



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Metodología para la identificación y priorización de los factores críticos para implantar Digital Twins bajo un enfoque de sostenibilidad aplicando un método multicriterio

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Avanzada de Producción,  
Logística y Cadena de Suministro

AUTOR/A: Barreto Del Pozo, Xavier

Tutor/a: Rodríguez Rodríguez, Raúl

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



**TRABAJO FIN DE MÁSTER DE INGENIERÍA AVANZADA  
DE PRODUCCIÓN, LOGÍSTICA Y CADENA DE SUMINISTRO**

**METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y  
PRIORIZACIÓN DE LOS FACTORES CRÍTICOS PARA  
IMPLANTAR DIGITAL TWINS BAJO UN ENFOQUE DE  
SOSTENIBILIDAD APLICANDO UN MÉTODO  
MULTICRITERIO**

AUTOR: XAVIER BARRETO DEL POZO

TUTOR: RAÚL RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

CURSO: 2021-2022

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia por darme ánimos todo el tiempo desde la distancia, en especial a mi madre y mi pareja; a mis amigos más cercanos por creer en mí; a mis compañeros de grupo por su confianza brindada, al personal de la empresa Hofmann por su preocupación constante; a mis profesores y en especial a Raúl por la oportunidad de desarrollar esta investigación junto a él.

A mi abuela Leyla, que cada día pienso más en ella y en lo mucho que me sacrifico para que se sienta orgullosa esté donde esté.

A todos ellos,

MUCHÍSIMAS GRACIAS DE TODO CORAZÓN

## **RESUMEN**

Esta investigación se basa en identificar y priorizar los factores críticos de éxito necesarios para implementar la tecnología Digital Twin en una empresa bajo un enfoque de sostenibilidad aplicando un método multicriterio. Como primer paso se realizó un análisis bibliográfico con el objetivo de identificar cuáles son los factores, que definen los autores como claves, para desplegar Digital Twin en una organización, obteniéndose como resultados la existencia de limitada bibliografía debido a lo novedoso que es el tema y a su vez justificando la existencia de un hueco investigador. Dado esta situación, se plantea como objetivo fundamental establecer una metodología para implantar Digital Twin en una empresa bajo un enfoque de sostenibilidad, identificando y priorizando primeramente los factores críticos de éxito necesarios para llevar a cabo un despliegue de esta tecnología. Parte de los resultados de esta metodología surgirán principalmente de la opinión de expertos investigadores en el tema y supondrán la base para el proceso de toma de decisión de directivos a la hora de optar por una estrategia para comenzar a usar tecnologías con alto nivel de automatización. Como herramienta para el desarrollo de la tesis, se diseñó y aplicó una metodología, con la ayuda del Best-Worst Method y un grupo de expertos en el tema del Centro de Investigación, Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP) de la Universidad Politécnica de Valencia. Como resultados de la metodología, se alcanzó que el factor crítico de éxito más significativo es el de mejora en el margen de ganancia sobre el cual se plantearon una serie de recomendaciones dirigido en empresas que requieran una base para llevar a cabo una inversión de este calibre con especial enfoque en la sostenibilidad.

**Palabras Clave:** sostenibilidad; Digital Twin; Best-Worst Method; Factores Críticos de Éxito

## **ABSTRACT**

This research is based on identifying and prioritizing the critical success factors necessary to implement Digital Twin technology in a company under a sustainability approach by applying a multi-criteria method. As a first step, a bibliographic analysis was carried out with the aim of identifying the factors that the authors define as key to deploy Digital Twin in an organization, obtaining as results the existence of limited bibliography due to the novelty of the subject and at the same time justifying the existence of a research gap. Given this situation, the main objective is to establish a methodology to implement Digital Twin in a company under a sustainability approach, first identifying and prioritizing the critical success factors necessary to carry out the deployment of this technology. Part of the results of this methodology will emerge mainly from the opinion of expert researchers in the field and will be the basis for the decision-making process of managers when opting for a strategy to start using technologies with a high level of automation. As a tool for the development of the thesis, a methodology was designed and applied with the help of the Best-Worst Method and a group of experts in the field from the Centro de Investigación, Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP) belonging to the Universidad Politécnica de Valencia. As a result of the methodology, it was found that the most significant critical success factor is the improvement in the profit margin, on which a series of recommendations were made for companies that require a basis for carrying out an investment of this caliber with a special focus on sustainability.

**Keywords:** sustainability; Digital Twin; Best-Worst Method; Critical Success Factors

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	7
1.1. Objetivo .....	7
1.2. Justificación y Motivación .....	8
1.3. Estructura del Documento .....	8
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS BIBLIORÁFICO SOBRE FACTORES CRÍTICOS DE ÉXITO Y DIGITAL TWIN .....	10
2.1 Factores Críticos de Éxito según la literatura .....	10
2.2 Factores Críticos de Éxito en la Industria 4.0 .....	11
2.3 Factores Críticos de Éxito para implementar Digital Twin bajo un enfoque de sostenibilidad	13
2.4 Determinación del hueco investigador .....	18
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LA INDUSTRIA 4.0 .....	19
3.1 Evolución histórica de la Revolución Industrial.....	19
3.2 Análisis de la actual Revolución Industrial .....	20
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	23
4.1 Fases de la metodología a desarrollar.....	23
CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	27
5.1 Fase 1. Identificación de los FCE necesarios para la implementación de DT.....	27
5.1.1 Aplicación del Método de Expertos para la selección de Factores Crítico de Éxito.....	27
5.1.2 Coeficiente de Competencia de Experto.....	28
5.1.3 Selección de los FCE según el Método de Expertos .....	30
5.2 Fase 2. Aplicación del “Best-Worst Method” .....	34
5.3 Fase 3. Análisis de los resultados .....	36
5.4 Fase 4. Recomendaciones .....	37
CAPÍTULO 6. PRESUPUESTO .....	39
6.1 Análisis del presupuesto.....	39
Conclusiones.....	40
Anexos .....	41
Bibliografía.....	42

## Índice de Tablas

Tabla 1. Criterios para la evaluación de la aplicabilidad de la tecnología de la Industria 4.0 .....	12
Tabla 2. Factores Críticos de Éxito para la aplicabilidad de Digital Twin según autores.....	17
Tabla 3. Tabla patrón para la estimación de las fuentes de argumentación. ....	29
Tabla 4. Resultado sobre KComp y Promedio de Índice de Competencia de Expertos .....	29
Tabla 5. Votaciones efectuadas por expertos .....	30
Tabla 6. Codificación de los criterios.....	34
Tabla 7. Mejor y Peor criterio.....	35
Tabla 8. Ponderación de los criterios. ....	35
Tabla 9. Resultado de formulación en BWM.....	36
Tabla 10. Costo Total del proyecto.....	39

## Índice de Figuras

Figura 1. Clasificación de los FCE para la adopción de Digital Twin en la cadena de suministro.....	16
Figura 2. Línea temporal de la Revolución Industrial.....	20
Figura 3. Análisis PESTEL sobre situación actual de Industria 4.0 bajo un enfoque de sostenibilidad ....	22
Figura 4. Fases de la metodología.....	23
Figura 5. Pilares de Éxito y FCE.....	31
Figura 6. Gráfico de prioridades de los FCE.....	37
Figura 7. Planificación de la investigación.....	39

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La Industria 4.0 no solo se trata de un avance tecnológico mediante sistemas inteligentes, sino también consiste en procurar un futuro sostenible para el planeta. Hablar de sostenibilidad industrial consiste fundamentalmente en aprovechar las materias primas y la energía para la generación de productos y servicios útiles para la sociedad, extendiendo consigo el ciclo de vida de un producto, desde que surge, crece, entra en la madurez alcanzando altas ventas, luego dándole comienzo a su declive y finalmente reciclándose o refabricándose para convertirse en otro producto mediante la reutilización de sus partes.

Desde el surgimiento de la Primera Revolución Industrial en el siglo XVIII, cuyo objetivo era utilizar los avances tecnológicos del momento para desarrollar la agricultura, mejorar la economía mediante la apertura comercial y la industria y el desenvolvimiento del armamento bélico, casi 300 años después toca la puerta la Cuarta Revolución Industrial. La misma tiene ese enfoque tecnológico, donde la minimización de tareas humanas y la preservación de los ecosistemas van de la mano camino a la preservación de todas las especies incluyendo la nuestra. La diferencia entre la Primera y la Cuarta es que ya hemos aprendido de errores y nos encontramos ante una cuenta regresiva que amenaza la extinción de especies animales, el deterioro de la flora y el surgimiento de continuos desastres naturales que azotan zonas de sensible impacto para los ecosistemas. Con esta problemática surgen tecnologías autónomas capaces de aprender por sí mismas y evolucionar como es Digital Twin, cuya implementación favorece, en el campo de la Gestión de Operaciones, la reducción de los defectos en fabricación, la mejora del mantenimiento preventivo o la eliminación parcial de residuos de fabricación.

## 1.1. Objetivo

Partiendo de esto, se plantea como objetivo fundamental de la investigación establecer una metodología para implantar Digital Twin en una empresa bajo un enfoque de sostenibilidad, identificando y priorizando primeramente los factores críticos de éxito necesarios para llevar a cabo un despliegue de esta tecnología. Parte de los resultados de esta metodología surgirán principalmente de la opinión de expertos investigadores en el tema y supondrán la base para el proceso de toma de decisión de directivos a la hora de optar por una estrategia para comenzar a usar tecnologías con alto nivel de automatización.

La definición de estos factores relacionados estrechamente con el tema de la sostenibilidad supondrá que los objetivos estratégicos, tácticos y operativos de las empresas estarán alineados con las directivas que plantean 9 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados en el 2015 por la ONU a cumplirse en su agenda 2030.

Para lograr este objetivo principal, a continuación, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- « Desarrollar un marco teórico para el análisis de las principales definiciones referidas al tema y demostrar la existencia de un hueco investigador para el desarrollo de este trabajo, manifestando la concepción de los investigadores en la temática de la Industria 4.0.

- « Identificar los Factores Críticos de Éxito con enfoque en la sostenibilidad basados en los 3 pilares: Medioambiental, Económico-Tecnológico y Social.
- « Diseñar una metodología mediante el uso del “Best-Worst Method” para clasificar esos Factores Críticos de Éxito en función de su importancia, para lograr implantar DT, a partir de la opinión de los expertos y la situación actual en la que se encuentre la organización.

### **1.2. Justificación y Motivación**

Las ventajas de una nueva tecnología y el conocimiento sobre la actual crisis medioambiental, condicionó la propuesta de esta investigación para concatenar estas dos áreas y formular recomendaciones a partir de los resultados obtenidos. Conocer el aporte que puede generar el alto nivel de automatización de la Industria 4.0 en los conceptos de economía circular, gestión de residuos y sostenibilidad, puede permitir que los diseños de los procesos y modelos de gestión sean eficientes y respetuosos con el medio ambiente.

Aunque Digital Twin es apenas un sistema automatizado inteligente cuyo ciclo de vida puede decirse que está aún en sus inicios, no es menos cierto que los aportes que puede generar a la industria son de un alto valor añadido; para ello primeramente se deberían preguntar las empresas: ¿Qué necesito para poner en marcha esta tecnología? La respuesta radica en la identificación y priorización de factores claves o críticos de éxito y en el análisis económico para conocer la rentabilidad de ese proyecto.

### **1.3. Estructura del Documento**

Se estructuró la memoria del documento que sustenta la investigación en cinco capítulos:

- Capítulo 2: Análisis bibliográfico sobre Factores Críticos de Éxito y Digital Twins

Para este capítulo se tuvo como objetivo fundamental presentar las bases teóricas de la investigación sustentada en el concepto de Factor Crítico de Éxito bajo un enfoque de sostenibilidad y aplicación de Digital Twins.

- Capítulo 3: Análisis de la situación actual

El objetivo de este capítulo es presentar un análisis del desarrollo de las revoluciones industriales a lo largo de la historia, con los principales hitos de cada momento, hasta llegar a la actual, donde se desarrollará una matriz de PESTEL sobre el desarrollo de la Industrial 4.0 bajo un enfoque de la sostenibilidad.

- Capítulo 4: Metodología

Se pretende diseñar una metodología tomando como base el “Best-Worst Method” con especial enfoque en la sostenibilidad, de forma que se puedan priorizar los factores críticos de éxito identificados en el capítulo anterior.

- Capítulo 5: Aplicación de la metodología

Se desarrolla la metodología, compuesta de cuatro fases, cuyos resultados definirán los requisitos necesarios para que una organización comience el despliegue de esta tecnología a partir de los FCE identificados y contribuir a la propuesta de recomendaciones teniendo como base los tres pilares que rigen la aplicabilidad de DT.

➤ Capítulo 6: Presupuesto

En este apartado se pretende evaluar económicamente la investigación realizada, mediante la presentación de un presupuesto reflejando las horas-hombre dedicadas. Como esta investigación tiene un desarrollo teórico más que aplicado, las actividades desarrolladas para la creación de esta investigación fueron ejecutadas por el propio autor y el grupo de expertos.

## CAPÍTULO 2. ANÁLISIS BIBLIORÁFICO SOBRE FACTORES CRÍTICOS DE ÉXITO Y DIGITAL TWIN

El principal objetivo de este capítulo es presentar las bases teóricas de esta investigación sustentada en el concepto de factor crítico de éxito (FCE) bajo un enfoque de sostenibilidad. Una vez realizado este análisis, se pretende definir cuáles de estos factores serán necesarios para sentar las bases en la aplicación de Digital Twin según los autores referenciados. Igualmente se pretende explicar la existencia de un hueco para el desarrollo de la investigación presente. Como fuentes bibliográficas se consultó Scopus, ScienceDirect, Google Académico y el Polibuscador de la Biblioteca perteneciente a la Universidad Politécnica de Valencia.

