma de medir las 6 grandes pérdidas propuestas por Nakajima en los ámbitos económico y sostenible.

Por último, en el análisis de la literatura se ha visto que las cadenas de suministro están cada vez más concienciadas medioambientalmente y, por tanto, están cada vez más cerca de una filosofía “verde”, acuñada con el término GSC y que requieren de las tecnologías 4.0 para su implantación. En la transición de una cadena de suministro tradicional a una GSC es necesario evaluar y medir el impacto de las mejoras implementadas y este trabajo aporta una metodología totalmente apta para la evaluación de las mismas.

Con todas estas consideraciones, este trabajo pretende aportar una solución que pueda ser replicada con facilidad y sirva como estándar para la implementación de CPS en sistemas de fabricación, proponer y caracterizar nuevos indicadores, así como, redefinir los ya existentes en ámbitos productivos, económicos y sostenibles que puedan emplearse en distintos entornos industriales, identificando claramente las variables a emplear para el cálculo de los mismos y

presentar casos de uso en los que se resuelvan las limitaciones identificadas en la literatura comentadas previamente en este capítulo.

3. Definición del modelo

En este capítulo se define el modelo planteado para el desarrollo de este trabajo y que se ha basado en la implementación de CPS empleando el modelo de 5 niveles (5C) definido en el apartado 2.2.1., incluyendo la definición, caracterización e implementación de KPIs en el aspecto productivo, económico y sostenible, así como el diseño y la generación de un dashboard o mapa de KPIs para la visualización en tiempo real de los mismos, mostrando así su evolución a lo largo del tiempo.

3.1. Implementación de CPS

Como ya se ha comentado, la implementación de CPS está basada en los niveles de implementación definidos en el apartado 2.2.1. de este documento. A continuación, se detalla la implementación de cada uno de los niveles particularizado al modelo de la tesis.

3.1.1. Nivel 1: conexión inteligente

En este primer nivel se lleva a cabo la instalación de la sensórica en el sistema físico: un analizador de red y un PC industrial.

En el caso del analizador de red, se coloca un Circutor CVM-MINI (Figura 9), un instrumento de medida programable, capaz de analizar las propiedades de las redes eléctricas y almacenar internamente los parámetros de medición.



Figura 9. Analizador de red CVM-MINI

Además, se recogen las variables del PLC de la máquina a través de la colocación de un PC industrial.

Las variables adquiridas del PLC y del analizador de red se adquieren cada segundo, se almacenan en el PC industrial y se envían a la nube cada 15 minutos.

3.1.2. Nivel 2: transformación de datos en información

En este segundo nivel se lleva a cabo un análisis de las variables adquiridas y se decide que variables son las más interesantes a la hora de adquirir información que vaya a ser útil para el cálculo de indicadores.

3.1.2.1. Variables adquiridas del analizador de red

En el caso del analizador de red, las variables adquiridas pueden verse en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables adquiridas a través del analizador de red

Nombre variable	Descripción variable	Uds
THD_A_L1	Analizador THD A L1	%
THD_A_L2	Analizador THD A L2	%
THD_A_L3	Analizador THD A L3	%
THD_V_L1	Analizador THD V L1	%
THD_V_L2	Analizador THD V L2	%
THD_V_L3	Analizador THD V L3	%
CURRENT_L1	Analizador corriente L1	A
CURRENT_L2	Analizador corriente L2	A
CURRENT_L3	Analizador corriente L3	A
COS_PHI	Analizador cos phi	-
ENERGY_ACTIVE	Analizador energía activa	Wh
ENERGY_APPARENT	Analizador energía aparente	VAh
ENERGY_REACTIVE_CAPACITIVE	Analizador energía reactiva capacitiva	varCh
ENERGY_REACTIVE_INDUCTIVE	Analizador energía reactiva inductiva	varLh
POWER_FACTOR	Analizador factor de potencia	-
POWER_FACTOR_L1	Analizador factor de potencia	-
POWER_FACTOR_L2	Analizador factor de potencia L2	-
POWER_FACTOR_L3	Analizador factor de potencia L3	-
FREQUENCY	Analizador frecuencia	Hz
POWER_ACTIVE	Analizador potencia activa	W
POWER_APPARENT	Analizador potencia aparente	VA
POWER_APPARENT_L1	Analizador potencia aparente L1	VA
POWER_APPARENT_L2	Analizador potencia aparente L2	VA
POWER_APPARENT_L3	Analizador potencia aparente L3	VA
POWER_CAPACITIVE	Analizador potencia capacitiva	varC
POWER_INDUCTIVE	Analizador potencia inductiva	varL
VOLTAGE_L1	Analizador voltaje L1	V
VOLTAGE_L12	Analizador voltaje L12	V
VOLTAGE_L2	Analizador voltaje L2	V
VOLTAGE_L23	Analizador voltaje L23	V
VOLTAGE_L3	Analizador voltaje L3	V
VOLTAGE_L31	Analizador voltaje L31	V

De estas variables, la más interesante para los KPIs que se definirán posteriormente es la variable ENERGY_ACTIVE que permitirá conocer el consumo energético de los CPS.

3.1.2.2. Variables adquiridas del PLC

En el caso de las variables adquiridas del PLC, estas son diferentes para cada tipo de máquina. Para conocer el significado de cada una de las variables la operativa a seguir es la misma, debe llevarse a cabo un ensayo en la máquina en un entorno controlado, conociendo con exactitud las operaciones que se llevan a cabo durante el ensayo, con qué herramientas, la duración de cada proceso, el número de piezas mecanizadas... De esta forma se puede validar a posteriori que las variables adquiridas transfieren correctamente la información del entorno físico al virtual y con las unidades de medida correctas.

3.1.3. Nivel 3: cibernético

El nivel cibernético actúa como hub de información en la arquitectura de los CPS. La información adquirida por cada máquina es almacenada en este nivel, formando una red de máquinas. Este paso queda fuera del alcance de este trabajo, puesto que se trabaja de forma individual con los sistemas, no obstante, se considera como una línea futura de la investigación.

3.1.4. Nivel 4: cognición

Este nivel se basa en la presentación de información de forma sencilla al usuario final. Es el nivel en el que más profundiza esta tesis, ya que en él se integra la implementación y visualización de KPIs para aportar una visión sencilla y global del estado de la máquina tanto a nivel productivo como económico y medioambiental.

