



Universidad de San Andrés

Escuela de Negocios

Maestría en Gestión de Servicios Tecnológicos y de Telecomunicaciones

“El Uso de gemelos digitales para transformar los procesos de validación y verificación (V&V) de productos para la Exploración & Producción (E&P) de Petróleo y Gas”

Autor: Luis A. Innamorati

DNI: 27.418.627

Director de Tesis: Martín Wessel

Buenos Aires, Argentina

30 de diciembre 2023

Rev. 1.1



Universidad de
San Andrés

Universidad de San Andrés

Escuela de Negocios

Maestría en Gestión de Servicios Tecnológicos y Telecomunicaciones

“El Uso de gemelos digitales para transformar los procesos de validación y verificación (V&V) de productos para la Exploración & Producción (E&P) de Petróleo y Gas”

Autor: Luis A. Innamorati

DNI: 27.418.627

Director de Tesis: Martín Wessel

Buenos Aires, Argentina

30 de diciembre 2023

Rev. 1.1

Agradecimientos

Esta tesis representa el final de una de las experiencias más enriquecedoras en las que me embarqué, que empezó en 2021 aún en tiempos de pandemia COVID-19, cursando el *Master in Business and Technology* primero de forma virtual y luego, afortunadamente, presencial junto con un increíble grupo de profesionales con quienes compartimos la pasión y el entusiasmo por aprender.

Un desafío que me llena de orgullo haber transitado, dándome el honor de ser parte de la comunidad de la Universidad San Andrés, para siempre. Un proceso marcado por mucho esfuerzo personal y familiar, de invaluable crecimiento gracias a la colaboración y las experiencias de todos los colegas, profesores y speakers invitados a los cuales tuve la dicha de conocer.

Gracias a mi esposa Cintia y a mi hija Chiara Luz, quienes me apoyaron y dieron fuerzas en este arduo camino de casi 3 años entre cursada y preparación de tesis. Perdón por las largas jornadas frente a la computadora. Las amo.

Gracias a mis compañeros de maestría, por las enseñanzas y experiencias compartidas. Me permitieron conocer de ustedes, de sus trabajos y de sus empresas, enriqueciendo a un Ing. Mecánico apasionado por la tecnología y con ganas de pivotar de carrera.

Gracias al Team “Socios Plus”, con quienes pasamos grandes momentos de aprendizaje, charlas y diversión. Por más encuentros y proyectos.

Gracias a mi tutor de tesis, Martin Wessel, por incansablemente guiarme y motivarme a cumplir este gran objetivo de terminar mi investigación.

Gracias a todo el cuerpo docente y no docente de la Universidad San Andrés.

Gracias a todos.

Resumen Ejecutivo

La industria del petróleo y el gas, como uno de los sectores más grandes del mundo en términos de valor económico, centra gran parte de su actividad en la exploración y producción (E&P), donde los tubulares desempeñan un papel crucial. Estos componentes, críticos para la integridad estructural y la sellabilidad de los pozos, se conectan mediante conexiones roscadas, con gran variedad de diseños. Las demandantes condiciones de servicio hacen que estos productos deban ser sometidos a rigurosos programas de validación y verificación (V&V), los cuales combinan métodos de evaluación analíticos, modelos numéricos (FEA) y ensayos de plena escala (FST). Estos programas de calificación se basan en estándares industriales, cuyo objetivo es replicar las condiciones de operación más exigentes, unificando criterios de evaluación y aceptación. La ejecución de estos programas trae aparejados prolongados ciclos de desarrollo y elevados gastos de capital por parte de los fabricantes de tubulares.

Este trabajo de investigación se llevó a cabo con el objetivo de analizar cómo el uso de gemelos digitales puede transformar y hacer más eficientes los procesos de validación y verificación (V&V) de productos para la Exploración & Producción (E&P) de Petróleo y Gas. En el proceso, nos propusimos entender el concepto y la tecnología detrás los gemelos digitales, su aplicación actual en el petróleo y gas y el estado del arte de su uso específico en procesos de V&V de producto.

A través del análisis de documentos bibliográficos, papers y encuestas a referentes en la industria de petróleo y gas, identificamos que los gemelos digitales, combinando múltiples capas de tecnologías exponenciales, han encontrado aplicación en diferentes verticales, apalancadas por sus necesidades de transformación digital. A pesar de ello, su adopción en el Oil & Gas es más lenta comparada con otras industrias, con un uso más marcado en procesos que en producto. Aunque son limitadas las referencias en etapas de diseño y desarrollo de producto, se identificaron oportunidades de uso para la predicción de performance de producto a partir de simulación y ensayos sobre prototipos virtuales. Nuestro relevamiento consolidó nueve casos industriales de uso de gemelos digitales en procesos de V&V de productos, de distinta naturaleza y

complejidad, con preponderancia en los sectores de Aeronáutica, Aeroespacial, Automotriz y Manufactura (OEM). Del análisis se desprende que el concepto de “gemelo digital” se encuentra extendido, pero no necesariamente bien utilizado según definiciones modernas en términos del tipo de flujo de la información y su salida funcional. Una clasificación del tipo “sombra digital” con salida funcional del tipo predictiva parecería ajustarse más al estado del arte en procesos de V&V de producto y pudiera considerarse como un primer paso natural para la transformación digital en este tipo de aplicaciones.

Tras un benchmarking con industrias afines y extrapolando los ejes de comparación, no identificamos limitaciones significativas a nivel industria, producto, condiciones de los modelos de simulación y tecnología para el uso de gemelos digitales en procesos de V&V de productos del Upstream. Por su parte, a partir del análisis de campo realizado, la audiencia consultada tiene una perspectiva positiva de la implementación de gemelos digitales en procesos V&V, avizorando una adopción gradual, pero sin llegar a alcanzar a impactar dentro de los estándares de industria al menos en los próximos 5 años. A nivel macro, los principales beneficios se identifican en la reducción del time-to-market y de los costos de calificación de productos, reduciendo brechas entre diseño y aplicación. En contrapartida, entre los desafíos más significativos se citan el conservadurismo de la industria y la fiabilidad/repetibilidad de los modelos.

Por último, se proponen dos roadmaps conceptuales para la transformación digital en procesos de V&V de productos para el upstream, diferenciando las actividades, beneficios esperados y tecnologías involucradas en función del estado de madurez del producto.

Palabras clave: Gemelos Digitales, Modelos de simulación, IIoT, Transformación Digital, Procesos V&V, Producto, Upstream, Oil & Gas.

Índice General

1. Introducción	5
1.1. Planteo de la problemática y justificación de la investigación	5
1.2. Preguntas de investigación	9
1.3. Objetivos	10
1.3.1. Objetivo General	10
1.3.2. Objetivos Específicos	10
1.4. Marco Conceptual	11
1.5. Metodología de investigación	12
2. Gemelos digitales: La tecnología y su uso actual en el petróleo y gas.	15
2.1. Un primer panorama. Introducción.	15
2.2. Gemelos digitales: Definiendo el término y conceptos relacionados.	18
2.3. Gemelos digitales: Framework conceptual. Tecnologías	23
2.4. Gemelos digitales: Aplicaciones en Petróleo y Gas	26
2.5. Casos de uso en el Oil & Gas. Una primera revisión	29
2.6. Desafíos identificados para la implementación	31
3. Gemelos digitales en procesos de V&V de producto	36
3.1. Gemelos Digitales en la gestión del ciclo de vida de productos. Perspectiva general.	36
3.2. Gemelos Digitales en la etapa de diseño de productos. Revisión de casos de uso en diferentes industrias.	39
3.3. Construcción de gemelos digitales para procesos de V&V. Elementos y tecnologías facilitadoras.	48
4. El producto usado en el Upstream y sus procesos de V&V	51
4.1. Conexiones Roscadas. Conociendo el producto	51
4.2. Procesos V&V en productos para el Upstream. Una breve introducción. ..	56
4.2.1. Ensayos a plena escala (FST): Un repaso sobre la API RP 5C5:2017	59
4.2.2. Modelos de Simulación: FEA 101	62
4.3. Validación de línea de productos. Criterios de interpolación y extrapolación de diseños.	65
5. Posibilidades de utilizar gemelos digitales en los procesos de V&V de productos del Upstream. Discusión.	68
5.1. Punto de inicio: Benchmark y análisis de los casos de uso en industrias afines. ..68	
5.2. ¿Existen factores limitantes para la implementación de gemelos digitales en procesos de V&V de productos del Oil & Gas?	82
5.3. Análisis de Campo. Presentación de Resultados y Discusión de observaciones.	90

5.4. Delineando un roadmap conceptual para la implementación en procesos V&V de producto del Upstream	102
6. Resumen y conclusiones	112
7. Listado de Abreviaciones	126
8. Bibliografía	127
9. Anexos	131
9.1. Anexo A: Resumen de casos de uso relevados en la industria de DT en procesos de V&V.	131
9.2. Anexo B: Análisis de Campo. Cuestionario propuesto (Google forms). . .	133



