



Universidad CENFOTEC

Maestría en Ingeniería de Software con Énfasis en Arquitectura y Diseño de Software

Documento final de Proyecto de Investigación Aplicada 1

Diseño de una arquitectura de software multimodal para el desarrollo de Gemelos Digitales
Humanos, con el propósito de optimizar la interacción humano-máquina

Gatica Valle Orlando Alexander

Abril 2026

Declaratoria de Derechos de Autor

Declaro que el presente trabajo es de mi autoría y autorizo a la Universidad CENFOTEC a utilizarlo con fines académicos y didácticos, con el debido reconocimiento de autoría.

Dedicatoria y Agradecimientos

Dedico este trabajo a mi familia.

Agradezco a todos aquellos que me han ayudado y formado en el camino, ya que sin ellos no sería quien soy y no estaría donde estoy.

TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera: Maestría Profesional en Ingeniería del Software con Énfasis en Arquitectura y Diseño Soft, requisito para optar por el título de grado de Maestría Profesional en Ingeniería del Software con Énfasis en Arquitectura y Diseño Soft, el estudiante Orlando Alexander Gatica Valle.

DAVID GERARDO ALFARO VIQUEZ (FIRMA)
PERSONA FISICA, CPF-01-1337-0927.
Fecha declarada: 17/08/2026 09:06:02 PM
Es una representación gráfica,
verifique validez de la firma.

M.Sc. David Gerardo Alfaro Víquez
Tutor

CARMEN MARIA

MOK ZHENG (FIRMA)

Digitally signed by CARMEN
MARIA MOK ZHENG (FIRMA)
Date: 2026.08.17 22:03:52
-06'00'

M.Sc. Carmen María Mok Zheng
Lector 1

IGNACIO
TREJOS ZELAYA
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por IGNACIO TREJOS
ZELAYA (FIRMA)
Fecha: 2026.08.18
18:15:52 -06'00'

M.Sc. Ignacio Trejos Zelaya
Lector 2

San José, Costa Rica, 17 de Agosto 2026

Tabla de Contenido

Resumen Ejecutivo.....	8
Introducción.....	9
Generalidades.....	9
Antecedentes del problema.....	9
Definición y descripción del problema	9
Justificación	10
Viabilidad	11
Objetivos.....	13
Alcances	13
Limitaciones.....	14
Marco de referencia	14
Revisión sistemática de la literatura	14
Estado de la cuestión.....	25
Marco Conceptual.....	48
Industria 5.0	50
Digital Twin y Human Digital Twin	50
Ecosistema digital y gobernanza de datos	50
Multimodalidad y tipos de datos en HDT	51
Modelado humano y técnicas de representación	51
Enfoques arquitectónicos para HDT multimodal.....	52
Flujo de datos multimodales en HDT	53
Atributos de calidad relevantes	54
Marco Metodológico	55
Tipo de investigación	55
Alcance investigativo.....	55
Enfoque	55
Diseño	57
Población y muestreo.....	58
Instrumentos de recolección de datos.....	58
Técnicas de análisis de información.....	58
Estrategia de desarrollo de la propuesta	58
Análisis de la Situación.....	60
Situación actual del dominio y tendencias recientes	60

Hallazgos del análisis de literatura	60
Brechas y limitaciones del estado actual	61
Insumos técnicos para el diseño de la propuesta	61
Restricciones de alcance para la fase de diseño y validación inicial	62
Criterios iniciales de evaluación técnica	62
Conclusión del análisis de la situación	63
Propuesta de Solución	64
Fundamento arquitectónico de la propuesta	64
<i>Drivers</i> arquitectónicos y atributos de calidad	66
Ciclos de diseño arquitectónico basados en ADD	72
Flujo de información multimodal	75
Contextualización del flujo en un escenario de interacción humano-máquina	75
Arquitectura propuesta	76
Documentación y control del diseño	79
Estrategia de validación de la propuesta	79
Diseño de la PoC	80
Implementación de la PoC	82
Metodología para medición de métricas	83
Resultados y análisis de la PoC	86
Conclusiones	92
Referencias Bibliográficas	93
Apéndices	96
Apéndice 1: ADRs del proceso de diseño	96
Apéndice 2: vistas C4 de la arquitectura propuesta	99
Apéndice 3: contrato de interfaces establecidos	103

Lista de Tablas

<i>Tabla 1</i>	12
<i>Tabla 2</i>	15
<i>Tabla 3</i>	21
<i>Tabla 4</i>	22
<i>Tabla 5</i>	25
<i>Tabla 6</i>	26
<i>Tabla 7</i>	27
<i>Tabla 8</i>	28
<i>Tabla 9</i>	29
<i>Tabla 10</i>	30
<i>Tabla 11</i>	31

<i>Tabla 12</i>	32
<i>Tabla 13</i>	33
<i>Tabla 14</i>	34
<i>Tabla 15</i>	35
<i>Tabla 16</i>	36
<i>Tabla 17</i>	37
<i>Tabla 18</i>	38
<i>Tabla 19</i>	39
<i>Tabla 20</i>	40
<i>Tabla 21</i>	41
<i>Tabla 22</i>	42
<i>Tabla 23</i>	43
<i>Tabla 24</i>	65
<i>Tabla 25</i>	67
<i>Tabla 26</i>	69
<i>Tabla 27</i>	70
<i>Tabla 28</i>	70
<i>Tabla 29</i>	71
<i>Tabla 30</i>	71
<i>Tabla 31</i>	71
<i>Tabla 32</i>	72
<i>Tabla 33</i>	82
<i>Tabla 34</i>	84
<i>Tabla 35</i>	85
<i>Tabla 36</i>	88
<i>Tabla 37</i>	88
<i>Tabla 38</i>	90
<i>Tabla 39</i>	96
<i>Tabla 40</i>	96
<i>Tabla 41</i>	97
<i>Tabla 42</i>	97
<i>Tabla 43</i>	98

Lista de Figuras

<i>Figura 1</i>	48
<i>Figura 2</i>	49
<i>Figura 3</i>	53
<i>Figura 4</i>	56
<i>Figura 5</i>	99
<i>Figura 6</i>	100
<i>Figura 7</i>	101
<i>Figura 8</i>	102

Resumen Ejecutivo

El presente proyecto aborda la ausencia de arquitecturas de software estandarizadas para integrar datos multimodales en *Human Digital Twins* (HDT) orientados a la interacción humano-máquina en el contexto de la Industria 5.0. Desde una investigación aplicada, apoyada en una revisión sistemática de la literatura y en un diseño metodológico fundamentado en *Design Science Research* (DSR), se identificaron los conceptos, enfoques arquitectónicos y limitaciones más recurrentes del dominio. El análisis confirmó que la principal brecha no radica en la falta de tecnologías de captura o procesamiento, sino en la carencia de una arquitectura capaz de integrar fuentes heterogéneas con criterios claros de interoperabilidad, sincronización temporal, trazabilidad y extensibilidad.

Con base en estos hallazgos, se diseñó una arquitectura multimodal sustentada en una combinación de capas y servicios desacoplados, con un flujo explícito de captura, normalización, integración, actualización del HDT, persistencia y consumo. El diseño se refinó mediante iteraciones de *Attribute Driven Design* (ADD), priorizando atributos de calidad y documentando decisiones arquitectónicas mediante vistas C4, ADRs y un contrato canónico para el intercambio interno de eventos multimodales. Esta propuesta permitió aterrizar la solución a un modelo arquitectónico verificable, coherente con el alcance del proyecto y con posibilidad de evolución hacia escenarios de mayor complejidad.

La validación se realizó mediante una prueba de concepto en entorno controlado inicialmente con dos fuentes de datos (fisiológico y contexto) y luego con una fuente adicional (video simulado); se tomaron en cuenta escenarios nominales, de alta carga, alarma y degradación. Los resultados mostraron integración consistente de las fuentes fisiológica y de contexto y la incorporación de la nueva modalidad con impacto localizado; los escenarios degradados mantuvieron continuidad operativa con evidencia suficiente para reconstruir el recorrido del dato.

En consecuencia, el proyecto aporta evidencia sólida de factibilidad técnica para la arquitectura propuesta y establece una base arquitectónica consistente para futuras validaciones en entornos reales.

Frases clave: Gemelos Digitales Humanos, Human Digital Twins, arquitectura de software, integración multimodal de datos, interoperabilidad, prueba de concepto, Industria 5.0.

Introducción

Generalidades

El presente proyecto corresponde a una investigación de tipo aplicada y se desarrolla en colaboración con los proyectos de investigación de la Universidad CENFOTEC. No se encuentra sujeto a ninguna cláusula de confidencialidad, dado que no se utiliza información sensible, propietaria ni de acceso restringido. Los datos empleados durante el desarrollo del trabajo serán de dominio público o generados directamente por el investigador con fines académicos.

El proyecto no está asociado a una organización cliente específica, por lo que no se requiere el uso de información interna ni la intervención de procesos productivos reales. Las herramientas tecnológicas utilizadas se emplean exclusivamente como apoyo para el análisis y desarrollo de la propuesta planteada.

Antecedentes del problema

No se dispone de antecedentes formales documentados para la resolución integral del problema abordado en esta investigación. Las acciones relacionadas con la problemática han sido tratadas de manera parcial o informal, sin un enfoque estructurado ni una propuesta metodológica claramente definida.

Definición y descripción del problema

En el contexto de la Industria 5.0, los Gemelos Digitales Humanos (*Human Digital Twins*, HDT) han surgido como un enfoque prometedor para mejorar la interacción humano-máquina mediante la representación digital de aspectos físicos, cognitivos y fisiológicos del ser humano. Estos modelos requieren la integración de datos multimodales provenientes de diversas fuentes, tales como video, sensores fisiológicos y métricas cognitivas, con el fin de reflejar de manera coherente el estado del individuo en tiempo casi real.

No obstante, la literatura actual evidencia la ausencia de arquitecturas de software estandarizadas que permitan integrar, de forma estructurada y reutilizable, estos datos multimodales dentro de los HDT. Las propuestas existentes suelen ser fragmentadas, diseñadas para casos de uso específicos y con un bajo nivel de interoperabilidad, escalabilidad y extensibilidad. Esta situación dificulta la reutilización de soluciones, limita su adaptación a nuevos contextos y restringe su aplicación práctica en entornos reales como manufactura, salud o ergonomía.

El problema no radica en la falta de tecnologías para la captura o el procesamiento de datos multimodales, sino en la carencia de una arquitectura de software que unifique dichos componentes bajo un diseño coherente, orientado a atributos de calidad y alineado con principios modernos de arquitectura de software. En consecuencia, es necesario diseñar una arquitectura de software multimodal para HDTs, capaz de estructurar el flujo de datos desde su captura hasta su procesamiento y consumo, con el propósito de optimizar la interacción humano-máquina y sentar las bases para futuras implementaciones.

Justificación

Un Gemelo Digital (*Digital Twin*) es una representación virtual de un sistema, proceso o entidad física que permite el monitoreo, simulación y análisis de su comportamiento en tiempo real (Zhong, Xia, Zhu, & Duan, 2023). Posteriormente, debido a la evolución de los sistemas para ser más centrados en las personas, surge el concepto de Gemelo Digital Humano o *Human Digital Twin* (HDT), cuyo objetivo es modelar digitalmente aspectos del ser humano, como su estado físico, cognitivo o emocional, para mejorar la interacción con sistemas inteligentes (Wang, et al., 2024). Estos modelos se aplican en sectores como la manufactura, la salud y la ergonomía, donde permiten optimizar la seguridad, el rendimiento y la personalización de las interacciones entre humanos y máquinas (Zafar, Langås, & Sanfilippo, 2024).

Los HDT son una de las tendencias más relevantes en el marco de la Industria 5.0, ya que ponen al ser humano en el centro de sistemas inteligentes y colaborativos (Wang, et al., 2024). Su potencial radica en permitir modelar estados físicos, cognitivos y emocionales de las personas mediante la integración de múltiples fuentes de datos (Ramasubramanian, Mathew, Kelly, Hargaden, & Papakostas, 2022). Sin embargo, la literatura evidencia un vacío importante, ya que no existe un marco arquitectónico estandarizado para integrar datos multimodales en HDT; las propuestas actuales son fragmentadas, con bajo nivel de reutilización y limitada capacidad de escalabilidad (Shi, et al., 2022).

Diversas investigaciones recientes demuestran avances parciales pero insuficientes:

- Modelos que evalúan fatiga física y cognitiva mediante visión por computadora y *wearables*, sin ofrecer una arquitectura extensible (Chand, Zheng, & Lu, 2024).
- Enfoques cognitivos como ACT-R para simular el comportamiento humano en entornos industriales, con aportes en entrenamiento y predicción de desempeño,

pero aislados de un marco multimodal (Balaji, Shahab, Srinivasan, & Srinivasan, 2023).

- Arquitecturas multi-agente potenciadas por *Large Language Models*, que muestran cómo integrar información heterogénea para la toma de decisiones, aunque centradas en mantenimiento predictivo y no en HDT (Sun, Zhang, Bao, Lu, & Liu, 2024).
- Propuestas de gemelos digitales en manufactura aditiva que destacan el valor de arquitecturas orientadas a servicios para mejorar la reutilización y la interoperabilidad (Chen, et al., 2024).

Lo anterior confirma la necesidad de diseñar una arquitectura conceptual de software que integre datos visuales y fisiológicos multimodales en HDT, garantizando escalabilidad, modularidad e interoperabilidad. Tal arquitectura permitiría unificar el flujo desde la captura de datos hasta su procesamiento y visualización, habilitando aplicaciones en interacción humano-máquina más allá de casos *ad-hoc*.

Una arquitectura formal para HDT puede tener beneficios tangibles en distintos sectores debido a que facilitaría el desarrollo e implementación de sistemas centrados en el humano. En manufactura, permitiría mejorar la ergonomía, seguridad y eficiencia mediante la detección temprana de fatiga o sobrecarga cognitiva. En salud, facilitaría el monitoreo personalizado del estado físico y emocional de los pacientes. Además, en entornos de formación y seguridad laboral, posibilitaría simulaciones más realistas del comportamiento humano, favoreciendo decisiones y diseños centrados en las personas (Zafar, Langås, & Sanfilippo, 2024).

El aporte del proyecto es pertinente al área de Arquitectura y Diseño de Software, al priorizar atributos de calidad (interoperabilidad, reusabilidad, extensibilidad) y estilos modernos (*cloud-native, event-driven, edge computing*). Adicionalmente, parte de la propuesta innovadora consiste en la integración de fuentes multimodales de datos provenientes de múltiples sensores. Finalmente, el proyecto conecta la formación en mecatrónica del autor con el énfasis actual en software, aportando una perspectiva interdisciplinaria que fortalece el carácter innovador y publicable del trabajo.

Viabilidad

A continuación, se desarrollan los motivos técnicos, operativos y económicos por los que se considera que el desarrollo del presente proyecto es factible.

Técnica

Se cuenta con la formación académica necesaria en ingeniería de software, adquirida en el marco de los programas de posgrado de la Universidad CENFOTEC, así como con experiencia profesional relacionada con el análisis, diseño y evaluación de soluciones tecnológicas. Estos conocimientos permiten abordar adecuadamente el problema planteado. Adicionalmente, se dispone de acceso a recursos académicos y bibliográficos proporcionados por la universidad para la adquisición de conocimientos complementarios.

Operativa

La investigación puede llevarse a cabo sin afectar el funcionamiento normal de ninguna organización, ya que no depende de recursos operativos críticos ni de la participación directa de personal externo. El desarrollo del proyecto se ajusta a las condiciones y lineamientos establecidos para los proyectos de investigación de la Universidad CENFOTEC y se realizará utilizando recursos propios del investigador.

Económica

El presente proyecto no está vinculado a ninguna institución pública o privada como cliente, por lo que los costos asociados a su desarrollo serán asumidos por el investigador y se consideran de carácter teórico.

Como referencia para la estimación del costo de las horas de trabajo, se utiliza un salario anual promedio de un profesional en el área de software de USD 62 000, según el *Stack Overflow Developer Survey 2024*, lo que equivale aproximadamente a un costo de USD 28 por hora de consultoría. Se estima una dedicación total de 200 horas para el desarrollo del proyecto.

Adicionalmente, se contemplan costos asociados a capacitación metodológica y licencias de software. No se incluyen costos por adquisición de literatura, ya que la Universidad CENFOTEC provee acceso a recursos académicos y bibliográficos.

En la Tabla 1 se observa el detalle de los costos considerados.

Tabla 1
Costos de la investigación

Rubro	Costo (\$)
Horas de consultor	5600
Capacitación metodológica	600

Licencias de software	1000
-----------------------	------

Objetivos

General

Diseñar una arquitectura de software multimodal para el desarrollo de Gemelos Digitales Humanos, con el propósito de optimizar la interacción humano-máquina.

Específicos

- Identificar los conceptos, modelos y enfoques arquitectónicos existentes sobre *Digital Twins* y *Human Digital Twins* a partir de una revisión sistemática de literatura, para establecer la base teórica del proyecto.
- Explicar los retos de interoperabilidad, sincronización y calidad de datos mediante el análisis de arquitecturas multimodales actuales, con el fin de comprender las limitaciones que afectan su integración efectiva.
- Aplicar los hallazgos teóricos y técnicos en la elaboración de modelos de flujo de información que representen la captura y procesamiento de datos multimodales, para contextualizar la propuesta arquitectónica en escenarios de interacción humano-máquina.
- Analizar alternativas arquitectónicas relevantes (por capas, orientadas a servicios, *cloud-native*, *edge computing*) utilizando criterios de calidad definidos, para determinar las más adecuadas como base del diseño de la arquitectura propuesta.

Alcances

Como entregables principales se contempla:

- Un documento académico que describe el diseño arquitectónico propuesto, incluyendo sus componentes, capas, flujos de información e interfaces.
- Un modelo arquitectónico visual, representado mediante notaciones estandarizadas de arquitectura de software.
- Un artículo académico derivado del trabajo, orientado a publicación o presentación en congreso.
- Una prueba de concepto desarrollada en un entorno controlado, con el fin de validar la factibilidad técnica del diseño propuesto mediante la integración básica de datos multimodales.

El proyecto se desarrolla en el marco de los cursos PIA-1 y PIA-2 de la Universidad CENFOTEC y se limita al nivel conceptual y de validación inicial.

Limitaciones

El proyecto no contempla la implementación completa de la arquitectura propuesta en entornos productivos reales, ni su despliegue operativo en organizaciones específicas. Tampoco se incluye la evaluación de impacto organizacional, económico o social derivado de una adopción a gran escala.

Asimismo, no se desarrollan modelos avanzados de inteligencia artificial ni soluciones comerciales completas, limitándose el trabajo al diseño arquitectónico y a una prueba de concepto orientada a la validación inicial del enfoque propuesto.

Marco de referencia***Socioeconómico***

Desde una perspectiva socioeconómica, la investigación se enmarca en el contexto de la Industria 5.0, donde existe un creciente interés por el desarrollo de sistemas centrados en el ser humano que mejoren la interacción entre personas y máquinas. Los HDTs representan una línea emergente con potencial impacto en sectores como manufactura, salud, ergonomía y seguridad laboral.

La ausencia de arquitecturas de software estandarizadas para la integración de datos multimodales en HDT limita su adopción y aplicación práctica en dichos sectores. En este sentido, el diseño de una arquitectura conceptual orientada a la interoperabilidad, modularidad y escalabilidad puede contribuir a sentar bases técnicas que faciliten futuros desarrollos y aplicaciones, tanto en contextos académicos como industriales.

Revisión sistemática de la literatura

Para estructurar la revisión, se utiliza como guía el protocolo propuesto por (Biolchini, Mian, Natali, & Travassos, 2005), el cual establece actividades de planificación, ejecución, extracción y análisis de resultados.

Formulación de la pregunta**Foco de la pregunta.**

Se centraliza la búsqueda en estudios primarios que describan arquitecturas, marcos o modelos de referencia orientados a HDTs o propuestas equivalentes humano-céntricas, con énfasis en cómo integran datos multimodales y qué atributos de calidad consideran.

Amplitud y calidad de la pregunta.**1. Problema**

La literatura reporta avances relevantes en HDT y en DT aplicados a interacción humano-máquina; sin embargo, no existe un marco arquitectónico estandarizado para integrar coherentemente datos multimodales en HDT. Las propuestas existentes tienden a ser fragmentadas, poco reutilizables y con limitaciones de interoperabilidad, escalabilidad y extensibilidad, lo cual restringe su adopción práctica en escenarios reales.

2. Pregunta de investigación

Con base en lo anterior, se formula la siguiente pregunta principal:

- ¿Qué elementos arquitectónicos y decisiones de diseño se reportan en la literatura para integrar datos multimodales en HDTs, y cuáles son las limitaciones que impiden su estandarización y adopción?

Para delimitar el alcance, se plantean sub-preguntas:

- RQ1: ¿Qué estilos y enfoques arquitectónicos se utilizan?
- RQ2: ¿Qué modalidades de datos se integran y cómo se modela el flujo de información?
- RQ3: ¿Qué atributos de calidad se priorizan y cómo se abordan?
- RQ4: ¿Qué estrategias de validación se reportan y cuáles son las principales limitaciones?

3. Palabras clave y sinónimos

Se define un conjunto de términos en español e inglés por tratarse de un campo con alta producción en inglés.

Tabla 2

Palabras clave preliminares

Término principal	Equivalentes / sinónimos en inglés
Gemelo Digital Humano	Human Digital Twin, Human-Centric Digital Twin, Human Twin
Gemelo Digital	Digital Twin
Datos multimodales	Multimodal data, Multimodal fusion, Heterogeneous data, Sensor fusion
Interacción humano-máquina	Human–Machine Interaction, Human–Robot Interaction, Human–Robot Collaboration
Arquitectura de software	Software architecture, Reference architecture, Architectural

	framework, Conceptual architecture
Interoperabilidad	Interoperability, Integration
Sincronización	Synchronization, Data alignment, Time-series alignment
Calidad de datos	Data quality, Data reliability, Data integrity
Edge computing	Edge computing, Edge AI
Cloud-native	Cloud-native, Microservices, Event-driven architecture

4. Intervención

Extraer y analizar estudios primarios relevantes para identificar patrones arquitectónicos, modalidades de datos integradas, mecanismos de integración y limitaciones reportadas.

5. Control

Al iniciar la revisión no se dispone de una base cerrada de estudios. Se parte de búsquedas por cadena y se complementa con revisión de referencias hacia atrás y hacia adelante a partir de estudios iniciales identificados.

6. Efectos esperados

Contar con evidencia suficiente para:

- Caracterizar arquitecturas utilizadas en HDT multimodales.
- Identificar brechas recurrentes (interoperabilidad, sincronización, calidad de datos).
- Derivar criterios de diseño arquitectónico aplicables a la propuesta del proyecto.