### 2.1 Factores Críticos de Éxito según la literatura

A mediados de la segunda mitad del siglo XX surge el concepto de Factor Crítico de Éxito a partir del estallido de los sistemas de información, pese al gran cúmulo de datos significativos que necesitaban ser analizados y en base a ellos pasar a un proceso de toma de decisión. Uno de los primeros artículos publicados referidos al tema, fue por (Ronald, 1961) en la Universidad de Harvard, el cual señaló la importancia de los factores claves al determinar el éxito organizativo a la hora de afrontar el riesgo de sobrecarga de datos. Sin embargo, no pasó mucho tiempo antes de que se hiciera evidente que un uso principal de los factores críticos era ayudar a un equipo de gestión a pensar en las prioridades de los sistemas de información, las áreas para su aplicación eran infinitas (Forster & Rockart, 1989). Con el tiempo hemos podido apreciar que la definición de FCE, inicialmente enfocado en ayudar a determinar las prioridades de los sistemas de información, ha evolucionado para que los líderes establezcan un nivel de prioridad sobre aquellos elementos capaces de garantizar competitividad en el mercado y gestionar la organización eficientemente.

Muchos han sido los estudios dedicados al análisis de los factores crítico del éxito en diferentes sectores, todos con el objetivo de establecer los puntos clave para lograr los objetivos planteados. (Merhi, 2021) realiza un estudio con el objetivo de identificar, definir y evaluar los factores críticos de éxito que afectan la implantación de la inteligencia de datos en el sector público, (Alonso Ferreras, 2010) y (Marais, du Plessis, & Saayman, 2017) presentan investigaciones enfocadas sobre la aplicación de los FCE en la industria del turismo donde el primero se basa en formular un modelo integral para evaluar la competitividad de diferentes destinos turísticos, identificando e integrando factores concretos mientras que el segundo demuestra que en su revisión bibliográfica para esta industria es necesaria la asignación eficiente de recursos, el posicionamiento, la gestión de la calidad, los clientes satisfechos, el aumento de los ingresos y la sostenibilidad. Otros trabajos se centraron en examinar y proporcionar una visión de los factores críticos que permitan la gestión del valor en el sector de la construcción como es el caso de (Alsolami, 2022), mientras que la investigación de (Janyapoon, Liangrokapart, & Tan, 2021) se enfoca en los FCE para la implantación de inteligencia de negocio bajo una visión de la industria sanitaria.

El concepto proporcionado por (Alfaro Saiz, Rodríguez Rodríguez, & Ortiz Bas, 2006) se ciñe a aquellos factores que garantizan, a través de su monitorización y cumplimiento, el éxito de la entidad. Esos factores críticos están formados por un conjunto reducido de objetivos y

estrategias. Una vez que los objetivos, estrategias y factores críticos de éxito han sido definidos, derivan a KPIs que son la parte final y más operativa del sistema de medición del rendimiento. Otros autores como (Wayan Trisnawaty, Hardian, Raharjo, & Prasetyo, 2021) consideran que los FCE pueden priorizar la planificación estratégica de una organización para ayudar a lograr una ventaja competitiva, concentrando los recursos y llegando a convertirse en un método poderoso y aplicable que se usa para abordar desafíos empresariales.

(Alkarney & Albraithen, 2018) expresan que el concepto de factor crítico de éxito destaca sistemáticamente las áreas clave que la dirección debe considerar cuidadosamente para realizar sus objetivos de rendimiento. El mismo autor define como pregunta de su investigación si son los FCE válidos para cualquier contexto en el que sean aplicados. Como respuesta a esa interrogante vale señalar que, al llevar a cabo una definición de estos factores en una empresa, quizás no se garantice el éxito, pero será un punto de inflexión para gestionar correctamente las cuestiones más débiles que pudiesen afectar el cumplimiento de los objetivos y las estrategias, logrando con ello que en el largo plazo se evite el fracaso. De acuerdo con (Abylova & Salykova, 2019), proponen que los criterios de éxito evolucionan constantemente, lo que supone un reto permanente para los profesionales del sector.

De acuerdo con lo antes propuesto, la presentación de un marco estratégico que aborde escalonadamente el éxito del proyecto y la caracterización de cada factor crítico sobreviene perfectamente para un escenario de resultados trascendentales en la organización. Partiendo de este hecho, las mencionadas autoras concluyen en su revisión bibliográfica, respecto a esta temática, la necesidad de comprender las prioridades de los distintos factores de éxito según las fases del proyecto, los objetivos de este y la influencia de los gestores, la comunicación, el control y el aprendizaje.

## **2.2 Factores Críticos de Éxito en la Industria 4.0**

La Industria 4.0 ha sido todo un hito en la última década con los avances alcanzados en el campo de la tecnología, la cual está sustentada bajo 9 pilares según (CCOO INDUSTRIA, 2017) que son Banda Ancha, Cloud, Internet de las Cosas (IoT), Big Data, Robots, Drones, Impresoras 3D, Inteligencia Artificial (IA) - Computación Cognitiva y Servicios de Ubicación. Este proceso de digitalización abarca todas las esferas productivas ofreciendo beneficios económicos, mejoras en la calidad de la producción, reducción de los tiempos de entrega, obtención de información fiable para cumplir con los requisitos de clientes, análisis en tiempo real del proceso productivo, entre otros.

Estos beneficios son posibles de identificar y desarrollarlos gracias al análisis de los FCE. (Agnusdei, Miglietta, Tadic, Roso, & Krstic, 2022) en su estudio sobre “Aplicabilidad de las tecnologías de la Industria 4.0 en la Logística Inversa: Un enfoque de economía circular basado en Método COBRA” definieron un total de 16 criterios clave, necesarios para la implementación de tecnologías en la Industria 4.0, los cuales los dividieron en 3 grupos primordiales: Tecnológico, Sociopolítico y Económico-Operacional, como se puede apreciar en la Tabla 1. Este estudio concluyó que para el problema de investigación que existía respecto a la aplicabilidad de logística inversa, la literatura consultada y los criterios predefinidos, la tecnología más utilizada para resolver las operaciones de la logística inversa era el IoT, seguido de la computación en la nube.

**Tabla 1. Criterios para la evaluación de la aplicabilidad de la tecnología de la Industria 4.0**

Grupo de criterios	Criterio
Tecnológico	C1—Grado de desarrollo C2—Posibilidad de integración (modularidad) C3—Complejidad de implementación C4—Posibilidad de estandarización C5—Adaptabilidad
Sociopolítico	C6—Seguridad C7—Impacto en el mercado laboral C8—Impacto ambiental C9 - Marco cultural C10—Marco político C11—Marco regulatorio
Económico-operativo	C12—Costos de implementación C13—Eficiencia del consumo de energía C14—Seguridad C15—Preparación organizacional C16—Calidad del servicio logístico

Fuente: (Agnusdei, Miglietta, Tadic, Roso, & Krstic, 2022)

Igualmente (Sony, Antony, Mc Dermott, & Garza-Reyes, 2021) desarrollan una investigación en la que expresan la inexistencia de un estudio previo capaz de examinar de forma crítica las diferencias entre los retos, beneficios y factores críticos de éxito de la Industria 4.0, tanto en las industrias manufactureras como en el sector de servicios y los clasifique. Los autores citados ejecutaron una encuesta online a más de 96 profesionales de la alta dirección en países de Europa, Asia y Norteamérica. El estudio presenta 10 FCE los cuales abarcan:

- ✓ Alinear la iniciativa de la Industria 4.0 con la estrategia de la organización,
- ✓ La alta dirección debe apoyar la iniciativa de la Industria 4.0,
- ✓ Implicación y compromiso de los empleados con la Industria 4.0,
- ✓ Hacer que sus productos y servicios sean inteligentes para el cliente,
- ✓ Esforzarse por digitalizar la cadena de suministro,
- ✓ Esforzarse por digitalizar la organización,
- ✓ Gestión del cambio,
- ✓ Gestión de proyectos,
- ✓ Gestión de la ciberseguridad
- ✓ Sostenibilidad operativa, económica, medioambiental y social de la Industria 4.0

Los resultados de la encuesta arrojaron que el 74% de los encuestados concuerdan tanto en el sector productivo como el de servicios que los FCE más importantes son: la alta dirección debe apoyar las iniciativas de la Industria 4.0, sostenibilidad operativa, económica, medioambiental y social de la Industria 4.0 y alineación de las iniciativas de la Industria 4.0 con la estrategia de la organización. Según los autores de este artículo, los retos descubiertos en este estudio ayudarán a los directivos a comprender los retos específicos del sector y a diseñar mejores estrategias para mitigarlos. (Rad, y otros, 2022) presenta un año después un estudio similar al elaborado por (Sony, Antony, Mc Dermott, & Garza-Reyes, 2021), en el cual realizan una revisión profunda de la literatura enfocada en 11 tecnologías de industria 4.0, sobre los que delimitan los factores críticos de éxito, en base a presentar un marco sobre los beneficios, retos y FCE en relación con el rendimiento de la cadena de suministro en el entorno de la Industria 4.0.

Como resultado del estado del arte, el conjunto de autores concluyó que la literatura abarca los beneficios de las tecnologías de la Industria 4.0 para las cadenas de suministro, sin embargo, respecto a sus retos y factores críticos de éxito no se ha debatido lo suficiente creando una grieta para las empresas sin orientación académica basada en pruebas sobre cómo aplicar las tecnologías de la Industria 4.0.

No es menos cierto que este desequilibrio investigativo puede crear, sobre aquellos eslabones principales del sector empresarial, un cierto nivel de desconfianza, debido a las evidencias sesgadas y poco realistas del aporte de la “cuarta revolución industrial” al sector productivo. Consecuentemente se estarían dejando de obtener los innumerables beneficios del aporte de estas tecnologías, así como la posibilidad de convertirse en un activo competitivo en el mercado.

### **2.3 Factores Críticos de Éxito para implementar Digital Twin bajo un enfoque de sostenibilidad**

El profesor Michael Grieves, en el 2002, propuso por primera vez el concepto de representaciones digitales virtuales equivalentes a productos físicos en un curso de gestión del ciclo de vida del producto en la Universidad de Michigan. Esta es la primera vez que surge en concepto de Digital Twin (DT) o Gemelo Digital. Más tarde este autor lo define como una copia digital de uno o un conjunto de dispositivos específicos que puede representar de forma abstracta un dispositivo real y puede utilizarse como base para realizar pruebas en condiciones reales o simulada. (Grieves, 2014).

El Digital Twin puede existir antes de la producción del objeto, como ejemplo par a optimizar su diseño, y persistir después del final de su vida, como datos y modelos para alimentar otro DT. Entonces, el objeto virtualizado por el DT puede ser físico o no y puede ser un producto, un componente, un equipo, un proceso, un sistema, un servicio, un ser humano o un sistema de sistema. Por supuesto, los datos involucrados por el DT son directamente dependientes del objeto en cuestión, ya que puede ir desde un nanomaterial hasta una ciudad entera (Julien & Martin, 2021). Autores como (Florkowki, Szary, & Moglestue, 2019) expresan que un gemelo digital puede proporcionar un repositorio unificado de todos los datos relevantes asociados a un dispositivo. Esto puede abarcar desde documentación e información de diseño asistido por computadora hasta historiales de vida y servicios, horas de funcionamiento y una gran cantidad de información adicional pertinente.

Es su libro acerca “The Digital Twin Paradigm for Smarter Systems and Environments” (Evangeline & Anandhakumar, 2020) afirman que gemelo digital se puede definir, fundamentalmente, como un perfil digital en evolución del comportamiento histórico y actual de un objeto o proceso físico que ayuda a optimizar el rendimiento empresarial. El gemelo digital se basa en mediciones de datos masivos, acumulativos, en tiempo real y del mundo real en una variedad de dimensiones. Estas mediciones pueden crear un perfil evolutivo del objeto o proceso en el mundo digital que puede proporcionar información importante sobre el rendimiento del sistema, lo que lleva a acciones en el mundo físico, como un cambio en el diseño del producto o el proceso de fabricación.

A partir de las anteriores aserciones propuestas por los autores consideramos que el término Digital Twin se refiere a una copia digital sensitiva que se nutre de datos históricos y reales, del cual se realiza una simulación, lo más exacta posible, al modelo físico con el objetivo de optimizar los objetos y procesos y predecir problemas de forma eficiente. Ambos modelos, físico y digital, crean un intercambio informativo lo que posibilita la veracidad de los resultados y su monitorización actual, logrando con ello un elevado desenvolvimiento y análisis del proceso de toma de decisión a partir de grandes volúmenes de datos.

La sostenibilidad se basa en la gestión metódica y consciente de los recursos, logrando un balance entre los factores económicos, productivos, sociales y ambientales sin exceder su capacidad para garantizar un futuro a las generaciones venideras y satisfaciendo a la vez, las necesidades de la generación existente. Según la revisión bibliográfica, (Sony, Antony, Mc Dermott, & Garza-Reyes, 2021), (Agnusdei, Miglietta, Tadic, Roso, & Krstic, 2022), (Deepu & Ravi, 2021), (Rad, y otros, 2022) y (CCOO INDUSTRIA, 2017) concuerdan en que la Industria 4.0 puede cumplir con esta función de sostenibilidad asegurando la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, la logística inversa comprometida con el reciclaje, la eficiencia energética junto con la producción local y el tratamiento de aguas.