Lista de Figuras

Fig. 1: Comparativa de resultados de búsquedas relacionadas a DT en Google, por industria y año. Fuente (Wanasinghe et al., 2020)	17
Fig. 2: Distribución en términos de áreas de investigación en el uso de DT. Fuente: (Lo et al., 2021)	18
Fig. 3: Diferencias entre Digital Model, Shadow y Twin por tipo y dirección del flujo de la información Fuente: (Somers et al., 2023)	20
Fig. 4: Clasificación de los gemelos digitales en términos de su salida funcional. Fuente: (Eyre Jonathan et al., 2021)	21
Fig. 5: Gemelos digitales y su espacio tridimensional. Fuente: (Brossard et al., 2022)	22
Fig. 6: Modelo Conceptual de Gemelo Digital para proceso de Manufactura. Fuente (Aaron Parrott & Dr. Lane Warshaw, 2017)	24
Fig. 7: Arquitectura de tecnologías para la implementación de DT. Fuente (Aaron Parrott & Dr. Lane Warshaw, 2017)	26
Fig. 8: Diferentes sectores industriales donde los gemelos digitales han encontrado casos de uso. Fuente (Singh et al., 2022)	27
Fig. 9: Top Ten de usos de DT en la Industria del O&G. Fuente (Wanasinghe et al., 2020)	28

Fig. 10: Posibles aplicaciones de DT en el ciclo de vida del producto manufacturado. Fuente (Singh et al., 2022)-----	38
Fig. 11: Referencias de uso de DT en las distintas etapas de PLM (54 papers relevantes publicados entre 2015 y 2019). Fuente: (Lim et al., 2020)-----	39
Fig. 12: Elementos y Tecnologías facilitadoras de los gemelos digitales en desarrollo de producto. Fuente: (Lo et al., 2021)-----	48
Fig. 13: Conexiones Roscadas – Tipos y Elementos. Fuente:(Pattillo, 2018b) -----	52
Fig. 14: Conexiones Roscadas – Elementos de los perfiles de rosca. Fuente: (Pattillo, 2018b) -----	53
Fig. 15: Conexiones Roscadas – Superficies sellantes. Fuente: (Pattillo, 2018b) y (Xie, 2021b) -----	55
Fig. 16: Procesos V&V en productos para el Upstream -----	58
Fig. 17: Ensayos a Plena Escala – Ejemplos de cargas a sellabilidad y rotura. ----- Fuente: (American Petroleum Institute, 2017b) -----	60
Fig. 18: Matriz de Ensayos CAL IV Fuente: (American Petroleum Institute, 2017b)---	61
Fig. 19: FEA – Resumen de consideraciones generales. Fuente:(Xie, 2018)-----	63
Fig. 20: FEA – Proceso Conceptual para el Modelado de la performance a Sellabilidad en conexiones tubulares. Fuente: (Xie & Xie, 2019b) -----	63
Fig. 21: Criterios de interpolación/extrapolación de Línea de Productos. Fuente: (American Petroleum Institute, 2017b)-----	66
Fig. 22: Eje 3: Parámetros del Gemelo Digital – Selección de Parámetros (autoría propia) -----	75
Fig. 23: Siemens PLM Software Suite (autoría propia) -----	79
Fig. 24: Análisis de limitantes para implementar Gemelos digitales en O&G (autoría propia) -----	90
Fig. 25: Sección 1 - Información de la audiencia – Encuesta Propia-----	92
Fig. 26: Sección 2a - Conocimiento y estado de implementación (general de industria) – Encuesta Propia -----	93
Fig. 27: Sección 2b - Conocimiento y estado de implementación (particular empresa) – Encuesta Propia-----	94
Fig. 28: Sección 3 – Beneficios y desafíos – (Encuesta Propia) -----	96
Fig. 29: Sección 4 – Expectativa de adopción de gemelos digitales por normativas (Encuesta Propia)-----	98
Fig. 30: Evolución de los gemelos digitales en procesos V&V en los próximos 5 años (Encuesta Propia) -----	99
Fig. 31: Desafíos del O&G en su camino hacia la transformación digital (Encuesta Propia) -----	101
Fig. 32: Flujo Conceptual de Actividades - Caso A “Desarrollo de Nuevos Productos” (Autoría Propia)-----	106
Fig. 33: Roadmap Conceptual Caso B – “Released Products” (Autoria Propia)-----	107

Lista de Tablas

Tabla 1: Casos de Implementación de DT combinando esfuerzos entre empresas proveedoras y operadores. Fuente (Leblanc, 2020)-----	31
Tabla 2: Benchmark casos de uso de DT: Eje Industria-Producto (autoría propia)-----	69
Tabla 3: Benchmark casos de uso de DT: Eje Modelo de Simulación (autoría propia)	71
Tabla 4: Benchmark casos de uso de DT: Eje Parámetros del Gemelo Digital (autoría propia) -----	75
Tabla 5: Benchmark casos de uso de DT: Eje Contexto Colaborativo (autoría propia)	78
Tabla 6: Variables Físicas y sensorización típica en procesos V&V de O&G (autoría propia) -----	88
Tabla 7: Detalle Sección 2.2 – Implementación de la tecnología en la Industria (Autoría Propia) -----	93
Tabla 8: Detalle Sección 3.3 – Últimas innovaciones en la evaluación de tubulares (autoría propia) -----	97



Universidad de
San Andrés

1. Introducción

1.1. Planteo de la problemática y justificación de la investigación.

La industria del petróleo y el gas es uno de los sectores más grandes del mundo en términos de valor económico, generando ingresos globales estimados de 5 billones de dólares en 2022. El petróleo y el gas son cruciales para la economía mundial, impactando desde el transporte hasta la calefacción y la electricidad, para la producción industrial y la manufactura. En términos generales, el sector se divide en tres segmentos: Upstream, Midstream y Downstream. El Upstream incluye las actividades relacionadas a la exploración y producción (E&P) para encontrar petróleo y extraerlo de la tierra. El Midstream involucra el transporte y almacenamiento de los hidrocarburos, mientras que el segmento del Downstream consolida las actividades tendientes a refinar y comercializar del producto terminado. (Mcclay, 2022)

El Upstream, en particular, está compuesto por empresas que exploran, desarrollan y operan campos de petróleo y gas. Para desarrollar estas actividades, uno de sus principales insumos son los tubulares. Estos tubulares son los componentes estructurales responsables de proporcionar un conducto seguro desde la superficie hasta los reservorios subterráneos de petróleo y gas. Como los pozos se perforan y construyen desde la superficie en forma telescópica, el propósito de cada sarta de revestimiento individual varía, clasificándose como Tubing o Casing, en función de su diámetro y aplicación. A grandes rasgos, las sartas menos profundas (Surface Casing) sirven para sostener la estructura del pozo y aislarlos de los acuíferos de agua dulce. Las sartas intermedias (Intermediate Casing) proporcionan las condiciones necesarias para la perforación de las secciones más profundas, sirviendo tanto de soporte estructural del pozo como de sellabilidad a los fluidos de perforación (lodos) y de la formación (petróleo y gas). Las sartas más profundas y de menor diámetro (Tubing), conectan directamente el reservorio con la

superficie y son las responsables de la extracción y producción los hidrocarburos. (Pattillo, 2018b)

Para unir los tubulares y alcanzar las trayectorias y profundidades requeridas (hasta 30000 ft, >9000 metros), se utilizan conexiones roscadas, con variedad de geometrías, perfiles de rosca y superficies sellantes. Las condiciones demandantes de servicio de los pozos térmicos o de alta presión/alta temperatura (HP/HT) requieren que estas conexiones roscadas verifiquen una adecuada integridad estructural y de sellabilidad a lo largo de todo el ciclo de vida del yacimiento. Debido a esto, los diseños de conexiones deben ser evaluadas y calificadas a través de ensayos a plena escala siguiendo protocolos estandarizados de la industria. Para ello, la industria mayormente adoptó protocolos internacionales como son el [ISO/PAS 12835: 2013](#) para pozos térmicos que experimentan temperaturas entre 180°C a 350°C e [ISO13679:2019](#) y [API RP 5C5:2017](#) para pozos HPHT que experimentan temperaturas máximas de hasta 180°C y presiones superiores a 70 MPa. Algunas operadoras tienen requerimientos adicionales a estos protocolos internacionales (ej. Shell, BP) o inclusive protocolos propietarios, tal es el caso ExxonMobil y Saudi Aramco. (Xie & Xie, 2019a)

En términos generales y más allá de las diferencias en aplicación, estos protocolos proveen los lineamientos de ensayos y los criterios de aceptación para las evaluaciones de las conexiones, aplicando en probetas de plena escala, una secuencia de cargas combinadas (esfuerzos axiales, presión interna o externa, bending¹ y temperatura) que intentan simular las solicitaciones experimentadas por el tubular a lo largo de su uso en el pozo, evaluando la performance de la conexión en términos de tendencia al engrane², sellabilidad e integridad estructural. Estos ensayos se ejecutan en laboratorios especializados en un lote de

¹ Bending: Curvatura, Flexión

² Galling: Forma de desgaste causada por la adherencia entre superficies deslizantes sometidas a una excesiva presión de contacto en relación con las condiciones de lubricación, que en el caso de las conexiones roscadas se origina por operaciones repetidas de apretado (make-up) y afloje (break-out).

hasta 8 probetas (dependiendo la versión de la norma y la severidad de la evaluación requerida) con tolerancias dimensionales extremas de especificación de producto, y que, solo para una combinación específica de diámetro/espesor/material, puede demandar entre 6 – 9 meses de proyecto y un costo aproximado de hasta 1,25 millones de dólares. (Coe, 2015)