7. Medida de salida

Se utilizan medidas descriptivas y de clasificación, tales como:

- Número de estudios por año, dominio y tipo de publicación.
- Estilos arquitectónicos reportados.
- Modalidades de datos integradas.
- Mecanismos de integración y gestión de flujo de datos.
- Atributos de calidad considerados.
- Tipo de validación y limitaciones reportadas.

8. Población

Estudios académicos y técnicos relacionados con HDT e interacción humano-máquina que incluyan arquitectura de software y/o integración de datos multimodales.

9. Aplicación

Los resultados son relevantes para investigadores y profesionales en arquitectura de software, robótica colaborativa y sistemas ciberfísicos que requieran diseñar HDT integrando datos heterogéneos con atributos de calidad definidos.

10. Diseño experimental

Se realiza una síntesis cualitativa de los estudios seleccionados mediante clasificación y análisis temático de sus aportes arquitectónicos. No se plantea metaanálisis estadístico debido a la heterogeneidad de enfoques, métricas y tipos de validación reportados.

Selección de fuentes

Criterios de selección de fuentes.

Se priorizan fuentes con alta cobertura en ingeniería de software, robótica y sistemas ciberfísicos, considerando:

- Publicaciones revisadas por pares.
- Indexación y reputación.
- Pertinencia al tema.

Lenguaje de estudio.

Se consideran estudios en inglés y español.

Identificación de fuentes.

1. Método de búsqueda

Se utiliza una combinación de:

- Búsqueda por cadenas en motores académicos.
- Revisión de referencias desde estudios semilla relevantes.

2. Cadenas de búsqueda

Las cadenas se diseñan con operadores AND/OR y sinónimos para maximizar recuperación:

- CB1: (“human digital twin” OR “human-centric digital twin”) AND (“software architecture” OR “reference architecture” OR “framework”)
- CB2: (“human digital twin” OR “human twin”) AND (multimodal OR “sensor fusion” OR “heterogeneous data”)

- CB3: (“digital twin” AND human) AND (“data integration” OR interoperability OR synchronization OR “data quality”)
- CB4: (“human-robot collaboration” OR “human-machine interaction”) AND (“human digital twin” OR “cognitive digital twin”)
- CB5: (“human digital twin”) AND (edge OR “edge computing” OR “cloud-native” OR microservices OR “event-driven”)
- CB6: (“cognitive digital twin” OR “physiological digital twin”) AND (architecture OR framework)

3. Lista de fuentes

Se consideran como fuentes principales:

- Google Scholar.
- Lista de experto.

Debido a que este proyecto se desarrolla como apoyo a los objetivos del Laboratorio de Robótica de la Universidad CENFOTEC, la coordinación de dicho laboratorio brindó una lista de estudios relacionados con la temática que son considerados como una fuente sujeta al procedimiento de selección presentado.

La búsqueda por cadenas se realiza utilizando Google Scholar como punto de entrada, debido a que centraliza resultados provenientes de múltiples repositorios y editoriales (por ejemplo, IEEE Xplore, SpringerLink y ScienceDirect). Esta decisión permite ejecutar una estrategia de búsqueda consistente y reducir complejidad operativa. Para fines de trazabilidad y extracción, cada estudio se registra con su fuente editorial o repositorio original (DOI/URL) cuando está disponible.

Selección de fuentes luego de evaluación.

Las fuentes finales se definen con base en su capacidad para ejecutar las cadenas, la disponibilidad de texto completo y la pertinencia de los resultados iniciales.

Comprobación de fuentes.

Dado que la revisión es realizada por un único investigador, no se contempla validación por un panel de expertos. Para mitigar este riesgo, se aplica búsqueda piloto, criterios explícitos y búsqueda a partir de las referencias de estudios seleccionados.

La selección de fuentes y la cobertura temática se refuerzan mediante una lista curada por experto. Esta lista no reemplaza la búsqueda sistemática, sino que complementa la identificación de estudios y reduce el riesgo de omitir trabajos relevantes.

Para mitigar sesgos, se mantiene una búsqueda adicional por cadenas en motores académicos y se registran los estudios por su origen

Selección de estudios

Criterios de inclusión y exclusión.

Criterios de inclusión (CI):

- **CI1:** El estudio aborda HDT o un concepto equivalente humano-céntrico.
- **CI2:** Describe arquitectura, marco, modelo de referencia o componentes/integración a nivel de sistema.
- **CI3:** Considera integración de datos multimodales o retos asociados (interoperabilidad, sincronización, calidad de datos).
- **CI4:** Publicación revisada por pares y con acceso a texto completo.
- **CI5:** Rango temporal recomendado: últimos 4 años. Se permiten excepciones justificadas para estudios críticos o de alto impacto identificados en la lista curada por experto o durante la revisión de referencias, cuando aporten un marco arquitectónico base necesario para el proyecto

Criterios de exclusión (CE)

- **CE1:** DTs sin componente humano o sin relación con interacción humano-máquina.
- **CE2:** Trabajos puramente algorítmicos sin aporte a arquitectura o integración a nivel de sistema.
- **CE3:** Documentos no revisados por pares (blogs, notas comerciales sin método).
- **CE4:** Duplicados, resúmenes extendidos sin detalle o sin acceso a texto completo.

Tipos de estudio.

Se consideran como estudios primarios:

- Arquitecturas conceptuales o de referencia.
- *Framework* arquitectónicos.
- Propuestas con validación mediante PoC/caso/simulación.

Procedimiento de selección.

Se aplica un proceso por etapas:

1. Filtro por título y palabras clave.

2. Filtro por *abstract*.
3. Lectura completa y aplicación final de criterios.
4. Evaluación de calidad.

Se revisa una muestra de estudios excluidos en la etapa de *abstract* para confirmar que la aplicación de criterios no haya descartado estudios potencialmente relevantes.

Extracción y análisis de información

Evaluación de calidad de estudios.

Se utiliza una lista de verificación con puntaje:

- ¿Describe claramente el objetivo y contexto?
- ¿Define componentes y relaciones arquitectónicas?
- ¿Especifica modalidades de datos y flujo de información?
- ¿Aborda atributos de calidad o retos?
- ¿Incluye validación o discusión de limitaciones?

Formato de extracción.

Para estandarizar la extracción, se registran campos como:

- Identificación (título, autores, año, fuente).
- Dominio (manufactura, salud, ergonomía, HRC).
- Modalidades de datos.
- Enfoque arquitectónico (estilo, componentes, integración).
- Atributos de calidad abordados.
- Tipo de validación y limitaciones.

Criterios de inclusión y exclusión.

Se extrae únicamente información explícitamente reportada sobre:

- Estilo/enfoque arquitectónico.
- Modalidades de datos integradas.
- Mecanismos de integración/flujo.
- Atributos de calidad.
- Validación y limitaciones.

Se excluyen afirmaciones sin evidencia, especulaciones y contenido no relacionado con arquitectura o integración multimodal.

Resolución de divergencias.

Al tratarse de una revisión realizada por un único investigador, las discrepancias se gestionan mediante una reevaluación del criterio aplicado y el registro de la decisión tomada en las notas de selección.

Ejecución de la selección y registro de resultados

Una vez definido el protocolo de revisión (preguntas, fuentes, cadenas y criterios), se ejecuta la búsqueda en las fuentes seleccionadas y se aplica el proceso de selección por etapas. Con el fin de asegurar trazabilidad, se documenta por fuente la cantidad de estudios recuperados y filtrados en cada etapa: revisión de título, revisión de resumen y lectura de texto completo; estos resultados se pueden encontrar en la Tabla 3.

Tabla 3

Registro de ejecución de búsqueda y selección (por fuente)

Fuente	Fecha	Cadenas aplicadas	Filtros	N0	N1	N2	N3	Nf
Lista de experto	2026/01/28	N/A	Últimos 4 años / idioma	28	22	18	15	14
Google Scholar	2026/01/31	Todas	Últimos 4 años / idioma	12	10	7	6	5
Total	N/A	N/A	N/A	40	32	25	21	19

Nota: N0 corresponde al resultado inicial, N1 al título, N2 al *abstract*, N3 a la lectura completa y Nf a la selección final luego de aplicar criterios de calidad.

Estudios seleccionados para extracción

Los estudios que cumplen los criterios de inclusión y superan la lectura de texto completo se consolidan como el conjunto final para extracción. La Tabla 4 registra los estudios seleccionados, con su información bibliográfica esencial y su clasificación preliminar según el tipo de aporte.

Tabla 4
Estudios seleccionados para extracción

ID	Título	Autores	Año	Fuente	Tipo	Dominio	URL/DOI
S1	ACT-R based human digital twin to enhance operators' performance in process industries	Bharatwaajan Balaji; Mohammed Aatif Shahab; Babji Srinivasan; Rajagopalan Srinivasan	2023	Lista de experto	PoC	Industrias de proceso, desempeño de operadores	10.3389/fnhum.2023.1038060
S2	A vision-enabled fatigue-sensitive human digital twin towards human-centric human-robot collaboration	Saahil Chand; Hao Zheng; Yuqian Lu	2024	Lista de experto	PoC	HRC en manufactura, ergonomía, fatiga	10.1016/j.jmsy.2024.10.002
S3	Service oriented digital twin for additive manufacturing process	Zijue Chen; Kanishka Surendraarcharyagie; Keenan Granland; Chao Chen; Xun Xu; Yi Xiong; Chris Davies; Yunlong Tang	2024	Lista de experto	Framework	Manufactura aditiva	10.1016/j.jmsy.2024.04.015
S4	Digital Twin for Human–Robot Collaboration in Manufacturing: Review and Outlook	Aswin K. Ramasubramanian; Robins Mathew; Matthew Kelly; Vincent Hargaden; Nikolaos Papakostas	2022	Lista de experto	Review	HRC en manufactura	10.3390/app12104811
S5	A Cognitive Digital Twins Framework for Human-Robot Collaboration	Yanjun Shi; Weiming Shen; Lihui Wang; Francesco Longo; Letizia Nicoletti; Antonio Padovano	2022	Lista de experto	Framework	HRC en manufactura, human CPS, edge-cloud	10.1016/j.procs.2022.01.387

S6	Empowering digital twins with large language models for global temporal feature learning	Yicheng Sun; Qi Zhang; Jinsong Bao; Yuqian Lu; Shimin Liu	2024	Lista de experto	Framework	Mantenimiento/diagnóstico industrial	10.1016/j.jmsy.2024.02.015
S7	Human Digital Twin in the context of Industry 5.0	Baicun Wang; Huiying Zhou; Xingyu Li; Geng Yang; Pai Zheng; Ci Song; Yixiu Yuan; Thorsten Wuest; Huayong Yang; Lihui Wang	2024	Lista de experto	Review	Industria 5.0, manufactura humano-céntrica	10.1016/j.rcim.2023.102626
S8	Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart manufacturing: A state-of-the-art review	Muhammad Hamza Zafar; Even Falkenberg Langås; Filippo Sanfilippo	2024	Lista de experto	Review	Manufactura inteligente, HRC, augmentación	10.1016/j.rcim.2024.102769
S9	Overview of predictive maintenance based on digital twin technology	Dong Zhong; Zhelei Xia; Yian Zhu; Junhua Duan	2023	Lista de experto	Review	Mantenimiento predictivo, manufactura	10.1016/j.heliyon.2023.e14534
S10	A design framework for high-fidelity human-centric digital twin of collaborative work cell in Industry 5.0	Tianyu Wang; Zhihao Liu; Lihui Wang; Mian Li; Xi Vincent Wang	2025	Google Scholar	Framework	Manufactura, HRC, Industria 5.0	10.1016/j.jmsy.2025.02.018
S11	A human digital twin approach for fatigue-aware task planning in human-robot collaborative assembly	Yingchao You; Boliang Cai; Duc Truong Pham; Ying Liu; Ze Ji	2025	Google Scholar	PoC	Manufactura, HRC, ergonomía, fatiga	10.1016/j.cie.2024.110774
S12	A Digital Twin Driven Human-Centric Ecosystem for Industry 5.0	Valeria Villani; Marco Picone; Marco Mamei; Lorenzo Sabattini	2025	Google Scholar	Architecture	Industria 5.0, manufactura humano-céntrica	10.1109/TASE.2024.3410703

S13	Construction of Human Digital Twin Model Based on Multimodal Data and Its Application in Locomotion Mode Identification	Ruirui Zhong; Bingtao Hu; Yixiong Feng; Hao Zheng; Zhaoxi Hong; Shanhe Lou; Jianrong Tan	2023	Google Scholar	Framework	Manufactura; HCPS; modelado humano	10.1186/s10033-023-00951-0
S14	From Digital Human Modeling to Human Digital Twin: Framework and Perspectives in Human Factors	Qiqi He; Li; Dai Li; Tao Peng; Xiangying Zhang; Yincheng Cai; Xujun Zhang; Renzhong Tang	2024	Google Scholar	Review	Human factors, ergonomía, industria 5.0	10.1186/s10033-024-00998-7
S15	A review of digital twin capabilities, technologies, and applications based on the maturity model	Y. Liu; J. Feng; J. Lu; S. Zhou	2024	Lista de experto	Review	Industria 4.0, DT general	10.1016/j.aei.2024.102592
S16	Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies	I. Onaji; D. Tiwari; P. Soulatiantork; B. Song; A. Tiwari	2022	Lista de experto	Framework	Manufactura, DT general	10.1080/0951192X.2022.2027014
S17	Preconditions and benefits of digital twin-based business ecosystems in manufacturing	K. Kokkonen; L. Hannola; T. Rantala; J. Ukko; M. Saunila; T. Rantala	2023	Lista de experto	Empirical study	Manufactura, ecosistemas DT	10.1080/0951192X.2022.2145022
S18	Human-Centric Digital Twins in Industry: A Comprehensive Review of Enabling Technologies and Implementation Strategies	U. Asad; M. Khan; A. Khalid; W. A. Lughmani	2023	Lista de experto	Review	Industria, HCDT	10.3390/s23083938
S19	Towards a human-centric Digital Twin architecture for Industry 5.0: Aiding skilled operators with composites production automation	J. A. de Marchi; E. H. Baalbergen	2023	Lista de experto	Conceptual architecture	Manufactura de composites, Industria 5.0, soporte operador	10.1088/1742-6596/2526/1/012047

Estado de la cuestión

En esta sección se presenta la síntesis de los estudios seleccionados en la revisión sistemática. Con base en la información extraída, se organiza la evidencia para responder las preguntas RQ1-RQ4, destacando patrones, enfoques arquitectónicos, modalidades de datos integradas, atributos de calidad priorizados, estrategias de validación y limitaciones reportadas.

Extracción de información de los estudios seleccionados

Una vez definido el conjunto final de estudios (Tabla 4), se realiza la extracción de información relevante utilizando un formato estándar. Para mantener claridad y evitar densidad excesiva, la extracción se presenta en una tabla por estudio.

Tabla 5

Extracción de información del estudio S1

Campo	Descripción
ID del estudio	S1
Referencia	Balaji, B., Shahab, M., Srinivasan, B., & Srinivasan, R. (2023). ACT-R based human digital twin to enhance operators' performance in process industries. <i>Frontiers in Human Neuroscience</i> , 17. doi:10.3389/fnhum.2023.1038060
Fuente	Lista de experto
Dominio / Contexto	Industria de procesos; operadores de sala de control; seguridad operacional.
Modalidades integradas	Cognitiva (ACT-R); visual (eye-tracking); datos de proceso/estado.
Estilo/enfoque arquitectónico	Arquitectura cognitiva ACT-R (modular).
Componentes o capas reportadas	Módulos ACT-R (visual, motor, goal), memoria declarativa/procedimental, simulación de tareas de rechazo de perturbaciones.
Integración y flujo de datos	Escenario/proceso -> percepción visual -> procesamiento cognitivo (producciones/memoria) -> decisión/acción del operador simulado; validación con patrones de mirada.
Retos abordados	Modelar comportamiento humano ante anomalías; predecir respuestas del operador; generar datos de comportamiento para entrenamiento/soporte.

Atributos de calidad priorizados	Fidelidad/validez del comportamiento respecto a humanos (comparación con eye-tracking).
Estrategia de validación	Experimentos con 10 sujetos y 110 tareas; comparación de patrones de mirada; simulación (PoC).
Limitaciones reportadas por los autores	El HDT se restringe a una anomalía a la vez; falta incorporar diferencias individuales; necesidad de experimentos a mayor escala; evaluar robustez con EEG (futuro).
Aportes relevantes para este proyecto	• HDT cognitivo (ACT-R) para simular operadores en escenarios anormales. • Valida similitud de patrones de mirada entre HDT y humanos. • Permite generar datos de comportamiento para entrenamiento y detección de fallas en modelos mentales. • Apoya decisiones de operación en tiempo real.

Tabla 6
Extracción de información del estudio S2

Campo	Descripción
ID del estudio	S2
Referencia	Chand, S., Zheng, H., & Lu, Y. (2024). A vision-enabled fatigue-sensitive human digital twin towards human-centric human-robot collaboration. Journal of Manufacturing Systems, 77, 432-445. doi:10.1016/j.jmsy.2024.10.002
Fuente	Lista de experto
Dominio / Contexto	Manufactura/ensamble; HRC; ergonomía y fatiga.
Modalidades integradas	Visual (video); fisiológica (wearable); cognitiva (fatiga).
Estilo/enfoque arquitectónico	Framework HDT integrado a HHRC (sin estilo arquitectónico formal reportado).
Componentes o capas reportadas	Captura de video; segmentación de operaciones (MS-TCN <i>dual-stream</i> + LSTM); perfil de fatiga física; sensor wearable para señales fisiológicas; estimación de fatiga cognitiva; integración en sistema HHRC.
Integración y flujo de datos	Video -> segmentación -> tipo/rep/brazo -> perfil de fatiga física; señales fisiológicas -> fatiga cognitiva; fusión en HDT para monitoreo y adaptación.

Retos abordados	Monitoreo no invasivo de fatiga; integración de fatiga física y cognitiva; estimación en tiempo real.
Atributos de calidad priorizados	Precisión/robustez de segmentación; no intrusivo; tiempo real.
Estrategia de validación	Caso de estudio en ensamble de librero; evaluación comparativa de modelos (PoC).
Limitaciones reportadas por los autores	Replanificación dinámica fuera de alcance; señales fisiológicas pueden confundirse por actividad física intensa (posibles falsos positivos).
Aportes relevantes para este proyecto	• HDT sensible a fatiga física y cognitiva usando visión y wearables no intrusivos. • Integra segmentación de operaciones para estimar fatiga localizada. • Soporta HRC humano céntrica orientada a bienestar y seguridad.

Tabla 7
Extracción de información del estudio S3

Campo	Descripción
ID del estudio	S3
Referencia	Chen, Z., Surendraarcharyagie, K., Granland, K., Chen, C., Xu, X., Xiong, Y., Davies, C., & Tang, Y. (2024). Service oriented digital twin for additive manufacturing process. Journal of Manufacturing Systems, 74, 762-776. doi:10.1016/j.jmsy.2024.04.015
Fuente	Lista de experto
Dominio / Contexto	Manufactura aditiva (AM / 3D printing).
Modalidades integradas	Datos de sensores de proceso, datos de máquina, imágenes (microcam), datos de simulación.
Estilo/enfoque arquitectónico	SOA / por capas (service, model, data, interface).
Componentes o capas reportadas	Capa de servicios, capa de modelos, capa de datos, capa de interfaz; sub-servicios; base de datos relacional; sensores internos/externos; control PLC/OPC UA en caso.
Integración y flujo de datos	Definir servicios -> descomponer en sub-servicios -> seleccionar modelos -> identificar datos de entrada/entrenamiento -> capturar

	datos -> almacenar/etiquetar -> entrenar modelos -> ejecutar servicios -> interfaz/retroalimentación a operadores/PLC.
Retos abordados	Heterogeneidad de procesos AM; baja reutilización; alto costo; disponibilidad de datos; interoperabilidad.
Atributos de calidad priorizados	Reusabilidad, modularidad, interoperabilidad, adaptabilidad.
Estrategia de validación	Dos casos de estudio (detección de anomalías y predicción de <i>warping</i>).
Limitaciones reportadas por los autores	Implementación industrial limitada por complejidad y costo; necesidad de estandarizar interfaces; desafíos de adquisición/etiquetado de datos.
Aportes relevantes para este proyecto	• Propone marco de referencia orientado a servicios con cuatro capas y sub-servicios reutilizables. • Desacopla modelo y datos para facilitar reentrenamiento por máquina. • Incluye flujo de desarrollo y casos que muestran viabilidad.

Tabla 8*Extracción de información del estudio S4*

Campo	Descripción
ID del estudio	S4
Referencia	Ramasubramanian, A., Mathew, R., Kelly, M., Hargaden, V., & Papakostas, N. (2022). Digital Twin for Human–Robot Collaboration in Manufacturing: Review and Outlook. <i>Applied Sciences</i> , 12(10), 4811. doi:10.3390/app12104811
Fuente	Lista de experto
Dominio / Contexto	Manufactura; colaboración humano-robot (HRC).
Modalidades integradas	Revisión de datos de sensores, estado de robots y movimiento humano (multimodal).
Estilo/enfoque arquitectónico	Dos enfoques: simulación (SBA) y por capas (LBA: física, virtual, conexión/procesamiento).
Componentes o capas reportadas	Sistema físico HRC; modelo/simulación virtual; capa de conexión/procesamiento de información; herramientas de simulación/VR/AR (revisadas).

Integración y flujo de datos	Datos de sensores/IoT -> actualizan gemelo/simulación -> evaluación de seguridad/flujo -> retroalimentación para despliegue/ajuste.
Retos abordados	Integración de datos heterogéneos; sincronización y tiempo real; fidelidad (<i>reality gap</i>); modelado del humano; estandarización.
Atributos de calidad priorizados	Fidelidad, interoperabilidad, seguridad, tiempo real.
Estrategia de validación	No reporta (revisión).
Limitaciones reportadas por los autores	Gaps: falta de estándares; dificultades de integración y sincronización; modelado del humano aun limitado; fidelidad de simulación sin métrica clara.
Aportes relevantes para este proyecto	• Sintetiza enfoques SBA/LBA para DT-HRC. • Identifica desafíos clave (fidelidad, integración, seguridad). • Provee base para decisiones arquitectónicas en HRC.

Tabla 9*Extracción de información del estudio S5*

Campo	Descripción
ID del estudio	S5
Referencia	Shi, Y., Shen, W., Wang, L., Longo, F., Nicoletti, L., & Padovano, A. (2022). A Cognitive Digital Twins Framework for Human-Robot Collaboration. <i>Procedia Computer Science</i> , 200, 1867-1874. doi:10.1016/j.procs.2022.01.387
Fuente	Lista de experto
Dominio / Contexto	Manufactura; HRC; human cyber-physical system.
Modalidades integradas	Datos de máquinas + datos humanos (wearables/video); fusión multimodal.
Estilo/enfoque arquitectónico	Arquitectura por capas (<i>field-edge-cloud</i>) con 5G; <i>edge-cloud collaborative computing</i> .
Componentes o capas reportadas	<i>Field layer</i> (maquina + operador); <i>Edge layer</i> (procesamiento/inferencia); <i>Cloud layer</i> (entrenamiento/modelos); red 5G; modelos cognitivos humanos.
Integración y flujo de datos	Datos de campo -> edge -> cloud para entrenamiento; modelos actualizados -> edge; decisiones -> campo.