Varios autores proponen factores necesarios para garantizar la sostenibilidad en la implantación de tecnologías como Digital Twin. (Yang & Lin, 2020) consideran en su artículo que el compromiso entre los socios de la cadena de suministro y el apoyo de la alta dirección son factores por observar para garantizar un desarrollo de la “logística verde”; (Xu, de Vrieze, Lu, & Wang, 2022) y (Preut, Kopka, & Clausen, 2021) apoyan la idea de que un Digital Twin se puede utilizar para diseñar la refabricación y el reciclaje aplicado al ciclo de vida del producto, como también consideran que esta tecnología se debe conectar con el proceso de gestión de la cadena de suministro para emplear la logística inversa y considerarse como un indicador clave de rendimiento para asegurar la economía circular. No obstante, (Preut, Kopka, & Clausen, 2021) igual añaden la importancia de la información en la gestión del flujo de materiales con un enfoque especial en los procesos, donde es necesario tener el respaldo de una infraestructura tecnológica sustentada en las nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicaciones (TIC) entre las partes interesadas.

Hay que destacar que la gestión del riesgo, la reducción de costes de producción y la minimización de la huella de carbono son factores para tener en consideración según (Piancastelli & Tucci, 2020), debido a lo abarcadores que son estos criterios en los diferentes tipos de industrias, en vistas de ejecutar de forma óptima un proceso de producción con la implicación de los DT. Otros factores críticos por plantear sería mejorar la calidad de los servicios

logísticos como también ganar competitividad en el mercado al crear oportunidades para el establecimiento de nuevos modelos y estrategias comerciales (Nabeeh, Abdel-Basset, Gamal, & Chang, 2022). Vale resaltar que mediante estos criterios aumentaría la aplicabilidad de tecnologías avanzadas para planificar y gestionar procesos comerciales en toda la cadena de valor.

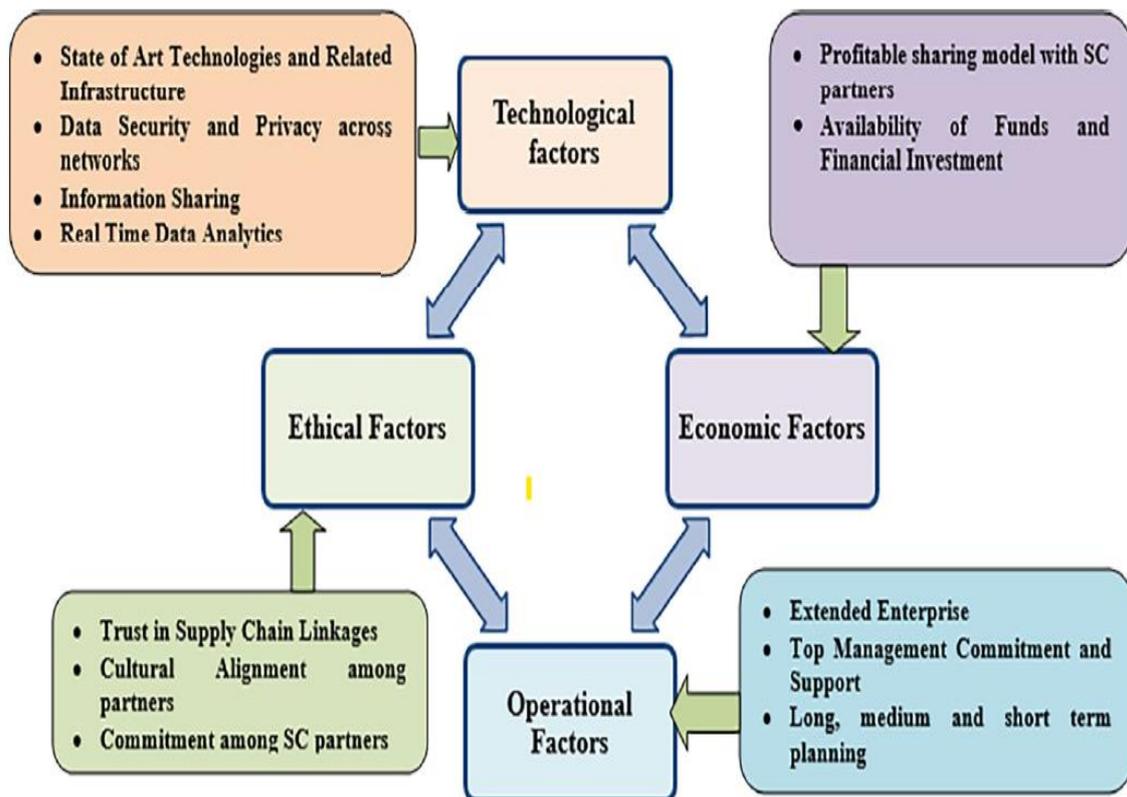
Los autores (Moshood, Nawanir, Sorooshian, & Okfalisa, 2021) expresan en su investigación que para la adopción de los Digital Twin suelen existir una serie de factores distintos pero primordiales para la puesta en marcha: la mejora de la toma de decisiones gracias a los datos de mayor calidad, la optimización de los procesos cotidianos y la liberación de recursos que permite la integración de nuevos modelos de negocio. Consecuentemente, estos autores, según su revisión en la literatura, identifican otros factores como los principales desafíos para la implementación de esta tecnología, los cuales se presentan a continuación:

- ✓ Educación: En una organización, los cambios técnicos conducen inevitablemente a la necesidad de que los trabajadores adopten y se adapten a los modos de funcionamiento modernos. Esto, en última instancia, conduce a problemas relacionados con el cambio de gestión y la transferencia de conocimientos.
- ✓ Representación precisa: Teniendo en cuenta el estado actual de la tecnología, es un reto desarrollar unos Digital Twin que puedan servir de copia perfecta de su activo físico, sobre todo porque los artefactos y procesos que se coordinan son cada vez más complicados. En última instancia, esto lleva a los desarrolladores de los Gemelos Digitales a tener que tomar decisiones y simplificar los procedimientos en el modelo subyacente.
- ✓ Calidad de los datos: Puede ser crítico garantizar una calidad de datos fiable en una aplicación de Digital Twins que dependa de los datos proporcionados por cientos (o miles) de sensores IoT. Las difíciles condiciones de funcionamiento y la comunicación a través de redes distantes significan que las organizaciones tendrán que construir formas de identificar y eliminar la información no fiable y hacer frente a las inconsistencias en la información recogida
- ✓ Costes: La implantación de los Digital Twin conlleva una fuerte inversión inicial. Aunque muchos de estos costes son susceptibles de bajar en el futuro debido a los avances tecnológicos, la decisión de introducir un Digital Twin debe sopesarse cuidadosamente frente a otras soluciones que podrían proporcionar una fracción del coste con ventajas similares. La mejor solución puede no ser un Digital Twin integral, sino un sistema contenido de sensores y bases de datos si sólo hay un puñado de parámetros críticos de interés para la organización. Es crucial minimizar los costes de desarrollo en una fase de desarrollo para afirmar qué datos son esenciales capturar y cuántos datos procesar.
- ✓ Protección IP: Para optimizar las ventajas de los gemelos digitales es necesario intercambiar datos entre varias instancias distintas. Supongamos que los datos que se recogen están directamente relacionados con las competencias básicas de la empresa. En ese caso, es probable que incluya datos extremadamente confidenciales, lo que plantea problemas de propiedad de los datos, procedimientos de garantía de identidad y control de acceso de los usuarios
- ✓ Seguridad digital. La cantidad de información que contienen los Digital Twin los convierte en objetivos útiles para la interferencia criminal. Un Digital Twin hackeado

puede tener peligrosas implicaciones en el mundo real, aparte de la siempre presente posibilidad de manipulación de datos. Aunque mantener las rutinas de protección de datos adecuadas para redes de esta magnitud puede ser una perspectiva desalentadora para muchas empresas, las amenazas que conlleva garantizar la seguridad de los Digital Twin suelen ser de la mayor importancia.

- ✓ Interoperabilidad: Dado que muchas organizaciones pueden carecer de los conocimientos necesarios para crear Digital Twin internos, las organizaciones que persiguen soluciones de DT corren el riesgo de depender totalmente de la simulación y de Inteligencia Artificial suministrada por actores externos.

(Deepu & Ravi, 2021) analizaron los principales FCE que influyen en el proceso de adopción de DT a través de un estado del arte sobre propuestas de investigadores y en consulta con cuatro expertos. Los 13 factores críticos finalmente identificados se dividieron en cuatro clusters principales (Tecnológico, Económico, Operacional y Ético) como se muestra en la Figura 1. Aplicaron seguidamente la metodología Grey-DEMATEL y con esta se identificó la relación causa-efecto entre los factores críticos de éxito.



**Figura 1. Clasificación de los FCE para la adopción de Digital Twin en la cadena de suministro.**

**Fuente:** (Deepu & Ravi, 2021)

Los resultados del estudio indicaron que el compromiso y el apoyo de la alta dirección es el principal FCE, perteneciente al factor Operacional para la adopción del DT, seguido de la planificación a largo, medio y corto plazo y de los fondos e inversiones financieras necesarias.

En resumen, los DT pueden aportar valor al sistema productivo sin comprometer la rentabilidad industrial, propiciando el surgimiento de nuevos modelos de negocio y el

lanzamiento de productos sustentables. Esta tecnología puede garantizar una fabricación sostenible para procurar la calidad en el producto, minimizar el tiempo y realizar una producción sobre la base de las necesidades específicas del cliente utilizando información en tiempo real. Esta atmósfera industrial permitirá la creación de un ecosistema tecnológico la cual, como plantean ciertos autores, debe ser analizada objetivamente con la ayuda del sector académico para conocer sus riesgos y beneficios a lo largo de nuestra actualidad. En la Tabla 2 se presentan, según el resultado arrojado por las definiciones de los autores, los FCE requeridos para aplicar Digital Twin, considerando igualmente el análisis de los FCE en la Industria 4.0., puesto que los DT forman partes de esta nueva revolución industrial.

**Tabla 2. Factores Críticos de Éxito para la aplicabilidad de Digital Twin según autores.**

Referencia Bibliográfica	Factor Crítico de Éxito
(Yang & Lin, 2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Compromiso entre los socios de la cadena de suministro</li> <li>✓ Apoyo de la alta dirección</li> </ul>
(Xu, de Vrieze, Lu, & Wang, 2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Diseño sobre la refabricación y el reciclaje aplicado al ciclo de vida del producto</li> <li>✓ Gestión de la cadena de suministro para emplear la logística inversa y asegurar la economía circular</li> </ul>
(Preut, Kopka, & Clausen, 2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Diseño sobre la refabricación y el reciclaje aplicado al ciclo de vida del producto</li> <li>✓ Respaldo de una infraestructura tecnológica entre las partes interesadas para la gestión del flujo de materiales</li> </ul>
(Piancastelli & Tucci, 2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Gestión del riesgo</li> <li>✓ Reducción de costes de producción</li> <li>✓ Minimización de la huella de carbono</li> </ul>
(Nabeeh, Abdel-Basset, Gamal, & Chang, 2022)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Mejorar la calidad de los servicios logísticos</li> <li>✓ Ganar competitividad en el mercado sobre nuevos modelos y estrategias comerciales.</li> </ul>
(Moshood, Nawanir, Sorooshian, & Okfalisa, 2021)	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Mejora de la toma de decisiones mediante datos de mayor calidad,</li> <li>✓ Optimización de los procesos cotidianos y liberación de recursos</li> <li>✓ Integración de nuevos modelos de negocio.</li> <li>✓ Educación</li> <li>✓ Representación precisa</li> <li>✓ Costes</li> <li>✓ Protección IP</li> <li>✓ Seguridad digital</li> <li>✓ Interoperabilidad</li> </ul>
	<p>Factores Tecnológicos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Tecnologías de punta e infraestructura relacionada</li> </ul>

<p>(Deepu &amp; Ravi, 2021)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Seguridad y privacidad de los datos en las redes</li> <li>✓ Intercambio de información</li> <li>✓ Análisis de datos en tiempo real</li> </ul> <p>Factores Éticos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Alineación cultural entre socios</li> <li>✓ Confianza en los vínculos de la cadena de suministro</li> <li>✓ Compromiso entre los socios de la cadena de suministro</li> </ul> <p>Factores Económicos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Disponibilidad de fondos e Inversión financiera</li> <li>✓ Modelo de participación rentable entre los socios de la cadena de suministro</li> </ul> <p>Factores Operativos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Planificación a corto, medio y largo plazo</li> <li>✓ Compromiso y apoyo de directivos</li> <li>✓ Empresa ampliada/extendida</li> </ul>
---------------------------------	---

Fuente: Elaboración Propia

## 2.4 Determinación del hueco investigador

El estudio ofrecido por los investigadores nos ofrece una visión actualizada sobre el estado del análisis de los factores críticos de éxitos en la Industria 4.0. Se pudo apreciar que muchos de los autores referenciados denotan en su estado del arte la falta de investigación en esta área, afirmando que se debe a lo aún innovadora que son estas tecnologías, la imposibilidad de llevar a cabo estudios aplicables y a la necesidad de conocer la base de programación que respaldan a estos pilares tecnológicos.

Sin embargo, se han encontrado trabajos que concretamente se centran en los requerimientos que debe al menos, poseer una empresa para implementar Digital Twin, pero los autores no lo enfocan como factores críticos de éxito. A estos se les ciñe como posibles fuentes de mejora necesaria para que la tecnología se desarrolle correctamente en el ambiente empresarial. Esto permite que se tome como objetivo de la investigación presente el análisis y priorización de los FCE para implementar Digital Twin bajo un enfoque de sostenibilidad, presentando para ello una metodología.

Por tanto, es aquí donde se realiza la apropiación de este hueco investigador, para darle respuesta a la situación presentada en este trabajo de Tesis de Máster, ejecutando una propuesta con el análisis de una metodología enfocada a la aplicación en una empresa.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LA INDUSTRIA 4.0

El objetivo de este capítulo es realizar un análisis sobre como ha sido el comportamiento a través del tiempo, desde el surgimiento de la primera revolución industrial hasta llegar a la actual Industria 4.0. Una vez llegado este punto se desarrollará una matriz de PESTEL para analizar los factores que generan el estado actual de esta industria bajo un enfoque en el cuidado del medio ambiente.