Reconociendo el tiempo y los gastos de capital asociados con la realización de ensayos a plena escala (FST) de líneas de productos de conexiones roscadas con múltiples diseños, en tubulares de diferentes rangos de diámetros, espesores y grados de material, la industria está desarrollando un enfoque híbrido, que complementa los resultados de los ensayos físicos con evaluaciones de simulación numérica, como el análisis de elementos finitos (FEA). Los desafíos primarios relacionados con este tipo de evaluaciones numéricas son la falta de criterios concluyentes para poder interpretar los indicadores analíticos y correlacionarlos con límites de fuga prácticos. Adicionalmente, es ampliamente reconocido que debido a las complejidades de los diseños y de las condiciones matemáticas a simular (ovalidad, grandes deformaciones, plasticidad, heterogeneidad de los materiales, efecto de lubricantes) sumados a limitaciones computacionales, estos modelos numéricos constituyen representaciones simplificadas de los sistemas físicos que no siempre logran capturar el comportamiento real del producto ante un estado de cargas determinado. (Xie, 2021a)

En este contexto, tanto por los requerimientos normativos como por las complejidades de los diseños, las empresas manufactureras de tubulares presentan procesos de validación y verificación (V&V) de sus productos que combinan métodos analíticos tradicionales, técnicas modernas de simulación numérica con elementos finitos (FEA) y ensayos de calificación a plena escala en laboratorio (FST), pero que, incluso luego de todas esas evaluaciones, se pueden obtener resultados no esperados durante la operación en campo (Pattillo, 2018a)

En contraparte, los datos y experiencias de uso de estos tubulares que día a día generan las operadoras en las actividades de E&P ya están siendo utilizados en sus centros de operación en tiempo real (RTOC) con cada vez mayores capacidades analíticas, para eficientizar procesos de perforación y producción (Wang & Stewart, 2022). A pesar de ello, esta información no termina retroalimentando aguas arriba los procesos de desarrollo de productos tubulares, no siendo masivamente utilizada en ninguna de las etapas de V&V para análisis de interpolación o extrapolación de diseños de conexiones roscadas. (American Petroleum Institute, 2017). Annex F. Product Line Validation (pp. 183 -190)

En resumen, en los procesos de V&V de productos para la Exploración & Producción (E&P) de Petróleo y Gas se observa:

- Alto componente de estandarización (normas [API](#)³ y [ISO](#)⁴);
- Proyectos de desarrollo y calificación de productos con alto costo (de 250,000 a 1,25 millones de dólares) y “time to market” prolongado (6 a 9 meses);
- Modelos analíticos y numéricos simplificados, con limitaciones para capturar el comportamiento real de los sistemas físicos,
- Ensayos a plena escala extensivos, exigentes, pero poco representativos de la realidad (una probeta, peor cruce de tolerancias sometida a todas las condiciones de operación),
- Limitado uso de datos de la operación por parte de los fabricantes de tubulares para interpolar/extrapolar diseños o validar la performance de sus productos.

Los beneficios que se esperan de este estudio y que justifican esta investigación, esperamos que impacten en primera instancia a las empresas manufactureras de tubulares. Eventualmente, estos

³ API: American Petroleum Institute

⁴ ISO: International Organization for Standardization

beneficios se podrían extender a las operadoras, permeando en toda la cadena de valor de la industria. A saber:

1. Reducción de costos y time to market para las empresas manufactureras de tubulares, por mejores herramientas para optimizar el desarrollo de sus productos e interpolar/extrapolar diseños;
2. Reducción o complementariedad a los requerimientos de los estándares de la industria por parte de las operadoras, modificando protocolos de evaluación en términos de cantidad de probetas, cruce de tolerancias o secuencias de ensayo;
3. Dar los primeros pasos en una metodología que, con las modificaciones industriales pertinentes, permita pasar del laboratorio a la producción, generando un tubular “más inteligente”. Esto incrementaría el valor hacia las operadoras, permitiendo generar un ecosistema digital alrededor de los tubulares que integre los distintos participantes de la cadena de valor de la industria (manufactureras de tubulares, accesorios y equipos, operadoras y empresas de servicios)

1.2. Preguntas de investigación

Ante este escenario, nuestra investigación se propone responder las siguientes preguntas:

- *¿Cómo el uso de gemelos digitales puede transformar y hacer más eficientes los procesos de validación y verificación (V&V) de productos para la Exploración & Producción (E&P) de Petróleo y Gas?*
- *¿Cuál es el estado del arte en el uso de gemelos digitales en procesos de V&V de productos en la industria?*
- *¿Cuáles son los principales desafíos y/o barreras que pueden limitar la adopción de gemelos digitales en procesos de V&V de productos para la E&P de Petróleo y Gas?*

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Identificar las oportunidades y los desafíos de implementar el uso de Gemelos Digitales en los procesos de V&V de productos para la E&P de Petróleo y Gas.

1.3.2. Objetivos Específicos

- **Objetivo 1:** Entender a Digital Twins como tecnología y su aplicación actual en el Petróleo y gas.
- **Objetivo 2:** Investigar el uso de Digital Twins en la gestión del ciclo de vida de los productos manufacturados (PLM), en particular en las etapas de desarrollo de nuevos productos (NPD) y en específico en procesos de validación y verificación (V&V). Recopilar casos de uso en la industria y estudios en ambiente académico,
- **Objetivo 3:** Describir los procesos de V&V de productos usados para la E&P de Petróleo y Gas, identificando requerimientos, metodologías y problemáticas actuales de la industria.
- **Objetivo 4:** Clasificar y analizar la data recopilada. Benchmark entre casos de uso, identificando principales variables y factores comunes para la implementación exitosa.
- **Objetivo 5:** Discusión y análisis. Identificar beneficios esperados y posibles barreras para su concreción. Delinear una propuesta de implementación de Digital Twins en los procesos de V&V de productos para la E&P de petróleo y gas.

1.4. Marco Conceptual

Esta investigación se centra en la posibilidad del uso de tecnología para construir “probetas digitales gemelas” durante ensayos a plena escala en ambiente de laboratorio, que aumente el conocimiento de los fabricantes de tubulares de la performance de sus productos, retroalimentando el proceso de desarrollo y acelerando los proyectos de calificación con los clientes.

Para ello, partiremos por entender los gemelos digitales como tecnología y su aplicación actual en toda la cadena de valor de la industria del petróleo y gas. Luego, recopilaremos casos de uso industrial y estudios académicos de gemelos digitales en procesos de V&V de producto de otras industrias que tomaremos como referencia.

Toda esta data recopilada de casos de uso y estudios académicos será clasificada, procesada y analizada con el fin de determinar ejes primarios para la construcción de un benchmark que nos permita identificar factores comunes de éxito para la implementación de gemelos digitales en procesos de V&V de “productos tangibles”.

A partir de mi experiencia de más de 15 años como mánager de producto en [Tenaris](#) y antes de avanzar en la proposición de un roadmap para la implementación de gemelos digitales en esta industria (situación “to-be”), considero de relevancia describir las conexiones roscadas en tubulares y sus procesos de validación y verificación actuales (situación “as-is”). Tipos de conexiones, detalles de métodos de evaluación (analíticos, numéricos y a plena escala) y criterios de interpolación y extrapolación deben ser revisados.

Con toda esta información debidamente clasificada y organizada, nuestro objetivo será delinear un roadmap para la implementación exitosa de

gemelos digitales en los procesos de V&V de productos para el Upstream, apalancándonos de las experiencias en otras industrias.

1.5. Metodología de investigación

Para el desarrollo de esta tesis se utilizará mayormente un **paradigma de investigación cualitativo**, haciendo foco en la identificación y descripción del uso actual de gemelos digitales en procesos de V&V de productos en industrias que identificaremos como afines, las cuales tomaremos como referencia. Sin embargo, es importante destacar que incorporaremos algunos elementos cuantitativos como la presentación y análisis de encuestas realizadas por consultoras sobre niveles de adopción de gemelos digitales en distintas industrias, o referencias cuantitativas en términos del impacto del uso de esta tecnología en variables de los procesos bajo estudio, como costos y tiempos de ejecución de proyectos de desarrollo y calificación de productos.

Por otra parte, la investigación que se llevará a cabo será del **tipo descriptiva**. Consideramos que este tipo de investigación es la que mejor se adapta para el objetivo de esta tesis. (Best, 1988) se refiere a la investigación descriptiva como aquella que minuciosamente interpreta lo que es. Está relacionada a condiciones o conexiones existentes, prácticas que prevalecen, opiniones, puntos de vista o actitudes que se mantienen, procesos en marcha, efectos que se sienten o tendencias que se desarrollan. En línea con este enfoque, se realizará una recopilación, revisión y análisis a partir del relevamiento de material bibliográfico tanto del ámbito académico como de la industria, apuntando a tomar en todos los casos una ventana temporal de no más de 5-6 años (2017 a la fecha) para capturar los avances más recientes de esta tecnología.

Para complementar y enriquecer el relevamiento de datos de fuentes secundarias, haremos una investigación de campo, relevando opiniones e insights de referentes y contactos nacionales e internacionales dentro

de la industria del petróleo y gas, con distintas posiciones dentro de la cadena de valor. Utilizaremos para esto un modelo de encuesta, diseñando un cuestionario que capture información relevante en términos del conocimiento de la tecnología y el estado del arte de su implementación en su área de aplicación. Adicionalmente se pueden sumar algunos profesionales de ingeniería en la industria aeroespacial y eventualmente expertos en sensorización y modelado numérico.