Retos abordados	Latencia y tiempo real; integración humano-en-el-bucle; fusión multimodal; conectividad 5G.
Atributos de calidad priorizados	Baja latencia, escalabilidad, adaptabilidad, tiempo real.
Estrategia de validación	Caso HRC con edge computing 5G (PoC).
Limitaciones reportadas por los autores	No reporta limitaciones explícitas; plantea futuro: más modelos cognitivos y más casos de uso.
Aportes relevantes para este proyecto	• Propone framework cognitivo con tres capas y 5G para HRC. • Integra fusión multimodal y actualización de modelos edge-cloud. • Valida con caso HRC en entorno 5G.

Tabla 10

Extracción de información del estudio S6

Campo	Descripción
ID del estudio	S6
Referencia	Sun, Y., Zhang, Q., Bao, J., Lu, Y., & Liu, S. (2024). Empowering digital twins with large language models for global temporal feature learning. Journal of Manufacturing Systems, 74, 83-99. doi:10.1016/j.jmsy.2024.02.015
Fuente	Lista de experto
Dominio / Contexto	Mantenimiento/diagnóstico de equipos industriales.
Modalidades integradas	Series temporales de sensores + datos semánticos/textuales.
Estilo/enfoque arquitectónico	Arquitectura multi-agente impulsada por LLM.
Componentes o capas reportadas	Representación de series (descomposición + <i>features</i>), integración semántica, agentes LLM, mecanismos de interacción, memoria/conocimiento, módulo de decisión/diagnostico.
Integración y flujo de datos	Series de sensores -> representación semántica -> percepción local por agentes -> interacción multi-agente -> decisión/diagnostico -> <i>feedback</i> .

Retos abordados	Adaptabilidad, uso de datos, interpretabilidad; coordinación de agentes; procesamiento de series temporales.
Atributos de calidad priorizados	Interpretabilidad/trazabilidad, adaptabilidad, confiabilidad de decisiones.
Estrategia de validación	Escenario de mantenimiento con ablaciones de componentes.
Limitaciones reportadas por los autores	LLMs limitados para secuencias largas (tokens/contexto); densidad de información en series; necesidad de data sets más grandes y más modalidades; interacción compleja no mejora en esta etapa.
Aportes relevantes para este proyecto	• Introduce LLMs como capa cognitiva en DT multi-agente. • Mejora trazabilidad e interpretabilidad de decisiones. • Integra datos temporales y semánticos para diagnóstico.

Tabla 11*Extracción de información del estudio S7*

Campo	Descripción
ID del estudio	S7
Referencia	Wang, B., Zhou, H., Li, X., Yang, G., Zheng, P., Song, C., Yuan, Y., Wuest, T., Yang, H., & Wang, L. (2024). Human Digital Twin in the context of Industry 5.0. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 85, 102626. doi:10.1016/j.rcim.2023.102626
Fuente	Lista de experto
Dominio / Contexto	Industria 5.0; manufactura humano-céntrica.
Modalidades integradas	Datos humanos (fisiológicos, conductuales, cognitivos) + datos de sistema; wearables (según framework).
Estilo/enfoque arquitectónico	Modelo por capas (<i>agent, data, inference, implementation</i>).
Componentes o capas reportadas	Agent layer (humanos, activos físicos, entorno, wearables, IoT); Data layer (extracción, transformación, almacenamiento, acceso); Inference layer (procesamiento, simulación, predicción, decisión, AI); Implementation layer (servicios, control/monitorización).
Integración y flujo de datos	Datos del agente -> data layer -> inference -> implementation -> retroalimentación y servicios a humanos/sistema (loop cerrado).

Retos abordados	Estandarización de datos/interfases, privacidad/seguridad, human-centricity, sostenibilidad/resiliencia.
Atributos de calidad priorizados	Interoperabilidad, extensibilidad, resiliencia, privacidad/seguridad.
Estrategia de validación	No reporta (revisión).
Limitaciones reportadas por los autores	Desafíos tecnológicos y organizacionales: estándares, privacidad/ética, evaluación humano-céntrica.
Aportes relevantes para este proyecto	• Define connotación y framework de HDT para Industria 5.0. • Propone arquitectura por capas con responsabilidades claras. • Sintetiza tecnologías habilitadoras y desafíos clave.

Tabla 12
Extracción de información del estudio S8

Campo	Descripción
ID del estudio	S8
Referencia	Zafar, M., Langas, E., & Sanfilippo, F. (2024). Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart manufacturing: A state-of-the-art review. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 89, 102769. doi:10.1016/j.rcim.2024.102769
Fuente	Lista de experto
Dominio / Contexto	Smart manufacturing; Industria 5.0; HRC y augmentation.
Modalidades integradas	Augmentation (VR/AR/MR/haptics) + DT + AI (según revision).
Estilo/enfoque arquitectónico	Revisión de sinergias; no define una arquitectura única.
Componentes o capas reportadas	Cobots, DT, tecnologías de aumento, AI (según literatura).
Integración y flujo de datos	Describe integración conceptual de cobots, DT y aumento para soporte humano céntrico (sin flujo detallado).

Retos abordados	Investigación fragmentada; falta de casos de uso integrados; necesidad de referencia unificada.
Atributos de calidad priorizados	Seguridad, ergonomía, human-centricity (según revisión).
Estrategia de validación	No reporta (revisión).
Limitaciones reportadas por los autores	Gaps identificados: poca integración multi-tecnología y escasez de evaluaciones comparables.
Aportes relevantes para este proyecto	• Síntesis integral de sinergias entre cobots, DT y aumentación. • Identifica vacíos y oportunidades para nuevas arquitecturas. • Proporciona base para definir casos de uso humano céntricos.

Tabla 13*Extracción de información del estudio S9*

Campo	Descripción
ID del estudio	S9
Referencia	Zhong, D., Xia, Z., Zhu, Y., & Duan, J. (2023). Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. Heliyon, 9(4), e14534. doi:10.1016/j.heliyon.2023.e14534
Fuente	Lista de experto
Dominio / Contexto	Mantenimiento predictivo en manufactura (y otros sectores).
Modalidades integradas	Datos de sensores/operación; series temporales.
Estilo/enfoque arquitectónico	Marco de referencia PdMDT por capas: data collection, state judgement, service decision-making.
Componentes o capas reportadas	Capa de recolección de datos; capa de juicio de estado (diagnostico/predicción/RUL); capa de decisión de servicio (planificación de mantenimiento).
Integración y flujo de datos	Sensores/IoT -> juicio de estado -> decisiones de mantenimiento -> ejecución/retroalimentación.
Retos abordados	Falta de plataforma común; implementación de ciclo de vida completo; integración de tecnologías; fidelidad de modelos.

Atributos de calidad priorizados	Confiabilidad, tiempo real, exactitud, interoperabilidad.
Estrategia de validación	Ejemplo con robot industrial (caso).
Limitaciones reportadas por los autores	Ausencia de estándares/plataforma común; cobertura parcial del ciclo de vida; integración compleja en entornos heterogéneos.
Aportes relevantes para este proyecto	• Sintetiza PdMDT y diferencia con PdM tradicional. • Propone marco de referencia por capas para manufactura. • Identifica desafíos y oportunidades para implementar PdMDT.

Tabla 14*Extracción de información del estudio S10*

Campo	Descripción
ID del estudio	S10
Referencia	Wang, T., Liu, Z., Wang, L., Li, M., & Wang, X. V. (2025). A design framework for high-fidelity human-centric digital twin of collaborative work cell in Industry 5.0. <i>Journal of Manufacturing Systems</i> , 80, 140-156. doi:10.1016/j.jmsy.2025.02.018
Fuente	Google Scholar
Dominio / Contexto	Manufactura; celda de trabajo colaborativa humano-robot; Industria 5.0.
Modalidades integradas	Visual (video RGB); seguimiento de movimiento; reconocimiento de procedimientos.
Estilo/enfoque arquitectónico	Framework de diseño para DT humano céntrico (no declara estilo arquitectónico por capas).
Componentes o capas reportadas	Modelo humano digital de alta fidelidad (<i>mesh</i> personalizado); DT de la celda (p. ej., Unity3D); redes <i>transformer</i> para seguimiento de movimiento y reconocimiento de procedimientos.
Integración y flujo de datos	Video RGB corto -> generación de modelo humano personalizado -> integración al DT de la celda -> sincronización de estado mediante tracking/reconocimiento en tiempo real.
Retos abordados	Alta fidelidad del humano digital; oclusiones e incompletitud en observaciones; tracking y reconocimiento en tiempo real.

Atributos de calidad priorizados	Fidelidad; precisión/robustez ante oclusiones; tiempo real.
Estrategia de validación	Experimentos en múltiples celdas colaborativas reales (PoC/experimental).
Limitaciones reportadas por los autores	No reporta explícitamente limitaciones.
Aportes relevantes para este proyecto	• Framework para construir HDT de alta fidelidad con modelo humano personalizado. • Pipeline de sincronización de estado con tracking y reconocimiento de procedimientos en tiempo real. • Evidencia experimental en celdas HRC reales.

Tabla 15*Extracción de información del estudio S11*

Campo	Descripción
ID del estudio	S11
Referencia	You, Y., Cai, B., Pham, D. T., Liu, Y., & Ji, Z. (2025). A human digital twin approach for fatigue-aware task planning in human-robot collaborative assembly. <i>Computers & Industrial Engineering</i> , 200, 110774. doi:10.1016/j.cie.2024.110774
Fuente	Google Scholar
Dominio / Contexto	Manufactura; ensamble colaborativo humano-robot (HRC); planificación de tareas sensible a fatiga.
Modalidades integradas	Movimiento humano con IMUs (Xsens); datos biomecánicos derivados (cinemática y fuerzas musculares); modelo de fatiga muscular.
Estilo/enfoque arquitectónico	Enfoque de HDT con comunicación bidireccional y flujo <i>data-driven</i> (evaluación de fatiga + planificador de tareas). No declara estilo arquitectónico formal.
Componentes o capas reportadas	Adquisición de movimiento con IMUs; modelo musculoesquelético personalizado (escalado); red IK-BiLSTM-AM para estimar fuerzas musculares; modelo fuerza-fatiga; modelo sustituto (<i>surrogate</i>) para evaluación eficiente; planificador de tareas con grafo And-Or + optimización; GUI para ejecución.
Integración y flujo de datos	IMUs → IK-BiLSTM-AM → estimación de fuerzas musculares → modelo fuerza-fatiga → evaluación de fatiga → planificador

	(And-Or + optimización) → asignación de tareas y guía a agentes; comunicación bidireccional entre operador y DT.
Retos abordados	Evaluación de fatiga muscular en tiempo real; reducir carga computacional frente a simulación musculoesquelética completa; planificación dinámica de tareas para mitigar fatiga en HRC.
Atributos de calidad priorizados	Precisión del modelo de fatiga; eficiencia computacional/tiempo real; robustez del planificador.
Estrategia de validación	PoC experimental en entorno de laboratorio con múltiples participantes; comparación con métodos de referencia; validación del impacto del planificador en la reducción de fatiga.
Limitaciones reportadas por los autores	Planificador enfocado solo en fatiga (sin objetivos múltiples como tiempo/seguridad); modelo fuerza-fatiga general (no personalizado); validación en entorno controlado, falta prueba en fábrica y tareas más complejas.
Aportes relevantes para este proyecto	• Integra HDT musculoesquelético con evaluación de fatiga y planificación de tareas en HRC. • Propone pipeline bidireccional con modelo sustituto para operación en tiempo real. • Valida experimentalmente la reducción de fatiga en un caso de ensamble colaborativo.

Tabla 16

Extracción de información del estudio S12

Campo	Descripción
ID del estudio	S12
Referencia	Villani, V., Picone, M., Mamei, M., & Sabbatini, L. (2025). A Digital Twin Driven Human-Centric Ecosystem for Industry 5.0. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 22. doi:10.1109/TASE.2024.3410703
Fuente	Google Scholar
Dominio / Contexto	Industria 5.0; manufactura humano-céntrica; ecosistema DT con operador en el bucle.
Modalidades integradas	Biométricas del operador (condiciones físicas, emocionales y mentales); datos de planta y equipos.
Estilo/enfoque arquitectónico	Arquitectura basada en DT con capa digital desacoplada de la física (<i>blue-print architecture</i>).

Componentes o capas reportadas	Operator Digital Twin (ODT); DTs de entidades en planta; capa digital desacoplada; sala de control/orquestador.
Integración y flujo de datos	Datos biométricos y de planta -> DTs/ODT -> capa digital/Control Room para análisis en tiempo real -> gestión/acción sobre planta y agentes.
Retos abordados	Gestión de dispositivos y datos heterogéneos; human-centricity; orquestación de interacciones humano-maquina.
Atributos de calidad priorizados	Interoperabilidad, monitorización en tiempo real, centrado en el operador.
Estrategia de validación	Ejemplo de implementación en un escenario de robótica colaborativa (caso de uso).
Limitaciones reportadas por los autores	No reporta explícitamente limitaciones.
Aportes relevantes para este proyecto	• Define un ecosistema DT humano céntrico con ODT como elemento central. • Propone arquitectura con capa digital desacoplada y orquestación en <i>control room</i>. • Muestra aplicación en escenario de robótica colaborativa.

Tabla 17*Extracción de información del estudio S13*

Campo	Descripción
ID del estudio	S13
Referencia	Zhong, R., Hu, B., Feng, Y., Zheng, H., Hong, Z., Lou, S., & Tan, J. (2023). Construction of Human Digital Twin Model Based on Multimodal Data and Its Application in Locomotion Mode Identification. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 36, 126. doi:10.1186/s10033-023-00951-0
Fuente	Google Scholar
Dominio / Contexto	Manufactura inteligente; HCPS; modelado humano.
Modalidades integradas	Datos de estado corporal y datos fisiológicos (multimodal).
Estilo/enfoque arquitectónico	Framework para HDT basado en datos multimodales.

Componentes o capas reportadas	Sistema de adquisición de datos; red BiLSTM-CNN para fusión y extracción de características; caso de identificación de modo de locomoción.
Integración y flujo de datos	Adquisición de datos corporales/fisiológicos -> fusión multimodal (BiLSTM-CNN) -> extracción espaciotemporal -> identificación de locomoción.
Retos abordados	Dificultad de percibir/digitalizar información humana; complejidad e incertidumbre del cuerpo humano; fusión multimodal.
Atributos de calidad priorizados	Precisión del modelo y de la identificación; robustez del aprendizaje.
Estrategia de validación	Experimentos y comparación con modelos tradicionales de identificación de locomoción.
Limitaciones reportadas por los autores	No reporta explícitamente limitaciones.
Aportes relevantes para este proyecto	• Framework HDT con adquisición y fusión de datos multimodales humanos. • Modelo BiLSTM-CNN para características espaciotemporales. • Evidencia experimental en identificación de locomoción.

Tabla 18*Extracción de información del estudio S14*

Campo	Descripción
ID del estudio	S14
Referencia	He, Q., Li, L., Li, D., Peng, T., Zhang, X., Cai, Y., Zhang, X., & Tang, R. (2024). From Digital Human Modeling to Human Digital Twin: Framework and Perspectives in Human Factors. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 37, 9. doi:10.1186/s10033-024-00998-7
Fuente	Google Scholar
Dominio / Contexto	Human factors; ergonomía; Industria 5.0.
Modalidades integradas	Datos multi fuente y AI para monitoreo y evaluación continua (según framework).

Estilo/enfoque arquitectónico	Framework unificado: physical twin + virtual twin + linkage.
Componentes o capas reportadas	Physical twin; virtual twin (human modeling + AI engines); enlace entre ambos.
Integración y flujo de datos	Datos del humano -> virtual twin (model-data hybrid) -> análisis en tiempo real -> retroalimentación bidireccional.
Retos abordados	Limitaciones de DHM en datos en tiempo real, personalización e interacción oportuna; desafíos técnicos y sociales para HDT.
Atributos de calidad priorizados	Interacción en tiempo real, personalización, integración de datos.
Estrategia de validación	No reporta (revisión).
Limitaciones reportadas por los autores	No reporta limitaciones del estudio; discute desafíos técnicos y sociales para HDT.
Aportes relevantes para este proyecto	• Propone framework HDT desde la perspectiva de human factors. • Define estructura physical/virtual/linkage con enfoque model-data hybrid. • Resume desafíos y perspectivas para aplicaciones industriales.

Tabla 19*Extracción de información del estudio S15*

Campo	Descripción
ID del estudio	S15
Referencia	Liu, Y., Feng, J., Lu, J., & Zhou, S. (2024). A review of digital twin capabilities, technologies, and applications based on the maturity model. <i>Advanced Engineering Informatics</i> , 62, 102592. doi:10.1016/j.aei.2024.102592
Fuente	Lista de experto
Dominio / Contexto	Industria 4.0; gemelos digitales en general (no centrado en humano).
Modalidades integradas	No reporta.

Estilo/enfoque arquitectónico	Revisión con modelo de madurez para evaluar desarrollo de DT.
Componentes o capas reportadas	Modelo de madurez DTMM de cinco niveles; cada nivel alinea capacidades, objetivos y requisitos técnicos. Incluye catálogo de tecnologías/herramientas por nivel y evaluación de sectores verticales.
Integración y flujo de datos	No detalla un flujo operativo de datos; el foco es evaluar madurez, capacidades y requisitos técnicos a lo largo del ciclo de vida.
Retos abordados	Necesidad de evaluar objetivos, nivel de desarrollo y efectividad de DTs durante y después de la implementación.
Atributos de calidad priorizados	No reporta (enfatisa evaluación de efectividad/madurez).
Estrategia de validación	No reporta (revisión).
Limitaciones reportadas por los autores	No reporta.
Aportes relevantes para este proyecto	• Propone un modelo de madurez para evaluar DTs a lo largo del ciclo de implementación. • Sintetiza capacidades, tecnologías y aplicaciones de DT. • Útil para establecer criterios de evaluación y mejora continua.

Tabla 20*Extracción de información del estudio S16*

Campo	Descripción
ID del estudio	S16
Referencia	Onaji, I., Tiwari, D., Soulatiantork, P., Song, B., & Tiwari, A. (2022). Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies. <i>International Journal of Computer Integrated Manufacturing</i> , 35(8), 831–858. doi:10.1080/0951192X.2022.2027014
Fuente	Lista de experto
Dominio / Contexto	Manufactura; gemelos digitales en general (no centrado en humano).

Modalidades integradas	No reporta.
Estilo/enfoque arquitectónico	Framework conceptual + casos de estudio (revisión).
Componentes o capas reportadas	Framework conceptual de DT producto-proceso integrado: integra product twin + process twin y una plataforma de integración de datos; discute la arquitectura estándar de DT (físico-virtual-conexión/datos) y extensiones (p. ej., 6D con datos/servicios).
Integración y flujo de datos	Integración físico-virtual para crear huella de datos; sensores/datos de producción → plataforma DT integrada → acciones correctivas/optimización en tiempo real; validado con casos de estudio.
Retos abordados	Brechas de investigación, tendencias y limitaciones técnicas que dificultan la implementación de DTs.
Atributos de calidad priorizados	No reporta.
Estrategia de validación	Casos de estudio (además de revisión).
Limitaciones reportadas por los autores	No reporta.
Aportes relevantes para este proyecto	• Presenta un marco conceptual y evolución del DT en manufactura. • Identifica brechas y limitaciones técnicas para adopción • Incluye casos de estudio como referencia práctica.

Tabla 21*Extracción de información del estudio S17*

Campo	Descripción
ID del estudio	S17
Referencia	Kokkonen, K., Hannola, L., Rantala, T., Ukko, J., Saunila, M., & Rantala, T. (2023). Preconditions and benefits of digital twin-based business ecosystems in manufacturing. <i>International Journal of Computer Integrated Manufacturing</i> , 36(5), 789–806. doi:10.1080/0951192X.2022.2145022
Fuente	Lista de experto

Dominio / Contexto	Manufactura; ecosistemas de negocio basados en DT.
Modalidades integradas	No reporta.
Estilo/enfoque arquitectónico	Estudio empírico sobre ecosistemas (no arquitectura técnica).
Componentes o capas reportadas	No reporta.
Integración y flujo de datos	Enfatiza necesidad de compartir información entre actores del ecosistema.
Retos abordados	Complejidad del ecosistema; necesidad de orientación a objetivos y voluntad de compartir información; receptividad técnica y objetivos comunes a nivel ecosistema.
Atributos de calidad priorizados	No reporta.
Estrategia de validación	Estudio cualitativo con seis compañías (casos).
Limitaciones reportadas por los autores	No reporta.
Aportes relevantes para este proyecto	• Identifica precondiciones organizacionales para ecosistemas DT. • Evidencia beneficios (uso de recursos, co-aprendizaje, nuevos negocios) • Útil para considerar gobernanza e integración multi-actor.

Tabla 22*Extracción de información del estudio S18*

Campo	Descripción
ID del estudio	S18
Referencia	Asad, U., Khan, M., Khalid, A., & Lughmani, W. A. (2023). Human-Centric Digital Twins in Industry: A Comprehensive Review of Enabling Technologies and Implementation Strategies. <i>Sensors</i> , 23, 3938. doi:10.3390/s23083938
Fuente	Lista de experto

Dominio / Contexto	Industria; HCDDT (Human-Centric Digital Twins).
Modalidades integradas	Sensores de movimiento; sensores biológicos; simulación; visualización; VR/AR (mencionados como tecnologías habilitadoras).
Estilo/enfoque arquitectónico	Revisión sistemática; frameworks y guías por dominio (no arquitectura única).
Componentes o capas reportadas	Tecnologías habilitadoras: motion sensors, biological sensors, computational intelligence, simulación y visualización; propone frameworks/guías por dominio para HCDDT.
Integración y flujo de datos	Flujos por dominio que conectan captura de datos humanos > procesamiento/IA > simulación/visualización > feedback (p. ej., entrenamiento de IA, ergonomía y políticas de seguridad).
Retos abordados	Integración de tecnologías habilitadoras para HCDDT y estrategias de implementación.
Atributos de calidad priorizados	No reporta explícitamente (menciona seguridad/ergonomía como objetivos).
Estrategia de validación	Revisión sistemática con mapeo bibliométrico (VOSviewer).
Limitaciones reportadas por los autores	No reporta.
Aportes relevantes para este proyecto	• Mapea tecnologías habilitadoras para HCDDT (sensores, IA, simulación, visualización). • Provee guías/flows por dominio y resultados esperados (p. ej., ergonomía, seguridad). • Base para definir modalidades y stack tecnológico de HDT.