### 3.1 Evolución histórica de la Revolución Industrial

Los avances tecnológicos a los que nos enfrentamos hoy en día nos parecen hasta predecibles por la rapidez generada de las investigaciones en diferentes campos. La globalización es la causante de este continuo bombardeo de innovaciones, exigiendo a las empresas que estén en la primera línea de I+D para acaparar mercados y hacer frente a sus competidores. Esta mentalidad no siempre ha sido así, dado que a medida que han transcurrido los siglos nos hemos adaptado a nuevos modelos de negocios guiados por la tecnología que poseemos en ese momento. Antes de la primera revolución industrial, los negocios o comercios consistían en profesionales muy especializados en su oficio y cuya área de trabajo eran sus talleres o casas con una demanda controlada debido a la inexistente infraestructura.

Según (Chaves Palacios, 2004), la industrialización se debió a una sucesión interrelacionada de cambios tecnológicos que sustituyeron la capacidad humana por instrumentos mecánicos, y la energía humana y animal por la energía inanimada. Cambios en equipos y en métodos que trajeron consigo nuevas formas de organización industrial. La utilización de máquinas, que pasó de la producción inicial de hilaza y de tejidos a su utilización en las minas de carbón y de hierro, para continuar, ya en el siglo XIX, con su aplicación a los buques de vapor y el ferrocarril, originó un cambio sustancial en el tamaño de la unidad productiva. De forma que la unidad de trabajo familiar fue sustituida por la nave industrial y la fábrica se convirtió en un sistema de producción en sí mismo, basado en una clara definición de las funciones y responsabilidades de sus principales miembros: burguesía y obreros.

A su vez, los avances tecnológicos y empresariales continuaron una dirección convergente, de forma que “un cambio generaba otro cambio”. Y en ese sentido cabe establecer otra de las características de la Revolución Industrial, basada en el principio de que, una vez iniciado el proceso, éste se prolonga indefinidamente. Y esa dinámica se aprecia con claridad en las mejoras tecnológicas y su dependencia de los avances en otras actividades afines. La máquina de vapor constituye un ejemplo suficientemente ilustrativo de esa interrelación, pues no se consiguió una máquina de condensación efectiva hasta que las mejoras en los métodos metalúrgicos permitieron obtener cilindros adecuados. Igualmente, el incremento de la productividad gracias a una innovación técnica generaba presión sobre las actividades industriales análogas, que potenciaban su capacidad de invención.

Es indiscutible como una dinámica en la invención de nuevos productos puede generar un avance tan magnánimo como el presenciado hace tres siglos atrás. Esta evolución continúa como se muestra en la Figura 2, con la segunda y tercera revolución hasta llegar a la actual, marcó las nuevas posibilidades de negocio a partir de poder simular situaciones con inteligencia artificial, donde la base es conformada con los datos captados de los comportamientos y expectativas del cliente.

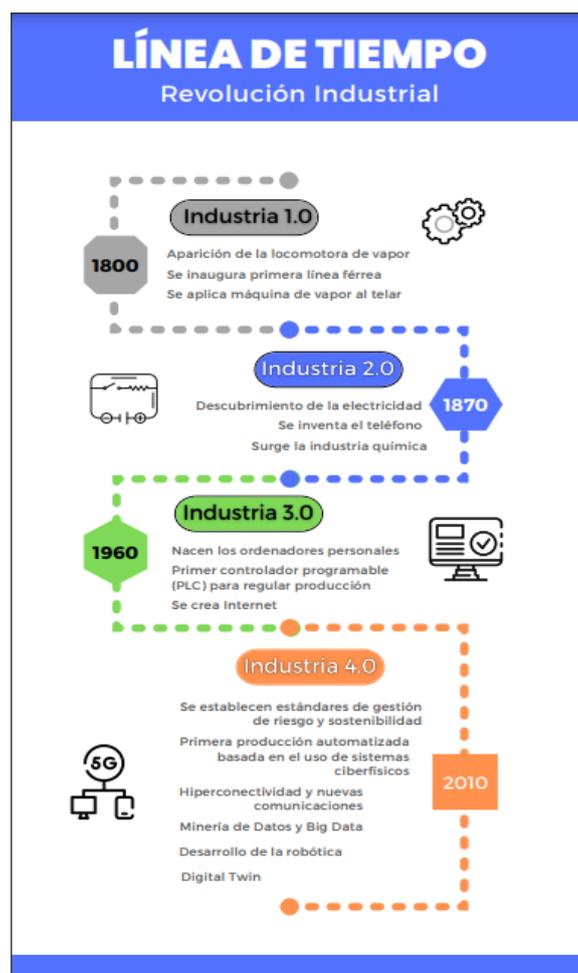


Figura 2. Línea temporal de la Revolución Industrial

Fuente: Elaboración Propia

### 3.2 Análisis de la actual Revolución Industrial

Los niveles macro y microeconómicos de esta era tecnológica tiene un fuerte sustento en IA, debido a las diferentes variables que hoy se tienen en cuenta para el análisis del entorno y la experiencia acumulada de los usuarios, las empresas y los gobiernos. Variadas son las fuentes para acceder a la información, tales como base de datos sobre consumos históricos, rastros de clics en redes sociales, datos generados por los termómetros climáticos, escuchas de podcast, audios de llamadas telefónicas, datos de navegación de sitios web durante cierto tiempo, etc. Sin embargo, para la captura, procesamiento y análisis de todos estos datos son necesarios un grupo de profesionales con conocimientos en las áreas de estadística, marketing, informática y matemática, por lo que las habilidades del factor humano o su capacitación determinan el primer paso para la implementación de nuevas tecnologías.

Esta cuarta revolución comenzó con un marcado enfoque en la sustentabilidad, con un interés particular del estado futuro de los recursos naturales, necesarios para el continuo desarrollo de la especie humana. (Carrillo González & Pomar Fernández, 2021) consideran en su investigación sobre “La economía circular en los nuevos modelos de negocio” que, pese a la severa crítica que se hace a la sociedad de consumo, es claro que en el modelo económico actual el papel del consumidor y las decisiones de la sociedad son elementos clave para conservar el dinamismo de

la economía y del mercado, hasta hoy predominante. Al parecer las estrategias de las compañías han sido lo suficientemente persuasivas para conducir a ritmos de consumo incompatibles con el ambientalismo, pero al mismo tiempo la discusión de la crisis ambiental en casi todos los ámbitos ha despertado un interés, una preocupación y una reacción de diversos sectores de la población que empiezan a demandar un estilo de vida y de consumo más frugal, más medido y más en armonía con la naturaleza.

Los autores mencionados concuerdan con los autores referenciados en su investigación que existen distintas posturas que argumentan sobre el tema: visiones fuertes que cuestionan los volúmenes de consumo y abogan por un decrecimiento de la economía mundial; por otro lado hay visiones intermedias de la sociedad civil con demandas a favor del cuidado del medio ambiente, mediante un cambio en las características de los productos y servicios que se consumen; una tercera vertiente está en la creación de redes de intercambio de productos en comunidades y organizaciones civiles, donde el sentido de la sustentabilidad está creciendo paulatinamente, desafiando al modelo de mercado tradicional al reducir su volumen de consumo y desarrollar productos más ecológicos. Evidentemente, el período de la pandemia ha favorecido esta última tendencia con el aumento de productos más saludables y ecológicos que se ofertan a las personas.

Por otro lado, los gobiernos y los organismos internacionales han avanzado en la construcción de políticas públicas que incentivan comportamientos del consumidor a favor del ambiente. La iniciativa privada, en una posición dual, empieza a adoptar sistemas de gestión ambiental, proyectos eco-innovadores y a generar modelos de negocio con enfoque de economía circular; pero al mismo tiempo, otras empresas generan de manera ficticia una imagen ecológica que no se corresponde con una visión realmente ambientalista sino más bien publicitaria.

Para realizar un análisis más abarcador en este entorno de Industria 4.0, se pretende utilizar la matriz de PESTEL, como se muestra en la Figura 3, para definir los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, medioambientales y jurídicos. Esta herramienta se utiliza para evaluar el macroentorno y desarrollar estrategias que puede influir en el escenario actual y futuro de una organización.

**Factores Políticos:** se basan en incluir las condiciones políticas, las normas y los reglamentos del gobierno

**Factores Económicos:** incluyen los efectos de los ciclos económicos, los precios de las materias primas y los mercados laborales que influyen en la industria.

**Factores Sociales:** consisten en la concientización de la sociedad sobre los temas de salud, superación profesional y condiciones laborales que se alinean en la configuración empresarial de la industria.

**Factores Tecnológicos:** aborda los efectos de la rápida innovación tecnológica, el cúmulo constante de datos y la automatización de los procesos

**Factores Ecológicos:** incluyen la forma en que la industria interactúa con el medio ambiente al realizar sus operaciones y su impacto en la ecología. Este factor es cada vez más importante debido a la reciente concienciación mundial sobre el cambio climático.

Factores Legales: abordan leyes específicas relativas a la privacidad de datos y monopolización tecnológica, así como la protección de áreas de sensible impacto ambiental

El resultado del análisis puede utilizarse en los procesos de planificación estratégica y puede ayudar en los estudios de mercado, proporcionando una visión global de los factores externos que afectan a la empresa y permite detectar nuevas oportunidades de crecimiento sostenible.

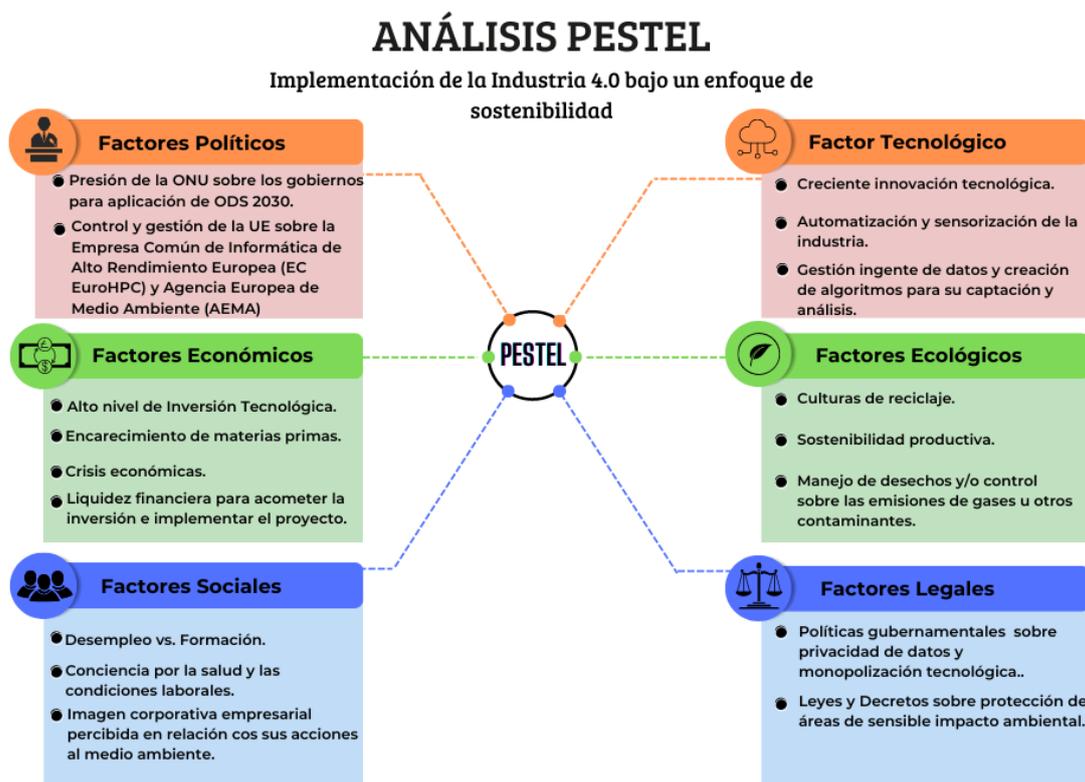


Figura 3. Análisis PESTEL sobre situación actual de Industria 4.0 bajo un enfoque de sostenibilidad

Fuente: Elaboración Propia

Teniendo en cuenta este análisis, se pretende que la metodología a diseñar y los FCE a proponer, estén encaminados a establecer las bases para la implementación de una tecnología de alto impacto en la producción y en las cadenas de suministro como es Digital Twin, pero también abrir un terreno para la preservación del medio ambiente. Los procesos de gestión ambiental están dirigidos en gran medida a la adopción de tecnologías que permiten aumentar la eficiencia del desempeño de la EC en términos de consumo de energía y agua, costos, y sistemas de gestión. La gestión eficiente de los residuos es un paso importante hacia una sociedad sostenible desde el punto de vista energético y material. (Melendez, Delgado, Chero, & Franco-Rodríguez, 2021)

## CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Luego de haber evidenciado la inexistencia de estudios enfocados en el análisis de los FCE para desplegar la tecnología Digital Twin en una compañía, se pretende diseñar en este capítulo, una metodología capaz de priorizar dichos FCE basada en el método multi-criterio “Best-Worst Method”, con especial enfoque en la sostenibilidad.

### 4.1 Fases de la metodología a desarrollar.

Para la metodología, se plantea un diseño dividido en cuatro fases, que se pueden apreciar en la Figura XX, abarcando desde la definición de los FCE hasta el análisis de sensibilidad. El enfoque consiste en la aplicabilidad para una empresa del sector productivo, tanto para conocer la opinión de sus expertos como para saber cuánto se necesita para aplicar DT en el contexto operacional. En la Figura 4 se muestran las fases de esta metodología.