La cantidad de recursos cualitativos bajo análisis (i.e. casos, estudios, entrevistas y encuestas) se determinará hasta lograr saturación.

A modo de resumen y en términos de las **técnicas e instrumentos de recolección de datos** que utilizaremos para el desarrollo de esta tesis consideraremos:

- Fuentes de datos secundarias:
 - **Revisión y análisis bibliográfico.** Se realizará una revisión de la literatura disponible para un mejor entendimiento de “Digital Twins” como tecnología, su estado del arte y su aplicación en la industria.
 - **Análisis documental:** Estudios, papers, casos, revistas, jornales y actas de conferencias, con referencias a casos de uso en la industria o estudios académicos sobre el uso de “Digital Twins” en procesos de V&V serán material de consulta, análisis y clasificación, con el fin de identificar factores comunes para la implementación exitosa, beneficios esperados y obstáculos.
 - **Encuestas y estadísticas de consultoras reconocidas.** Se utilizarán estos instrumentos para describir el estado de adopción y las tendencias de uso los gemelos digitales en los procesos de V&V de distintas industrias con productos nativamente “físicos” y variables económicas relacionadas con la aplicación de esta tecnología en ambientes industriales.

- Fuentes de datos primarias:

En este apartado se propone utilizar, fundamentalmente, un **cuestionario** (tipo encuesta “Google Forms”). El público objetivo comprenderá primariamente a profesionales especialistas de la industria del petróleo y gas, en diferentes roles y empresas dentro de la cadena de valor:

- Fabricantes de tubulares;
- Operadoras;
- Proveedoras de servicios;
- Laboratorios de ensayo y entes certificadores.

En menor medida y en función de los avances de la investigación se podrán consultar profesionales de la ingeniería con expertise comprobable en:

- Industria aeroespacial, aviación y eólica;
- modelado numérico;
- sensores e instrumentos de medición;



Universidad de
San Andrés

2. Gemelos digitales: La tecnología y su uso actual en el petróleo y gas.

2.1. Un primer panorama. Introducción.

La volatilidad histórica del mercado del petróleo y el gas (O&G), la disminución de la demanda observada durante la pandemia del COVID-19 y la tendencia creciente en el uso de recursos renovables y energías más limpias están impulsando cada vez más la necesidad de innovación y digitalización en la industria del O&G (Elijah et al., 2021).

En este sentido y con el advenimiento de la industria 4.0, el sector del petróleo y el gas ahora está considerando una gama más amplia de tecnologías para mejorar la productividad, la eficiencia y la seguridad de sus operaciones al tiempo que minimizan costos de capital (CAPEX) y operativos (OPEX), riesgos para la salud y el medio ambiente, y la variabilidad en los ciclos de vida de los proyectos de exploración y producción (Wanasinghe et al., 2020). Reportes y revistas especializadas estiman, por ejemplo, que el uso de tecnología puede reducir costos de producción hasta en un 20% y alcanzar ahorros en OPEX y CAPEX en el sector del Upstream del orden de los 100 billones a 1 trillón de dólares⁵ para el 2025 (Shane McArdle, 2021).

Dentro del lote de tecnologías emergentes que apalacan la industria 4.0, los gemelos digitales (de ahora en más identificados con las siglas “DT” en este documento por su nombre en inglés “Digital Twins”) son la base para la próxima generación de sistemas de optimización y monitoreo de producción en tiempo real, constituyéndose en una solución para aumentar la productividad del sector del petróleo y gas, combinando información, simulación y visualización de datos a través de toda la cadena de valor de las empresas operadoras (Sircar et al., 2022).

⁵ Ésta y todas las cifras económicas de este documento serán expresados en escala numérica corta (Estados Unidos).

Como ya desarrollaremos, la idea de los DT no es nueva y ya tiene 20 años desde su introducción, pero, los relativamente recientes avances en las tecnologías de la información y comunicación hacen que la implementación de los DT sean el próximo paso natural en la aplicación de tecnologías de simulación para la resolución de complejos problemas de negocio, combinando métodos numéricos tradicionales con data operacional en tiempo real (Cameron et al., 2018).

Debido a las variadas ventajas y aplicaciones de los DT, su adopción en diferentes sectores se ha acelerado en años recientes. El tamaño del mercado mundial de gemelos digitales se valoró en 11120 millones de USD en 2022, es actualmente de 16750 millones de USD en 2023 (1,5x YoY) y se prevé que crezca a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 37,5 % entre 2023 y 2030. (Grand View Research, 2023)

Mas allá de los citados beneficios esperados y de las expectativas de crecimiento de mercado global de DT, también existe un consenso en la academia y en la industria de que **la adopción tecnológica en general, y de DT en particular, en la industria de petróleo y gas ocurren a un ritmo más lento en comparación con otras industrias** (Wanasinghe et al., 2020) y (Shane McArdle, 2021). Este retraso en la implementación en el O&G, relativo con otras industrias puede inferirse de la **Fig. 1.**, en donde verticales como la manufacturera, automotriz, aviación y aeroespacial ó salud se perciben más adelantadas y con mayor masividad en su uso.

Industry	Google search string
Manufacturing	“digital twin” AND “manufacturing”
Automotive	“digital twin” AND “automotive”
Aviation	“digital twin” AND (“aviation” OR “aerospace”)
Healthcare	“digital twin” AND “healthcare”
Retail	“digital twin” AND “retail”
Oil and Gas	“digital twin” AND “oil and gas”

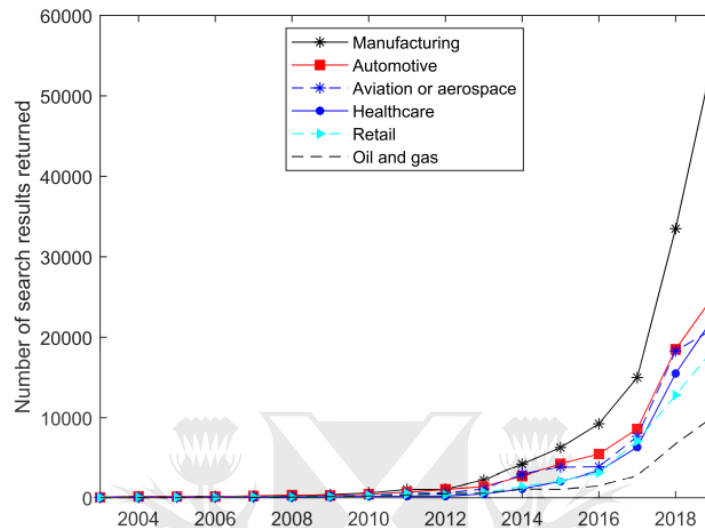


Fig. 1: Comparativa de resultados de búsquedas relacionadas a DT en Google, por industria y año. Fuente (Wanasinghe et al., 2020)

Para dimensionar la penetración en la industria, una buena referencia podemos tomarla de (Lo et al., 2021), quien de su búsqueda académica identificó que **más del 50% de las referencias bibliográficas encontradas se corresponden con aplicaciones en la industria de manufactura**, cuyas investigaciones se centran en la simulación y optimización de procesos de producción y en el monitoreo y pronóstico de vida útil de máquinas-herramientas. En el resto de las verticales, las referencias de uso de gemelos digitales se identifican bastante atomizadas, tal cual puede verse en la **Fig. 2**. La aplicación en las tecnologías de información y comunicación (TIC) y en la construcción de edificios y ciudades inteligentes lo siguen, alcanzando solamente un 9% cada segmento. Puntualmente **el segmento de energía, que incluye a la industria del O&G, contribuye tan solo con un 4% de referencias de uso, principalmente centradas en el monitoreo de sistemas de energía, el diagnóstico de fallos (parques eólicos, sistemas fotovoltaicos) y la optimización de la operación de centrales eléctricas.**

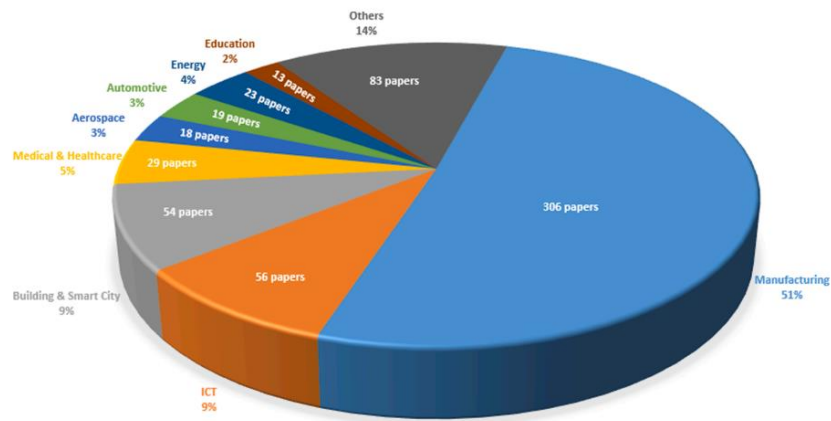


Fig. 2: Distribución en términos de áreas de investigación en el uso de DT. Fuente: (Lo et al., 2021)