Tabla 23*Extracción de información del estudio S19*

Campo	Descripción
ID del estudio	S19
Referencia	de Marchi, J. A., & Baalbergen, E. H. (2023). Towards a human-centric Digital Twin architecture for Industry 5.0: Aiding skilled operators with composites production automation. Journal of

	Physics: Conference Series, 2526, 012047. doi:10.1088/1742-6596/2526/1/012047
Fuente	Lista de experto
Dominio / Contexto	Manufactura de compuestos; soporte a operadores; Industria 5.0.
Modalidades integradas	No reporta explícitamente.
Estilo/enfoque arquitectónico	Arquitectura de DT operador-céntrica (diseño conceptual).
Componentes o capas reportadas	Arquitectura basada en blueprint lógico y arquitectura física; inventario de componentes funcionales. Incluye middleware service-oriented con capas de abstracción de protocolo y hardware, interfaz operador-céntrica, y módulos de análisis online; define adquisición, procesamiento, almacenamiento y gestión de datos.
Integración y flujo de datos	Sincronización multi-fuente con timestamps, monitoreo activo, consistencia de datos y ciberseguridad; datos se presentan en interfaz del operador, se enriquecen con IA y se usan para gestión/decisión del proceso.
Retos abordados	Trasladar guías de diseño operador-céntrico a una arquitectura implementable.
Atributos de calidad priorizados	No reporta.
Estrategia de validación	No reporta validación formal; presenta diseño y lecciones aprendidas.
Limitaciones reportadas por los autores	No reporta.
Aportes relevantes para este proyecto	• Propone arquitectura DT humano céntrica para apoyar operadores en producción de composites. • Evidencia cómo traducir guías de diseño a una arquitectura implementable. • Aporta lecciones aprendidas para soporte al operador.

Resumen del proceso de selección

La selección se ejecutó en dos fuentes principales: lista de experto y Google Scholar. En la lista de experto se recuperaron 28 estudios (N0), 22 pasaron el filtro de

título (N1), 18 el filtro de resumen (N2), 15 la lectura completa (N3) y 14 fueron seleccionados tras el filtro de calidad (Nf). En Google Scholar se recuperaron 12 estudios (N0), 10 pasaron título (N1), 7 resumen (N2), 6 lectura completa (N3) y 5 fueron seleccionados (Nf). En total, el proceso formal de selección terminó con 19 estudios (Nf).

Síntesis para RQ1

Se destaca un patrón dominante de arquitecturas por capas o *frameworks* conceptuales que separan el mundo físico, la representación digital y los mecanismos de enlace/servicio. Este enfoque aparece explícitamente en marcos *physical-virtual-linkage* para HDT (He, et al., 2024), en capas de agente-datos-inferencia-implementación (Wang, et al., 2024) y en arquitecturas *field-edge-cloud* para HRC (Shi, et al., 2022).

En manufactura, se observan propuestas de orientación a servicios (SOA) con capas de servicios/modelos/datos/interfaz para modularidad y reutilización (Chen, et al., 2024). Otros trabajos aportan enfoques específicos: arquitectura cognitiva (ACT-R) para modelado humano (Balaji, Shahab, Srinivasan, & Srinivasan, 2023), arquitecturas multi-agente impulsadas por LLMs (Sun, Zhang, Bao, Lu, & Liu, 2024) y arquitecturas *blueprint* con capa digital desacoplada para ecosistemas humano-céntricos (Villani, Picone, Mamei, & Sabattini, 2025).

Predominan los *frameworks* conceptuales, mientras que pocas propuestas describen arquitecturas implementadas con definición clara de componentes y flujos entre ellos.

Síntesis para RQ2

Las modalidades más recurrentes combinan datos del sistema físico (sensores de proceso, estado de máquina) con datos humanos (fisiológicos, movimiento, cognitivos o visuales). En HDT para fatiga se integran video y señales fisiológicas para estimar fatiga física y cognitiva (Chand, Zheng, & Lu, 2024), mientras que en modelos de locomoción se fusionan señales corporales y fisiológicas con redes BiLSTM-CNN (You, Cai, Pham, Liu, & Ji, 2025) (Zhong, et al., 2023). En HRC se integran datos del operador con la dinámica del robot y el entorno (Ramasubramanian, Mathew, Kelly, Hargaden, & Papakostas, 2022) (Shi, et al., 2022). También se reporta integración de series temporales con información semántica mediante LLMs para diagnóstico (Sun, Zhang, Bao, Lu, & Liu, 2024).

El flujo de datos sigue un patrón común: captura multimodal → preprocesamiento/normalización → fusión o extracción de características → actualización del gemelo → análisis/decisión → retroalimentación al entorno físico o al operador. Este patrón aparece en casos de manufactura aditiva (Chen, et al., 2024), HRC (Shi, et al.,

2022) (Chand, Zheng, & Lu, 2024) y *frameworks* de HDT humano céntrico (Wang, Liu, Wang, Li, & Wang, 2025) (He, et al., 2024).

Síntesis para RQ3

Los atributos priorizados se concentran en interoperabilidad, tiempo real/latencia, fidelidad o precisión del modelo y seguridad. En HRC y ecosistemas humano-céntricos se enfatizan interoperabilidad y seguridad (Ramasubramanian, Mathew, Kelly, Hargaden, & Papakostas, 2022) (Wang, et al., 2024), mientras que en arquitecturas *edge-cloud* se prioriza latencia y escalabilidad (Shi, et al., 2022).

Los trabajos de SOA resaltan reusabilidad y modularidad (Chen, et al., 2024), y los enfoques cognitivos enfatizan fidelidad de comportamiento humano (Balaji, Shahab, Srinivasan, & Srinivasan, 2023). En análisis con LLMs se incorpora interpretabilidad y trazabilidad como atributo clave (Sun, Zhang, Bao, Lu, & Liu, 2024).

Se destaca que la calidad de datos, sincronización y estandarización son condiciones habilitadoras críticas (Ramasubramanian, Mathew, Kelly, Hargaden, & Papakostas, 2022).

Síntesis para RQ4

La validación se concentra en PoC, experimentos controlados y casos de estudio. Se reportan pruebas experimentales para modelos de fatiga (Chand, Zheng, & Lu, 2024), HRC *edge-cloud* (Shi, et al., 2022), HDT cognitivo (Balaji, Shahab, Srinivasan, & Srinivasan, 2023), *frameworks* de alta fidelidad en celdas colaborativas (Wang et al., 2025) y modelos multimodales de locomoción (Zhong, Xia, Zhu, & Duan, 2023). En manufactura aditiva y mantenimiento predictivo se documentan casos de estudio o escenarios aplicados (Chen, et al., 2024) (Zhong, Xia, Zhu, & Duan, 2023). En contraste, varios estudios son revisiones o marcos conceptuales sin validación empírica (Ramasubramanian, Mathew, Kelly, Hargaden, & Papakostas, 2022) (Zafar, Langås, & Sanfilippo, 2024) (Wang, et al., 2024) (Asad, Khan, Khalid, & Lughmani, 2023) (Liu, Feng, Lu, & Zhou, 2024) (He, et al., 2024).

Las limitaciones reportadas con mayor frecuencia son (Ramasubramanian, Mathew, Kelly, Hargaden, & Papakostas, 2022) (Chen, et al., 2024) (Zhong, et al., 2023) (Sun, Zhang, Bao, Lu, & Liu, 2024):

- Ausencia de estándares y plataformas comunes.
- Integración compleja de datos heterogéneos.
- Sincronización en tiempo real.

- Brechas de fidelidad entre simulación y realidad.
- Disponibilidad de datos multimodales.

En varios casos se reconoce la falta de validaciones a escala industrial y la necesidad de *datasets* más ricos y continuos.

Consideraciones de sesgo y limitaciones de la revisión

La revisión fue realizada por un único investigador, por lo que no se cuenta con evaluación de otro investigador, lo cual puede introducir sesgo de selección. El uso de Google Scholar como fuente principal favorece cobertura amplia, pero puede introducir duplicados o sesgos de indexación. Finalmente, la lista de experto mejora cobertura temática, aunque puede sesgar hacia líneas de investigación cercanas al laboratorio.

Aplicación de resultados al proyecto

Los resultados permiten definir criterios arquitectónicos concretos para la propuesta del proyecto:

- Adoptar una arquitectura por capas con separación explícita entre físico, digital y enlace/servicios para asegurar trazabilidad e interoperabilidad (He, et al., 2024) (Wang, et al., 2024).
- Incorporar un pipeline multimodal estandarizado (captura → preprocesamiento → fusión → modelado → retroalimentación) como núcleo de integración (Chand, Zheng, & Lu, 2024) (Zhong, Xia, Zhu, & Duan, 2023).
- Favorecer una estrategia *edge-cloud* para reducir latencia y mantener procesamiento en tiempo real cuando exista interacción humano-máquina (Shi, et al., 2022).
- Priorizar atributos de calidad desde el diseño: interoperabilidad, modularidad, seguridad y fidelidad (Ramasubramanian, Mathew, Kelly, Hargaden, & Papakostas, 2022) (Chen, et al., 2024).
- Definir explícitamente la estrategia de validación del HDT (PoC + caso de uso controlado) y plan de escalamiento, atendiendo las limitaciones recurrentes reportadas en la literatura.

Marco Conceptual

El presente marco conceptual deriva de los hallazgos del estado de la cuestión y de la revisión sistemática realizada bajo el enfoque de (Biolchini, Mian, Natali, & Travassos, 2005). Como paso previo, se elaboró una nube de conceptos (Figura 1) para identificar términos recurrentes en la literatura, y un mapa conceptual jerárquico (Figura 2) que organiza dichos términos desde un nivel general hacia componentes específicos de arquitectura, datos y atributos de calidad. Esta estructura guía la redacción del capítulo y asegura que los conceptos incluidos sean los necesarios para comprender el desarrollo del proyecto sin incorporar elementos redundantes o innecesarios.

Figura 1
Nube de conceptos

Figura 2*Mapa conceptual jerárquico sobre HDT*

Fuente: elaboración propia.

Industria 5.0

La Industria 5.0 propone un cambio de paradigma en el que la productividad debe coexistir con la seguridad, el bienestar y la sostenibilidad, colocando al ser humano como eje central de los sistemas productivos (Wang, et al., 2024) (Zafar, Langås, & Sanfilippo, 2024).

Debido a esto, la colaboración humano-robot (HRC) evoluciona hacia un enfoque humano-céntrico donde las decisiones del sistema consideran las capacidades, limitaciones y estado del operador, en lugar de optimizar únicamente la eficiencia técnica y productiva (Chand, Zheng, & Lu, 2024) (Villani, Picone, Mamei, & Sabattini, 2025).

Por ello, el *Human Digital Twin* (HDT) se plantea como un habilitador clave de la interacción humano-máquina, capaz de integrar datos del operador y apoyar la adaptación del sistema a sus necesidades en tiempo casi real (Wang, et al., 2024) (Villani, Picone, Mamei, & Sabattini, 2025).

Digital Twin y Human Digital Twin

El *Digital Twin* (DT) se define como una representación virtual de un activo o proceso físico, alimentada y actualizada con datos del mundo real; su propósito usualmente implica monitoreo, simulación y optimización del sistema durante su ciclo de vida (Zhong, Xia, Zhu, & Duan, 2023).

El HDT extiende este concepto al modelar al ser humano como entidad digital, incorporando aspectos físicos, cognitivos y fisiológicos para mejorar la interacción con sistemas inteligentes (Wang, et al., 2024) (He, et al., 2024). El HDT se puede descomponer en sus componentes de gemelo físico, gemelo virtual y vínculo (*linkage*); el sistema es sustentado por datos multi-fuente o multi-modales y modelos inteligentes (He, et al., 2024).

Cabe destacar que, en el área de manufactura, los esquemas de DT tienden a integrar el gemelo de producto y el gemelo de proceso en una plataforma de datos unificada, con el fin de habilitar decisiones de operación y mejora continua (Onaji, Tiwari, Soulatiantork, Song, & Tiwari, 2022).

La adopción del HDT depende, además, de la madurez de las tecnologías habilitadoras de los DT, tanto a nivel de software como hardware, infraestructura de datos y compatibilidad del ecosistema.

Ecosistema digital y gobernanza de datos

Los HDT no operan aislados, se implementan en ecosistemas digitales donde el intercambio de datos entre componentes y sistemas es indispensable para obtener

resultados óptimos. Por esto los sistemas basados en DT requieren tener objetivos alineados, disposición y capacidad para compartir información y receptividad técnica para habilitar la colaboración (Kokkonen, et al., 2023).

Como ejemplo de integración a alto nivel, se tienen los escenarios industriales humano-céntricos en donde surge el concepto de *Operator Digital Twin* (ODT) y el esquema *operator-in-the-loop*, donde el estado del operador influye directamente en la operación del sistema (Villani, Picone, Mamei, & Sabbatini, 2025).

Cualquier sistema complejo depende directamente de los datos con los cuales es alimentado. Por ello es necesario definir adecuadamente los tipos y fuentes de datos para entender sus necesidades de procesamiento, limitaciones y uso adecuado.

Multimodalidad y tipos de datos en HDT

La multimodalidad es un principio central en el HDT porque la condición del operador no puede representarse con una sola fuente de datos. Este concepto no solo se debe entender como disponer datos de diferentes fuentes: implica la integración, sincronización y fusión de diversas modalidades de datos para considerar la información de manera conjunta. La literatura destaca la integración de datos de movimiento, visión y postura; señales biométricas o fisiológicas; datos de proceso y estado de máquina; y variables cognitivas o de desempeño (Chand, Zheng, & Lu, 2024) (Asad, Khan, Khalid, & Lughmani, 2023) (Zhong, et al., 2023).

Por ejemplo, se utilizan datos de visión y seguimiento para generar modelos humanos de alta fidelidad (Wang, Liu, Wang, Li, & Wang, 2025), sensores fisiológicos para estimar fatiga cognitiva y física (Chand, Zheng, & Lu, 2024) (You, Cai, Pham, Liu, & Ji, 2025), y fusión multimodal para reconocer estados de locomoción y desempeño (Zhong, et al., 2023). Este enfoque requiere sincronización temporal, manejo de heterogeneidad y mecanismos de fusión robustos, tanto en el *edge* como en la nube (Shi, et al., 2022).

Una vez que se dispone de datos procesados e integrados en el sistema, su uso se debe regir por un modelado definido y claro, de manera que se pueda extraer la mayor cantidad de información posible.

Modelado humano y técnicas de representación

La transición desde el *Digital Human Modeling* (DHM) hacia el HDT implica pasar de modelos estáticos a modelos dinámicos y actualizados con datos en tiempo casi real, lo cual habilita servicios inteligentes orientados al bienestar y la ergonomía (He, et al., 2024).

En el dominio industrial, se destacan tres líneas de representación:

- a) Modelos físicos de alta fidelidad basados en mallas personalizadas y rastreo de movimientos (Wang, Liu, Wang, Li, & Wang, 2025).
- b) Modelos cognitivos que simulan el comportamiento del operador, como los basados en ACT-R, útiles para entender y predecir decisiones humanas (Balaji, Shahab, Srinivasan, & Srinivasan, 2023).
- c) Modelos de fatiga física y cognitiva, que permiten ajustar la asignación de tareas y reducir riesgos ergonómicos en HRC (Chand, Zheng, & Lu, 2024) (You, Cai, Pham, Liu, & Ji, 2025).

Además, se reporta el uso de arquitecturas multi-agente con apoyo de modelos de lenguaje para fortalecer la percepción temporal y la interpretabilidad (Sun, Zhang, Bao, Lu, & Liu, 2024). Sin embargo, los enfoques arquitectónicos son variados y deben ser explorados en más detalle.

Enfoques arquitectónicos para HDT multimodal

Las propuestas arquitectónicas para DT y HDT se agrupan en enfoques por capas, orientación a servicios y arquitecturas centradas en el operador.

Los enfoques por capas suelen organizar el sistema en niveles: físico, virtual y de conexión, facilitando la sincronización entre el entorno real y el digital (Ramasubramanian, Mathew, Kelly, Hargaden, & Papakostas, 2022).

En escenarios HRC, también se reportan arquitecturas de campo-*edge*-nube, donde el *edge* procesa datos en tiempo real y la nube consolida información multimodal para entrenar modelos y actualizar inferencias (Shi, et al., 2022).

El enfoque orientado a servicios estructura el DT en capas de servicio, modelo, datos e interfaz, incrementando modularidad, reusabilidad e interoperabilidad, especialmente en ambientes con procesos heterogéneos (Chen, et al., 2024).

Adicionalmente, se describen arquitecturas centradas en el operador con *middleware* de abstracción de protocolo y *hardware*, sincronización por *timestamps* y ciberseguridad integrada para unificar fuentes heterogéneas y soportar decisiones del operador (de Marchi & Baalbergen, 2023).

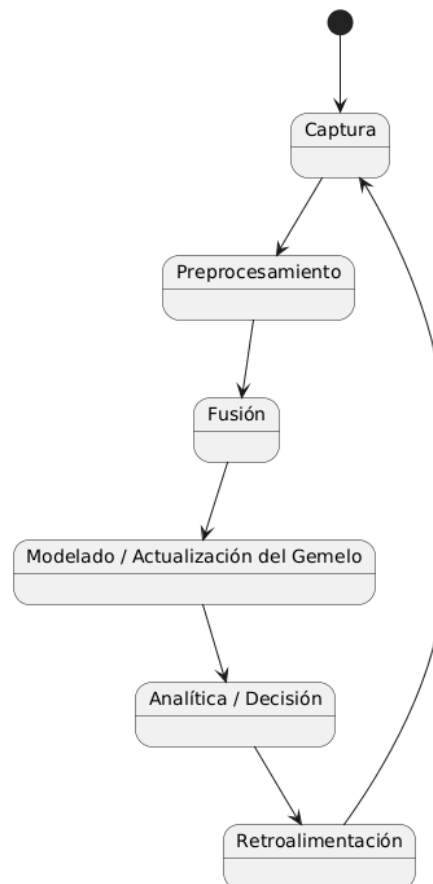
Finalmente, revisiones de DT-HRC distinguen enfoques basados en simulación y enfoques por capas, señalando que ambos deben coexistir para habilitar validación, planificación y sincronización en tiempo real (Ramasubramanian, Mathew, Kelly, Hargaden, & Papakostas, 2022).

De manera transversal a la arquitectura del sistema HDT, se debe considerar también el flujo de procesamiento e integración de los datos. Ambas consideraciones (arquitectura y flujo de datos) deben tomarse en cuenta de manera simultánea para un adecuado funcionamiento del sistema.

Flujo de datos multimodales en HDT

El flujo de datos típico en HDT multimodal sigue la secuencia expuesta en la Figura 3.

Figura 3
Flujo de datos en HDT multimodal



Fuente: elaboración propia.

- La captura integra video, sensores fisiológicos y datos de proceso,
- El preprocesamiento extrae características y sincroniza señales.
- La fusión combina modalidades heterogéneas.
- El modelo del gemelo se actualiza para generar inferencias que alimentan decisiones de operación o planificación (Chand, Zheng, & Lu, 2024) (Zhong, et al., 2023).

En HRC, el flujo es bidireccional: el HDT estima fatiga o estado del operador y devuelve recomendaciones o asignaciones de tarea para reducir riesgos ergonómicos (You, Cai, Pham, Liu, & Ji, 2025).

Atributos de calidad relevantes

La viabilidad del HDT multimodal depende de atributos clave desde el punto de vista arquitectónico y de manejo de datos. A continuación, se sintetizan los atributos de calidad identificados en la literatura como los más relevantes:

- Interoperabilidad: capacidad de integrar sistemas heterogéneos, protocolos y dispositivos sin fricción, clave en SOA y *middleware* de abstracción (Chen, et al., 2024) (de Marchi & Baalbergen, 2023).
- Modularidad y reusabilidad: descomposición por servicios y componentes para facilitar evolución y adaptación del gemelo (Chen, et al., 2024).
- Escalabilidad: posibilidad de extender el HDT a más activos o celdas, apoyada por arquitecturas *edge-cloud* (Shi, et al., 2022).
- Tiempo real y sincronización: actualización oportuna de estados y decisiones en HRC, con datos sincronizados multi-fuente (Chand, Zheng, & Lu, 2024).
- Fidelidad y precisión: representación realista del operador para ergonomía, seguridad y simulación confiable (Balaji, Shahab, Srinivasan, & Srinivasan, 2023).
- Confiabilidad y robustez: tolerancia al ruido y a la variabilidad de datos, esencial en entornos industriales dinámicos (Zhong, Xia, Zhu, & Duan, 2023).
- Seguridad y privacidad: protección del intercambio de datos sensibles del operador y del proceso (Asad, Khan, Khalid, & Lughmani, 2023).
- Enfoque humano-céntrico: priorizar bienestar, ergonomía y usabilidad del operador como criterio de diseño (Villani, Picone, Mamei, & Sabbatini, 2025).

Marco Metodológico

Tipo de investigación

El presente estudio se clasifica como investigación aplicada, debido a que utiliza conocimiento existente para resolver un problema concreto de ingeniería de software: el diseño de una arquitectura multimodal para HDT, orientada a mejorar la interacción humano-máquina.

No se busca formular una teoría general nueva, sino proponer y validar una solución arquitectónica factible en un entorno controlado, mediante una prueba de concepto (PoC).

Alcance investigativo

El alcance del estudio es exploratorio-descriptivo.

Es exploratorio porque, aunque existen avances en HDT, la literatura reporta ausencia de marcos arquitectónicos estandarizados para integración multimodal. Por otro lado, es descriptivo porque se documentan decisiones de diseño, componentes, flujos de datos y resultados técnicos de validación inicial de la PoC, con foco en atributos de calidad.

Enfoque

La investigación adopta un enfoque alternativo, coherente con el paradigma pragmático, por tratarse de un problema de ingeniería cuya solución requiere diseñar, implementar y evaluar un artefacto arquitectónico en contexto controlado (Naranjo-Zeledón, 2020). Este enfoque permite integrar evidencia cualitativa y cuantitativa de forma complementaria, sin separar artificialmente ambas perspectivas.

Dimensión epistemológica

Desde la dimensión epistemológica, el conocimiento se construye mediante una relación activa entre el investigador y el objeto de estudio. El investigador no se limita a observar el fenómeno: define *drivers* arquitectónicos, toma decisiones de diseño, implementa una prueba de concepto y evalúa sus resultados.

En este sentido, la evidencia se genera en tres niveles:

- Evidencia teórica proveniente de la revisión sistemática.
- Evidencia de diseño derivada de iteraciones ADD y modelos C4.
- Evidencia empírica obtenida de la PoC mediante métricas técnicas.

Para fortalecer la validez del proceso, se mantiene trazabilidad entre objetivos, atributos de calidad, decisiones arquitectónicas y resultados medidos. Esta lógica es

consistente con investigación aplicada y con investigación orientada a diseño de artefactos (Hevner, 2007).