En este nivel se desarrolla toda la algoritmia necesaria para el cálculo y la visualización de indicadores en CPS.

En un primer paso hay que definir y caracterizar los KPIs de forma teórica para, posteriormente, seleccionar las variables y los parámetros que son necesarios para el cálculo en CPS y por último, desarrollar toda la algoritmia requerida, tanto para el cálculo como para la visualización final de los indicadores.

En el paso final de visualización de KPIs, la solución actual suele ser la visualización a través de una aplicación web, ya sea una de las muchas plataformas que existen para ello, o bien, una plataforma que haya sido desarrollada específicamente para el usuario final. Entre las plataformas comerciales, para el trabajo llevado a cabo en esta tesis se ha empleado Grafana. Grafana es una herramienta de código abierto que proporciona una interfaz de usuario para ejecutar análisis de datos y extraer gráficos y elementos visuales a partir de los mismos. Además, se puede conectar con muchas fuentes de datos diferentes. Esta herramienta permite presentar la información adquirida durante un espacio de tiempo determinado de forma muy versátil, por las diferentes opciones de visualización que ofrece, además, de destacar por su sencillez y flexibilidad de uso [23] [24]. Con la versión de código abierto se pueden programar alertas sobre diferentes datos que pueden ser enviadas en diferentes formatos, desde SMS o e-mail hasta otras herramientas de comunicación como Slack (Martinez, 2021; Olano, 2021).

3.1.5. Nivel 5: configuración

El nivel 5 es el último nivel de implementación, una vez definidos los indicadores y pudiendo visualizarlos en tiempo real, este nivel sirve de retroalimentación al nivel 4 y pretende facilitar la toma de decisiones a los usuarios finales. Por este motivo, este último nivel es específico para cada caso de uso de un CPS puesto que los fallos y las posibilidades de mejora de cada sistema varían en función de las características propias de él mismo y el entorno productivo en el que se encuentre.

5. Conclusiones, líneas futuras y resultados de la investigación

Conclusiones

En líneas generales, el desarrollo de este trabajo muestra las virtudes de la aplicación de tecnologías habilitadoras de la industria 4.0 al entorno industrial. La metodología propuesta, junto con los casos de uso resueltos con éxito, puede servir a las empresas como prueba de las ventajas competitivas que pueden obtener si deciden implementar este tipo de tecnologías en sus sistemas, líneas de producción o cadenas de suministro.

La metodología propuesta en este trabajo se ha implementado en cuatro casos distintos, cada máquina es diferente y el entorno en el que trabajan cada una de ellas también lo es. Esto demuestra la capacidad de extrapolación que tiene este modelo y que por tanto puede servir como estándar para la implementación de CPS en entornos industriales de distinta índole. Además, la línea seguida en la investigación muestra un caso exitoso de transferencia para la colaboración entre UNIZAR y TECNALIA, puesto que los dos primeros casos se han implementado en un laboratorio bajo un entorno controlado en el que se ha podido investigar, desarrollar y mejorar la metodología planteada para trasladar los conocimientos adquiridos al entorno industrial a través de la implantación de CPS en entornos reales (los otros casos mostrados en el trabajo).

La presente propuesta ha dado respuesta a las limitaciones encontradas en la literatura acerca de cómo llevar a cabo la implementación de un CPS siguiendo los 5 niveles planteados por (J. Lee et al., 2015), ya que, aunque la parte teórica está bien definida no hay muchos casos de implementación en entorno industrial o ejemplos prácticos en la literatura. Además de presentar y plantear la definición, caracterización, implementación y visualización de KPIs para implementarlos en un CPS.

Siguiendo con la idea de completar los gaps detectados en la literatura se han planteado un total de 13 indicadores considerados como relevantes para la monitorización de los sistemas en tiempo real y la mejora de la toma de decisiones atendiendo a tres ámbitos: productivo, medioambiental y sostenible. Algunos de ellos han sido reformulados y caracterizados para su implementación en CPS y otros definidos desde cero como KPIs innovadores que finalmente han sido registrados como secretos industriales. Todos ellos se han planteado con idea de que puedan ser estandarizados para su uso en diferentes ámbitos y sectores industriales, por ello, se ha seguido una metodología de definición basada en la norma ISO 22400 (ISO, 2014).

Otro de los objetivos perseguidos ha sido el desarrollo de la algoritmia necesaria para el cálculo de KPIs en tiempo real con un lenguaje de programación (Python) que fuese sencillo de manejar y gratuito para el desarrollo en las empresas. Y que, además, los KPIs desarrollados pudiesen visualizarse tanto en las plataformas ya desarrolladas por las empresas (como es el caso C, ver 4.3), o bien, implementarse en una plataforma o dashboard gratuito. Para el diseño de los dashboards se ha buscado una interfaz sencilla para el manejo del usuario final, como es el caso de Grafana (ver casos 4.1, 4.2 y 4.4). Por tanto, este trabajo aporta varios ejemplos de visualización de indicadores que puedan servir de modelo para el diseño de paneles de visualización en empresas.

La implementación de estos KPIs en tiempo real en un visualizador permite a las empresas agilizar y mejorar la toma de decisiones como se ha ido mostrando a lo largo de los casos de uso. Además, el análisis temporal de la evolución de los KPIs no solo permite concluir si las mejoras implementadas impactan realmente en el sistema o la cadena de producción, sino que también

se puede determinar si el impacto es en todos los ámbitos o para uno de los tres en particular o incluso si impacta negativamente en alguno.

Líneas futuras

La consecución de esta investigación ha dado lugar a abrir nuevas líneas de investigación continuando con el trabajo realizado en el Lab 4.0 y en la implementación de KPIs en tiempo real en diferentes empresas y entornos. Las líneas futuras se enumeran a continuación:

Respecto al trabajo en el laboratorio:

- Trabajar con nuevos sensores como es el caso de los acelerómetros que ya están instalados en la máquina HAAS y el PINACHO para integrar una nueva línea de investigación sobre el análisis de vibraciones enfocado al mantenimiento predictivo.
- Caracterizar, diseñar e implementar nuevos KPIs en los tres ámbitos
- Resolver dificultades de captura de datos en tiempo real a través de la implementación de sistemas IoT combinados con la tecnología RFID para que sean capaces de adquirir variables como el tiempo de preparación, las piezas rechazadas o los tipos de averías.
- Desarrollar el nivel 3 de implementación de CPS (cibernético) para la comunicación entre ambas máquinas y el desarrollo de KPIs en conjunto

Como trabajo fuera del entorno del laboratorio, se plantean tanto la continuidad de la colaboración con las empresas con las que ya se ha trabajado, así como nuevas implementaciones en otras empresas. De manera que se proponen los siguientes puntos:

- Implementar los KPIs propuestos en el desarrollo de este trabajo en entornos industriales.
- Definir nuevos KPIs en los entornos existentes atendiendo a las propuestas de la industria, como por ejemplo, el interés en evaluar el consumo energético.