2.2. Gemelos digitales: Definiendo el término y conceptos relacionados.

La idea de un gemelo digital no es nueva, ya que la disciplina de simulación en ingeniería tiene al menos 30 años. Incluso se dice que tiene orígenes anteriores, con raíces en las misiones de la NASA del programa Apollo en 1960s (Cameron et al., 2018). El concepto, como tal, fue introducido por primera vez en 2002 por el **Dr. Michael Grieves** en una presentación de la Universidad de Michigan a la industria, para la formación del centro de gestión del ciclo de vida de producto. Allí, aunque sin su nombre actual, ya mostraba un modelo con todos sus componentes, el espacio real, el espacio virtual y el enlace para el flujo de data bidireccional entre ambos espacios, “espejándolos”. (Grieves, 2016)

Hubo muchas definiciones utilizadas para describir este modelo hasta que la NASA en 2010 empleó el término “Digital Twin” en el reporte del Área de Tecnología 12⁶. Desde allí, el concepto “Gemelo Digital” fue ampliamente aceptado y utilizado para representar la tecnología que duplica y vincula los objetos físicos y los modelos digitales. El primer

⁶ “NASA Technology Area 12: Materials, Structures, Mechanical Systems, and Manufacturing Road Map”: Documento que describe la dirección estratégica y los objetivos para el avance tecnológico en varios campos relacionados con materiales, estructuras, sistemas mecánicos y procesos de fabricación.

artículo relacionado con los DT se publicó en 2011 y el número de investigaciones ha crecido rápidamente en los últimos años y se ha expandido a diferentes áreas. La empresa asesora líder en el mundo, Gartner, elevó el Gemelo Digital como una de las diez tecnologías estratégicas principales en sus informes anuales de tendencias industriales desde 2017 hasta 2019. (Lo et al., 2021)

En toda esta evolución del concepto, diferentes investigadores e instituciones han adoptado distintas definiciones del término y muchas de las referencias bibliográficas consultadas incluso han listado un compendio de definiciones encontradas en la literatura (Wanasinghe et al., 2020, sec. III.A). Para referenciar una definición “moderna” y actualizada del término DT, en nuestro caso nos parece apropiado tomar como referencia a líderes de la industria y la consultoría como son IBM y Gartner, respectivamente:

IBM en su web page enuncia (IBM, 2023):

“Un gemelo digital es una representación virtual dinámica de un objeto o sistema físico que abarca su ciclo de vida, se actualiza a partir de datos en tiempo real y utiliza simulación, aprendizaje automático y razonamiento para ayudar en la toma de decisiones”.

Por su parte, la empresa consultora y de investigación de las tecnologías de la información Gartner enuncia en su glosario (Gartner, 2023):

“Un gemelo digital es una representación digital de una entidad o sistema del mundo real. La implementación de un gemelo digital es un objeto o modelo de software que refleja un objeto físico, proceso, organización, persona u otra abstracción únicos”

En este abanico de definiciones aparecen conceptos interrelacionados, que cubren diferentes clasificaciones. En ese sentido, **una clasificación de los gemelos digitales cubre el tipo y dirección del flujo de información entre el activo físico y el entorno digital**, diferenciando entre “**model**”, “**shadow**” y “**twin**”. Bajo esta clasificación, se asume que los modelos proporcionan visualización de un sistema físico sin flujo automático de datos entre los dos. Las sombras digitales, por su parte, toman información en tiempo real sobre el sistema físico para presentar una interfaz virtual en un entorno simulado. Los gemelos digitales cierran el ciclo de retroalimentación al combinar modelos y sombras digitales con el fin de complementar, interpretar y actuar sobre el activo físico (**Fig. 3**). (Somers et al., 2023)

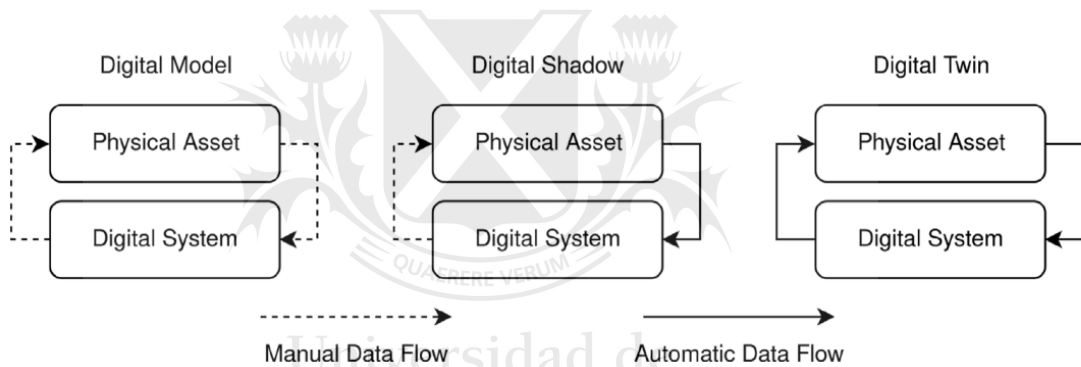


Fig. 3: Diferencias entre Digital Model, Shadow y Twin por tipo y dirección del flujo de la información Fuente: (Somers et al., 2023)

Siguiendo esta línea y basándose ahora en su salida funcional, algunos autores (Eyre Jonathan et al., 2021) proponen una clasificación para los gemelos digitales en tres categorías: **Supervisión, Predictiva e Interactiva**. Esta segmentación, en orden creciente de complejidad, se apalanca en el alcance del output del entorno digital sobre el activo físico y se explica a continuación (Somers et al., 2023):

- Supervisión: Los gemelos digitales de supervisión aceptan datos del activo físico para proporcionar información a un observador humano, permitiéndoles actuar (analógicamente) en función de esta información. La salida funcional para esta clasificación de

gemelo digital (o mejor identificado como “sombra digital”) es simplemente información visual.

- Predictiva: Los gemelos digitales predictivos pronostican los estados futuros de los sistemas utilizando información recopilada en tiempo real, así como información adicional e inferencias de contexto, basadas en modelos físicos o de datos. Este es un tipo de gemelo digital más complejo que el de Supervisión, ya que monitorea información de estado en función del tiempo para proporcionar información mejorada y predicciones sobre la condición del activo físico, como advertencias y/o recomendaciones, ya sea a un observador humano o a otro sistema digital.
- Interactiva: Los gemelos digitales interactivos cierran el ciclo de retroalimentación al utilizar los datos recopilados del activo físico para realizar cambios en el sistema de manera evolutiva en el tiempo, basados en sus estados actuales e históricos. Los gemelos digitales interactivos tienen una salida funcional que puede afectar al activo físico, de ahí que también se lo denomina “digital master”.

Aunque existe cierta superposición entre las tres categorías, un gemelo digital debiera clasificarse según una salida funcional más compleja, considerando al supervisor como el más simple y al interactivo como el más complejo, disminuyendo así el nivel de juicio humano requerido y permitiendo una mejor automatización de los sistemas (**Fig.4**)

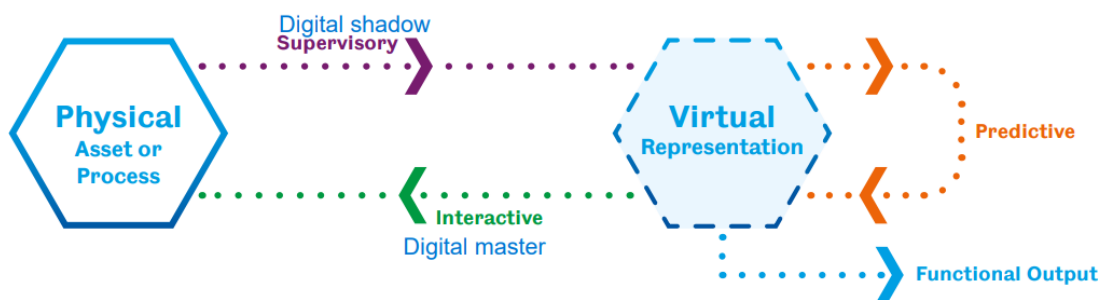


Fig. 4: Clasificación de los gemelos digitales en términos de su salida funcional.
Fuente: (Eyre Jonathan et al., 2021)

Por otra parte, en su concepción, McKinsey conceptualiza el diseño de los gemelos digitales dentro de un espacio tridimensional, tal cual puede verse en la **Fig. 5.** (Brossard et al., 2022)