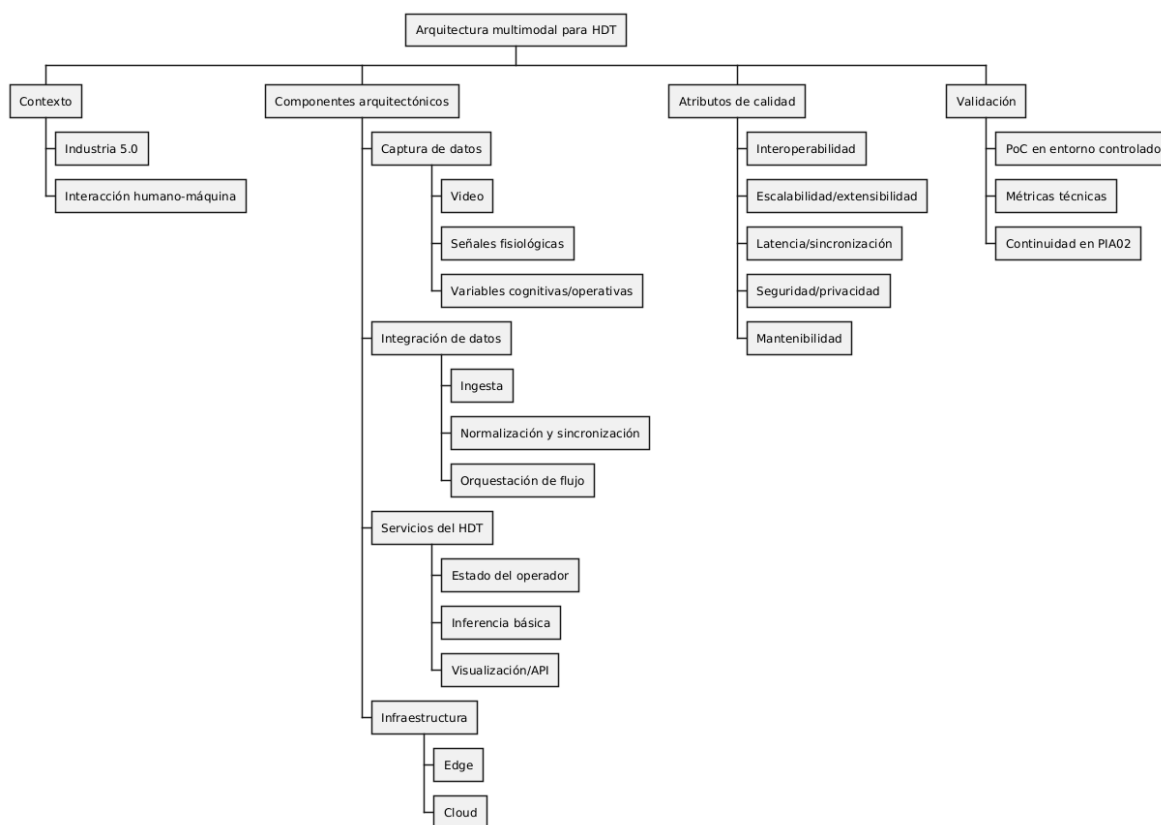
Dimensión ontológica

En la dimensión ontológica, el estudio asume que el problema puede representarse formalmente mediante entidades y relaciones arquitectónicas (Gruber, 1993). El “ser” del objeto de estudio se define por componentes observables y modelables: fuentes multimodales de datos, mecanismos de ingesta e integración, procesamiento, almacenamiento, servicios del gemelo digital y consumidores de información.

La ontología del proyecto se centra en el nivel arquitectónico de sistema, no en el modelado biomédico profundo del humano. En la Figura 4 se presenta la ontología propuesta para el proyecto; esta delimita el objeto de estudio al nivel arquitectónico, los atributos de calidad evaluados, el uso de información y el alcance de validación por PoC.

Figura 4

Ontología propuesta: Arquitectura multimodal para HDT



Fuente: elaboración propia.

Finalmente, también se establecen fronteras ontológicas explícitas: la fusión multimodal avanzada y el despliegue productivo organizacional quedan fuera del alcance del proyecto, mientras que integraciones y pruebas de escalabilidad se proyectan para etapas futuras.

Dimensión axiológica

La dimensión axiológica define los valores que orientan la evaluación de la propuesta. En este proyecto, el valor principal es utilidad técnica verificable: que la arquitectura sea integrable, escalable y mantenible en escenarios multimodales reales de ingeniería.

Bajo esa premisa, se priorizan atributos de calidad de arquitectura de software (Bass, Clements, & Kazman, 2021): interoperabilidad, escalabilidad/extensibilidad, sincronización/latencia, seguridad y mantenibilidad.

Adicionalmente, se incorpora un criterio de responsabilidad técnica sobre datos humanos: minimizar exposición de datos sensibles y justificar cualquier dato recolectado por su valor para la validación. En consecuencia, las decisiones arquitectónicas no se evalúan solo por funcionamiento, sino por su aporte al objetivo del estudio y su viabilidad de evolución.

Diseño

El diseño metodológico se fundamenta en *Design Science Research* (DSR), por su orientación a la construcción y evaluación de artefactos en problemas complejos de ingeniería (Hevner, 2007).

Se aplican los tres ciclos de DSR:

- Rigor: revisión sistemática para sustentar decisiones arquitectónicas.
- Diseño: construcción iterativa del artefacto arquitectónico.
- Relevancia: validación en una PoC acotado al contexto del proyecto.

Como método técnico de diseño arquitectónico se utiliza *Attribute-Driven Design* (ADD), en iteraciones guiadas por atributos de calidad y *drivers* arquitectónicos (Bass, Clements, & Kazman, 2021). Cada iteración produce: escenarios de calidad priorizados, decisiones arquitectónicas, vistas C4 refinadas y criterios de validación técnica.

El alcance excluye explícitamente la fusión multimodal avanzada, por corresponder a una línea de investigación posterior.

Población y muestreo

La investigación no utiliza población humana como fuente primaria de datos. La población de trabajo se compone de:

- Estudios primarios seleccionados en la revisión sistemática.
- Patrones y estrategias arquitectónicas identificadas en la literatura.
- Fuentes de datos multimodales seleccionadas para la PoC.

El muestreo se define como no probabilístico, intencional y teórico. No se busca representatividad estadística, sino seleccionar deliberadamente fuentes y casos que aporten evidencia útil para evaluar la arquitectura propuesta. La selección se guía por tres criterios:

- Pertinencia técnica respecto a los objetivos y atributos de calidad.
- Heterogeneidad de modalidades y mecanismos de integración.
- Viabilidad de implementación y medición en un entorno controlado de prueba de concepto.

Se pretende iniciar con 2 fuentes multimodales y se incluye una fuente adicional para verificar extensibilidad de la arquitectura.

Instrumentos de recolección de datos

Se utilizan los siguientes instrumentos:

- Tablas de extracción y síntesis de estudios de la revisión sistemática.
- Plantillas de diseño ADD (*drivers*, escenarios de calidad, tácticas, decisiones).
- Modelos arquitectónicos C4 y diagramas de flujo multimodal.
- Bitácora técnica de implementación y decisiones (ADRs).
- Registros y métricas de la PoC.

Técnicas de análisis de información

Se aplican técnicas complementarias:

- Análisis cualitativo de la evidencia bibliográfica para identificar patrones arquitectónicos y limitaciones recurrentes.
- Análisis de alternativas de diseño mediante criterios de calidad definidos.
- Análisis cuantitativo de métricas obtenidas en la PoC.

Estrategia de desarrollo de la propuesta

Para el desarrollo de la propuesta se sigue una estrategia iterativa e incremental, orientada a construir y validar la arquitectura de software. Esta estrategia busca mantener

trazabilidad entre objetivos, decisiones de diseño, implementación y resultados, de forma que el proceso sea replicable.

La ejecución se organiza en ciclos consecutivos de trabajo. En cada ciclo se definen tareas concretas, se documentan decisiones arquitectónicas y se revisan avances técnicos. Como base metodológica se utiliza Ciencia de Diseño para la construcción del artefacto y ADD para guiar decisiones por atributos de calidad.

A nivel técnico, la estrategia contempla:

- Modelado de la arquitectura mediante vistas C4.
- Registro de decisiones arquitectónicas y cambios de diseño.
- Implementación de una PoC con integración básica de fuentes multimodales.
- Ejecución de pruebas técnicas controladas.
- Recolección y análisis de métricas definidas en el marco metodológico.

En este punto de la investigación se desarrolla la validación inicial de factibilidad técnica: diseño arquitectónico consolidado, PoC funcional en alcance mínimo y evidencia de métricas.

Las actividades de profundización (ampliación de fuentes, robustecimiento técnico y evaluación extendida) se continuarán en posteriores etapas de la investigación, según las tareas pendientes al cierre de la actual.

Para asegurar la replicabilidad, se documentan de forma explícita los pasos de implementación, configuraciones del entorno, versiones de herramientas y criterios de evaluación utilizados durante la PoC.

Análisis de la Situación

El presente análisis de la situación se construye a partir de la información recolectada y sintetizada en el estado de la cuestión, con el objetivo de identificar la condición actual del problema y establecer el sustento técnico de la propuesta arquitectónica.

En esta sección se analiza qué reporta la literatura reciente, cuáles enfoques son más utilizados, qué limitaciones persisten y cómo esos hallazgos justifican los componentes y flujos definidos para la solución.

Situación actual del dominio y tendencias recientes

La literatura reciente confirma un crecimiento sostenido del interés por los HDTs en el contexto de Industria 5.0, con énfasis en enfoques humano-céntricos para mejorar la interacción humano-máquina.

Entre las líneas actualmente más visibles se observan: arquitecturas por capas, despliegues *edge-cloud* para tiempo casi real, orientación a servicios para mejorar modularidad e interoperabilidad, y, en algunos casos, incorporación de modelos de lenguaje para enriquecer análisis temporal e interpretación.

También se observa una tendencia clara hacia el uso de datos multimodales del operador (video, señales fisiológicas y variables cognitivas/operativas) como insumo para servicios del gemelo digital. Sin embargo, el avance está más consolidado en propuestas conceptuales que en arquitecturas implementadas y validadas a escala industrial.

Hallazgos del análisis de literatura

A partir de la extracción y síntesis de los estudios seleccionados, se identifican los siguientes hallazgos principales:

- Predomina el uso de arquitecturas por capas y marcos conceptuales con separación entre mundo físico, representación digital y mecanismos de enlace/servicios.
- El flujo multimodal más recurrente sigue la secuencia: captura -> preprocesamiento/sincronización -> integración/fusión -> actualización del gemelo -> análisis/decisión -> retroalimentación.
- Los atributos de calidad más priorizados son interoperabilidad, latencia/sincronización, escalabilidad, seguridad, modularidad y fidelidad del modelo.

- Las estrategias de validación más comunes son PoC, experimentos controlados y casos de estudio; la validación industrial a gran escala sigue siendo limitada.

Estos resultados muestran que sí existe base técnica suficiente para diseñar una arquitectura multimodal, pero también evidencian vacíos importantes en estandarización y validación práctica.

Brechas y limitaciones del estado actual

El análisis evidencia brechas recurrentes que impactan directamente la adopción de HDT multimodales:

- Ausencia de marcos estandarizados de arquitectura para integración multimodal.
- Alta complejidad para integrar fuentes heterogéneas con sincronización temporal consistente.
- Baja trazabilidad de decisiones arquitectónicas en la mayoría de las propuestas reportadas.
- Limitada evidencia empírica en escenarios operativos reales y con escalamiento progresivo.

Estas brechas justifican que la investigación no se centre en crear modelos avanzados de fusión de datos, sino en proponer una base arquitectónica coherente, replicable y extensible para integración multimodal en un entorno controlado.

Insumos técnicos para el diseño de la propuesta

A partir del análisis de literatura, se identifican insumos que orientan la fase de diseño arquitectónico, pero que no constituyen todavía decisiones definitivas de arquitectura:

- Se confirma la necesidad de una arquitectura con integración multimodal explícita, debido a la fragmentación reportada en propuestas actuales.
- Se identifican atributos de calidad prioritarios para guiar el diseño: interoperabilidad, escalabilidad/extensibilidad, sincronización/latencia, seguridad y mantenibilidad.
- Se reconocen patrones y enfoques recurrentes en la literatura (arquitecturas por capas, esquemas *edge-cloud* y orientación a servicios) que funcionan como alternativas base para evaluar en la fase de diseño.

Estos elementos se utilizan como entrada directa del proceso ADD en el capítulo de propuesta, donde se formalizan los *drivers* arquitectónicos, escenarios de calidad, decisiones y justificaciones correspondientes.

Restricciones de alcance para la fase de diseño y validación inicial

Con base en los hallazgos del análisis, se establecen las siguientes restricciones para la etapa de propuesta en esta fase de la investigación:

- La validación se realiza en un entorno controlado mediante PoC, sin despliegue en entorno productivo.
- El alcance técnico se limita a integración multimodal básica (2-3 fuentes representativas) y no incluye fusión multimodal avanzada.
- No se desarrollan modelos avanzados de inteligencia artificial; se prioriza la arquitectura de integración y el flujo de datos.
- No se evalúa impacto organizacional, clínico o económico a gran escala.
- La continuidad de ampliación funcional y robustecimiento técnico se traslada a la siguiente etapa de la investigación aplicada.

Criterios iniciales de evaluación técnica

Como insumo para la fase ADD, se definen criterios iniciales de evaluación que son refinados en la propuesta:

- Interoperabilidad: capacidad de integrar fuentes heterogéneas (formatos/protocolos distintos) dentro de un flujo común.
- Latencia y sincronización: comportamiento temporal del *pipeline* para captura, procesamiento e intercambio de datos en entorno controlado.
- Escalabilidad: capacidad de crecer en número de fuentes o volumen de datos sin rediseño estructural completo.
- Seguridad: aplicación de controles básicos de acceso y protección de datos durante la PoC.
- Modularidad: separación de responsabilidades y bajo acoplamiento entre componentes del flujo multimodal.
- Fidelidad del modelo: nivel de correspondencia funcional entre los datos multimodales integrados y la representación digital esperada en el alcance de la PoC.

Estos criterios funcionan como referencia inicial para orientar el diseño. Su formalización final (métricas, umbrales y evidencias) se realiza en la fase de propuesta mediante ADD.

Conclusión del análisis de la situación

La evidencia revisada muestra avances importantes en HDT multimodales, pero también brechas persistentes en estandarización arquitectónica, integración de datos heterogéneos y validación en contextos aplicados. En este escenario, el problema de investigación se confirma como vigente y pertinente. Por tanto, en esta sección se delimitaron insumos técnicos que orientan el diseño: patrones reportados, restricciones de alcance, atributos de calidad prioritarios y criterios iniciales de evaluación que son formalizados en la fase de propuesta mediante ADD.

Propuesta de Solución

Con base en los hallazgos obtenidos, se propone una arquitectura de software multimodal para el desarrollo de HDTs orientada a estructurar de forma coherente el flujo de información que inicia en la captura de datos heterogéneos y culmina en la actualización, consulta y consumo de servicios del gemelo digital. La propuesta responde directamente a la brecha principal identificada en el estudio: la ausencia de marcos arquitectónicos estandarizados que permitan integrar datos visuales, fisiológicos y operativos con niveles adecuados de interoperabilidad, extensibilidad, sincronización y trazabilidad.

La solución se plantea como un artefacto de ingeniería de software, desarrollado bajo una lógica de investigación aplicada y fundamentado en DSR. En consecuencia, su propósito fundamental es el diseño, documentación y validación de una base arquitectónica técnicamente consistente, capaz de ser implementada en una prueba de concepto.

Fundamento arquitectónico de la propuesta

La evidencia revisada muestra que las arquitecturas más prometedoras para HDT multimodales comparten tres rasgos comunes:

1. Separan de forma explícita el mundo físico, la representación digital y los mecanismos de enlace o servicio.
2. Organizan el flujo multimodal a través de etapas diferenciadas de captura, preprocesamiento, integración, actualización del gemelo y consumo.
3. Priorizan atributos de calidad vinculados con interoperabilidad, latencia, modularidad, seguridad y fidelidad de la representación.

De acuerdo con (Bass, Clements, & Kazman, 2021), el diseño arquitectónico debe realizarse en iteraciones, tomando como entrada principal los *drivers* arquitectónicos y refinando progresivamente los elementos del sistema hasta obtener estructuras capaces de satisfacer dichos *drivers*. En consecuencia, la propuesta no se define en una sola decisión monolítica, sino mediante varios ciclos de diseño, en los cuales se revisan insumos, se seleccionan *drivers* prioritarios, se refinan elementos, se escogen conceptos de diseño, se documentan las decisiones y se evalúa el resultado parcial antes de avanzar al siguiente ciclo.

Análisis comparativo de alternativas arquitectónicas

A continuación, se compararon los enfoques identificados en la literatura mediante criterios de calidad coherentes con el problema del proyecto y con el alcance de la prueba de concepto. En particular, se consideraron interoperabilidad, modularidad y mantenibilidad, sincronización y latencia, complejidad de implementación y adecuación al alcance investigativo.

La comparación presente en la Tabla 24 pretende determinar cuál combinación resulta más adecuada para sustentar el diseño de una PoC multimodal de HDT en un entorno controlado. Las alternativas consideradas en dicha tabla se derivan de patrones arquitectónicos identificados de forma recurrente en la literatura revisada, con enfoques que ya cuentan con sustento técnico dentro del dominio

En particular, varios estudios reportan esquemas por capas con separación explícita entre el mundo físico, la representación digital y los mecanismos de integración o servicio, lo que refuerza su valor como base para organizar responsabilidades y estructurar el flujo multimodal (Onaji, Tiwari, Soulatiantork, Song, & Tiwari, 2022) (Wang, Liu, Wang, Li, & Wang, 2025) (He, et al., 2024). De manera más específica, (Chen, et al., 2024) proponen una arquitectura orientada a servicios con cuatro capas, centrada en mejorar reusabilidad, modularidad e interoperabilidad en entornos de manufactura, mientras que de (de Marchi & Baalbergen, 2023) presentan una arquitectura humano-céntrica con *middleware service-oriented*, capas de abstracción de protocolo y *hardware*, e integración de componentes de adquisición, procesamiento y gestión de datos para apoyar al operador. Por su parte, (Shi, et al., 2022) aportan evidencia a favor de un enfoque *field-edge-cloud* cuando la latencia, el tiempo real y la adaptación continua del sistema se vuelven restricciones dominantes.

Tabla 24

Comparación de alternativas arquitectónicas para la propuesta de HDT multimodal

Alternativa	Interop.	Modularidad / mantenibilidad	Sincronización / latencia	Comp. PoC	Adec.
Arquitectura por capas	Alta, por la separación explícita de responsabilidades y flujos	Alta, por la delimitación de funciones y dependencias	Media, depende de mecanismos adicionales de coordinación temporal	Baja	Alta
Orientación a servicios	Alta, por el uso de interfaces	Alta, favorece reusabilidad y	Media, requiere mecanismos	Media	Alta

	definidas y encapsulamiento funcional	evolución controlada	complementarios para interacción asíncrona		
<i>Cloud-native</i>	Media a alta, especialmente en entornos distribuidos	Alta, por elasticidad y despliegue desacoplado	Media	Alta	Media
<i>Edge computing</i>	Alta en escenarios cercanos a la fuente y de captura distribuida	Media, por mayor dependencia del contexto de despliegue	Alta, al reducir tiempos de transporte y procesamiento	Media a alta	Media a alta

Fuente: Elaboración propia

A partir de esta comparación y de la evidencia revisada, se determina que la base más adecuada para la propuesta es una arquitectura por capas con orientación a servicios y soporte de integración desacoplada. Esta decisión resulta consistente con los hallazgos de la literatura: las estructuras por capas favorecen la delimitación de responsabilidades y la trazabilidad del flujo multimodal, mientras que la orientación a servicios aporta encapsulamiento funcional, reusabilidad y estabilidad de interfaces, tal como se observa en los aportes de (Chen, et al., 2024) (de Marchi & Baalbergen, 2023). Aunque el enfoque *edge-cloud* ofrece ventajas relevantes cuando la latencia y la cercanía a la fuente son prioritarias, como muestran (Shi, et al., 2022), su adopción como base principal introduciría una complejidad de infraestructura que no resulta necesaria para la validación inicial del artefacto.

En consecuencia, la arquitectura propuesta adopta como núcleo una combinación de capas y servicios, manteniendo la posibilidad de incorporar componentes *edge* o esquemas de despliegue más distribuidos en etapas posteriores del proyecto. Los criterios específicos y detalles de selección se incluyen en las iteraciones de diseño incluidas en las siguientes secciones del informe.

Drivers arquitectónicos y atributos de calidad

La propuesta se apoya en un conjunto explícito de *drivers* arquitectónicos que funcionan como *backlog* de diseño. Estos *drivers* se derivan del problema de investigación, de los objetivos específicos, de las preguntas de investigación y de los patrones identificados en la literatura.

Para efectos de claridad, se distinguen *drivers* funcionales y *drivers* de calidad.

Drivers funcionales

Desde la dimensión funcional, la arquitectura debe satisfacer, al menos, las siguientes capacidades:

- Capturar datos provenientes de distintas fuentes multimodales del operador y su contexto.
- Transformar dichos datos a un formato común utilizable por el resto del sistema.
- Sincronizar temporalmente la información cuando existan fuentes con frecuencias, formatos o protocolos distintos.
- Actualizar un estado digital consolidado del operador dentro del HDT.
- Exponer dicho estado a consumidores o servicios externos mediante interfaces estables.
- Permitir la incorporación de una nueva fuente de datos sin rediseñar el núcleo de la solución.

Estas capacidades delimitan el mínimo funcional necesario para demostrar que la arquitectura puede sostener un HDT multimodal en un escenario controlado. En la Tabla 25 se describen estos *drivers* con más detalle.