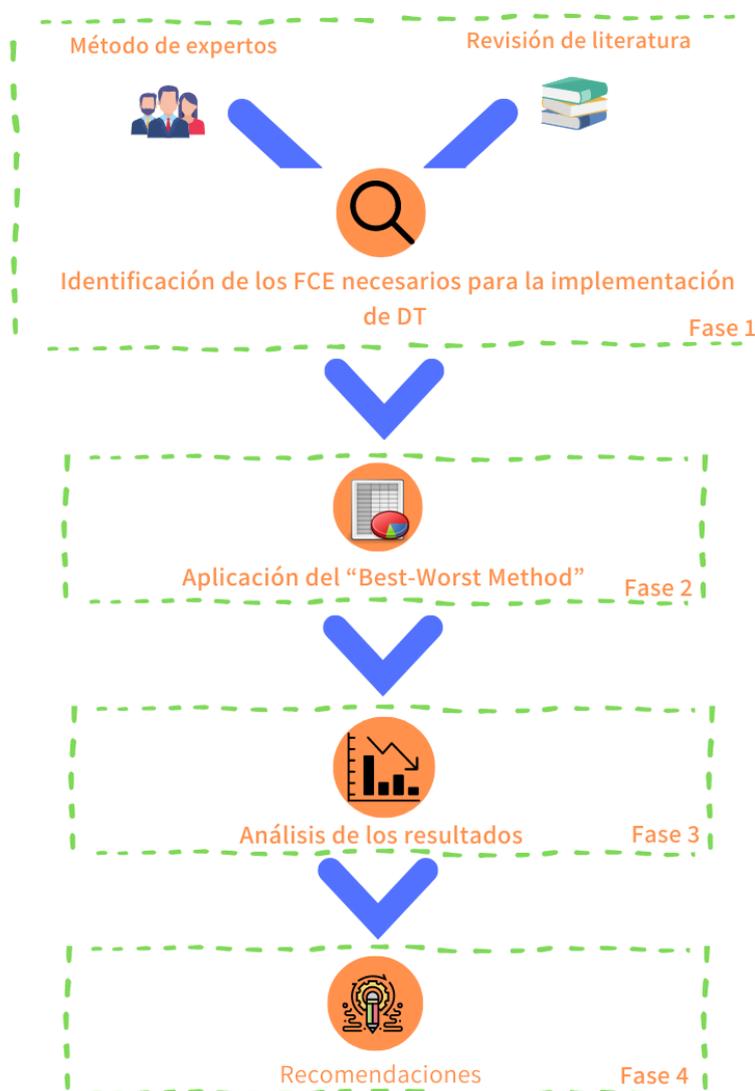


Figura 4. Fases de la metodología

Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se menciona la metodología planteada anteriormente.

Fase 1. Identificación de los FCE necesarios para la implementación de DT

- Revisión de Literatura
- Método de expertos

Fase 2. Aplicación del “Best-Worst Method”

Fase 3. Análisis de los resultados

Fase 4. Recomendaciones

### **Fase 1: Identificación de los FCE necesarios para la implementación de DT**

El estado del arte y el método de expertos conforman la base fundamental de la metodología pues es aquí donde se identifican los principales factores clave de éxito necesarios, bajo el enfoque de sostenibilidad, para implementar DT en las organizaciones. Este enfoque garantizaría que esta tecnología fuese considerada como una “tecnología verde”, la cual asegura la gestión de los recursos de forma eficiente y la ejecución de un ecosistema productivo sustentable.

Las empresas deben comenzar a preservar el medio ambiente sin detener el desarrollo tecnológico, más bien deben darse cuenta de que el avance en la industria no es sinónimo de maltrato ambiental, sino de oportunidad de mejora para crear un futuro medioambientalmente viable.

### **Fase 2. Aplicación del “Best-Worst Method”**

Una vez se han identificado los FCE en la fase anterior, es recomendable priorizarlos en función de su importancia, ya que para una organización serán más importantes unos FCE que para otra. Así, es necesario aplicar algún tipo de método o técnica para poder realizar dicha priorización de FCE de la forma más eficaz posible; en este sentido, en este TFM se ha optado por aplicar el denominado Best-Worst Method (Rezai, 2015) debido a su sencillez en su aplicación (que no sencillez matemática). Así, el Best-Worst Method (BWM), creado por (Rezaei, 2015), tiene como objetivo evaluar una serie de alternativas con respecto a una serie de criterios para seleccionar las mejores alternativas (priorizándolas). Este método permitirá de forma concisa y cuantitativa autoevaluar qué factores priorizar según los definidos para alcanzar el éxito en la implantación de Digital Twin. Los pasos a seguir para obtener las ponderaciones de los criterios se muestran a continuación.

#### **Paso 1. Determinar un conjunto de criterios de decisión.**

En este primer paso, se consideran los criterios  $c_1$ ;  $c_2$ ;  $c_3$ ; ...;  $c_n$ , que deben utilizarse para llegar a una decisión sobre las alternativas.

#### **Paso 2. Definir el mejor y el peor criterio.**

El responsable de la decisión identifica el mejor y el peor criterio en general. En esta fase no se realiza ninguna comparación

#### **Paso 3. Precisar las preferencias del mejor criterio (B) sobre los demás criterios (j)**

En este paso, el responsable de la toma de decisiones determina un vector denominado Best-to-Other (BO) que es el siguiente:

$$A_B = (a_{B1}, a_{B2}, a_{B3}, \dots, a_{Bn})$$

Siendo  $a_{Bj}$  la preferencia del mejor criterio B sobre el criterio j y su valor es un número entero en el rango de 1 a 9. Resaltar que  $a_{BB}=1$ .

#### **Paso 4. Definir las preferencias de todos los criterios (j) sobre el peor criterio (W).**

En este paso, el decisor determina un vector llamado Other-to-Worst (OW) que es similar al siguiente vector:

$$A_W = (a_{1W}, a_{2W}, a_{3W}, \dots, a_{nW})^T$$

Donde  $a_{jw}$  es la preferencia del criterio j sobre el peor criterio W y su valor es un número entero en el rango de 1 a 9. Resaltar que  $a_{ww} = 1$

#### **Paso 5. Búsqueda de la solución óptima.**

En este paso debemos encontrar los pesos óptimos de los criterios (vector W). Para ello, debemos encontrar una solución que minimice las diferencias máximas entre las ponderaciones obtenidas y la opinión del decisor. Nótese que, según la opinión de decisor,  $a_{jw}(a_{Bj})$ , es la preferencia del criterio j sobre el criterio W (criterio B sobre el criterio j), es decir:

$$a_{jw} = \text{Preferencia } j / \text{Preferencia } W \quad (a_{Bj} = \text{Preferencia } B / \text{Preferencia } j)$$

De hecho, determinamos la preferencia de cada criterio cuando encontramos su peso, por lo que podemos decir  $W_j = \text{Preferencia } j$ . Por lo tanto, tenemos:

$$\text{Preferencia } j / \text{Preferencia } W = W_j / W_w \quad (\text{Preferencia } B / \text{Preferencia } j = W_B / W_j)$$

El propósito de BWM es encontrar el vector de pesos tal que para cada j brechas absolutas

$|W_j / W_w - a_{jw}|$  y  $|W_B / W_j - a_{Bj}|$  se minimice. Teniendo en cuenta la condición de no negatividad y de suma para los pesos, resulta el siguiente problema:

$$\min \max_j \{ | \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} |, | \frac{W_j}{W_w} - a_{jw} | \} \quad \text{donde,}$$

$$\sum_j W_j = 1, \quad W_j \geq 0, \text{ para todo } j \quad (1)$$

El problema tendrá una solución única y al resolverlo obtendremos los pesos óptimos ( $w^*$ ) y  $\xi^{L*}$ . Podemos considerar  $\xi^{L*}$  como un indicador de la coherencia de las comparaciones. Los valores más bajos de  $\xi^{L*}$  representan una mayor consistencia.

#### **Fase 3. Análisis de los resultados**

Lo interesante de la obtención de los resultados aplicando este método es que se pueden llegar a obtener diferentes respuestas, debido a que se parte de la apreciación del evaluador respecto al tema, sin embargo, su constante utilización parte de la poca cuantía de información que requiere para su aplicación y consecuente análisis. Esto lo hace más fácil y cómodo de usar respecto a otros problemas de optimización multicriterio.

En general, lo que se ha obtenido de la aplicación del BWM a los FCE identificados, es la priorización, en base a la opinión de los decisores, de dichos FCE para la implantación de DT en una organización industrial. De ese modo, los decisores de dicha organización dispondrán de

información adicional relevante para favorecer esa implantación exitosa. Para ello, deberán analizar esos resultados y proponer (en la fase siguiente) recomendaciones concretas que favorezcan y contribuyan positivamente a alcanzar los principales FCE.

#### **Fase 4. Recomendaciones**

Las recomendaciones estarán guiadas hacia una sostenibilidad productiva, considerando lo necesario que hoy en día se vuelve la proposición de estrategias que engloben la eficiencia productiva y la sostenibilidad medioambiental y además plantearse acciones que requieran de tareas enfocadas en lograr una minimización del cambio climático, decidiendo en proyectos de inversión que favorezcan a la organización y a su entorno. Todas las recomendaciones que se generen a partir del análisis de la fase anterior deberán ir encaminadas a favorecer la exitosa implantación de DT bajo un enfoque de sostenibilidad en las organizaciones.

## CAPÍTULO 5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En este capítulo se desarrolla la metodología, compuesta de cuatro fases, cuyos resultados definirán los requisitos necesarios para que una organización comience el despliegue de esta tecnología a partir de los FCE identificados y contribuir a la propuesta de recomendaciones teniendo como base los tres pilares que rigen la aplicabilidad de DT. Para ello se formó un equipo de trabajo, compuestos por tres profesores del CIGIP, expertos en DT, debido a que no se disponía de una empresa industrial que se incorporase para aplicar esta metodología. Sin embargo, esta metodología se puede aplicar en una empresa industrial siempre que lo requiera, siguiendo las diferentes fases.

### 5.1 Fase 1. Identificación de los FCE necesarios para la implementación de DT.

Luego de consultada la literatura, se pretende aplicar un Método de Expertos con el objetivo de que los especialistas en el tema ofrezcan su criterio a partir de la experiencia adquirida, investigaciones realizadas e intercambios académicos para identificar según su experticia cuales consideran que serían los FCE necesarios para llevar a cabo DT en una organización.

#### 5.1.1 Aplicación del Método de Expertos para la selección de Factores Crítico de Éxito

El Método Delphi o Método de Expertos es uno de los más utilizados por organizaciones, empresas y países en los últimos cuarenta años. Como todo método, tiene sus ventajas y desventajas, sin embargo, en un intento por superar estas últimas, el método ha sufrido una serie de modificaciones a partir del procedimiento original, por lo que se han desarrollado otros enfoques, como es el caso del mini-Delphi, que propone una aplicación en tiempo real en la que los especialistas se reúnen en un lugar y debaten cada cuestión antes de responder. La última tendencia es utilizar nuevas vías de interacción entre los especialistas, como la web (Cardozo Montilla, Melo, & Aponte Figueroa, 2012)

#### Ventajas

- Facilidad de llegar a una decisión final sin forzar falsos consensos.
- El anonimato de los expertos evita presiones hacia la conformidad con las ideas de los otros, evitándose el “efecto autoridad”.
- Se evita la retroalimentación no controlada mediante el uso de un cuestionario estructurado y el suministro de información filtrada por el comité de dirección del estudio.

#### Desventajas

- La validez de los resultados aportados depende extraordinariamente de una selección adecuada de los expertos. En otras palabras, estará en función del nivel de conocimiento de los expertos sobre el tema consultado.
- No es fácil mantener la motivación y el interés de los participantes durante todo el proceso.
- Su costo puede ser elevado

Los autores (Cabero Almenara & Barroso Osuna, 2013) definen al Método Delphi como la herramienta en la cual recogemos la opinión de los expertos de forma individual y anónima,

devolviéndoles la propuesta de conjunto para su revisión y acuerdo; una débil dispersión nos llevará a señalar que se ha llegado a un acuerdo.

En su conjunto, la herramienta permitirá prever las transformaciones más importantes que puedan producirse en el fenómeno analizado en el transcurso de los próximos años con el surgimiento o la eliminación de estos factores, independientemente que se clasifique dentro de los métodos reconocidos como una herramienta cualitativa y subjetiva. La selección de los expertos es de vital importancia para la correcta selección de los factores. Como requisito indispensable se exige que los expertos tengan cierta experiencia en el campo mediante la investigación, debido a lo novedoso que es la tecnología de Digital Twin y la poca aplicación que existe en el sector empresarial.

Llevando a cabo el cumplimiento de los requisitos se seleccionaron un total de 3 sujetos, donde se les aplica a cada uno el instrumento denominado "Coeficiente de Competencia de Experto". El objetivo consiste en que aquellos mejor calificados conformen el grupo de expertos y que valoren las variables que se analizan respecto al tema.

### 5.1.2 Coeficiente de Competencia de Experto

En una primera fase antes de la delimitación de los FCE con los que se van a trabajar, se debe determinar el "Coeficiente de Competencia de Experto". Este es un método en el que se aplica un cuestionario diseñado de tal modo que el candidato exprese su grado de conocimiento sobre el tema y las fuentes de argumentación (Ver Anexo 1). Con la combinación de ambos se logra lo que se denomina "Coeficiente de Competencia" (Kcomp) el cual se calcula de la siguiente forma en la expresión (1) según (García Martínez, Aquino Zúñigas, Guzmán Salas, & Medina Meléndez, 2012):

$$K_{comp} = 0.5 (K_c + K_a) \quad (1)$$

Donde:

Kcomp: coeficiente de competencia.

Kc: coeficiente de conocimiento o información que tiene el experto acerca del problema. El sujeto determina el nivel de conocimientos que cree poseer en una escala del 0 al 10 donde la evaluación "0" indica que el experto que no tiene absolutamente ningún conocimiento de la problemática correspondiente, mientras que la evaluación "10" significa que el experto tiene pleno conocimiento de la problemática tratada. Luego, el coeficiente Kc de cada experto se calcula mediante la expresión (2).

$$K_c = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} K_{pi}}{10n} \quad (2)$$

Donde:

Kpi: autovaloración del experto sobre la pregunta pi del cuestionario.

n: número total de preguntas del cuestionario de autovaloración.