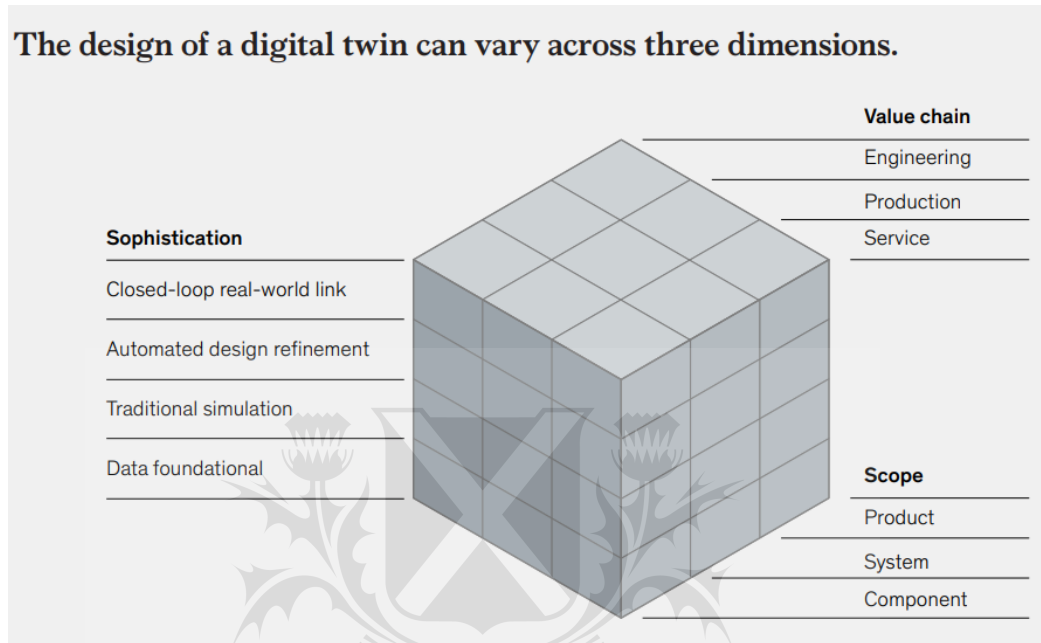


Fig. 5: Gemelos digitales y su espacio tridimensional. Fuente: (Brossard et al., 2022)

La primera dimensión considera las etapas dentro de la **cadena de valor** que el gemelo digital abarcará, separando a nivel macro en etapas de *Ingeniería* (desde la definición de producto hasta la ingeniería en detalle), *Producción* (manufactura y calidad) y *Servicio* (producto en uso). Los gemelos digitales más sofisticados abarcan múltiples partes de la cadena de valor, permitiendo que los datos en servicio optimicen los procesos de fabricación o las futuras iteraciones de diseño.

La segunda dimensión es el **alcance** del gemelo digital. Un producto puede consistir en varios sistemas principales, múltiples subsistemas y cientos o miles de componentes de hardware y software. Dadas las limitaciones en la capacidad de cómputo, por lo general, cuanto más estrecho sea el alcance de un gemelo digital, más precisa será su réplica virtual. En contraste, los gemelos digitales de productos completos a

menudo necesitan abstraer o simplificar ciertos comportamientos del producto para mantenerlos manejables.

La dimensión final de un gemelo digital es su **grado de sofisticación**. Aquí McKinsey propone cuatro escalas de complejidad. Los gemelos digitales más simples consisten en diversas fuentes de datos relacionados con el activo real, a menudo provenientes de fuentes que tienen pocas o ninguna conexión entre sí. El segundo nivel de sofisticación utiliza herramientas de simulación tradicionales para realizar análisis del rendimiento del diseño e integrar las diversas fuentes a través de un sistema PLM u una plataforma similar. En el tercer nivel de sofisticación, un gemelo digital utilizará análisis predictivos o prescriptivos, así como tecnología de aprendizaje automático, para ejecutar refinamientos de simulación automatizados y generar nuevos conocimientos, los cuales facilitarían la toma de decisiones de los equipos. En el último nivel de sofisticación, los gemelos digitales utilizan predicciones de probabilidad de falla de componentes o variaciones de rendimiento para reaccionar ante entornos cambiantes y accionar sobre el mundo real en una configuración de bucle cerrado. (Brossard et al., 2022)

2.3. Gemelos digitales: Framework conceptual. Tecnologías

Para profundizar el entendimiento de los gemelos digitales, son ampliamente utilizados *frameworks* conceptuales que describen las etapas para su diseño y las tecnologías facilitadoras que intervienen en su ejecución. Dichos marcos conceptuales comienzan con modelos sencillos de tres componentes que contemplan el espacio físico, el virtual y sus conexiones hasta modelos más complejos de hasta cinco componentes y seis etapas de proceso (Wanasinghe et al., 2020). Citaremos en este trabajo este último caso, desarrollado originalmente por la consultora Deloitte (Aaron Parrott & Dr. Lane Warshaw, 2017) y que se reproduce en la **Fig.6**

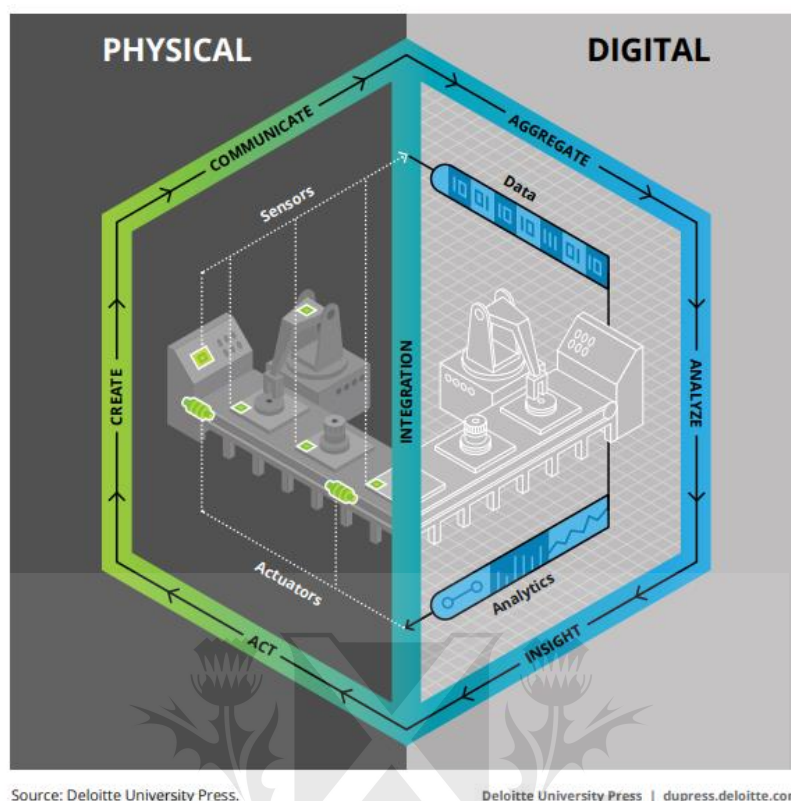


Fig. 6: Modelo Conceptual de Gemelo Digital para proceso de Manufactura. Fuente (Aaron Parrott & Dr. Lane Warshaw, 2017)

Tal cual puede verse, a pesar de estar desarrollado para proceso manufacturero, es fácilmente extrapolable a cualquier industria y sirve para conceptualizar los componentes, etapas y tecnologías que intervienen en la creación de un gemelo digital. Para comenzar, los sensores y actuadores están ubicados en el espacio físico mientras que los datos y su correspondiente análisis se llevan a cabo en el espacio virtual (digital). La línea vertical entre los dominios físico y digital está representada por las tecnologías de integración (Wanasinghe et al., 2020)

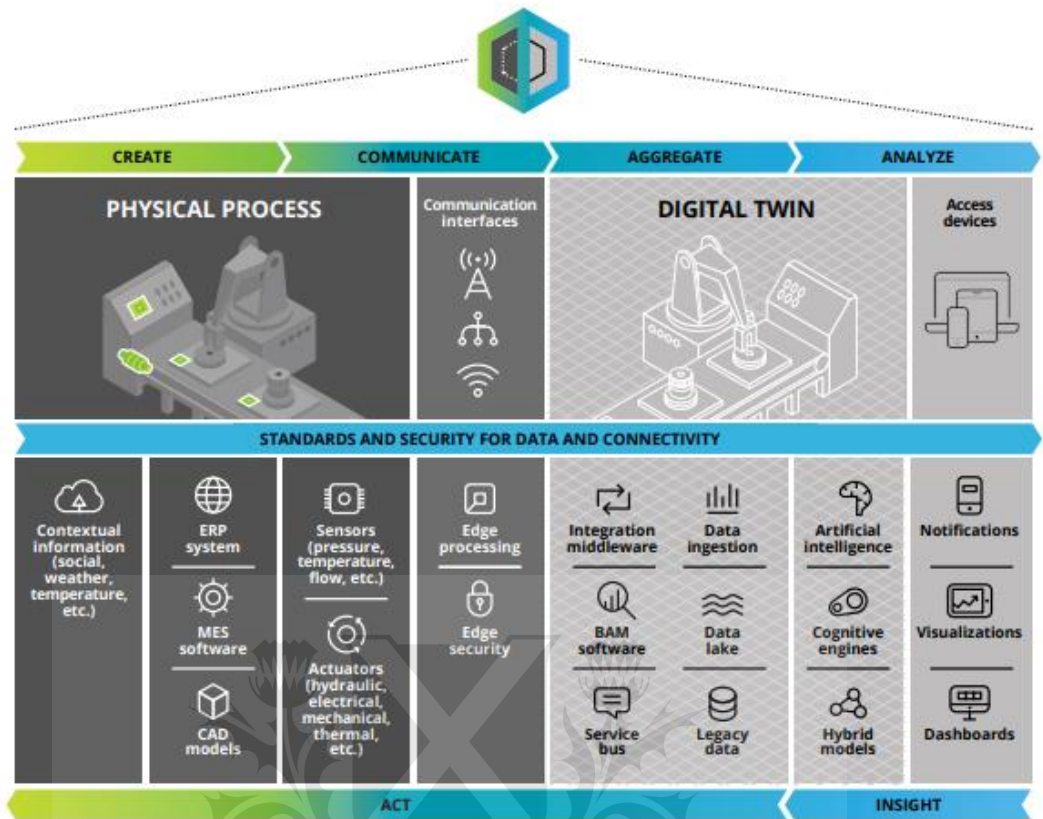
Los **sensores** permiten al gemelo capturar **datos** operativos y de contexto relacionados con el proceso físico en el mundo real. Estos datos se combinan y consolidan con datos de negocio, provenientes de la empresa, otros procesos dentro de la cadena de valor o terceros. Los sensores comunican los datos al mundo digital a través de **tecnologías de integración**. Las técnicas de **análisis de datos** combinan

simulaciones algorítmicas y rutinas de visualización, siendo utilizadas por el gemelo digital para producir *insights*. El lado digital del modelo per se es el **gemelo digital**, que integra los mencionados componentes en un modelo digital casi en tiempo real del mundo físico y el proceso. El objetivo de un gemelo digital es identificar desvíos y oportunidades para ahorrar costos, mejorar la calidad o lograr mayores eficiencias. La oportunidad identificada puede resultar en una acción en el mundo físico la cual se ejecuta a partir de **actuadores**, completando así una retroalimentación entre el mundo físico y digital y viceversa. (Aaron Parrott & Dr. Lane Warshaw, 2017)