Tabla 25

Descripción de drivers funcionales establecidos para el proceso de diseño

ID	Driver	Descripción	Origen	Prioridad
DF-01	Captura multimodal	Capturar datos desde distintas fuentes del operador y su contexto operativo.	Problema, OE3, RQ2	Alta
DF-02	Normalización de datos	Transformar la información capturada a un contrato canónico común para el sistema.	Problema, RQ2	Alta
DF-03	Sincronización temporal	Alinear temporalmente datos de fuentes heterogéneas antes de consolidar el estado del HDT.	Problema, RQ2, RQ3	Alta
DF-04	Actualización del HDT	Mantener un estado digital consolidado del operador a partir del flujo multimodal.	Objetivo general, OE3	Alta

DF-05	Exposición de estado	Publicar el estado del gemelo y sus indicadores a consumidores autorizados.	Objetivo general, RQ4	Media
DF-06	Incorporación de nuevas fuentes	Agregar una fuente adicional sin rediseñar el núcleo del sistema.	OE4, RQ1, RQ3	Alta

Fuente: Elaboración propia

Drivers de calidad

Desde la perspectiva no funcional, la propuesta prioriza los siguientes atributos de calidad:

- Interoperabilidad: la arquitectura debe permitir integrar fuentes heterogéneas, potencialmente basadas en distintos formatos, librerías o mecanismos de captura, dentro de un flujo unificado. Este atributo es central porque el problema identificado no reside en la inexistencia de sensores o técnicas de procesamiento, sino en la dificultad de integrarlos de manera coherente.
- Escalabilidad y extensibilidad: la solución debe crecer de forma controlada, tanto en número de fuentes como en servicios del HDT, sin requerir rediseños estructurales profundos. En la PoC, este atributo se verifica mediante la incorporación posterior de una nueva fuente de datos y el análisis del impacto arquitectónico asociado.
- Sincronización y latencia: debido a que la arquitectura está orientada a interacción humano-máquina, el *pipeline* de datos debe mantener un comportamiento temporal consistente. Aunque el proyecto no persigue operación industrial en tiempo real estricto, sí requiere una latencia controlada y una sincronización suficiente para que el estado representado por el gemelo sea funcionalmente útil.
- Seguridad: la propuesta debe minimizar exposición innecesaria de datos humanos, controlar el acceso a los servicios del HDT y mantener trazabilidad sobre el uso de la información. En esta etapa, la seguridad se aborda en un nivel básico, suficiente para una validación técnica responsable.
- Mantenibilidad y modularidad: la arquitectura debe favorecer bajo acoplamiento, responsabilidades claras y reemplazo controlado de componentes, especialmente en adaptadores, mecanismos de integración y servicios de consumo.
- Fidelidad funcional del modelo: sin perseguir una representación biomédica profunda, la arquitectura debe preservar la coherencia entre los datos integrados y

el estado digital expuesto por el HDT. Esto implica que el modelo refleje de forma consistente la información multimodal disponible en el alcance de la PoC.

En la siguiente tabla se describen los *drivers* no funcionales con mayor nivel de detalle.

Tabla 26

Descripción de drivers no funcionales establecidos para el proceso de diseño

ID	Driver	Descripción	Origen	Prioridad
DQ-01	Interoperabilidad	Integrar fuentes heterogéneas dentro de un flujo común y desacoplado.	Problema, RQ2, RQ3	Alta
DQ-02	Escalabilidad / extensibilidad	Permitir crecimiento progresivo en fuentes y servicios sin rediseño estructural completo.	OE4, RQ1, RQ3	Alta
DQ-03	Latencia / sincronización	Mantener comportamiento temporal consistente para actualización funcional del HDT.	Problema, RQ2, RQ3	Alta
DQ-04	Seguridad	Minimizar exposición de datos humanos y restringir acceso a servicios e información.	Marco metodológico, RQ3	Alta
DQ-05	Mantenibilidad / modularidad	Separar responsabilidades y reducir acoplamiento entre componentes.	OE4, RQ1, RQ3	Alta
DQ-06	Fidelidad funcional	Mantener coherencia entre datos integrados y estado representado por el gemelo.	Objetivo general, RQ3	Media
DQ-07	Trazabilidad / observabilidad	Permitir reconstruir el recorrido del dato y analizar el comportamiento del pipeline.	Marco metodológico, RQ4	Media

Fuente: Elaboración propia

Escenarios de calidad prioritarios

Siguiendo las buenas prácticas planteadas por (Bass, Clements, & Kazman, 2021), estos atributos se formalizan mediante escenarios de calidad que orientan el diseño y posteriormente la revisión de la arquitectura. Para esta propuesta, los escenarios prioritarios se establecen en las siguientes tablas.

Tabla 27*Escenario QC-01. Integración de nueva fuente*

Campo	Definición
Fuente	Arquitecto o desarrollador de la PoC.
Estímulo	Se requiere incorporar una nueva fuente multimodal con formato o protocolo distinto.
Artefacto	Captura, contrato canónico y orquestación.
Entorno	Evolución del sistema durante una iteración de diseño o ampliación de la PoC.
Respuesta	La arquitectura integra la nueva fuente mediante un adaptador localizado y reglas de mapeo sin modificar el núcleo del HDT ni los contratos de consumo.
Medida de respuesta	El cambio queda confinado al nuevo adaptador, al registro de la fuente y a la configuración de integración; no se altera la interfaz pública del HDT.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28*Escenario QC-02. Sincronización temporal de datos heterogéneos*

Campo	Definición
Fuente	Fuentes multimodales con frecuencias distintas.
Estímulo	Se reciben eventos temporalmente desalineados desde modalidades diferentes.
Artefacto	Normalización y sincronización.
Entorno	Operación normal de la PoC.
Respuesta	El sistema normaliza, marca temporalmente y sincroniza la información antes de consolidar el estado del HDT.
Medida de respuesta	Cada evento conserva identificador de origen y marca temporal; el criterio de alineamiento queda documentado y es verificable en pruebas.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29

Escenario QC-03. Falla parcial de captura

Campo	Definición
Fuente	Adaptador de captura o fuente física.
Estímulo	Una fuente deja de emitir datos o falla intermitentemente.
Artefacto	Captura e integración.
Entorno	Operación degradada de la PoC.
Respuesta	El sistema aísla la falla, registra el incidente y continúa operando con las fuentes disponibles.
Medida de respuesta	La falla no detiene el núcleo del HDT; se genera un log o evento de error con información suficiente para diagnóstico.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30

Escenario QC-04. Consulta autorizada del estado del HDT

Campo	Definición
Fuente	Consumidor autorizado.
Estímulo	Se consulta el estado actual del operador o un indicador derivado.
Artefacto	Exposición/consumo.
Entorno	Operación normal de la PoC.
Respuesta	El sistema entrega una respuesta estable, consistente y desacoplada del detalle interno del pipeline.
Medida de respuesta	La interfaz devuelve el estado consolidado y metadatos relevantes sin exponer datos crudos innecesarios.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31

Escenario QC-05. Protección básica de datos humanos

Campo	Definición
Fuente	Usuario o componente no autorizado.
Estímulo	Intenta acceder a datos sensibles o servicios restringidos.
Artefacto	API, persistencia y control de acceso.

Entorno	Operación normal o prueba de seguridad básica.
Respuesta	El sistema deniega el acceso y registra el intento.
Medida de respuesta	No se exponen datos sensibles sin autorización; el incidente queda trazado para revisión posterior.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32

Escenario QC-06. Observabilidad del pipeline

Campo	Definición
Fuente	Investigador o desarrollador.
Estímulo	Se requiere reconstruir el recorrido de un dato desde captura hasta consumo.
Artefacto	<i>Logs</i> , persistencia y eventos del pipeline.
Entorno	Ejecución de pruebas o análisis de incidentes.
Respuesta	El sistema permite rastrear el evento, sus transformaciones y su impacto en el estado del HDT.
Medida de respuesta	Existe evidencia verificable del recorrido mediante identificadores, <i>timestamps</i> y registros de operación.

Fuente: Elaboración propia

Ciclos de diseño arquitectónico basados en ADD

La construcción de la propuesta se organiza en ciclos de diseño guiados por ADD conforme al enfoque de (Bass, Clements, & Kazman, 2021); cada ciclo parte de los insumos disponibles, define un objetivo de iteración, selecciona *drivers* prioritarios, refina los elementos pertinentes del sistema, escoge conceptos de diseño, documenta las vistas y decisiones resultantes, y cierra con una revisión del estado alcanzado frente al propósito de diseño. En este proyecto, los ciclos se plantean de la siguiente manera.

Ciclo 1. Delimitación del sistema y estructura base

El propósito del primer ciclo es establecer la macroestructura de la solución y delimitar con claridad qué queda dentro y fuera del sistema arquitectónico.

Los *drivers* priorizados en esta etapa son:

- DQ-01 Interoperabilidad.
- DQ-05 Mantenibilidad/modularidad.
- DF-01 Captura multimodal.

- DF-04 Actualización del HDT.

Lo anterior debido a que cualquier decisión posterior depende de una separación adecuada de responsabilidades.

En este ciclo se refinan inicialmente el sistema completo, sus actores externos, las fuentes multimodales y los consumidores previstos.

El principal concepto de diseño seleccionado es una arquitectura por capas con orientación a servicios. La decisión se justifica porque permite representar con claridad la separación entre entorno físico, mecanismos de procesamiento y servicios digitales, al mismo tiempo que facilita reutilización y gobierno de interfaces.

Como resultado de este ciclo, se definen el contexto del sistema, la división principal en capas, el núcleo de servicios del HDT y la noción de adaptadores de captura. También se genera la primera vista de contexto y la vista de contenedores en notación C4, junto con un conjunto inicial de ADRs.

Al cierre del ciclo, la revisión se concentra en verificar que la estructura propuesta efectivamente soporta la integración de varias fuentes sin mezclar responsabilidades ni acoplar directamente productores y consumidores.

Ciclo 2. Diseño del pipeline multimodal y sincronización temporal

El segundo ciclo tiene como objetivo refinar el flujo de datos desde la ingesta hasta la actualización del gemelo. En esta etapa se priorizan especialmente los siguientes *drivers*, ya que el valor del HDT depende de que la información multimodal pueda combinarse de forma técnicamente consistente:

- DF-02 Normalización de datos.
- DF-03 Sincronización temporal.
- DQ-03 Latencia/sincronización.
- DQ-07 Trazabilidad/observabilidad.

Los elementos refinados en este ciclo son los adaptadores, la capa de normalización, los mecanismos de sincronización y la capa de integración.

El concepto de diseño dominante es un *pipeline* multimodal desacoplado, soportado por intercambio dirigido por eventos o mensajes. La selección de este concepto responde al interés por permitir evolución progresiva del sistema, reducir dependencias temporales fuertes y mantener claridad entre captura, transformación e integración.

En términos de decisiones, este ciclo establece que:

- Cada fuente debe publicar su información a través de un adaptador localizado.
- La información debe transformarse a un formato canónico interno.

- La marca temporal y la procedencia del dato son metadatos obligatorios.
- La integración no debe depender de la lógica interna del consumidor final.

Asimismo, se determina que el mecanismo de sincronización debe quedar explícitamente documentado, aun cuando en la PoC su implementación sea básica.

Los artefactos producidos en este ciclo incluyen el flujo multimodal, la vista de componentes inicial, la definición preliminar de contratos de intercambio y la actualización de escenarios de calidad asociados con latencia y sincronización.

La revisión del ciclo comprueba si el *pipeline* puede sostener trazabilidad completa desde la fuente hasta el estado consolidado del HDT.

Ciclo 3. Incorporación de tácticas para atributos de calidad

El tercer ciclo se orienta a incorporar tácticas concretas que permitan materializar los atributos de calidad priorizados. Esta etapa es crítica porque transforma requisitos abstractos en decisiones de diseño observables.

Los *drivers* priorizados son:

- DQ-02 Escalabilidad/extensibilidad.
- DQ-04 Seguridad.
- DQ-06 Fidelidad funcional.
- DF-05 Exposición de estado.

En esta iteración se refinan el servicio central del HDT, la persistencia, la exposición de servicios, la observabilidad y los mecanismos de control de acceso.

Entre los conceptos de diseño seleccionados destacan la encapsulación por adaptadores, la separación entre datos crudos y estado consolidado, la exposición por interfaces estables, el uso de *logging* estructurado y la minimización de privilegios en el acceso a información sensible.

Las decisiones resultantes son las siguientes:

- La incorporación de nuevas modalidades debe realizarse mediante extensión de la capa de captura e integración, sin alterar el núcleo del HDT.
- La arquitectura debe mantener desacoplamiento entre almacenamiento de eventos, estado actual del gemelo y mecanismos de consulta.
- Toda interacción con datos sensibles debe quedar gobernada por controles básicos de acceso y por una justificación explícita de uso.
- La arquitectura debe ofrecer observabilidad suficiente para analizar fallos, tiempos de procesamiento y rutas del dato durante la PoC.

Como salida de este ciclo se consolidan ADRs adicionales y se actualizan las vistas C4 con los componentes transversales.

Ciclo 4. Refinamiento orientado a PoC y validación técnica

El cuarto ciclo tiene como propósito ajustar la arquitectura al alcance real de la PoC y preparar su evaluación.

Los *drivers* priorizados son:

- DF-06 Incorporación de nuevas fuentes.
- Validación transversal de DQ-01 a DQ-07 en la PoC.

En este punto se refinan la vista lógica de despliegue y la estrategia de incorporación de una fuente adicional.

La principal decisión de diseño consiste en privilegiar una implementación mínima vertical, capaz de recorrer el *pipeline* completo desde captura hasta consumo, antes que una solución extensa con cobertura funcional amplia pero baja trazabilidad.

Flujo de información multimodal

El flujo de información de la arquitectura propuesta sigue la secuencia general identificada de manera consistente en la literatura revisada: captura, preprocesamiento, integración, actualización del gemelo, consumo y retroalimentación. No obstante, en esta propuesta dicha secuencia se formaliza como un *pipeline* explícito y documentado.

1. Los datos son capturados por adaptadores especializados.
2. Se normalizan y enriquecen con metadatos de trazabilidad.
3. Se sincronizan en función de criterios temporales definidos para la PoC.
4. Se integran en una representación común que permita actualizar el estado del HDT.
5. El estado es persistido y expuesto a consumidores autorizados.
6. Los datos son expuestos para visualización, consulta o retroalimentación hacia el entorno de uso.

Contextualización del flujo en un escenario de interacción humano-máquina

Con el fin de contextualizar la propuesta en un escenario de interacción humano-máquina, la PoC se plantea en un entorno controlado en el que un operador ejecuta una tarea apoyada por un sistema digital capaz de capturar, integrar y exponer información relevante sobre su estado y su contexto de operación. En este escenario, distintas fuentes multimodales, tales como video, señales fisiológicas y datos operativos, son adquiridas por mecanismos de captura específicos (o simuladas por *software* para fines del entorno

de prueba), transformadas a un formato interno común y sincronizadas temporalmente antes de actualizar el estado del HDT.

Esta contextualización traduce los hallazgos teóricos y técnicos identificados en la revisión en una estructura operativa concreta para la PoC. La literatura mostró que la utilidad de un HDT depende de integrar fuentes heterogéneas, mantener trazabilidad del dato y sostener una actualización suficientemente consistente para apoyar decisiones o servicios posteriores. En consecuencia, el flujo propuesto articula las etapas como un recorrido completo orientado a demostrar que la arquitectura puede servir como soporte técnico para escenarios de interacción humano-máquina en los que el estado del operador debe ser observado, consultado o utilizado por componentes desacoplados.

Cabe destacar que esta investigación no busca reproducir un entorno industrial completo, sino demostrar que la arquitectura propuesta puede sostener un ciclo mínimo, trazable y extensible de interacción entre fuentes del entorno físico, representación digital del operador y consumo posterior de la información.

Arquitectura propuesta

La arquitectura propuesta se estructura como una arquitectura multimodal por capas, orientada a servicios y soportada por integración desacoplada. Su propósito es separar de manera explícita la adquisición de datos, su transformación técnica, la gestión del estado del HDT y el consumo de la información por parte de servicios o aplicaciones. Esta separación permite reducir el acoplamiento entre fuentes, facilitar la evolución de la solución y mantener trazabilidad entre el dato capturado y la representación digital resultante.

En términos generales, la arquitectura contempla seis dominios principales:

1. Captura e ingesta.
2. Normalización y sincronización.
3. Integración y orquestación.
4. Servicios del HDT.
5. Persistencia y trazabilidad.
6. Exposición/consumo.

De forma transversal, incorpora controles básicos de seguridad, observabilidad y documentación de decisiones.

Capa de captura e ingesta multimodal

La primera capa es responsable de la conexión con las fuentes de datos del entorno físico. En esta capa se ubican los adaptadores de captura, cuya función es desacoplar la arquitectura interna de las particularidades de cada fuente.

La existencia de adaptadores específicos responde al atributo de interoperabilidad: cada fuente puede tener estructura, frecuencia, librería o mecanismo de adquisición diferente, pero la arquitectura evita propagar esa heterogeneidad al resto del sistema.

Para la PoC, esta capa debe ser capaz de trabajar con dos fuentes representativas, por ejemplo, contexto, señales fisiológicas u otro flujo operativo pertinente al caso de uso seleccionado. Cada adaptador debe enriquecer el dato con metadatos mínimos de trazabilidad, tales como identificador de fuente, marca temporal, tipo de modalidad y estado de captura.

Capa de normalización y sincronización

La segunda capa transforma la salida heterogénea de los adaptadores a un formato común que pueda ser procesado por el *pipeline*. Su responsabilidad principal es normalizar estructuras, validar campos mínimos, unificar representación temporal y preparar la información para su integración posterior. Esta capa tiene especial relevancia porque en ella se atiende uno de los problemas más frecuentes reportados por la literatura: la dificultad de combinar flujos heterogéneos sin perder coherencia temporal ni significado técnico. La propuesta considera que la sincronización debe resolverse en este punto mediante un mecanismo explícito de alineamiento temporal.

Para la PoC debe existir una lógica clara de cómo se comparan, agrupan o relacionan eventos provenientes de modalidades distintas antes de consolidar el estado del gemelo.

Capa de integración y orquestación

La tercera capa gestiona el tránsito del dato ya normalizado hacia el núcleo del sistema. Su responsabilidad es coordinar el flujo multimodal, aplicar reglas básicas de integración y entregar al servicio del HDT una representación consistente y trazable. Desde el punto de vista arquitectónico, esta capa constituye el punto de enlace entre la heterogeneidad del entorno físico y la representación digital unificada.

Se plantea que esta integración se apoye en un mecanismo desacoplado, preferiblemente dirigido por eventos o mensajes, para reducir dependencias directas entre productores y consumidores de datos.

En la PoC, esto puede implementarse con un *bróker* liviano, una cola o un mecanismo equivalente, siempre que se preserve la lógica de desacoplamiento y la posibilidad de crecimiento posterior.

La decisión es coherente con los hallazgos de literatura relacionados con arquitecturas *edge-cloud* y soluciones orientadas a servicios, donde la comunicación asíncrona contribuye tanto a la extensibilidad como al manejo de latencia.

Capa de servicios del HDT

La cuarta capa constituye el núcleo lógico de la propuesta. Aquí se ubican los servicios encargados de construir, actualizar y exponer el estado digital del operador. Su función principal es consolidar un estado digital coherente y dejar preparado el punto de extensión para análisis posteriores.

A nivel de diseño, este núcleo debe mantenerse desacoplado de los detalles de captura y también de las aplicaciones consumidoras. De este modo, el estado del gemelo se convierte en un recurso arquitectónico reusable, accesible por interfaces definidas y gobernado por reglas internas explícitas. Esta decisión mejora mantenibilidad, permite sustituir mecanismos de ingesta sin afectar al núcleo y favorece la evolución hacia escenarios más complejos.

Capa de persistencia y trazabilidad

La quinta capa almacena la información mínima necesaria para sostener la validación y garantizar trazabilidad. La propuesta distingue, al menos conceptualmente, entre datos de entrada, estado consolidado y registros de operación. Esta separación es importante porque no todos los datos deben tratarse con la misma semántica ni con el mismo propósito.

En la PoC, la persistencia debe ser suficiente para reconstruir el flujo de eventos relevante, analizar comportamientos del *pipeline* y respaldar la evaluación técnica. Asimismo, debe permitir diferenciar entre información cruda, información transformada y estado expuesto por el HDT. Esta decisión fortalece tanto la observabilidad como la responsabilidad técnica sobre datos humanos.

Capa de exposición y consumo

La sexta capa ofrece interfaces para que otros componentes o consumidores consulten el estado del HDT, indicadores derivados o información de operación. En una primera etapa, esta exposición puede implementarse mediante API, *dashboard* mínimo o mecanismo equivalente, según convenga al caso de uso. Lo importante no es la interfaz

visual en sí misma, sino que exista un punto estable y desacoplado desde el cual se demuestre el consumo efectivo del gemelo digital.

Esta capa también constituye el lugar adecuado para materializar la retroalimentación del *pipeline*; para la PoC se pueden incluir alertas, visualización de estado o consulta de resultados. Con ello se completa el ciclo arquitectónico desde la captura del dato físico hasta su utilización en apoyo a la interacción humano-máquina.

Decisiones transversales de arquitectura

Además de las capas descritas, la propuesta incorpora un conjunto de decisiones transversales que responden directamente a los *drivers* priorizados:

- Uso de adaptadores por fuente para encapsular heterogeneidad.
- Definición de un formato o contrato canónico interno para intercambio de datos.
- Comunicación desacoplada entre ingesta, integración y servicios del HDT.
- Registro explícito de decisiones arquitectónicas mediante ADRs.
- Documentación continua mediante vistas C4 y diagramas de flujo.
- Controles básicos de autenticación, autorización y minimización de exposición de datos.
- Observabilidad mínima a través de *logs*, métricas de ejecución y trazas del *pipeline*.

Estas decisiones deben interpretarse como mecanismos concretos para traducir atributos de calidad en estructuras y responsabilidades observables.

Documentación y control del diseño

A continuación, se describen los artefactos generados para sustentar el diseño arquitectónico planteado en las secciones anteriores.

- Apéndice 1: ADRs.
- Apéndice 2: vistas C4.
- Apéndice 3: contratos de interfaces.

Estrategia de validación de la propuesta

La validación de la propuesta se realizó mediante una prueba de concepto en entorno controlado. Dicha PoC no pretende demostrar viabilidad industrial plena, sino verificar que la arquitectura diseñada puede implementar un flujo multimodal mínimo con niveles aceptables de interoperabilidad, sincronización, modularidad y extensibilidad. La validación se alinea con las prácticas observadas en la literatura, donde predominan experimentos controlados, casos de estudio acotados y pruebas de factibilidad técnica.

La PoC se diseña como una implementación mínima funcional que recorra el *pipeline* completo: captura, normalización, integración, actualización del HDT, persistencia y consumo. Sobre esta base se ejecutan pruebas orientadas a escenarios, con énfasis en los atributos de calidad priorizados.

- La interoperabilidad se observa a través de la capacidad de integrar fuentes heterogéneas dentro de un flujo común.
- La latencia y sincronización se evalúa mediante el comportamiento temporal del *pipeline*.
- La extensibilidad se verifica incorporando una nueva fuente y midiendo el impacto estructural requerido.
- La seguridad se comprueba a través de controles básicos de acceso y manejo responsable de la información
- La modularidad y mantenibilidad se analizan a partir del acoplamiento efectivo entre componentes y de la facilidad de sustitución o ampliación de adaptadores y servicios.

Diseño de la PoC

Propósito y alcance de la PoC

La PoC se diseñó como una validación técnica inicial de la arquitectura propuesta en un entorno controlado. Su propósito fue comprobar que la solución puede sostener un flujo multimodal funcional desde la captura de datos hasta la consulta del estado consolidado del operador, preservando atributos de calidad relevantes para el problema de investigación.

El diseño parte de los *drivers* arquitectónicos establecidos en la propuesta y prioriza un recorrido funcional completo antes de incorporar complejidad adicional de infraestructura. Por ello, la PoC se concentró en integrar modalidades representativas, aplicar un contrato interno común, sincronizar eventos heterogéneos, consolidar el estado del operador, persistir evidencia técnica y exponer el resultado a un consumidor desacoplado. Esta decisión permitió mantener coherencia entre la arquitectura documentada, el alcance del proyecto y la estrategia de validación definida para esta etapa.