Ka: coeficiente de argumentación. Es el que resulta de sumar los grados de influencia que el sujeto considera que distintas fuentes de argumentación han tenido, en el conocimiento acumulado por él respecto de un tema en particular. La ponderación de esos grados de influencia, están determinados por criterios relacionados con la importancia de esas fuentes. En la Tabla 3 se expresan las fuentes de argumentación y el grado de influencia ejercido por cada fuente

**Tabla 3. Tabla patrón para la estimación de las fuentes de argumentación.**

Fuentes de Argumentación:	Grados de influencia de c/u de las fuentes en su conocimiento y criterios:		
	Alta	Media	Baja
Análisis teórico sobre la temática realizado por usted	0.3	0.2	0.1
Experiencia adquirida	0.5	0.4	0.2
Conocimiento sobre el tema generado por discusiones, intercambios académicos personales.	0.05	0.05	0.05
Trabajos de autores nacionales que conoce y han trabajado la temática	0.05	0.05	0.05
Participación en grupos diseñadores de programas, materiales e iniciativas.	0.05	0.05	0.05
Participación en proyectos de investigación y/o desarrollo de artículos o ponencias sobre el tema.	0.05	0.05	0.05

Fuente: (García Martínez, Aquino Zúñigas, Guzmán Salas, & Medina Meléndez, 2012)

Luego de calculado el coeficiente (Kcomp) se analiza el rango de competencia, cuyo código de interpretación es:

Si  $0.8 < K_{comp} < 1.0$  coeficiente de competencia alto.

Si  $0.5 < K_{comp} < 0.8$  coeficiente de competencia medio

Si  $K_{comp} < 0.5$  coeficiente de competencia bajo

Con los sujetos a los cuales se les aplicó el cuestionario, se realizó una tabla resumen para esbozar el Kcomp individual y determinar el Promedio de Índice de Competencia de Expertos reflejados en la Tabla 4.

**Tabla 4. Resultado sobre KComp y Promedio de Índice de Competencia de Expertos**

Núm. Sujeto	KComp	PROMEDIO DE INDICE DE COMPETENCIA DE EXPERTOS (KComp) 0.9
1.	0.95	
2.	0.85	
3.	0.90	

Fuente: Elaboración Propia

Como se observa el Promedio de Índice de Competencia de Expertos tiene un valor de 0.9 considerado como alto, dado el rango  $0,8 < KComp < 1,0$ . Vale destacar que los especialistas tienen experiencia en este campo puesto que además de la investigación participaron en el congreso sobre Digital Twin desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia, garantizando que su dictamen es esencial para la investigación.

### 5.1.3 Selección de los FCE según el Método de Expertos

En una primera parte en la aplicación del método, se precisaron 14 factores, donde los expertos puntualizaron los aspectos más influyentes para la implementación de Digital Twin en una empresa. La independencia de los expertos en la selección de respuestas fue esencial para el correcto funcionamiento del método, debido a que ninguno ejerció su influencia sobre otro encuestado, obteniendo así la opinión real de cada experto y no la creencia más o menos falseada por la influencia de un líder. (Ver Tabla 5)

Se realiza una tabla resumen con las votaciones efectuadas por los encuestados, donde luego se determina el coeficiente de concordancia (Cc) a través de la expresión (3):

$$Cc = 1 - \frac{Vn}{Vt} \quad (3)$$

Donde:

Vn: cantidad de votos negativos

Vt: cantidad total

Si  $Cc \geq 70\%$  se considera aceptable la variable.

**Tabla 5. Votaciones efectuadas por expertos**

F <sub>n</sub>	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14
E1	X	X	X	X	X	X	X	-	X	-	X	-	X	-
E2	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	X	-	X	-
E3	X	X	X	X	-	X	X	X	X	-	X	-	X	-

**Fuente: Elaboración Propia**

Después de procesadas las encuestas, se obtuvo como resultado que:

- $F5=F8=F10=F12=F14 < 0,7$ (Eliminar)
- $F1=F2=F3=F4=F6=F7=F9=F11=F13 \geq 0,7$  (Aceptable)

Eliminando las variables de menor nivel de coeficiente de concordancia obtenidas del método de expertos, y con base del análisis bibliográfico, se delimitan y clasifican dentro de los tres pilares fundamentales de la sostenibilidad, nueve FCE. Estos nueve FCE resumen los requisitos

necesarios para que las compañías puedan lograr una eficiencia empresarial ante la puesta en práctica de la tecnología Digital Twin, los cuales se muestran en la Figura 5.

Aunque no es menos cierto que la mayoría de los artículos de investigación apuntan al área operacional para la obtención de mejores resultados, la aplicación impactará en todos los sectores de la empresa así sea, recursos humanos, departamento de Tecnologías de Información (TI), SAC (Servicio al Cliente), finanzas, diseño de productos, calidad, logística y producción. A continuación, se describen esos nueve FCE.



Figura 5. Pilares de Éxito y FCE

Fuente: Elaboración Propia

❖ Coste de inversión (C1).

Es aquel en el que se incurre la compra de capital activo como maquinaria o equipos de montaje. Este concepto será crítico a la hora de desplegar una tecnología como Digital Twin en una empresa, pese a la avanzada tecnología que requerirá este sistema ciber-físico, capaz de generar cambios en tiempo real. Generalmente las empresas se detienen en la evaluación de este indicador para conocer el rendimiento de la inversión, objetivo el cual esta tecnología cumplirá brillantemente mediante el control de la producción, la realización de pruebas cuando se lanza un nuevo producto y la monitorización de datos, todo ello evitando la pérdida de tiempo y garantizando la producción en línea.

❖ Colaboración en la cadena de suministro (C2).

Se basa en las estrategias que pueden desarrollarse en toda la cadena de suministro con un objetivo común, garantizando la interoperabilidad entre los actores y aprovechando las oportunidades que puedan surgir para favorecer el crecimiento horizontal de la cadena. Una tecnología como DT provoca un valor incremental en el servicio al cliente, anticipándose a sus

necesidades y cumpliendo con los plazos de entrega pactados. Esto generará que disminuya el riesgo en cuanto al proceso de toma de decisiones basado fundamentalmente en qué necesita el cliente para ser bien servido y el estado de inventario de mi cliente.

❖ Gestión de la información e integración tecnológica (C3).

Los tres pilares que sostienen este factor son las redes, el software y el hardware. La constante evolución de estos elementos forja el surgimiento de nuevas tecnologías de punta, convirtiéndose en el verdadero factor de éxito en esta nueva revolución industrial. Una tecnología que soporte y gestione el volumen de ventas diario, presente pasarelas de pago cómodas para el usuario, garantice la visualización y actualización de productos en páginas web, incluso oferte la personalización de productos en el momento de la compra son labores que, mediante la captación continua de datos y metadatos alimentará la fuente de la que se suministrará Digital Twin para proponer durante el diseño de productos estrategias incrementar cuotas de mercado.

❖ Mejora en el margen de ganancia (C4).

Este indicador tiende a relacionarse con el incremento de los precios, la reducción de gastos, conservar la calidad o mejorarla y hasta presentar una marca de renombre, pero también vale destacar que esta debe relacionarse con la disminución de recursos innecesarios. Implementar una tecnología de punta que a su vez garantice la reducción de residuos es siempre un objetivo estratégico por considerar en los departamentos de Calidad en las empresas.

Siempre se ha creado la mentalidad que los artículos de gran volumen generan mayores ganancias, pero la recuperación se percibe en el largo plazo, sin embargo, con el tiempo esta mentalidad ha cambiado y numerosas compañías han decidido mejorar este margen de ganancia a través de la producción de productos pequeños con bajo costo empleando la metodología Lean. Desplegar Digital Twin en una empresa no será barato, pero si se hace bajo un enfoque consciente de producir solo lo requerido, utilizando la información que esta herramienta puede suministrar, los beneficios en el medio y largo plazo mostrarán las ventajas de su empleo.

❖ Impacto ambiental en la comunidad (C5).

Este factor se refiere a las consecuencias ocasionadas por acciones del hombre, creando un impacto en la topografía, el clima, la flora y la fauna terrestre y marina, como también las zonas pobladas de vida humana. La existencia de cambios en un ecosistema puede llegar a afectar a una comunidad desde su condición socioeconómica hasta tu estado de salud. La buena noticia es que, la tecnología que hoy en día se produce, no solo tiene un enfoque productivo sino también tiene un compromiso con generar menor cantidad de residuos para el planeta. De hecho, una de las potencialidades de Digital Twin es la capacidad de generar simulaciones con información actualizada, donde los investigadores abarcarán esta fuente para realizar pruebas y experimentar los impactos que tienen diferentes decisiones.

Un ejemplo de aplicabilidad de esta tecnología es el programa “Destination Earth” de la Unión Europea. El principal objetivo de este proyecto es desarrollar, a escala mundial, un modelo digital de la Tierra de gran precisión para controlar y predecir la interacción entre los fenómenos naturales y las actividades humanas. (European Commission, 2022)

❖ Gestión de la logística inversa (C6).

La logística inversa se encarga de gestionar los flujos de retorno de artículos que pueden ser reciclados o eliminados, creando una cadena de valor en las empresas para reducir el impacto de los residuos en el medio ambiente. Muy asociado a este concepto encontramos también el de economía circular, que, en estos tiempos de enfoque a la sostenibilidad, ya se hace inconcebible tocar uno de estos temas sin hablar del otro. La economía circular no sigue las reglas del modelo lineal que se ha utilizado a lo largo de los años, sino que se basa en garantizar la utilidad del producto final, así como en los componentes que lo conforman. Este dúo dinámico parece ser la opción más prometedora como estrategia empresarial para mitigar la gestión de desechos de materiales.

Haciendo uso de DT se pudiesen optimizar las rutas, ya preestablecidas por las organizaciones, para la recogida de todo ese tipo de productos e igualmente se fabricaría con un grupo de productos recuperados de estos puntos de reciclaje otorgándoles un nuevo valor en el proceso productivo. Podemos concebir la idea de lo que antes conocíamos como desecho dentro de nada se estará convirtiendo en el producto.

❖ Sostenibilidad productiva (C7).

Este ha sido un siglo en el que el ser humano ha tenido que velar por conservar el medio ambiente para proveer a las generaciones futuras de un planeta lleno de vida. Reconocidas organizaciones como, por ejemplo, en el sector de la moda, automotor, alimenticio, agrícola han desarrollado acciones de trabajo para que sus productos cumplan con ciertos estándares de sostenibilidad y generen cero desperdicios, como la reducción en la utilización de agua para la producción, reciclaje de plásticos, papel y otros residuos, evitar el vertimiento de productos químicos, etc. No obstante, se piensa que el avance tecnológico no es sinónimo de sostenibilidad productiva, pero la mente humana es capaz de crear y mejorar, y DT según plantean investigadores como (Kamble, y otros, 2022) en su estado del arte referido a “Gemelo digital para las cadenas de suministro de fabricación sostenible: Tendencias actuales, perspectivas futuras, y un marco de implementación”, el gemelo digital se está convirtiendo en una parte fundamental de la operación de productos, activos e infraestructuras para lograr objetivos sostenibles en una cadena de suministro.

❖ Cultura Organizativa (C8).

La misión, la visión y los valores de una empresa son lo que definen su cultura organizacional, centrada en las normas, procedimientos y políticas sí como la existencia de patrones entre las relaciones interpersonales. Todo esto conforma el ADN de una empresa, además claramente del producto estrella que posean, no obstante, el tratamiento que se le dé a la información del cliente en esta nueva actualidad tecnológica forma parte también de la cultura de una empresa. La digitalización ha provocado un proceso de transformación digital en la industria y los servicios, proporcionado a las organizaciones la capacidad de oferta en la personalización del producto respecto al gran volumen de demanda que existe, contando con datos de extrema sensibilidad. Existen disímiles de elementos que pueden frenar la aplicación de una tecnología en una compañía, el primero de ellos sería la poca existencia de habilidades digitales, el rechazo al cambio, la falta de comunicación en la pirámide departamental y finalmente la ausencia de líderes que crean en este nuevo proceso evolutivo y le transmitan su importancia al equipo de trabajo.

❖ Formación en tecnología DT (C9).

La preparación del personal respecto a los procesos que conforman a la organización es un factor clave en el cumplimiento de Buenas Prácticas de Fabricación para la estandarización de procedimientos y modelos. Esta tarea tiene como propósito impulsar el desarrollo personal y profesional de los trabajadores. Cuando se trata de tecnología, la preparación formativa se trata mayormente de enfocar hacia personal, no obstante, la edad no es impedimento para aprender nuevas tareas, puesto que la tecnología va a continuar en constante progreso y el hombre solo debe adaptarse a ella. Detrás de Digital Twin se mueve una gran maquinaria de programación, sensorización, captación de datos y horas-hombre útil para las empresas, presentando una tecnología que ofrece valiosos resultados y que a su vez es capaz de generar nuevos conocimientos para el personal de diferentes áreas, logrando elevar el nivel formativo y estar en primera línea frente a un mercado en competencia. Se debe abogar por crear una mentalidad abierta de constante formación y crecimiento frente a los venideros años de desarrollo tecnológico.

## 5.2 Fase 2. Aplicación del “Best-Worst Method”

- a) Una vez identificados los FCE, se pasa a la aplicación del BWM para priorizarlos. Lo primero sería predefinir una codificación para cada criterio con el objetivo de facilitar el trabajo futuro como se muestra en la Tabla 6. El grupo de expertos fue seleccionado a partir de su trayectoria en la temática de Digital Twin, en el sector investigativo, pese a que esta tecnología está apenas siendo diseccionada en partes con el objetivo de conocer sus ventajas y desventajas, siendo a su vez poco implementada en proyectos. A pesar de que los primeros aportes surgieron en el 2002, no fue hasta el 2018 que la consultora Gartner lo propuso en su lista Top 10 de las tecnologías en tendencia.