Estos cinco componentes que constituyen al gemelo digital (sensores, datos, tecnologías de integración, analytics y actuadores) ejecutan seis pasos iterativos que se secuencian 1) crear/capturar información del mundo físico, 2) comunicarla, 3) consolidarla, 4) analizarla y modelarla construyendo escenarios “what-if?”, 5) generación de *insights* que aumentan el entendimiento del proceso y 6) actuar, tomando acción nuevamente en el mundo físico, conformando un loop físico-digital-físico (Wanasinghe et al., 2020).

La implementación exitosa de DT requiere que ejecuten estos pasos de forma rápida, confiable y segura, y para ello es clave combinar diferentes tecnologías que pueden soportar el flujo de datos en tiempo real e información de operación entre el activo físico y gemelo digital (Elijah et al., 2021).

En este sentido, tecnologías como Internet of Things (IoT/IIoT), Cloud y Edge Computing, Big Data, Inteligencia Artificial (IA), Machine Learning (ML) y Realidad Virtual/Aumentada (VR/AR) son claves para el armado de un ecosistema digital que sustenta la construcción del gemelo digital, tal cual puede verse en la **Fig. 7** (Aaron Parrott & Dr. Lane Warshaw, 2017)



Source: Deloitte University Press.

Deloitte University Press | dupress.deloitte.com

Fig. 7: Arquitectura de tecnologías para la implementación de DT. Fuente (Aaron Parrott & Dr. Lane Warshaw, 2017)

2.4. Gemelos digitales: Aplicaciones en Petróleo y Gas

La tecnología de los gemelos digitales ha encontrado su aplicación en diferentes industrias, apalancadas por las necesidades de la transformación digital que las atraviesa. Los estudios y relevamientos realizados por la academia han identificado de diez a trece sectores industriales principales donde se están aplicando la tecnología de los gemelos digitales, tal cual se identifica en la **Fig. 8**. Las aplicaciones en productos y procesos son diversas, identificándose primariamente en actividades de simulación, monitoreo y control, y secundariamente, en etapas de diseño, validación, optimización, predicción y mantenimiento. (Singh et al., 2022)

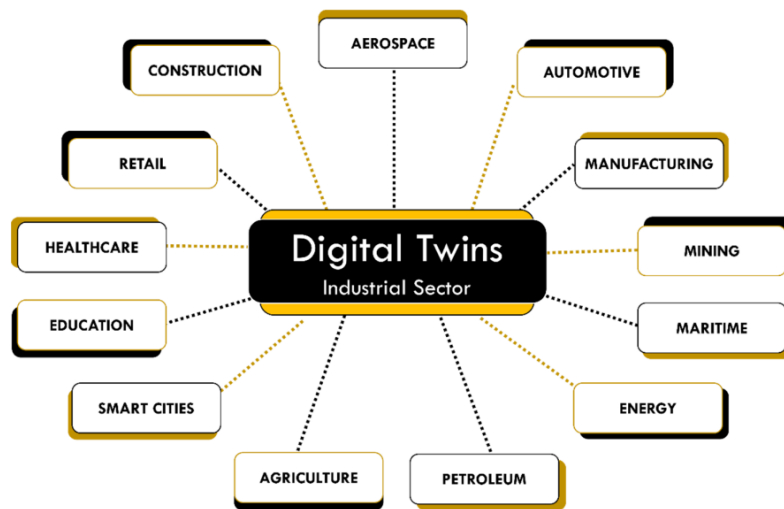


Fig. 8: Diferentes sectores industriales donde los gemelos digitales han encontrado casos de uso. Fuente (Singh et al., 2022)

En particular, existen múltiples ámbitos de la industria de los hidrocarburos donde la digitalización y los modelos de gemelos digitales podrían resultar altamente productivos (Sircar et al., 2022). Dentro de la industria del O&G, las tecnologías que impulsan la industria 4.0 tienen amplias posibilidades de potenciar las operaciones de los “yacimientos inteligentes” en el Upstream, los “oleoductos inteligentes” en el Midstream y de las “refinerías inteligentes” en el Downstream (Elijah et al., 2021).

Puntualmente en relación con el uso de DT, y considerando el ciclo completo del Upstream, Midstream y Downstream, se identifican usos primarios 1) **actividades de monitoreo y mantenimiento de activos**, 2) **planificación y gestión de ciclo de vida de proyectos**, 3) **perforación** y 4) **monitoreo de operaciones y infraestructuras de plataformas offshore**. En mucho menor medida se verifican aplicaciones en tareas de entrenamiento o colaboración virtual, comisionado remoto, y monitoreo de tuberías de transporte. Un resumen de estos findings en la literatura puede encontrarse en la **Fig. 9** (Wanasinghe et al., 2020)

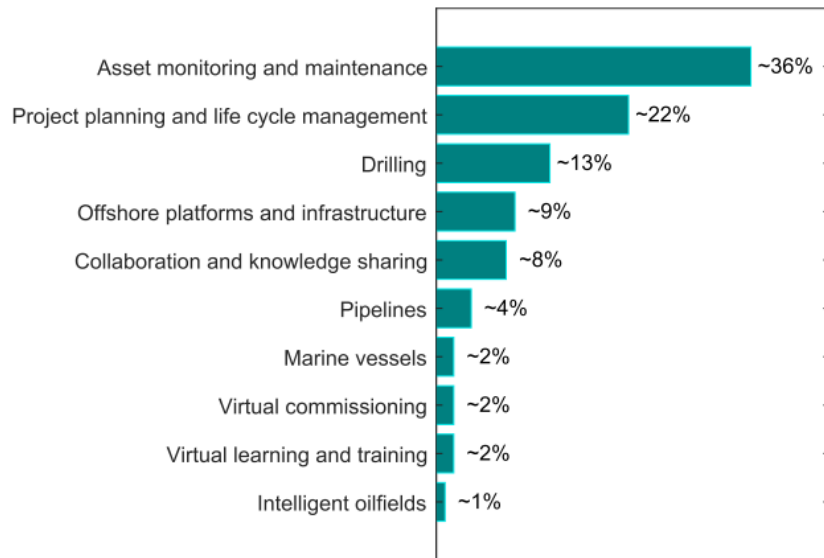


Fig. 9: Top Ten de usos de DT en la Industria del O&G. Fuente (Wanasinghe et al., 2020)

Para empezar a hacer foco en el sector del **Upstream**, consideramos relevante primero entender que actividades incluye. El Upstream es la primera fase en el ciclo de vida de O&G e incluye la exploración y desarrollo de los proyectos (Exploration); la perforación y completación de pozos (Drilling & Completion); la producción de los pozos y su optimización (Production); y la ingeniería integral de los yacimientos, controlando sus operaciones (Oilfield Operations) (Elijah et al., 2021).

Debido a los peligros subyacentes de HSE (salud, seguridad y medio ambiente) asociados con la **exploración, perforación y producción del petróleo y gas**, es un sector altamente regulado. Consecuencia de esto, la industria está recurriendo a DT para, además de aumentar la productividad y la eficiencia operativa, reducir riesgos de HSE y mejorar la conformidad con estas regulaciones (Sircar et al., 2022)

El uso de un DT en la **perforación de pozos**, que combina datos digitales y físicos en tiempo real con análisis predictivo y mensajes de diagnóstico, aumenta la planificación de operaciones de perforación y precisión en la toma de decisiones. Estos sistemas comparan los datos del pozo con los

datos medidos en tiempo real con el DT, simulando y visualizando de forma online para diagnosticar automáticamente dificultades durante la perforación, identificar problemas en adelanto y tomar acciones de contingencia. Por su parte, el uso de gemelos digitales en la **etapa de producción de petróleo y gas** no es solo el modelo tridimensional típico (léase entidad física, entidad virtual y sus conexiones), sino también la combinación de nuevas tecnologías para conformar un ecosistema con nuevas formas de comunicación entre los actores dentro de la cadena de valor, nuevos servicios y hasta nuevos modelos de negocio (Sircar et al., 2022)

2.5. Casos de uso en el Oil & Gas. Una primera revisión.

Para complementar los estudios académicos, es interesante identificar casos prácticos de uso en donde empresas del sector del O&G están creando valor a partir de la implementación de proyectos de DT. Aunque aún no se observa un uso incipiente, y tal cual mostramos, el ámbito del O&G viene rezagado en comparación con otras industrias, existen algunos casos de uso y algunos esfuerzos privados para implementar gemelos digitales de forma intensiva.