Alcance técnico de la implementación inicial

La primera versión funcional de la PoC cubre los siguientes elementos:

- Integración de dos fuentes multimodales representativas.

- Registro de procedencia, marca temporal y tipo de modalidad.
- Transformación de las entradas a un formato interno común.
- Sincronización básica de eventos heterogéneos.
- Actualización del estado consolidado del HDT.
- Persistencia mínima para trazabilidad y evaluación técnica.
- Exposición del estado para consulta desde un consumidor desacoplado.
- Incorporación posterior de una nueva fuente con impacto localizado.

Quedan fuera del alcance inmediato la inferencia avanzada, el despliegue industrial, el procesamiento distribuido complejo y las interfaces de alta fidelidad, salvo que resulten estrictamente necesarias para sostener la validación técnica.

Escenarios de validación diseñados

A partir de ese alcance, se definió un conjunto de escenarios orientados a observar el comportamiento de la arquitectura bajo condiciones distintas. Estos escenarios constituyen mecanismos para estresar atributos de calidad específicos dentro del alcance de la PoC.

- La corrida A (*normal-day*) se definió como línea base para verificar la operación nominal del *pipeline* con dos fuentes activas.
- La corrida B (*high-load*) permitió observar el comportamiento del estado consolidado ante un aumento sostenido de carga fisiológica y operativa.
- La corrida C (*alarm-episode*) se diseñó para verificar si la arquitectura reflejaba una condición de alarma en el estado del operador.
- La corrida D (*normal-day-video*) incorporó una tercera modalidad de video simulado y enriquecido semánticamente con el fin de evaluar extensibilidad y cambio estructural.
- La corrida E (*degraded-source*) introdujo fallas parciales de captura para observar continuidad operativa y preservación de trazabilidad.
- La corrida F (*noisy-physiology*) permitió verificar el rechazo de datos inválidos y el comportamiento del *pipeline* bajo degradación controlada.

En conjunto, estos escenarios permitieron cubrir operación nominal, variación funcional, incorporación de una nueva modalidad y degradación del flujo, ofreciendo una base suficiente para evaluación integral de la arquitectura propuesta.

Implementación de la PoC

Para la implementación de la PoC se selecciona como entorno principal de desarrollo WSL 2 con Ubuntu 24.04 LTS, utilizando *Visual Studio Code* con la extensión *Remote WSL*. Esta elección responde a criterios de compatibilidad con el ecosistema *Python*, reproducibilidad del entorno, menor fricción operativa para bibliotecas de procesamiento y facilidad para evolucionar posteriormente hacia escenarios de ejecución sobre *Linux*. Dado que la PoC se desarrolla en un entorno controlado y no depende de infraestructura industrial especializada, este entorno ofrece una relación adecuada entre simplicidad, estabilidad y capacidad técnica.

El código fuente de la prueba de concepto se administra mediante Git en el repositorio del proyecto <https://github.com/agvor/poc-hdt-multimodal>. La utilización de esta plataforma contribuye a la trazabilidad del proceso, al control de cambios y a la replicabilidad académica del trabajo. Asimismo, permite vincular la evolución de la implementación con los artefactos arquitectónicos producidos durante el diseño, manteniendo coherencia entre decisiones documentadas, código y evidencia de validación.

Tecnologías seleccionadas

A continuación, se presentan las tecnologías y herramientas seleccionadas para el desarrollo de la PoC. Estas se basan en conocimiento técnico del investigador, familiaridad y mejores prácticas modernas.

Tabla 33

Tecnologías y herramientas seleccionadas para la PoC

Área	Tecnología seleccionada	Justificación principal
Lenguaje principal	Python 3.12	Madurez, amplitud de ecosistema y rapidez de implementación
Gestión de entorno	uv con pyproject.toml	Reproducibilidad y control de dependencias
Plan de contingencia	venv	Alternativa conservadora si se requiere una configuración más simple
Servicios y API	FastAPI + Uvicorn	Exposición de interfaces estables y documentadas
Modelado de datos	Pydantic v2	Validación del contrato canónico y consistencia entre componentes

Captura visual	OpenCV	Soporte libre y suficiente para video o secuencias reproducibles
Integración interna	asyncio.Queue	Implementación inicial del intercambio desacoplado por eventos
<i>Broker</i> opcional	NATS	Extensión posible si se requiere mensajería externa entre procesos
Persistencia	SQLite + SQLAlchemy 2.0	Bajo costo operativo y suficiencia para una PoC de nodo único
Visualización opcional	Streamlit	Consumo básico del estado del HDT sin desarrollar un <i>frontend</i> complejo
Calidad de código	pytest, Ruff, mypy	Pruebas, control estático y mantenibilidad
Automatización	GitHub Actions	Validación básica del repositorio
Contenerización opcional	Podman	Aislamiento de servicios auxiliares si la evolución de la PoC lo exige

Fuente: Elaboración propia

Correspondencia entre arquitectura y tecnologías

La selección tecnológica mantiene correspondencia directa con la arquitectura propuesta:

- Captura e ingesta: adaptadores implementados en Python, con OpenCV para la modalidad visual y lectores estructurados para fuentes complementarias.
- Normalización y sincronización: validación del contrato canónico y enriquecimiento de metadatos mediante Pydantic y lógica de aplicación en Python.
- Integración y orquestación: intercambio desacoplado mediante asyncio.Queue, con NATS como extensión opcional.
- Servicios del HDT: implementación del servicio central con FastAPI y Uvicorn.
- Persistencia y trazabilidad: registro de eventos, estado y datos operativos mediante SQLite y SQLAlchemy.
- Exposición y consumo: consulta del estado del HDT mediante FastAPI y, si resulta conveniente, una visualización básica con Streamlit.

Metodología para medición de métricas

La validación de la PoC se realizó en un entorno controlado, con el objetivo de comprobar que la arquitectura propuesta puede sostener un flujo multimodal funcional y extensible. La medición se definió a partir de los atributos de calidad priorizados en el

diseño: interoperabilidad, sincronización, extensibilidad, seguridad, mantenibilidad, trazabilidad y fidelidad funcional.

La evidencia se obtuvo desde tres puntos: la API protegida, la base de datos SQLite y el *dashboard* de observación. A través de estos mecanismos se registraron *snapshots* del operador, eventos persistidos, trazas del *pipeline*, incidentes operativos, iteraciones recientes y ventanas sincronizadas. La Tabla 34 resume los atributos evaluados, qué se mide en cada caso, cómo se mide y cuál es la fuente principal de evidencia.

Tabla 34

Métricas utilizadas en la validación de la PoC

Atributo evaluado	¿Qué se mide?	¿Cómo se mide?	Fuente de evidencia
Interoperabilidad	Integración de varias fuentes en un mismo <i>pipeline</i>	Verificando modalidades por ventana y <i>snapshots</i> consolidados	API protegido, dashboard y SQLite
Latencia / sincronización	Coherencia temporal entre captura, ventana y <i>snapshot</i>	Comparando <i>timestamps</i> de iteraciones, ventanas y actualización del estado	Diagnóstico de <i>runtime</i> , trazas y SQLite
Extensibilidad	Impacto de agregar una nueva modalidad	Analizando el <i>diff</i> funcional y el comportamiento del sistema con tres fuentes activas	Código, pruebas, API y <i>dashboard</i>
Seguridad	Protección básica de acceso a datos operativos	Probando acceso con y sin llave API válida	API protegido
Mantenibilidad / modularidad	Localización del cambio necesario para integrar la nueva fuente	Revisando módulos modificados y capas afectadas	Código fuente y <i>diff</i> final
Trazabilidad / observabilidad	Capacidad de reconstruir el tránsito del dato	Consultando trazas, incidentes, ventanas y <i>snapshots</i>	API protegido, <i>dashboard</i> y SQLite
Fidelidad funcional	Representación útil del estado del operador	Verificando indicadores e interpretación del <i>snapshot</i> en escenarios distintos	Estado consolidado, <i>dashboard</i> y SQLite

Fuente: Elaboración propia

Corridas y procedimiento de medición

La toma de mediciones se realizó mediante un conjunto de corridas controladas definidas previamente en el diseño de la PoC. Cada corrida utilizó una configuración específica de escenario, fuentes activas, intervalo de ejecución e iteraciones sugeridas, con el propósito de observar el comportamiento del sistema bajo condiciones nominales, de variación y de degradación. La Tabla 35 presenta la configuración de corridas utilizada durante la validación.

Tabla 35
Configuración de corridas utilizadas en la validación

Corrida	Escenario	Fuentes activas	Intervalo	Iteraciones sugeridas	Propósito
A	normal-day	physiology + context	1 s	40	Establecer línea base de operación nominal
B	high-load	physiology + context	1 s	40	Observar aumento de carga fisiológica y operativa
C	alarm-episode	physiology + context	1 s	40	Verificar respuesta del estado ante una condición de alarma
D	normal-day-video	physiology + context + video	1 s	40	Validar extensibilidad al incorporar una tercera modalidad
E	degraded-source	physiology + context	1 s	40	Observar manejo de fallas parciales de captura
F	noisy-physiology	physiology + context	1 s	40	Observar rechazo de datos inválidos y degradación controlada

Fuente: Elaboración propia

Para cada corrida se ejecutó el *pipeline* completo, se esperó la finalización de la ingesta y luego se consolidó la evidencia observada desde los distintos puntos de monitoreo definidos. Esta estrategia permitió comparar el comportamiento del sistema entre escenarios y reducir el riesgo de interpretar resultados a partir de observación parcial o anecdótica.

Recolección y consolidación de evidencia

Las mediciones se respaldan con evidencia recolectada con un *script* presente en el repositorio del proyecto (`scripts/collect_f10_measurements.py`). Este *script* ejecuta corridas controladas con bases SQLite separadas, levanta la API con la configuración de cada escenario, espera la finalización de la ingesta, exporta el estado del *runtime*, las iteraciones, las ventanas, los *snapshots*, las trazas y los incidentes, y además consulta la base persistida para obtener conteos consolidados de *snapshots*, eventos, trazas e incidentes.

Esta instrumentación permite que los resultados incluidos en el informe estén respaldados por evidencia reproducible y no solo por observación manual del *dashboard*.

Resultados y análisis de la PoC

Resultados operativos

Los resultados muestran que la PoC puede sostener un flujo multimodal completo desde la captura hasta la consulta del estado consolidado del operador. En la configuración base, el sistema integró, de forma consistente, las fuentes fisiológica y de contexto dentro de una misma ventana temporal, generando *snapshots* persistidos y evidencia técnica suficiente para reconstruir el flujo de datos. Asimismo, los escenarios de variación permitieron observar cambios funcionales en el estado consolidado sin pérdida del recorrido general del *pipeline*.

Los escenarios degradados confirmaron además que la arquitectura mantiene continuidad operativa ante fallas parciales de captura o rechazo de datos inválidos. Aunque estos escenarios introdujeron incidentes registrados, el sistema preservó la trazabilidad necesaria para analizar técnicamente el comportamiento del flujo y no colapsó ante la degradación controlada. La Tabla 36 presenta los resultados operativos consolidados obtenidos en cada corrida.

Resultados por atributo de calidad

Además de los registros operativos, la evidencia se analizó a partir de criterios de éxito definidos para cada atributo de calidad priorizado en el diseño. De esta manera, los resultados describen tanto lo ejecutado por la PoC como el grado en que la arquitectura satisface las condiciones mínimas de validación establecidas para esta etapa. La Tabla 37 resume esta evaluación por atributo.

En términos generales, los resultados obtenidos fueron favorables para interoperabilidad, sincronización funcional, extensibilidad, seguridad básica, mantenibilidad, trazabilidad y fidelidad funcional dentro del alcance acotado de la PoC.

La interoperabilidad quedó respaldada por la generación consistente de ventanas y *snapshots* válidos con dos modalidades activas, y por la capacidad de sostener esa integración al incorporar una tercera modalidad.

La sincronización se manifestó en la consolidación estable de eventos en ventanas temporales sin fragmentación observable.

La extensibilidad y la mantenibilidad quedaron respaldadas por la incorporación de video con impacto localizado, sin alteración de contratos ni de la API protegida.

Por su parte, la trazabilidad y la fidelidad funcional se evidenciaron en la capacidad de reconstruir el recorrido del dato y en la correspondencia entre variaciones del escenario y el estado consolidado expuesto por el HDT.

Impacto estructural de incorporar la fuente adicional

La incorporación de una nueva modalidad constituyó una prueba especialmente relevante para la propuesta arquitectónica, ya que permitió observar si la solución podía evolucionar sin rediseño estructural. En este caso, la fuente adicional de video simulado y enriquecido semánticamente se integró mediante cambios concentrados en las capas esperables, sin modificar la API protegida ni los contratos establecidos. Esto refuerza la idea de que la separación por capas y el soporte de integración desacoplada no solo fueron una decisión conceptual, sino una propiedad observable en la implementación.

La Tabla 38 presenta el detalle del impacto estructural de esta incorporación y muestra que la extensión del sistema se resolvió con cambios localizados y coherentes con la arquitectura planteada.

Tabla 36
Resultados operativos de la PoC

Corrida	Ventanas cerradas	Eventos persistidos	Snapshots generados	Incidentes registrados	Modalidades	Observaciones
A	8	160	8	0	context, physiology	Operación nominal sin incidentes
B	8	160	8	0	context, physiology	Aumento sostenido de carga fisiológica
C	9	160	9	0	context, physiology	Activación de alarma y contexto de advertencia
D	8	240	8	0	context, physiology, video	Integración correcta de tres modalidades
E	9	152	9	4	context, physiology	Falla parcial de captura con continuidad operativa
F	8	152	8	8	context, physiology	Rechazo de datos inválidos con degradación controlada

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37
Evaluación de criterios de éxito por atributo de calidad

Atributo	Criterio de éxito	Evidencia observada	Resultado
Interoperabilidad	La arquitectura debe producir ventanas y <i>snapshots</i> válidos con dos modalidades en los escenarios base y mantener esa	Las corridas generaron <i>snapshots</i> válidos y ventanas con modalidades	Cumplido

	capacidad al incorporar una tercera modalidad.	<i>context, physiology</i> ; la corrida D con video también.	
Latencia / sincronización	El <i>pipeline</i> debe consolidar eventos en ventanas temporales utilizables, sin fragmentación observable, dentro del entorno controlado.	40 iteraciones produjeron entre 8 y 9 ventanas cerradas según el escenario, sin fragmentación observable	Cumplido
Extensibilidad	La arquitectura debe admitir una nueva modalidad sin rediseño del núcleo, sin cambios en la API protegida y sin modificación de los contratos establecidos.	La corrida D operó con 3 modalidades, generó 8 snapshots y 240 eventos persistentes; el <i>diff</i> se mantuvo en 17 archivos (4 nuevos y 13 modificados)	Cumplido
Seguridad	Los servicios protegidos deben restringir el acceso sin credenciales válidas y permitir acceso autorizado bajo el esquema básico definido para la PoC.	"401 Unauthorized" sin API key, "200 OK" con API key válida y "200 OK" en <i>/system/health</i>	Cumplido
Mantenibilidad / modularidad	La incorporación de una nueva modalidad debe concentrar cambios en capas esperables, sin afectar de forma innecesaria integración, persistencia ni rutas principales de la API.	La incorporación de video afectó <i>capture, normalize, hdt_services, api wiring, tests, docs</i> y <i>data/scenarios</i> , pero no exigió cambios en <i>integration, persistence</i> ni rutas API	Cumplido
Trazabilidad / observabilidad	Cada corrida debe preservar evidencia suficiente para reconstruir técnicamente el recorrido del dato y analizar el comportamiento del <i>pipeline</i> .	Cada corrida conserva estado, iteraciones, ventanas, trazas, incidentes, <i>logs</i> y base SQLite completa	Cumplido
Fidelidad funcional	El estado consolidado debe reflejar variaciones relevantes del escenario e incorporar indicadores representativos de las modalidades activas.	B mostró mayor carga, C reflejó episodio de alarma, D incorporó indicadores visuales (<i>latest_frame_uri, latest_frame_index,</i>	Cumplido

latest_attention_state), E persistió incidentes de captura y F rechazó datos inválidos sin detener el *pipeline*

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38

Impacto estructural de incorporar la fuente adicional

Aspecto evaluado	Resultado observado
Nueva modalidad incorporada	Video simulado y enriquecido semánticamente
Nuevos archivos creados	• <code>src/app/capture/controlled_video_adapter.py</code> • <code>data/scenarios/normal-day-video/physiology.csv</code> • <code>data/scenarios/normal-day-video/context.ndjson</code> • <code>data/scenarios/normal-day-video/video.ndjson</code>
Archivos modificados	13 (incluyendo 4 de documentación y 4 de pruebas)
Capas afectadas	capture, normalize, hdt_services, api
¿Se modificó el núcleo HDT?	Sí, con cambios localizados de agregación de indicadores de video
¿Se modificó la API protegida?	No
¿Se modificaron los contratos?	No
¿Se requirió rediseño arquitectónico?	No
Interpretación del impacto	La nueva modalidad se absorbió con impacto localizado y coherente con la separación por capas; no fue necesario rediseñar la arquitectura ni alterar la API protegida

Fuente: Elaboración propia

Síntesis de resultados

En conjunto, la evidencia obtenida permite afirmar que la PoC satisface los criterios de éxito definidos para esta etapa de validación. La arquitectura demostró capacidad de integrar fuentes heterogéneas, sincronizar eventos en ventanas temporales, consolidar un estado funcional del operador, preservar trazabilidad técnica y admitir una nueva modalidad con impacto estructural controlado. Por lo tanto, la PoC constituye una validación suficiente de factibilidad técnica para la arquitectura de software propuesta y para el alcance del proyecto.

Conclusiones

La revisión sistemática de la literatura y el análisis del estado de la cuestión confirmaron que el problema abordado radica en la ausencia de una arquitectura de software que permita integrar modalidades heterogéneas con criterios claros de interoperabilidad, sincronización, trazabilidad y capacidad de evolución. A partir de este análisis se identificaron los conceptos, enfoques y limitaciones más relevantes del dominio, y se constató que las propuestas existentes siguen siendo fragmentadas, orientadas a casos particulares y con poca estandarización arquitectónica.

Sobre esa base, la propuesta aterrizó dichos hallazgos en un flujo explícito de captura, normalización, integración, actualización del HDT, persistencia y consumo, contextualizado en un escenario de interacción humano-máquina. Además, el análisis comparativo de alternativas permitió justificar la selección de una arquitectura por capas con servicios desacoplados como base de la solución, por ofrecer mejor balance entre interoperabilidad, modularidad, trazabilidad y viabilidad de implementación que opciones con mayor complejidad de infraestructura.

La validación empírica se realizó mediante seis corridas controladas en las cuales se logró demostrar: la adecuada ejecución del flujo planteado, la integración de una fuente de datos adicional con impacto localizado de cambios, la persistencia de eventos, trazas y *snapshots*, el registro de incidentes, el control ante fallas parciales y el control básico de acceso.

En consecuencia, puede afirmarse que el objetivo general del proyecto ha sido alcanzado dentro del alcance definido para esta investigación, al haberse diseñado y validado técnicamente una arquitectura multimodal para Human Digital Twins con evidencia concreta de interoperabilidad entre fuentes heterogéneas, sincronización funcional del flujo de datos, trazabilidad del *pipeline* y capacidad de evolución mediante la incorporación de nuevas modalidades con impacto estructural controlado. Si bien la validación se desarrolló en un entorno controlado y no constituye aún una demostración en condiciones operativas reales, los resultados obtenidos sí son suficientes para sostener la factibilidad técnica de la propuesta y establecer una base arquitectónica sólida para su posterior evaluación y maduración en escenarios reales de interacción humano-máquina.

Referencias Bibliográficas

- Asad, U., Khan, M., Khalid, A., & Lughmani, W. (2023). Human-Centric Digital Twins in Industry: A Comprehensive Review of Enabling Technologies and Implementation Strategies. *Sensors*, 23, 3938. doi:10.3390/s23083938
- Balaji, B., Shahab, M., Srinivasan, B., & Srinivasan, R. (2023). ACT-R based human digital twin to enhance operators' performance in process industries. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17. doi:10.3389/fnhum.2023.1038060
- Bass, L., Clements, P., & Kazman, R. (2021). *Software Architecture in Practice* (4th ed.). Boston: Addison-Wesley.
- Biolchini, J., Mian, P., Natali, A., & Travassos, G. (2005, 5). *Systematic Review in Software Engineering*. COPPE / UFRJ, Systems Engineering and Computer Science Department. Rio de Janeiro: COPPE / UFRJ.
- Chand, S., Zheng, H., & Lu, Y. (2024). A vision-enabled fatigue-sensitive human digital twin towards human-centric human-robot collaboration. *Journal of Manufacturing Systems*, 77, 432-445. doi:10.1016/j.jmsy.2024.10.002
- Chen, Z., Surendraarcharyagie, K., Granland, K., Chen, C., Xu, X., Xiong, Y., . . . Tang, Y. (2024). Service oriented digital twin for additive manufacturing process. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 762-776. doi:10.1016/j.jmsy.2024.04.015
- de Marchi, J., & Baalbergen, E. (2023). Towards a human-centric Digital Twin architecture for Industry 5.0: Aiding skilled operators with composites production automation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2526, 012047. doi:10.1088/1742-6596/2526/1/012047
- Gruber, T. (1993). A translation approach to portable ontology specifications. *Knowledge Acquisition*, 5(2), 199-220. doi:10.1006/knac.1993.1008
- He, Q., Li, L., Li, D., Peng, T., Zhang, X., Cai, Y., . . . Tang, R. (2024). From Digital Human Modeling to Human Digital Twin: Framework and Perspectives in Human Factors. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 37, 9. doi:10.1186/s10033-024-00998-7
- Hevner, A. (2007). A Three Cycle View of Design Science Research. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 19(2), 87-92.
- Kokkonen, K., Hannola, L., Rantala, T., Ukko, J., Saunila, M., & Rantala, T. (2023). Preconditions and benefits of digital twin-based business ecosystems in manufacturing. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(5), 789-806. doi:10.1080/0951192X.2022.2145022

- Liu, Y., Feng, J., Lu, J., & Zhou, S. (2024). A review of digital twin capabilities, technologies, and applications based on the maturity model. *Advanced Engineering Informatics*, 62, 102592. doi:10.1016/j.aei.2024.102592
- Naranjo-Zeledón, L. (2020). Investigación en Informática: el enfoque alternativo. *Technology Inside*, 5(5), 1-15. Retrieved from <https://cpic-sistemas.or.cr/revista/index.php/technology-inside/article/view/35>
- Onaji, I., Tiwari, D., Soulatiantork, P., Song, B., & Tiwari, A. (2022). Digital twin in manufacturing: conceptual framework and case studies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 35(8), 831-858. doi:10.1080/0951192X.2022.2027014
- Ramasubramanian, A., Mathew, R., Kelly, M., Hargaden, V., & Papakostas, N. (2022). Digital Twin for Human–Robot Collaboration in Manufacturing: Review and Outlook. *Applied Sciences*, 12(10), 4811. doi:10.3390/app12104811
- Shi, Y., Shen, W., Wang, L., Longo, F., Nicoletti, L., & Padovano, A. (2022). A Cognitive Digital Twins Framework for Human-Robot Collaboration. *Procedia Computer Science*, 200, 1867-1874. doi:10.1016/j.procs.2022.01.387
- Sun, Y., Zhang, Q., Bao, J., Lu, Y., & Liu, S. (2024). Empowering digital twins with large language models for global temporal feature learning. *Journal of Manufacturing Systems*, 74, 83-99. doi:10.1016/j.jmsy.2024.02.015
- Villani, V., Picone, M., Mamei, M., & Sabattini, L. (2025). A Digital Twin Driven Human-Centric Ecosystem for Industry 5.0. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 22. doi:10.1109/TASE.2024.3410703
- Wang, B., Zhou, H., Li, X., Yang, G., Zheng, P., Song, C., . . . Wang, L. (2024). Human Digital Twin in the context of Industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 85, 102626. doi:10.1016/j.rcim.2023.102626
- Wang, T., Liu, Z., Wang, L., Li, M., & Wang, X. (2025). A design framework for high-fidelity human-centric digital twin of collaborative work cell in Industry 5.0. *Journal of Manufacturing Systems*, 80, 140-156. doi:10.1016/j.jmsy.2025.02.018
- You, Y., Cai, B., Pham, D., Liu, Y., & Ji, Z. (2025). A human digital twin approach for fatigue-aware task planning in human-robot collaborative assembly. *Computers & Industrial Engineering*, 110774. doi:10.1016/j.cie.2024.110774
- Zafar, M., Langås, E., & Sanfilippo, F. (2024). Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart

manufacturing: A state-of-the-art review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 89, 102769. doi:10.1016/j.rcim.2024.102769

Zhong, D., Xia, Z., Zhu, Y., & Duan, J. (2023). Overview of predictive maintenance based on digital twin technology. *Heliyon*, 9(4), e14534.

doi:10.1016/j.heliyon.2023.e14534

Zhong, R., Hu, B., Feng, Y., Zheng, H., Hong, Z., Lou, S., & Tan, J. (2023). Construction of Human Digital Twin Model Based on Multimodal Data and Its Application in Locomotion Mode Identification. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 36, 126. doi:10.1186/s10033-023-00951-0

Apéndices

Apéndice 1: ADRs del proceso de diseño

En las siguientes tablas se detallan los ADRs que fueron producidos durante los ciclos de diseño de ADD.