**Tabla 6. Codificación de los criterios**

Criteria Number = 9	Criterion 1	Criterion 2	Criterion 3	Criterion 4	Criterion 5	Criterion 6	Criterion 7	Criterion 8	Criterion 9
Names of Criteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9

Fuente: Elaboración Propia

- b) Seguidamente se precisa cuál de los criterios es el mejor y cuál es el peor. Esta elección consiste en diferenciar qué criterio tiene un papel más significativo en la toma de decisiones, siendo en este caso la implementación de Digital Twin en una empresa bajo un enfoque de sostenibilidad, mientras que el peor criterio tiene el papel contrario, o sea lo que no se considera necesario o inevitable para poner en uso esta tecnología de punta como se muestra en la Tabla 7.

Los expertos coincidieron en que el criterio C4 referido a la “Mejora en el margen de ganancia” es considerado como el mejor criterio puesto que además de que gran parte de las organizaciones se enfocan en el aspecto económico, es importante desarrollar estrategias que nos permitan aprovechar los movimientos del mercado para generar ingresos en el corto plazo y poder desarrollar inversiones para incrementar nuestro capital. En cambio, gran parte de los expertos consideraron que el peor criterio relacionado con el despliegue de esta tecnología sería en C8 referido a la “Cultura Organizacional” debido a que, según argumentan, este sería el último paso para el despliegue de una nueva tecnología, consistiendo en que el personal asuma y comprenda la visión de la organización.

**Tabla 7. Mejor y Peor criterio**

Select the Best	C4
Select the Worst	C8

Fuente: Elaboración Propia

- c) A partir de ello se concretan puntuaciones en relación con los demás criterios y los elegidos como el mejor y el peor en una escala del 1 al 9. Cuanto más alejado está el valor de 1, menos relacionado estará el criterio, mostrándose en la Tabla 8. Mediante estas comparaciones se recurre a un problema de optimización, ofreciendo como resultado la ponderación de los factores elegidos. Vale destacar que los valores planteados en el BWM se definieron a partir del consenso entre el grupo de expertos

El significado de los números del 1 al 9:

- 1: Igual importancia
- 2: Algo entre igual y moderada
- 3: Moderadamente más importante que
- 4: Algo entre Moderada y Fuerte
- 5: Más importante que
- 6: Algo entre Fuerte y Muy fuerte
- 7: Muy importante que
- 8: Algo entre Muy fuerte y Absoluta
- 9: Absolutamente más importante que

**Tabla 8. Ponderación de los criterios.**

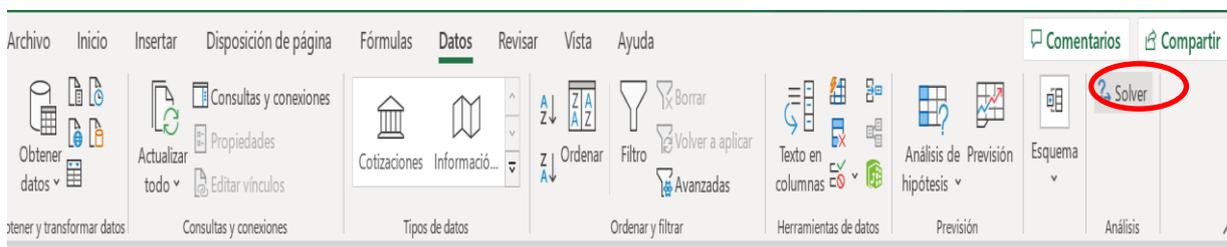
Best to Others	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
C4	3	6	4	1	5	4	3	9	7
Others to the Worst	C8								
C1	7								
C2	5								
C3	5								
C4	9								
C5	4								
C6	5								
C7	8								
C8	1								
C9	5								

Fuente: Elaboración Propia

- a) Finalmente se genera una formulación para alcanzar como resultado los pesos de los diferentes criterios. Con esto se obtiene un índice de consistencia, el cual muestra la fiabilidad de las comparaciones por pares realizadas, arrojando a la vez un histograma que muestra a partir de los valores cuantitativos, cuáles son los factores necesarios para

llevar a cabo por la empresa para la implementación de DT. En este caso se ha utilizado el Solver de Microsoft Excel para calcular dichos pesos para cada criterio como se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9. Resultado de formulación en BWM**



Weights	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	0,13108614	0,06554307	0,09831461	0,31460674	0,07865169	0,09831461	0,13108614	0,02621723	0,05617978
Ksi*	0,07865169								

Fuente: Elaboración Propia

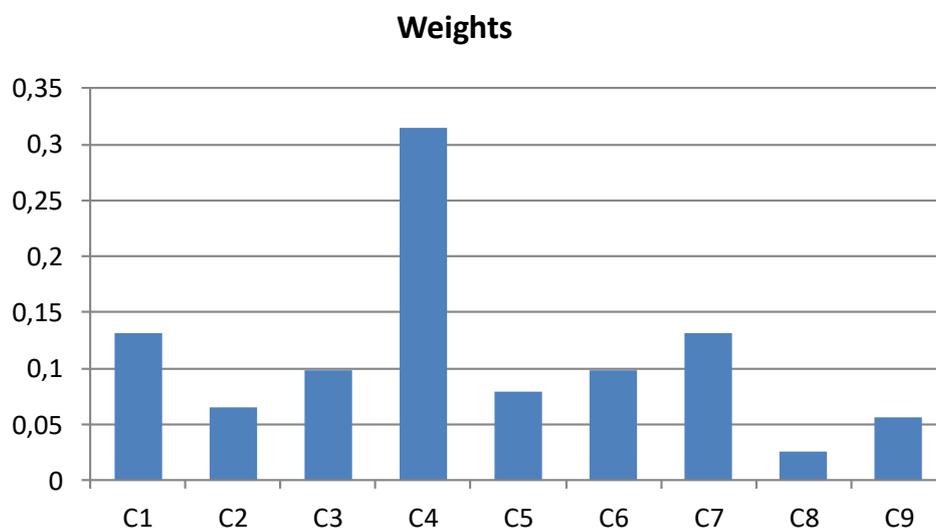
### 5.3 Fase 3. Análisis de los resultados

Primeramente, se parte del valor de Ksi\*, el cual muestra hasta qué punto los resultados son fiables (cuanto más se acerque el Ksi\* a cero, mejor). En este caso el valor es de 0,078; por lo que se puede asegurar un alto nivel de confianza en los resultados de la metodología ya que es a partir de valores superiores a 0,1 cuando se considera que el ratio de consistencia de las comparaciones efectuadas entre variables (FCE) no es el adecuado y que se ha tenido un alto grado de contradicción en las comparaciones.

A partir de la opinión ofrecida por los expertos y los resultados arrojados por el método, se considera que el criterio C4 (Mejora en el margen de ganancia) es el punto de partida requerido para llevar a cabo el desarrollo de Digital Twin en una empresa, como se muestra en la Figura 6. Esto se puede apreciar a partir de que, para gran parte de las empresas, los indicadores económicos muestran la valía y la resiliencia de una organización en el tiempo y su posibilidad de llevar a cabo proyectos de inversión. Esta tecnología requiere un gran capital económico pese al alto nivel tecnológico necesitado, pero que se amortizará en el tiempo considerando las diferentes casuísticas que se formarán desde la gestión de volúmenes de datos, evaluar escenarios de mejora de procesos hasta simplemente predecir y resolver cualquier anomalía en el funcionamiento, logrando reducir la utilización en mano de obra e interrupciones en las líneas de producción por mantenimientos.

Los criterios que le siguen son C1 (Coste de inversión) y C7 (Sostenibilidad productiva), ambos con un valor de 0,13; formando el primero parte del pilar económico-tecnológico y el segundo del pilar medioambiental. Esta interpretación, que parte de la toma de decisión de los expertos, se traduce en que son necesarias estrategias enfocadas en disminuir, refabricar y reciclar los desechos que generan las fábricas, potenciando la economía circular sin afectar la rentabilidad de una organización e incrementar el impacto en las cuentas de resultados. En los últimos tiempos la economía circular se perfila como el futuro modelo de gestión empresarial de las organizaciones, generando consigo la idea de invertir en maquinaria y tecnología que realice aportes de este calibre, contribuyendo a una alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Respecto al criterio menos valorado, que es C8 referido a la Cultura Organizativa, este tiende a cero, acorde a que los expertos consideran que todo aquello involucrado con los principios, normas y valores que rigen la organización no se contempla como un factor decisivo a la hora de implementar DT en una empresa. No obstante, en el largo plazo, si será necesario que los trabajadores y directivos asuman este advenimiento tecnológico como una mejora en las condiciones de trabajo, en un mejor servicio al cliente, enfoque en la mejora continua de la calidad del servicio/producto y muchos otros beneficios. De hecho, en una entrevista del periódico (AméricaEconomía, 2020) que le realizaba a Cecilia del Valle, Directora de Productos de PDA Internacional, surgía la siguiente pregunta: ¿puede y está vinculada la tecnología a la cultura organizacional? De acuerdo con del Valle, ambas están altamente relacionadas, pero no se debe perder de vista que lo más importante siempre debe ser el trabajador. La tecnología es una variable imprescindible y si bien hoy no se puede pensar casi ninguna organización ajena a la transformación digital, tampoco se puede avanzar si no se contempla a las personas. En un mundo en el que lo único constante es el cambio, es imprescindible recordar que, para lograr objetivos organizacionales, todo depende del talento. Sobre todo, en el caso de la tecnología y la digitalización, debido a que quienes impulsarán el proceso de transformación serán las personas. La directora finalizaba con la siguiente frase: “La tecnología y la cultura deben evolucionar de manera conjunta. Vimos muchas empresas que, empujadas por la transformación digital, apuestan por la incorporación de nuevas tecnologías, pero olvidan la cultura de la organización. Entonces ahora comienzan a darse cuenta de que no se han cumplido todas las expectativas depositadas en la tecnología”. (AméricaEconomía, 2020)



**Figura 6. Gráfico de prioridades de los FCE**

**Fuente: Elaboración propia**

#### **5.4 Fase 4. Recomendaciones**

Las organizaciones que decidan realizar un despliegue íntegro de Digital Twin en su proceso productivo deben primeramente cerciorarse de que cumplen con los factores planteados anteriormente. Lo que se recomienda desde un punto de vista de los expertos es que, el criterio C4 (Mejora en el margen de ganancia) debe ser el foco en la organización, el cual está relacionado con el criterio C1 (Coste de inversión). Este coste de inversión no debe ser elevado,

más si lo llegase a ser, siempre se aconseja que este valor no sea prolongado en el tiempo con el fin de recibir en un corto periodo, los beneficios de la inversión. En todo caso, DT es una tecnología que requiere un alto nivel de automatización, lo que genera un incremento en el valor de la inversión, aunque el período de recuperación depende mayormente del sector o industria en que se desarrolle la organización.

Sin embargo, contar con una logística que no solo se encargue de la distribución y almacenamiento del producto final, sino también, responsabilizarse por una logística inversa es muestra de la conciencia ambiental que se está forjando en las generaciones actuales. La culminación del ciclo de vida del producto sería la reutilización o reciclaje, donde el usuario final o consumidor también formaría parte de la cadena de suministro al contribuir con la economía circular. Esta no es una práctica ajena, puesto que ya se implementa en muchas empresas, pero involucrar a esta tecnología de la industria 4.0 sería una pieza de valioso aporte, puesto que esta tecnología ayudaría a identificar la baja previsibilidad que existe actualmente cuando un producto individual, adquirido por un usuario, necesita ser reciclado. Esto claramente se logra con una gestión eficiente de la información, donde los analistas de datos jugarían un papel crucial a la hora de proveer de información, pero donde también es necesaria la heterogeneidad de los sistemas entre los actores de la cadena de suministro. Dicho esto, se hace primordial igualmente fomentar una alineación entre proveedores de la cadena, pero también entre los clientes.

Lo cierto es que con DT se pueden obtener resultados alentadores respecto a la detección de futuros problemas en la línea para una solución anticipada, puede influir en las vías de desarrollo de una nueva versión de dicho producto o en los planes de fabricación, así como simular multitud de escenarios “what if”. Todo esto se traduce en ahorro de tiempo y dinero para las compañías. Para este contexto se vislumbra un incremento inversionista de la utilización de sensores y programas especializados con software basado en iCloud, puesto que una opción es que las empresas inviertan en I+D para desarrollar su propia tecnología basada en Digital Twin y ser competitivos en el mercado frente a los cambios que estos han demostrado en los últimos años por el efecto de la globalización. Sin duda, esta tecnología apenas está ofreciendo su aporte a la evolución de la industria y su vinculación con Big Data e Internet of Things potenciará que la exactitud de los datos sea infalible para adquirir una excelencia operacional.

La utilización de materiales proveniente de productos previamente elaborados y en desuso es una fuente para aprovechar los bajos niveles de inversión en materia prima y el incremento en el margen de ganancia puesto que además de evitar la sobreexplotación existente de recursos naturales, la generación de materiales tóxicos y el incremento de los residuos, posibilita la integración de estrategias para detener el terrible impacto ambiental y traer consigo la concientización de una sociedad que prevé la administración de los recursos. Mediante DT se armonizarían los estados de inventario y los recursos desechados en los diferentes sitios de planeta, promoviendo el desarrollo industrial y generando un crecimiento económico positivo para las actuales y futuras generaciones.