Desarrollar nuevos KPIs en nuevos entornos reales en los que se pueda aplicar el modelo desarrollado (Distribución Urbana de Mercancías, AGVs (Automatic Guided Vehicles), o Impresión 3D).

Resultados de la investigación

Como resultado de la investigación desarrollada a lo largo de esta tesis se han obtenido:

- © 5 publicaciones indexadas en revistas de alto impacto
 - Morella, P.; Lambán, M.P.; Royo, J.; Sánchez, J.C.; Ng Corrales, L.d.C. Development of a New Green Indicator and Its Implementation in a Cyber-Physical System for a Green Supply Chain. *Sustainability* 2020, 12, 8629. <https://doi.org/10.3390/su12208629> (Q2, Impact Factor: 3.889)
 - Morella, P.; Lambán, M.P.; Royo, J.; Sánchez, J.C.; Latapia, J. Development of a New KPI for the Economic Quantification of Six Big Losses and Its Implementation in a Cyber Physical System. *Appl. Sci.* 2020, 10, 9154. <https://doi.org/10.3390/app10249154> (Q2, Impact Factor: 2.838)
 - Morella, P.; Lambán, M.P.; Royo, J.; Sánchez, J.C. Study and Analysis of the Implementation of 4.0 Technologies in the Agri-Food Supply Chain: A State of the Art. *Agronomy* 2021, 11, 2526. <https://doi.org/10.3390/agronomy11122526> (Q1, Impact Factor: 3.949)

- Lambán, M.P.; Morella, P.; Royo, J.; Sánchez, J.C. Using industry 4.0 to face the challenges of predictive maintenance: A key performance indicators development in a cyber physical system, *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 171, 108400, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108400> (Q1, *Impact Factor*: 7.18)
- Morella, P.; Lambán, M.P.; Royo, J.; Sánchez, J.C.; Muñoz, O. Cyber Physical Systems implementation to develop a Smart Manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Volume 1193, 9th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC 2021) DOI:10.1088/1757-899X/1193/1/012114.
- © 3 publicaciones en revistas no indexadas
 - Royo, J.A.; Lambán, M.P.; Morella, P. Cadena de Suministro 4.0: una ventaja competitiva. *Revista IV Congreso Innovación Logística, Slimstock*.
 - Morella, P., Lambán, M.P., Royo, J.; Sánchez, J.C. The Importance of Implementing Cyber Physical Systems to Acquire Real-Time Data and Indicators. *J* 2021, 4, 147-153. <https://doi.org/10.3390/j4020012>
 - Morella, P.; Lambán, M.P.; Royo, J.; Sánchez, J.C. Sistemas ciberfísicos y adquisición de datos en tiempo real. *Bit* 2022, nº223.
- © 1 publicación de un capítulo de un libro de la editorial Springer
 - Morella, P.; Lambán, M.P.; Royo, J.; Sánchez, J.C.; Hernández Korner, M.E. (2021). Determining and Applying Productive, Environmental and Economical Indicators and Indexes to a Cyber Physical System for Greening Process of Supply Chain. In: Ochoa-Zezzatti, A., Oliva, D., Juan Perez, A. (eds) *Technological and Industrial Applications Associated with Intelligent Logistics. Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68655-0_1
- © 6 Participaciones en congresos
 - 8º CONGRESO INTERNACIONAL EN LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO 2020 (CiLog 2020) con la comunicación Determining and Applying Productive, Environmental and Economical Indicators and Indexes to a Cyber Physical System for Greening Process of Supply Chain
 - RED CONGRESS HUMANITAS 2021 con dos comunicaciones orales:
 - Participación de profesores de Formación Profesional en las aulas universitarias.
 - Aplicación de un caso práctico con M5Stack para la enseñanza de la tecnología IoT.
 - XIX FORO INTERNACIONAL sobre la EVALUACIÓN de la CALIDAD de la INVESTIGACIÓN y de la EDUCACIÓN SUPERIOR (FECIES 2022) con la participación en el simposio “Alianza entre Universidad de Zaragoza y el Centro de Investigación TECNALIA: estrategias y resultados educativos” con la comunicación oral creación de recursos académicos a través de las TICs para fomentar conocimiento sobre CPS.
 - MESIC 2021 con la comunicación Cyber Physical Systems implementation to develop a Smart Manufacturing.
 - Primer Congreso Anual Internacional de Estudiantes de Doctorado de la Universidad Miguel Hernández de Elche con el poster “Desarrollo de indicadores aplicados a las seis grandes pérdidas e implementación de estos en un Sistema Ciberfísico”.