Tabla 39

ADR-001

Campo	Contenido
Identificador	ADR-001
Título	Adoptar una arquitectura híbrida por capas y orientada a servicios
Estado	Aceptada
Contexto	La literatura revisada muestra predominio de arquitecturas por capas, separación entre mundo físico y digital, y propuestas orientadas a servicios para mejorar modularidad e interoperabilidad. El problema de investigación exige una base reusable y estructurada para HDT multimodales.
Decisión	Se adopta una arquitectura híbrida con organización por capas y orientación a servicios como estructura base de la propuesta.
Consecuencias positivas	Mejora separación de responsabilidades. Facilita trazabilidad estructural y documentación C4. Favorece mantenibilidad y reutilización.
Consecuencias negativas	Requiere disciplina para evitar acoplamientos cruzados entre capas. Puede introducir mayor complejidad inicial en una PoC pequeño.

Tabla 40

ADR-002

Campo	Contenido
Identificador	ADR-002
Título	Encapsular fuentes mediante adaptadores y un contrato canónico interno.
Estado	Aceptada.
Contexto	La heterogeneidad de fuentes multimodales es una de las principales brechas identificadas en la literatura. La arquitectura necesita integrar modalidades distintas sin propagar formatos nativos al resto del sistema.

Decisión	Cada fuente se integrará mediante un adaptador localizado y todo dato será transformado a un contrato canónico interno antes de ingresar al núcleo del HDT.
Consecuencias positivas	Mejora interoperabilidad. Reduce acoplamiento con librerías y protocolos específicos. Facilita incorporar nuevas fuentes.
Consecuencias negativas	Añade un paso adicional de transformación. Obliga a gobernar versión y consistencia del contrato canónico.

Tabla 41*ADR-003*

Campo	Contenido
Identificador	ADR-003
Título	Utilizar integración asíncrona dirigida por eventos para el pipeline multimodal.
Estado	Aceptada.
Contexto	El pipeline multimodal requiere desacoplar captura, transformación, integración y consumo. La literatura sobre edge-cloud y arquitecturas de servicios muestra ventajas del intercambio por eventos o mensajes.
Decisión	La comunicación entre normalización, integración y servicios del HDT se modela de forma asíncrona mediante eventos o mensajes lógicos.
Consecuencias positivas	Reduce dependencias temporales fuertes. Favorece extensibilidad y tolerancia a fallas parciales. Facilita trazabilidad del flujo.
Consecuencias negativas	Introduce complejidad en depuración y sincronización. Requiere control cuidadoso de orden y consistencia de eventos.

Tabla 42*ADR-004*

Campo	Contenido
Identificador	ADR-004
Título	Separar eventos crudos, estado consolidado del HDT y capa de consumo.

Estado	Aceptada.
Contexto	El proyecto no persigue solo transportar datos, sino construir una representación digital funcional del operador. Para ello es necesario distinguir entre dato de entrada, estado consolidado y respuesta al consumidor.
Decisión	Se separan explícitamente tres niveles: eventos capturados/normalizados, estado consolidado del HDT y exposición a consumidores autorizados.
Consecuencias positivas	Favorece fidelidad funcional del modelo. Evita exponer datos crudos innecesarios. Mejora trazabilidad y mantenibilidad.
Consecuencias negativas	Añade complejidad de mapeo entre niveles. Exige definición clara de reglas de composición del estado.

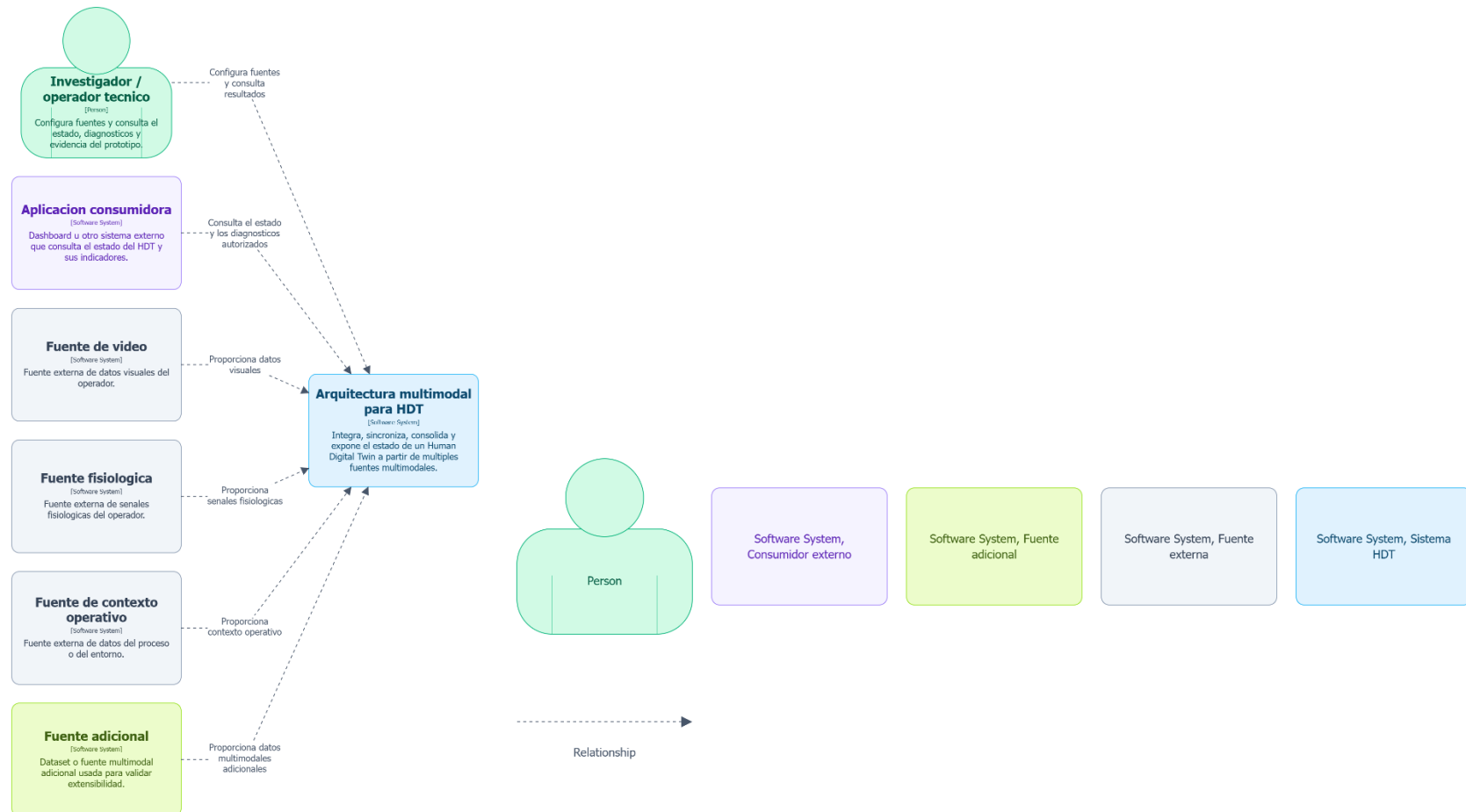
Tabla 43*ADR-005*

Campo	Contenido
Identificador	ADR-005
Título	Incorporar seguridad mínima y observabilidad transversal en la PoC.
Estado	Aceptada.
Contexto	La PoC manipulará datos humanos y debe producir evidencia técnica confiable. Aunque el alcance no es productivo, se requieren controles básicos de acceso y mecanismos de observabilidad.
Decisión	La arquitectura incluirá autenticación/autorización básica para interfaces relevantes, minimización de exposición de datos y trazabilidad operacional mediante <i>logs</i> , métricas y <i>trace_id</i> .
Consecuencias positivas	Reduce riesgo de exposición indebida. Mejora capacidad de análisis y validación. Alinea la propuesta con responsabilidad técnica sobre datos humanos.
Consecuencias negativas	Incrementa el esfuerzo de implementación de la PoC. Requiere disciplina de registro y gobernanza de metadatos.

Apéndice 2: vistas C4 de la arquitectura propuesta

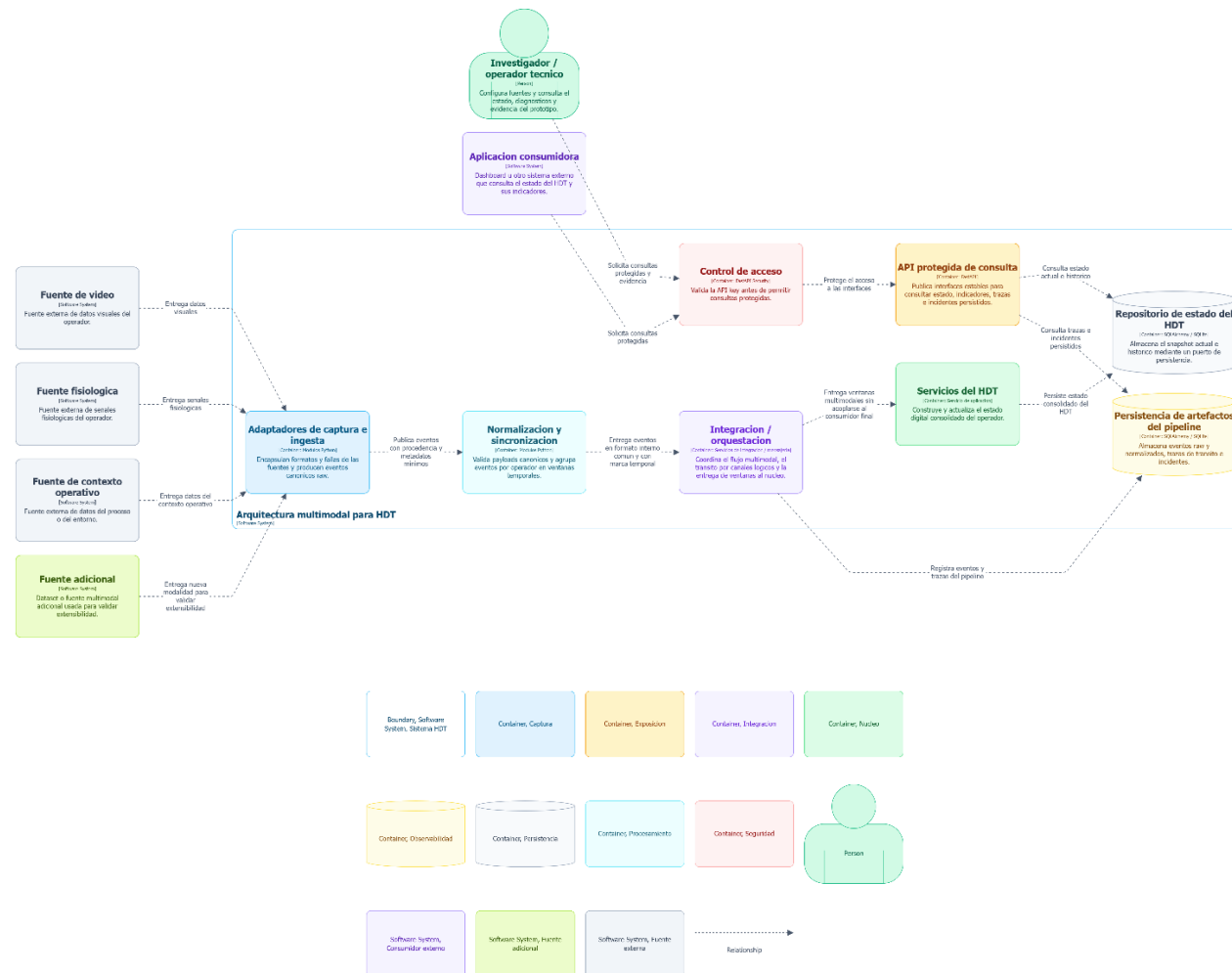
Figura 5

Diagrama C4 de contexto



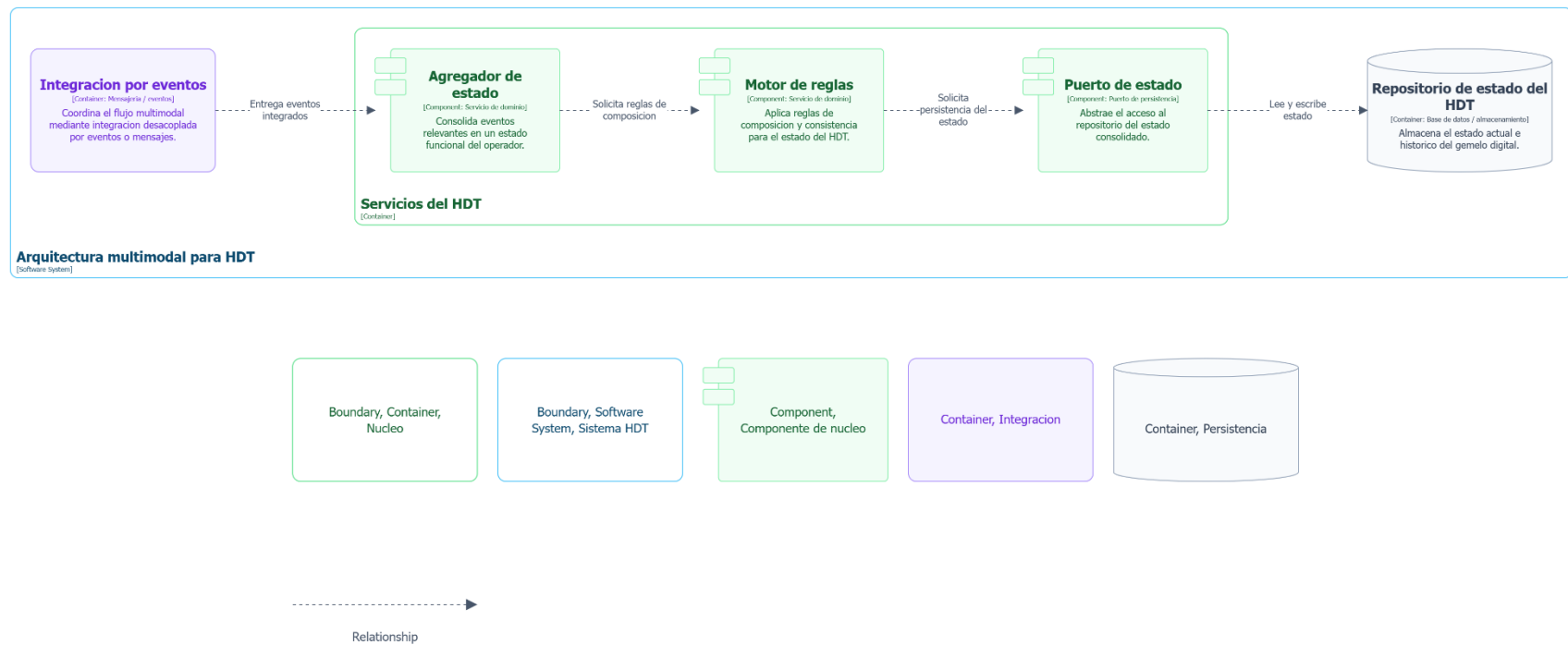
Fuente: elaboración propia con structurizr.com.

Figura 6
Diagrama C4 de contenedores



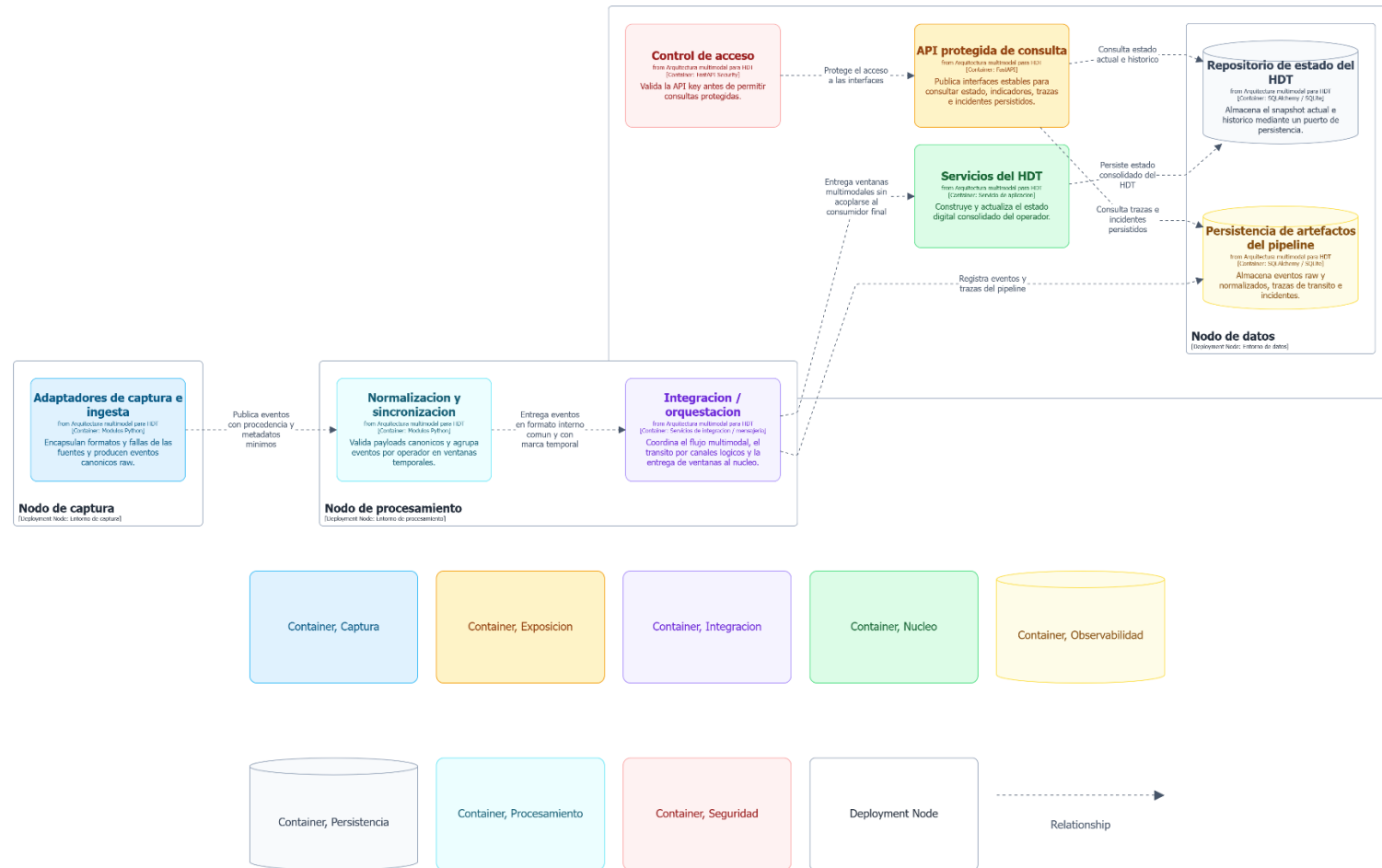
Fuente: elaboración propia con structurizr.com.

Figura 7
Diagrama C4 de componentes de servicios



Fuente: elaboración propia con structurizr.com.

Figura 8
Diagrama C4 de despliegue PoC



Fuente: elaboración propia con structurizr.com.

Apéndice 3: contrato de interfaces establecidos

A continuación, se presenta el contrato canónico propuesto para un evento multimodal. Este tiene como propósito estandarizar la información que se utiliza en los intercambios entre componentes internos de la arquitectura.

Estructura lógica

```
{  
  "event_id": "uuid",  
  "trace_id": "uuid",  
  "source_id": "camera-01",  
  "modality_type": "video|physiology|context",  
  "captured_at": "2026-03-16T14:00:00Z",  
  "normalized_at": "2026-03-16T14:00:02Z",  
  "operator_id": "operator-001",  
  "payload": {},  
  "quality_flags": [],  
  "schema_version": "1.0"  
}
```

Reglas del contrato

- event_id: identifica de forma única el evento.
- trace_id: agrupa eventos relacionados dentro del pipeline.
- source_id: permite rastrear la procedencia.
- modality_type: clasifica la fuente para reglas de integración.
- captured_at y normalized_at: soportan trazabilidad temporal.
- payload: es específico por modalidad, pero encapsulado dentro del contrato canónico.