## CAPÍTULO 6. PRESUPUESTO

En este apartado se pretende evaluar económicamente la investigación realizada, mediante la presentación de un presupuesto reflejando las horas-hombre dedicadas. Como esta investigación tiene un desarrollo teórico más que aplicado, las actividades desarrolladas para la creación de esta investigación fueron ejecutadas por el propio autor y el grupo de expertos.

### 6.1 Análisis del presupuesto

En la Figura 7 se puede apreciar la planificación temporal para el desarrollo de la investigación. Respecto a la búsqueda bibliográfica, que requirió el mayor espacio de tiempo, debido a las limitadas fuentes de información por lo innovador que es el tema, se le dedicó el 60%. Un 20% fue requerido para identificar los FCE y diseñar la metodología y el 20% restante se utilizó para aplicar la metodología junto al grupo de expertos y analizar los resultados y recomendaciones.

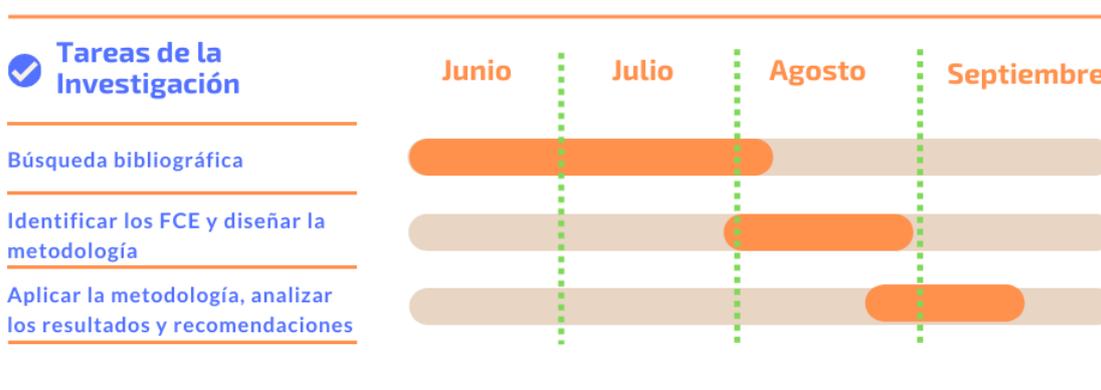


Figura 7. Planificación de la investigación

Fuente: Elaboración propia

El coste de este proyecto está asociado a la mano de obra del autor, cuyo salario tiene un valor de 20€/h, y donde destinó al proyecto un total aproximado de 300h. En cambio, los expertos destinaron un total de 4h cada uno, con un coste de 40€/h. Todo esto genera un coste total de 6.480€, como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Costo Total del proyecto

RECURSOS	HORAS	COSTO POR HORA (€/H)	COSTO TOTAL (€)
INVESTIGADOR	300	20	6,000.00
EXPERTO 1	4	40	160.00
EXPERTO 2	4	40	160.00
EXPERTO 3	4	40	160.00
<b>TOTAL</b>			<b>6,480.00</b>

Fuente: Elaboración propia

## Conclusiones

El objetivo fundamental de la presente Tesis de Máster era diseñar una metodología para la identificación y priorización de los factores críticos para implantar digital twin bajo un enfoque de sostenibilidad aplicando un método multicriterio. Para desarrollar exitosamente esta investigación se presentaron una serie de objetivos específicos y se estructuró la investigación por capítulos.

En el Capítulo 1 se presentó el objetivo del trabajo, así como la justificación y motivación de la investigación.

En el Capítulo 2 se analizaron una serie de artículos relacionados con los factores críticos de éxito y la Industria 4.0, específicamente con la tecnología de digital twin con el fin de conocer las definiciones de los autores respecto a este tema, encontrando la poca existencia de artículos y autores que tocan el tema y la posibilidad de un hueco investigador.

En el Capítulo 3 se desarrolló una línea temporal respecto al avance de la revolución industrial con el paso de los siglos, hasta llegar a la industria 4.0 y seguidamente se analizó, mediante una matriz de PESTEL, los factores que inciden en esta industria bajo un enfoque de sostenibilidad.

En el Capítulo 4 se presentó la metodología propuesta, compuesta por cuatro fases que son las siguientes:

- ✓ Fase 1. Identificación de los FCE necesarios para la implementación de DT
  - « Revisión de Literatura
  - « Método de expertos
- ✓ Fase 2. Aplicación del “Best-Worst Method”
- ✓ Fase 3. Análisis de los resultados
- ✓ Fase 4. Recomendaciones

En el Capítulo 5 se desarrolló la metodología fase por fase junto a un grupo de expertos formado por especialistas en DT del CIGIP, obteniéndose que el factor crítico de éxito más significativo es la “Mejora en el margen de ganancia” seguido del “Costo de Inversión” y la “Sostenibilidad Productiva”; por otra parte, el factor que menos interés ha generado es la “Cultura Organizacional”. A partir de estos resultados se propusieron recomendaciones, las cuales pueden servir como punto de partida (además de aplicar ellas mismas la metodología) a las empresas interesadas en implementar la tecnología de DT con el fin de sentar las bases de una experiencia efectiva. Estas recomendaciones estaban enfocadas en las potencialidades de la logística inversa, la gestión eficaz de la información mediante el uso de Big Data e Internet of Things y el control en los costos de inversión y los materiales necesarios para la producción con enfoque sostenible.

Finalmente, en el Capítulo 6 se hizo un análisis en el presupuesto requerido para esta investigación con un valor que asciende a los € 6.480.

## ANEXOS

### Anexo 1. Encuesta sobre Coeficiente de Competencia de Experto.

Encuesta sobre el Coeficiente de Competencia de Experto

Años de experiencia:

- 1) En una escala de 0 a 10 marque con una (x), donde 0 es Ninguna y 10 es Experto, cuál considera que sería su nivel de conocimiento respecto a “Factores Críticos de Éxito necesarios para implementar Digital Twin en una empresa”

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

- 2) A continuación, se presentan variadas fuentes de información por la cual usted pudo haber adquirido el conocimiento alcanzado por el tema “Factores Críticos de Éxito necesarios para implementar Digital Twin en una empresa”. Marque con una (x) la fuente de argumentación y el grado de influencia de estas fuentes

Fuentes de Argumentación	Grado de influencia de cada una de las fuentes en su conocimiento y criterio:		
	Alta	Media	Baja
Análisis teórico sobre la temática realizada por usted.			
Experiencia adquirida			
Conocimiento por el tema generado por discusiones, intercambios académicos y personales			
Trabajo de autores que conoce y han trabajado la temática			
Participación en grupos diseñadores, programas o iniciativas			
Participación en proyectos de investigación, desarrollo de artículos y/o ponencias sobre el tema			

Fuente: Elaboración Propia

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Wayan Trisnawaty, N., Hardian, B., Raharjo, T., & Prasetyo, A. (2021). Success Criteria and Factor for IT Project Application Implementation in Digital Transformation Era: A Case Study Financial Sector Industry.
- Abylova, V., & Salykova, L. (2019). Critical Success Factors in Project Management: A Comprehensive Review. *PM World Journal*, VIII.
- Agnusdei, G. P., Miglietta, P. P., Tadic, S., Roso, V., & Krstic, M. (2022). Applicability of Industry 4.0 Technologies in the Reverse Logistics: A Circular Economy Approach Based on Comprehensive Distance Based Ranking (COBRA) Method. *Sustainability*, 14.
- Alfaro Saiz, J. J., Rodríguez Rodríguez, R., & Ortiz Bas, Á. (2006). Sistema de medición del rendimiento para redes de organización colaborativa. *X Congreso de Ingeniería y Organización*. Valencia.
- Alkarney, W., & Albraithen, M. (2018). Are Critical Success Factors Always Valid for Any Case? A Contextual Perspective. *IEEE Access*, 6, 63496-63512.
- Alonso Ferreras, V. H. (2010). FACTORES CRITICOS DE ÉXITO Y EVALUACIÓN DE LA COMPETITIVIDAD DE DESTINOS. *Estudios y Perspectivas en Turismo*, 19, 201-220.
- Alsolami, B. (2022). Identifying and assessing critical success factors of value management implementation in Saudi Arabia building construction industry. *Ain Shams Engineering Journal*, 13.
- AméricaEconomía. (3 de Marzo de 2020). AméricaEconomía.com. *América Economía*. Obtenido de AméricaEconomía.com : <https://www.americaeconomia.com/articulos/notas/la-transformacion-tecnologica-debe-ir-de-la-mano-de-la-cultura-organizacional>
- Cabero Almenara, J., & Barroso Osuna, J. (2013). La utilización del juicio de expertos para la evaluación de TIC: el coeficiente de competencia experta. *Bordón: Revista de Pedagogía*, 2(65), 25-38.
- Cardozo Montilla, M., Melo, R. M., & Aponte Figueroa, G. (2012). Método DELPHI: aplicaciones y posibilidades en la gestión prospectiva de la investigación y desarrollo. *Revista Venezolana de Análisis de Coyuntura*, XVIII(1), 41-52.
- Carrillo González, G., & Pomar Fernández, S. (2021). La economía circular en los nuevos modelos de negocio. *Entreciencias: diálogos en la sociedad del conocimiento*, 9(23).
- CCOO INDUSTRIA. (2017). *La Digitalización y la Industria 4.0. Impacto industrial y laboral*. CCOO INDUSTRIA, Secretaría de Estrategias Industriales, Madrid, España.
- Chaves Palacios, J. (2004). DESARROLLO TECNOLÓGICO EN LA PRIMERA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL. *Norba. Revista de Historia*, 7, 93-109.
- Deepu, T., & Ravi, V. (2021). Exploring critical success factors influencing adoption of digital twin and physical internet in electronics industry using grey-DEMATEL approach. *Digital Business*, 1.

- European Commission. (2022). *Shaping Europe's digital future*. Obtenido de European Comission: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/es/node/9890>
- Evangeline, P., & Anandhakumar. (2020). Digital twin technology for “smart manufacturing”. En *The Digital Twin Paradigm for Smarter Systems and Environments: The Industry Use Cases* (Vol. 117, págs. 35-48).
- Florkowki, M., Szary, D., & Moglestue, A. (2019). El mundo de la simulación. *ABB*, 2, 8-13.
- Forster, N., & Rockart, J. (Junio de 1989). CRITICAL SUCCESS FACTORS: AN ANNOTATED BIBLIOGRAPHY. *Center for Information Systems Research, Sloan School of Management*.
- García Martínez, V., Aquino Zúñigas, S., Guzmán Salas, A., & Medina Meléndez, A. (2012). El Uso Del Método Delphi Como Estrategia Para La Valoración De Indicadores De Calidad En Programas Educativos A Distancia. *Calidad en la Educación Superior*, 200-222.
- Grieves, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *Florida Institute of Technology.* "Center for Lifecycle and Innovation Management.
- Janyapoon, S., Liangrokapart, J., & Tan, A. (2021). Critical Success Factors of Business Intelligence Implementation in Thai Hospitals. *International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics*, 16.
- Julien, N., & Martin, E. (2021). How to characterize a digital twin: a usage-driven classification. *International Federation of Automatic Control (IFAC)-PapersOnLine*, (págs. 894-899).
- Kamble, S., Gunasekaran, A., Parekh, H., Mani, V., Belhadi, A., & Sharma, R. (2022). Digital twin for sustainable manufacturing supply chains: Current trends, future perspectives, and an implementation framework. *Technological Forecasting & Social Change*, 176.
- Marais, M., du Plessis, E., & Saayman, M. (2017). A review on critical success factors in tourism. *Journal of Hospitality and Tourism Management*, 31, 1-12.
- Melendez, J., Delgado, J. L., Chero, V., & Franco-Rodríguez, J. (2021). Economía Circular: Una Revisión desde los Modelos de Negocios y la Responsabilidad Social Empresarial. *Revista Venezolana de Gerencia*(6), 560-573.
- Merhi, M. (2021). Evaluating the critical success factors of data intelligence implementation in the public sector using analytical hierarchy process. *Technological Forecasting & Social Change*, 173.
- Moshood, T., Nawanir, G., Sorooshian, S., & Okfalisa, O. (2021). Digital Twins Driven Supply Chain Visibility within Logistics: A New Paradigm for Future Logistics. *Applied System Innovation- MDPI*, 4.
- Nabeeh, N., Abdel-Basset, M., Gamal, A., & Chang, V. (2022). Evaluation of Production of Digital Twins Based on Blockchain Technology. *Electronics-MDPI*, 11.
- Piancastelli, C., & Tucci, M. (2020). The Role of Digital Twins in the Fulfilment Logistics Chain. *International Federation of Automatic Control (IFAC)-PapersOnLine*, 53(2), 10574–10578.
- Preut, A., Kopka, J.-P., & Clausen, U. (2021). Digital Twins for the Circular Economy. *Sustainability*, 13.

- Rad, F., Oghazi, P., Palmié, M., Chirumalla, K., Pashkevich, N., Patel, P., & Sattari, S. (2022). Industry 4.0 and supply chain performance: A systematic literature review of the benefits, challenges, and critical success factors of 11 core technologies. *Industrial Marketing Management*, 105, 268-293.
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria-decision-making method. *OMEGA*, 53, 49-57.
- Ronald, D. (1961). Management information crisis. *Harvard business review*, 111-121.
- Sony, M., Antony, J., Mc Dermott, O., & Garza-Reyes, J. A. (2021). An empirical examination of benefits, challenges, and critical success factors of industry 4.0 in manufacturing and service sector. *Technology in Society*, 67.
- Xu, L., de Vrieze, P., Lu, X., & Wang, W. (2022). Digital Twins Approach for Sustainable Industry. *International Conference on Advanced Information Systems Engineering*, (págs. 126-134).
- Yang, Z., & Lin, Y. (2020). The effects of supply chain collaboration on green innovation performance: An interpretive structural modeling analysis. *Sustainable Production and Consumption*, 23, 1-10.