- Segundo Congreso Anual Internacional de Estudiantes de Doctorado de la Universidad Miguel Hernández de Elche con el poster “Implementación de un Sistema Ciberfísico en una máquina herramienta”.
- © 1 ponencia en la FIMA el jueves 28/04/2022 sobre innovación, sostenibilidad y economía circular en la agricultura.
- © 3 secretos industriales desarrollados en la colaboración Unizar- TECNALIA
 - Inventora en el Registro de Software de la Universidad con número interno de registro PII-2022-0005 y título “ECL Energy Consumption Losses”
 - Inventora en el Registro de Software de la Universidad con número interno de registro PII-2022-0016 y título “CLI Cost Loss Indicator”
 - Inventora en el Registro de Software de la Universidad con número interno de registro PII-2022-0004 y título “SMR Serie Mínima Rentable”
- © 16 TFGs y TFM codirigidos
 - Coste de ciclo de vida en máquina herramienta en tiempo real
 - Estudio y cálculo de indicadores de producción y mantenimiento en un sistema ciberfísico
 - Procesos e indicadores en logística inversa de un e-commerce
 - Estudio, definición y caracterización de indicadores para la Distribución Urbana de Mercancías (DUM)
 - Estudio y caracterización de indicadores para la digitalización del Vertical Farming
 - Industria 4.0 en industria agroalimentaria. Tecnologías de identificación automática y captura y gestión de la información en procesos
 - Estudio y cálculo de variantes y de indicadores de producción y mantenimiento en sistemas ciberfísicos
 - Estudio y análisis de indicadores operativos, sostenibles y económicos para la implementación de un Hub logístico en Zaragoza
 - Estudio y aplicación de técnicas de mantenimiento 4.0 en máquina herramienta
 - Análisis de la situación actual de la distribución urbana de mercancías y estudio de buenas prácticas
 - Estudio de mejora del layout de la línea de ensamblaje de mezcladores de piensos en la empresa TATOMA.
 - Estudio de estrategias de logística inversa en la distribución urbana de mercancías
 - Implementación de algoritmos machine-learning al mantenimiento predictivo en sistemas ciberfísicos
 - Implantación del método 5S en PYME dedicada a la fabricación y diseño de cuadros eléctricos
 - Estudio y análisis de la logística inversa de residuos en ciudades
 - Herramienta de monitorización del mantenimiento en una empresa fabricante de electrodomésticos
- © 2 revisiones de artículos
 - Revista Sustainability
 - Revista Supercomputing
- © 3 artículos en revisión
 - “Technologies associated with Industry 4.0 in green supply chains: A Systematic Literature Review” en Journal of Manufacturing Technology Management (Q1)

- “Evaluating the impact of new trends in urban freight transportation attending the triple bottom line: A case study” en Computers & Industrial Engineering (Q1)
- “Using IoT technologies to facilitate communication between Cyber Physical Systems and users and solve the problems of set-up time acquisition” en J (no indexada)
- © 1 capítulo de un libro en revisión
 - “La gamificación como herramienta de mejora de la participación y adquisición de conocimientos” en el libro International Handbook of Innovation and Assessment of the Quality of Higher Education and Research (Vol. 2) por la editorial Thomson Reuters indexada en SPI (Ránking: Scholarly Publishers Indicators, Q1)
- © Participación en dos proyectos de innovación docente en la universidad de Zaragoza
 - Creación de un curso OCW: Introducción a los sistemas ciberfísicos en entornos industriales dentro del marco de los Proyectos de Innovación Docente en el PRAUZ (Programa de Recursos en Abierto en la Universidad de Zaragoza) con ID 93/2021.
 - Gamificación en el estudio "Experto Universitario en Cadena de Suministro 4.0", basado en la gamificación del curso enmarcado en el programa PIIDUZ (Programa de Incentivación de la Innovación Docente en la Universidad de Zaragoza), con ID 92/2021.

6. Bibliografía

- Ameta, G., Rachuri, S., Fiorentini, X., Mani, M., Fenves, S. J., Lyons, K. W., & Sriram, R. D. (2011). Extending the notion of quality from physical metrology to information and sustainability. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(5), 737–750. <https://doi.org/10.1007/S10845-009-0333-3>
- Anderson, J. K., Howarth, E., Vainre, M., Humphrey, A., Jones, P. B., & Ford, T. J. (2020). Advancing methodology for scoping reviews: Recommendations arising from a scoping literature review (SLR) to inform transformation of Children and Adolescent Mental Health Services. *BMC Medical Research Methodology*, 20(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/S12874-020-01127-3/FIGURES/2>
- Anser, M. K., Khan, M. A., Awan, U., Batool, R., Zaman, K., Imran, M., Sasmoko, Indrianti, Y., Khan, A., & Bakar, Z. A. (2020). The Role of Technological Innovation in a Dynamic Model of the Environmental Supply Chain Curve: Evidence from a Panel of 102 Countries. *Processes*, 8(9), 1033. <https://doi.org/10.3390/pr8091033>
- Asare, P., Bakirtzis, G., Bernard, R., Lee, E. A., Prinsloo, G., Torngren, M., & Sunder, S. S. (2012). *Cyber-Physical Systems - a Concept Map*. <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/cps/>
- Bag, S., Gupta, S., Kumar, S., & Sivarajah, U. (2020). Role of technological dimensions of green supply chain management practices on firm performance. *Journal of Enterprise Information Management*, 34(1), 1–27. <https://doi.org/10.1108/JEIM-10-2019-0324/FULL/PDF>
- Bagheri, B., Yang, S., Kao, H. A., & Lee, J. (2015). Cyber-physical systems architecture for self-aware machines in industry 4.0 environment. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 1622–1627. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.318>
- Banasik, A., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Kanellopoulos, A., Claassen, G. D. H., & van der Vorst, J. G. A. J. (2018). Multi-criteria decision making approaches for green supply chains: a review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 30(3), 366–396. <https://doi.org/10.1007/s10696-016-9263-5>
- Bayhan, H., Meißner, M., Kaiser, P., Meyer, M., & Hompel, M. ten. (2020). Presentation of a novel real-time production supply concept with cyber-physical systems and efficiency validation by process status indicators. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(1–2), 527–537. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05373-z>
- Beier, G., Ullrich, A., Niehoff, S., Reißig, M., & Habich, M. (2020). Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes – A literature review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 259). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120856>
- Bengtsson, M., & Kurdve, M. (2016). Machining Equipment Life Cycle Costing Model with Dynamic Maintenance Cost. *Procedia CIRP*, 48, 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.110>
- Big Data Marketer. (2016). *¿Qué es el Hype Cycle tecnológico de Gartner?* <http://www.bigdata-social.com/el-hype-cycle-tecnologico-de-gartner-es/>

- Birkel, H., & Müller, J. M. (2021). Potentials of industry 4.0 for supply chain management within the triple bottom line of sustainability – A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125612. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125612>
- Borregan-Alvarado, J., Alvarez-Meaza, I., Cilleruelo-Carrasco, E., & Garechana-Anacabe, G. (2020). A bibliometric analysis in industry 4.0 and advanced manufacturing: What about the sustainable supply chain? *Sustainability (Switzerland)*, 12(19), 7840. <https://doi.org/10.3390/SU12197840>
- Brandl, D. L., & Brandl, D. (2018). KPI Exchanges in Smart Manufacturing using KPI-ML. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 31–35. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2018.08.230>
- Brüggemann, H., Bremer, P., Brüggemann, H., & Bremer, P. (2015). Einführung und Überblick. In *Grundlagen Qualitätsmanagement* (pp. 1–14). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-09221-4_1
- Cañas, H., Mula, J., & Campuzano-Bolarín, F. (2020). A General Outline of a Sustainable Supply Chain 4.0. *Sustainability 2020, Vol. 12, Page 7978*, 12(19), 7978. <https://doi.org/10.3390/SU12197978>
- Chiappetta Jabbour, C. J., Fiorini, P. D. C., Ndubisi, N. O., Queiroz, M. M., & Piato, É. L. (2020). Digitally-enabled sustainable supply chains in the 21st century: A review and a research agenda. *Science of the Total Environment*, 725, 138177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138177>
- Christen, M., Adey, B. T., & Wallbaum, H. (2016). On the usefulness of a cost-performance indicator curve at the strategic level for consideration of energy efficiency measures for building portfolios. *Energy and Buildings*, 119, 267–282. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.02.056>
- Ciliberto, C., Szopik-Decpzy Nska, K., Tarczy Nska-Łuniewska, M., Ruggieri, A., & Ioppolo, G. (2021). Enabling the Circular Economy transition: A sustainable lean manufacturing recipe for Industry 4.0. *Wiley Online Library*, 30(7), 3255–3272. <https://doi.org/10.1002/bse.2801>
- Comisión de Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible. (2007). *Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies*.
- Cwiklicki, M., & Wojnarowska, M. (2020). Circular economy and industry 4.0: One-way or two-way relationships? *Engineering Economics*, 31(4), 387–397. <https://doi.org/10.5755/j01.ee.31.4.24565>
- Dalenogare, L. S., Benitez, G. B., Ayala, N. F., & Frank, A. G. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204, 383–394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- Daniyan, I., Mpofu, K., Ramatsetse, B., & Gupta, M. (2021). Review of life cycle models for enhancing machine tools sustainability: lessons, trends and future directions. *Heliyon*, 7(4), e06790. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E06790>
- de Sousa Jabbour, A. B. L., Jabbour, C. J. C., Foropon, C., & Filho, M. G. (2018). When titans meet – Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.01.017>

- Deepa, B, Srigayathri, S, & Visalakshi, S. (2018). A Review on Cloud Computing. *International Journal of Trend in Research and Development*.
https://www.researchgate.net/publication/327366291_A_Review_on_Cloud_Computing
- Denyer, D., & Tranfield, D. (2009). Producing a Systematic Review. In D. A. Buchanan & A. Bryman (Ed.), *The Sage handbook of organizationa research methods* (pp. 671–689). Sage Publications Ltd.
https://gent.uab.cat/diego_prior/sites/gent.uab.cat.diego_prior/files/01_a_01_Denyer-Tranfield-Producing-a-Systematic-Review.pdf
- Dev, N. K., Shankar, R., & Qaiser, F. H. (2020). Industry 4.0 and circular economy: Operational excellence for sustainable reverse supply chain performance. *Resources, Conservation and Recycling*, 153. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104583>
- Divya, K., & Jeyalatha, S. (2012). Key technologies in cloud computing. *Proceedings of 2012 International Conference on Cloud Computing Technologies, Applications and Management, ICCCTAM 2012*, 196–199. <https://doi.org/10.1109/ICCCTAM.2012.6488097>
- Dogan, I., & Aydin, N. (2011). Combining Bayesian Networks and Total Cost of Ownership method for supplier selection analysis. *Computers and Industrial Engineering*, 61(4), 1072–1085. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.06.021>
- Domingo, R., & Aguado, S. (2015). Overall Environmental Equipment Effectiveness as a Metric of a Lean and Green Manufacturing System. *Sustainability*, 7(7), 9031–9047. <https://doi.org/10.3390/su7079031>
- Durán, O., Capaldo, A., & Duran Acevedo, P. (2018). Sustainable Overall Throughputability Effectiveness (S.O.T.E.) as a Metric for Production Systems. *Sustainability*, 10(2), 362. <https://doi.org/10.3390/su10020362>
- electricityMap*. (2022).
https://app.electricitymaps.com/zone/ES?utm_source=electricitymap.org&utm_medium=website&utm_campaign=menu
- Elkington, J. (1999). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business* (Vol. 25). Capstone.
https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Cannibals+with+Forks:+Triple+Bottom+Line+of+21st+Century+Business&author=Elkington,+J.&publication_year=1999&journal=Altern.+J.&volume=25&pages=42%E2%80%939343
- Eparantza, R., Revilla, Ó., Azkarate, A., & Zendoia, J. (2006). A life cycle cost calculation and management system for machine tools. *13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 717–722.
https://www.researchgate.net/publication/228632481_A_life_cycle_cost_calculation_and_management_system_for_machine_tools
- Factor de emisión de la energía eléctrica: el mix eléctrico. Cambio climático*. (2022).
https://canviclimatic.gencat.cat/es/actua/factors_demissio_associats_a_lenergia/
- Frank, A. G., Dalenogare, L. S., Ayala, N. F., Frank, A. G., Dalenogare, L. S., & Ayala, N. F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210(C), 15–26.
<https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2019.01.004>

- Fritzsche, K., Niehoff, S., & Beier, G. (2018). Industry 4.0 and Climate Change—Exploring the Science-Policy Gap. *Sustainability*, 10(12), 4511. <https://doi.org/10.3390/su10124511>
- Fukuda, Y., & Patzke, R. (2010). Standardization of Key Performance Indicator for manufacturing execution system. *IEEE Conference Publication*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5603940>
- Furstenau, L. B., Sott, M. K., Kipper, L. M., MacHado, E. L., Lopez-Robles, J. R., Dohan, M. S., Cobo, M. J., Zahid, A., Abbasi, Q. H., & Imran, M. A. (2020). Link between Sustainability and Industry 4.0: Trends, Challenges and New Perspectives. In *IEEE Access* (Vol. 8, pp. 140079–140096). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012812>
- Gajdzik, B., Grabowska, S., Saniuk, S., & Wiczorek, T. (2020). Sustainable Development and Industry 4.0: A Bibliometric Analysis Identifying Key Scientific Problems of the Sustainable Industry 4.0. *Energies*, 13(16), 4254. <https://doi.org/10.3390/en13164254>
- Galar, D., Berges, L., Lambán, P., & Tormos, B. (2014). The measurement of maintenance function efficiency through financial KPIS La medición de la eficiencia de la función mantenimiento a través de KPIS financieros. *DYNA*, 81(184), 102–109. <http://dyna.medellin.unal.edu.co/>
- Gartner. (2018). *Gartner-2018-Manufacturing-Technology-Hype-Cycle*. <https://www.manufacturing-operations-management.com/.a/6a00e5510302528834022ad39b1dd2200b-popup>
- Gartner. (2019). *Hype Cycle for Manufacturing Operations Strategy, 2019*. <https://www.gartner.com/en/documents/3955912/hype-cycle-for-manufacturing-operations-strategy-2019>
- Gartner. (2020). *Hype Cycle for Manufacturing Operations Strategy, 2020*. <https://www.gartner.com/en/documents/3988511/hype-cycle-for-manufacturing-operations-strategy-2020>
- Ghobakhloo, M. (2018). The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(6), 910–936. <https://doi.org/10.1108/JMTM-02-2018-0057>
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119869>
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Grybauskas, A., Vilkas, M., & Petraitė, M. (2021). Industry 4.0, innovation, and sustainable development: A systematic review and a roadmap to sustainable innovation. *Business Strategy and the Environment*, 30(8), 4237–4257. <https://doi.org/10.1002/BSE.2867>
- Gifford, C., & Daff, D. (2017). *ISA-95*. International Society of Automation. <https://www.isa.org/intech-home/2017/november-december/features/isa-95-to-support-smart-manufacturing-iiot>
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: the industrial internet of things*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-2047-4>

- Götze, U., Koriath, H. J., Kolesnikov, A., Lindner, R., & Paetzold, J. (2012). Integrated methodology for the evaluation of the energy- and cost-effectiveness of machine tools. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5(3), 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.04.001>
- Gunasekaran, A., Williams, H. J., & McGaughey, R. E. (2005). Performance measurement and costing system in new enterprise. *Technovation*, 25(5), 523–533. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2003.09.010>
- Hagen, J., Büth, L., Haupt, J., Cerdas, F., & Herrmann, C. (2020). Live LCA in learning factories: real time assessment of product life cycles environmental impacts. *Procedia Manufacturing*, 45, 128–133. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.04.083>
- Hedvicáková, M., & Král, M. (2019). BENEFITS OF KPIS FOR INDUSTRY SECTOR EVALUATION: THE CASE STUDY FROM THE CZECH REPUBLIC. *Business Administration and Management*. <https://doi.org/10.15240/tul/001/2019-2-007>
- Herrmann, C., Kara, S., & Thiede, S. (2011). Dynamic life cycle costing based on lifetime prediction. <Http://Dx.Doi.Org/10.1080/19397038.2010.549245>, 4(3), 224–235. <https://doi.org/10.1080/19397038.2010.549245>
- ISO. (2006a). *Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (14040)*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en>
- ISO. (2006b). *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (14044)*. *International Organization for Standardization*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>
- ISO. (2014). *Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management — Part 2: Definitions and descriptions (22400-1:2014)*. <https://www.iso.org/standard/56847.html>
- ISO. (2018). *Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification (14067:2018)*.
- ISO 22400- Automation systems and integration — Key performance indicators (KPIs) for manufacturing operations management.* (2014). <https://www.iso.org/standard/54497.html>
- John, L., Sampayo, M., & Peças, P. (2021). Lean & Green on Industry 4.0 Context – Contribution to Understand L&G Drivers and Design Principles. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*, 6(5), 1214–1229. <https://doi.org/10.33889/IJMEMS.2021.6.5.073>
- Jonsson, P., & Lesshammar, M. (1999). Evaluation and improvement of manufacturing performance measurement systems - The role of OEE. In *International Journal of Operations and Production Management* (Vol. 19, Issue 1, pp. 55–78). <https://doi.org/10.1108/01443579910244223>
- Joppen, R., von Enzberg, S., Gundlach, J., Kühn, A., & Dumitrescu, R. (2019). Key performance indicators in the production of the future. *Procedia CIRP*, 81, 759–764. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2019.03.190>

Kaganski, S., Majak, J., Karjust, K., & Toompalu, S. (2017). Implementation of Key Performance Indicators Selection Model as Part of the Enterprise Analysis Model. *Procedia CIRP*, 63, 283–288. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2017.03.143>

Kambanou, M. L. (2020). Life Cycle Costing: Understanding How It Is Practised and Its Relationship to Life Cycle Management—A Case Study. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 3252, 12(8), 3252. <https://doi.org/10.3390/SU12083252>

Kambanou, M. L., & Sakao, T. (2020). Using life cycle costing (LCC) to select circular measures: A discussion and practical approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104650. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.104650>

Kazancoglu, Y., Kazancoglu, I., & Sagnak, M. (2018). A new holistic conceptual framework for green supply chain management performance assessment based on circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 195, 1282–1299. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.015>

Kibira, D., Brundage, M. P., Feng, S., & Morris, K. C. (2018). Procedure for Selecting Key Performance Indicators for Sustainable Manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 140(1). <https://doi.org/10.1115/1.4037439>

Kim, J., & Lee, J. Y. (2021). Server-Edge dualized closed-loop data analytics system for cyber-physical system application. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 67, 102040. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102040>

Kitchenham, B. (2007). *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*.

Korpi, E., & Ala-Risku, T. (2008). Life cycle costing: A review of published case studies. *Managerial Auditing Journal*, 23(3), 240–261. <https://doi.org/10.1108/02686900810857703/FULL/PDF>

Kumar, P., Singh, R. K., & Kumar, V. (2021). Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105215. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.105215>

Kumar, V., Pallathadka, H., Kumar Sharma, S., Thakar, C. M., Singh, M., & Kirana Pallathadka, L. (2022). Role of machine learning in green supply chain management and operations management. *Materials Today: Proceedings*, 51, 2485–2489. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2021.11.625>

Lad, B. K., & Kulkarni, M. S. (2012). Optimal maintenance schedule decisions for machine tools considering the user's cost structure. [Http://Dx.Doi.Org/10.1080/00207543.2011.632503](http://Dx.Doi.Org/10.1080/00207543.2011.632503), 50(20), 5859–5871. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.632503>

Lambán, M. P. (2010). *Determinación de costes de procesos de la cadena de suministro, e influencia de factores productivos y logísticos*. Universidad de Zaragoza.

Lee, E. (2010). Categories and Subject Descriptors. *Proc. of the 47th Design Automation Conference (DAC), ACM*, 737–742. <https://doi.org/10.1145/1837274.1837462>

Lee, E. A. (2015). The past, present and future of cyber-physical systems: A focus on models. *Sensors (Switzerland)*, 15(3), 4837–4869. <https://doi.org/10.3390/s150304837>

- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>
- Leong, W. D., Teng, S. Y., How, B. S., Ngan, S. L., Rahman, A. A., Tan, C. P., Ponnambalam, S. G., & Lam, H. L. (2020). Enhancing the adaptability: Lean and green strategy towards the Industry Revolution 4.0. *Journal of Cleaner Production*, 273, 122870. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122870>
- Li, G., Yang, H., Sun, L., & Sohal, A. S. (2009). The impact of IT implementation on supply chain integration and performance. *International Journal of Production Economics*, 120(1), 125–138. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.07.017>
- Li, Y., Dai, J., & Cui, L. (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*, 229, 107777. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107777>
- Lim, K. Y. H., Zheng, P., & Chen, C. H. (2020). A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. In *Journal of Intelligent Manufacturing* (Vol. 31, Issue 6, pp. 1313–1337). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>
- Lindberg, C. F., Tan, S., Yan, J., & Starfelt, F. (2015). Key Performance Indicators Improve Industrial Performance. *Energy Procedia*, 75, 1785–1790. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2015.07.474>
- Luthra, S., & Mangla, S. K. (2018). Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.018>
- Machado, C. G., Winroth, M. P., & Ribeiro da Silva, E. H. D. (2020). Sustainable manufacturing in Industry 4.0: an emerging research agenda. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1462–1484. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1652777>
- Manavalan, E., & Jayakrishna, K. (2019). An Analysis on Sustainable Supply Chain for Circular Economy. *Procedia Manufacturing*, 33, 477–484. <https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2019.04.059>
- Martinez, J. (2021). *Qué es Grafana y primeros pasos | OpenWebinars*. <https://openwebinars.net/blog/que-es-grafana-y-primeros-pasos/>
- Micheli, G. J. L., Cagno, E., Mustillo, G., & Trianni, A. (2020). Green supply chain management drivers, practices and performance: A comprehensive study on the moderators. *Journal of Cleaner Production*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121024>
- Muchiri, P., & Pintelon, L. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): Literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, 46(13), 3517–3535. <https://doi.org/10.1080/00207540601142645>
- Narasimhan, R., Swink, M., & Kim, S. W. (2006). Disentangling leanness and agility: An empirical investigation. *Journal of Operations Management*, 24(5), 440–457. <https://doi.org/10.1016/J.JOM.2005.11.011>

OECD. (2011). *Sustainable manufacturing toolkit: seven steps to environmental excellence start-up guide*. www.oecd.org/innovation/green/toolkit

Olano, J. (2021). *Qué es Grafana, cómo podemos emplearlo en la monitorización*. <https://pandorafms.com/blog/es/que-es-grafana/>

Olugu, E. U., Wong, K. Y., & Shaharoun, A. M. (2011). Development of key performance measures for the automobile green supply chain. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(6), 567–579. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.06.003>

Panicker, S., Nagarajan, H. P. N., Mokhtarian, H., Hamedi, A., Chakraborti, A., Coatanéa, E., Haapala, K. R., & Koskinen, K. (2019). Tracing the interrelationship between key performance indicators and production cost using Bayesian networks. *Procedia CIRP*, 81, 500–505. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.136>

Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., & Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 179, 605–615. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>

Prill, K., & Igielski, K. (2018). Calculation of Operational Indicator EEOI for Ships Designed to Other Purpose Than Transport Based on A Research – Training Vessel. *New Trends in Production Engineering*, 1(1), 335–340. <https://doi.org/10.2478/NTPE-2018-0041>

PwC. (2016). *Industry 4.0: Global Digital Operations Study*. www.pwc.com/industry40

Raji, I. O., Shevtshenko, E., Rossi, T., & Strozzi, F. (2021). Modelling the relationship of digital technologies with lean and agile strategies. *https://doi.org/10.1080/16258312.2021.1925583*, 22(4), 323–346. <https://doi.org/10.1080/16258312.2021.1925583>

REData API | Red Eléctrica. (n.d.). Retrieved August 1, 2022, from <https://www.ree.es/es/apidatos>

Rehman Khan, S. A., Yu, Z., Sarwat, S., Godil, D. I., Amin, S., & Shujaat, S. (2021). The role of block chain technology in circular economy practices to improve organisational performance. *https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1872512*. <https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1872512>

Rinaldi, S., Barbanera, M., & Lascaro, E. (2014). Assessment of carbon footprint and energy performance of the extra virgin olive oil chain in Umbria, Italy. *Science of The Total Environment*, 482–483(1), 71–79. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.02.104>

Royo Sánchez, J., Bolea Bitrián, M., Torres Leza, F., & Aguilar Martín, J. J. (2002). *Mantenimiento Industrial Integral*. Kronos.

Saraji, M. K., Streimikiene, D., Kyriakopoulos, G. L., & Tvaronaviciene, M. (2021). Fermatean fuzzy CRITIC-COPRAS method for evaluating the challenges to industry 4.0 adoption for a sustainable digital transformation. *Mdpi.Com*. <https://doi.org/10.3390/su13179577>

Sassanelli, C., Rosa, P., Rocca, R., & Terzi, S. (2019). Circular economy performance assessment methods: A systematic literature review. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 229, pp. 440–453). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.019>

Secretaría de medioambiente y recursos naturales. (2021). *Mix eléctrico Méjico*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/630693/Aviso_FEE_2020.pdf

- Settanni, E. (2008). The need for a computational structure of LCC. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2008 13:7, 13(7), 526–531. <https://doi.org/10.1007/S11367-008-0036-6>
- Sharma, R., Jabbour, C. J. C., & Lopes de Sousa Jabbour, A. B. (2020). Sustainable manufacturing and industry 4.0: what we know and what we don't. In *Journal of Enterprise Information Management*. Emerald Group Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1108/JEIM-01-2020-0024>
- Sigov, A., Ratkin, · Leonid, Ivanov, L. A., Li, ·, & Xu, D. (2022). Emerging Enabling Technologies for Industry 4.0 and beyond. *Information Systems Frontiers* 2022, 1, 1–11. <https://doi.org/10.1007/S10796-021-10213-W>
- Sindhvani, R., Mittal, V. K., Singh, P. L., Aggarwal, A., & Gautam, N. (2019). Modelling and analysis of barriers affecting the implementation of lean green agile manufacturing system (LGAMS). *Benchmarking*, 26(2), 498–529. <https://doi.org/10.1108/BIJ-09-2017-0245/FULL/PDF>
- Sony, M. (2019). Green Supply Chain Management Practices and Digital Technology: A Qualitative Study. In *Technology Optimization and Change Management for Successful Digital Supply Chains* (pp. 233–254). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7700-3.CH012>
- Tăucean, I., Tămășilă, M., Ivascu, L., Miclea, Șerban, & Negruț, M. (2019). Integrating Sustainability and Lean: SLIM Method and Enterprise Game Proposed. *Sustainability*, 11(7), 2103. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su11072103>
- Thiede, S., Spiering, T., Kohlitz, S., Herrmann, C., & Kara, S. (2012). Dynamic Total Cost of Ownership (TCO) Calculation of Injection Moulding Machines. *Leveraging Technology for a Sustainable World - Proceedings of the 19th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, 275–280. https://doi.org/10.1007/978-3-642-29069-5_47
- TuDashboard. (2022). Qué es un dashboard y cómo funciona. <https://tudashboard.com/que-es-un-dashboard/>
- Umar, M., Khan, S. A. R., Yusoff Yusliza, M., Ali, S., & Yu, Z. (2022). Industry 4.0 and green supply chain practices: an empirical study. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 71(3), 814–832. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2020-0633/FULL/PDF>
- Umar, M., Khan, S. A. R., Zia-ul-haq, H. M., Yusliza, M. Y., & Farooq, K. (2021). The role of emerging technologies in implementing green practices to achieve sustainable operations. *TQM Journal*. <https://doi.org/10.1108/TQM-06-2021-0172/FULL/PDF>
- UNE. (2017). *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-3: Guía de aplicación. Cálculo del coste del ciclo de vida (60300-3-3)*.
- Vanalle, R. M., Ganga, G. M. D., Godinho Filho, M., & Lucato, W. C. (2017). Green supply chain management. An investigation of pressures, practices, and performance within the Brazilian automotive supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 151, 250–259. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.066>
- Varisco, M., Johnsson, C., Mejvik, J., Schiraldi, M. M., & Zhu, L. (2018). KPIs for Manufacturing Operations Management: driving the ISO22400 standard towards practical

- applicability. IFAC-PapersOnLine, 51(11), 7–12.
<https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2018.08.226>
- Wahab, A. N. A., Mukhtar, M., & Sulaiman, R. (2013). A Conceptual Model of Lean Manufacturing Dimensions. *Procedia Technology*, 11, 1292–1298.
<https://doi.org/10.1016/J.PROTCY.2013.12.327>
- Wan, J., Chen, M., Xia, F., Li, D., & Zhou, K. (2013). From machine-to-machine communications towards cyber-physical systems. *Computer Science and Information Systems*, 10(3), 1105–1128. <https://doi.org/10.2298/CSIS120326018W>
- Wan, J., Yan, H., Suo, H., & Li, F. (2011). Advances in cyber-physical systems research. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 5(11), 1891–1908.
<https://doi.org/10.3837/tiis.2011.11.001>
- Wang, L., & Hui, M. (2020). Research on joint emission reduction in supply chain based on carbon footprint of the product. *Journal of Cleaner Production*, 121086.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121086>
- Windmark, C., Bushlya, V., & Ståhl, J. E. (2018). CPR a general Cost Performance Ratio in Manufacturing-A KPI for judgement of different technologies and development scenarios. *Procedia CIRP*, 72, 1220–1226. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.106>
- Woodward, D. G. (1997). Life cycle costing—Theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, 15(6), 335–344.
[https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(96\)00089-0](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(96)00089-0)
- Wudhikarn, R., Smithikul, C., & Manopiniwes, W. (2010). *Developing Overall Equipment Cost Loss Indicator* (pp. 557–567). https://doi.org/10.1007/978-3-642-10430-5_43
- Xu, L. da. (2020). Industry 4.0—Frontiers of fourth industrial revolution. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 531–534. <https://doi.org/10.1002/SRES.2719>
- Yadav, S., Garg, D., & Luthra, S. (2020). Analysing challenges for internet of things adoption in agriculture supply chain management. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 36(1), 73–97. <https://doi.org/10.1504/IJISE.2020.109121>
- Ying, J., & Li-jun, Z. (2012). Study on Green Supply Chain Management Based on Circular Economy. *Physics Procedia*, 25, 1682–1688. <https://doi.org/10.1016/J.PHPRO.2012.03.295>
- Zhang, G., Chen, C. H., Zheng, P., & Zhong, R. Y. (2020). An integrated framework for active discovery and optimal allocation of smart manufacturing services. *Journal of Cleaner Production*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123144>
- Zhao, J., Ji, M., & Feng, B. (2020). Smarter supply chain: a literature review and practices. *Journal of Data, Information and Management*. <https://doi.org/10.1007/s42488-020-00025-z>
- Zhao, R., Liu, Y., Zhang, N., & Huang, T. (2017). An optimization model for green supply chain management by using a big data analytic approach. *Journal of Cleaner Production*, 142, 1085–1097. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.006>
- Zhu, L., Johnsson, C., Varisco, M., & Schiraldi, M. M. (2018). Key performance indicators for manufacturing operations management – gap analysis between process industrial needs and ISO 22400 standard. *Procedia Manufacturing*, 25, 82–88.
<https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2018.06.060>

Zsidisin, G., Management, S. S.-J. of P. & S., & 2001, undefined. (2001). Environmental purchasing: a framework for theory development. *Elsevier*.
https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969701200000071?casa_token=DFPcCmLchnAAAAA:xR1FAIBqubPs4j65mM8L25OOwlrXrvOmH5vonEAwlcV0LI2Oy5-tcqoknfJuXVcPX_BzKg_rQ