La empresa de investigación noruega **DNV GL** emitió una llamada internacional a operadoras de petróleo y gas a poner a prueba si los datos generados por gemelos digitales son confiables y si la tecnología esta efectivamente está entregando valor. DNV GL está desarrollando y probando una metodología para la calificación de DT, con el fin de proporcionar esa seguridad y, en última instancia, fomentar una adopción más amplia de la tecnología en el sector del petróleo y el gas. Una asociación inicial con **TechnipFMC** condujo a la creación del piloto, que ahora está abierto a la industria en general. Actualmente, el uso de gemelos y la confiabilidad en su precisión está restringida por el hecho de que los datos que contienen no siempre reflejan la condición más actualizada del activo físico bajo modelo. (DNV GL Research Company, 2020)

En tanto, algunas petroleras líderes en el mundo ya están implementando nuevas tecnologías en sus operaciones y generando gemelos digitales de activos físicos. **Saudi Aramco**, por ejemplo, tiene un centro de innovación dedicado a la “Cuarta Revolución Industrial” (4IR), donde experimentan la aplicación de estas nuevas tecnologías para la transformación digital de sus procesos y operaciones. En tanto, **BP** desarrolló un sistema de vigilancia y simulación altamente sofisticado llamado APEX, que se ha implementado para crear modelos virtuales de todos sus sistemas de producción. APEX permite a BP planificar cambios e intervenciones en el gemelo digital antes de emplearlos en el mundo real. Como herramienta de vigilancia, identifica los problemas antes de que tengan efectos importantes en la producción y ya aportó valor económico cuantificable al negocio⁷. (Sircar et al., 2022)

Adicionalmente, también se identifican en algunos trabajos, casos de uso traccionados por empresas proveedoras de servicios en asociación con operadoras. Tales son los casos, por ejemplo, de **Emerson**, **Siemens**, **Honeywell** o **Kongsberg Digital** en asociación con Total, Aker BP, Lundin Energy Norway o Shell, respectivamente. Algunos detalles adicionales de estos casos se resumen en la **Tabla 1**. (Leblanc, 2020)

⁷ Solo en 2017, APEX entregó 30.000 barriles de petróleo /día adicionales a toda la cartera global de BP.

Vendor	Prime	Capability
Emerson	Total	An offline facility replica process and control simulator
Siemens	Aker BP	A data-driven, closed-loop approach to create a virtual proxy for much of the platform's infrastructure
Akselos	Shell	A finite element (FE) representation of the real-world asset
Aveva	Lundin Energy Norway	A composite twin representing a higher-level process, function or group of assets that combine several discrete twins
Honeywell	Lundin Energy Norway	A twin that integrates all condition monitoring systems into a unified platform
Kongsberg Digital	Shell	A fully-realized dynamic twin using an integrated facility informational model to build a virtual representation of plant and behavior
ANSYS, PTC ThingWorx, National Instruments, & Hewlett Packard Enterprise (HPE)	Flowserve	A simulation model of an operating pump for diagnosis and prognosis interrogation

Tabla 1: Casos de Implementación de DT combinando esfuerzos entre empresas proveedoras y operadores. Fuente (Leblanc, 2020)

2.6. Desafíos identificados para la implementación

Un gemelo digital en la industria del petróleo y gas es un sistema complejo y requiere la integración de una cartera de diferentes soluciones de probablemente múltiples proveedores. (Cameron et al., 2018). De la bibliografía consultada, es posible curar la siguiente lista de desafíos que se identifican como claves resolver para que los gemelos digitales cumplan el potencial:

- i. **Modelo de Negocio, Seguridad y Confidencialidad:** Es clave crear un modelo de negocio sustentable, con incentivos y comunicaciones claras para todos los actores. Las operadoras tienen fuertes incentivos para crear gemelos digitales de sus activos con fines de monitoreo y optimización. Los proveedores de servicios pueden verse beneficiados al usar data operacional de sus clientes. Sin embargo, se deben encontrar los mecanismos adecuados para que las retribuciones sean justas, las responsabilidades permanezcan claras y la seguridad en la

información que se transmite entre las partes se verifique (Cameron et al., 2018)

- ii. **Alcance y Foco:** Se requieren modelos “fit-for-purpose”, con distintos niveles de granularidad, que logren manejar distintas necesidades. Ahora bien, es clave encontrar el equilibrio entre modelos hipercomplejos y sobre simplificados. Con las capacidades tecnológicas a disposición, es posible concebir un DT extremadamente complejo que tenga como objetivo realizar “todo lo imaginable”. Pero un modelo complejo puede derivar en un número exponencialmente creciente de sensores en campo o capacidad de cómputo, lo cual limitará su usabilidad mientras elevará su costo. Por el contrario, los DT más simples brindan una visión limitada del activo físico, lo que puede requerir múltiples DT para la simulación completa del mismo activo. Como resultado, los DT pueden convertirse en otra colección de datos en silos y fuentes de información desagregada en lugar de un aliado digital útil. Debido a estos dos extremos, tanto operadores como proveedores y partners de servicios necesitan evaluar cuidadosamente los requisitos del DT para su organización (o proyecto) e implementarlo con una combinación óptima de foco y alcance. (Wanasinghe et al., 2020)
- iii. **Ciberseguridad:** Los activos conectados son vulnerables a los ciberataques. El sector de la energía se clasificó como la segunda industria más propensa a los ataques cibernéticos en 2016 con aproximadamente el 75% de las empresas de petróleo y gas de EE. UU al menos un incidente relacionado con la ciberseguridad. Manipular los parámetros de los sensores o actuadores pueden provocar fallas catastróficas. La severidad y vulnerabilidad del ciberataque difieren para las diferentes etapas del ciclo de vida de los proyectos en la industria del petróleo y gas. La perforación en exploración y las etapas de producción tienen una alta susceptibilidad a los ataques cibernéticos. Al considerar la

combinación de vulnerabilidad y severidad con respecto a los DT, la ciber-amenaza requiere una mayor atención por parte de las empresas. Es necesario implementar protocolos avanzados de ciberseguridad para proteger las instalaciones físicas y virtuales contra ataques cibernéticos (Wanasinghe et al., 2020).

- iv. **Usabilidad y Funcionamiento:** Un DT normalmente recopila una gran cantidad de datos sin procesar del activo bajo estudio, que se procesa para generar conocimientos (información). Los operadores y usuarios especializados, sin embargo, deberían ser capaces de acceder a la información que necesita de forma rápida, sencilla y sin distracciones o excesos de información. Por lo tanto, el diseñador del gemelo digital debe comprender sus requisitos antes de diseñar el DT, dando a los operadores la posibilidad de personalizar el proceso de visualización para que puedan seleccionar la información de mayor interés minimizando interferencias (Wanasinghe et al., 2020)

- v. **Integración y falta de estandarización:** Un gemelo digital está compuesto por múltiples fuentes de datos y modelos de simulación. Una compañía operadora deberá lidiar con múltiples plataformas proveedoras, tanto propietarias como de código abierto. ¿Como integrarlas de forma consistente, segura y confiable? Si bien los datos son la columna vertebral de DT, los datos existentes en campo normalmente no siguen un estándar común y pueden presentarse de diferentes formas (no estructurados, semiestructurados o estructurados). Más aún, plataformas de integración de datos de diferentes proveedores también siguen diferentes estándares y métodos para presentar sus datos. Además, los datos existentes normalmente no están vinculados a una base de datos común y, a menudo, se almacenan en lugares dispares. Estos factores dificultan la integración, en tiempo real y en un único módulo de análisis de datos. Como resultado, se requiere un intérprete intermedio para convertir estos datos de

diferentes fuentes y formatos en una fuente única y estandarizada que el DT pueda acceder e interpretar. (Wanasinghe et al., 2020)

- vi. **Mantenimiento:** Un gemelo digital es un complejo sistema que combina hardware y software. ¿Como ejecutar el mantenimiento de manera efectiva en términos de calidad y costos?

El desarrollo de un DT para una instalación de O&G comienza con un estudio preliminar del sitio y evoluciona a través del ciclo de vida de los proyectos (exploración, desarrollo, operación y abandono). Luego de la etapa de abandono del pozo, el gemelo digital resultante estará disponible para nuevos proyectos. Esto implica tanto que las herramientas de software, la infraestructura de hardware, sensores y actuadores como también la data recabada en todo el ciclo de vida de los activos (mediciones, simulaciones, modelos, anomalías, medidas correctivas, parámetros operativos óptimas) necesitan ser mantenidos a lo largo del ciclo de vida del activo e incluso después de que el activo haya sido dado de baja, conservando de esta manera el conocimiento en la empresa. Esto debe ser tenido en cuenta tanto en términos de recursos humanos como en costos. (Wanasinghe et al., 2020)

- vii. **Recursos de cómputo:** Un gemelo digital requerirá recursos computacionales extensivos, combinados tanto en el borde (edge computing) como en la nube (cloud computing) o incluso on-premise. La orquestación de esta infraestructura híbrida requiere un correcto diseño, dimensionamiento y mantenimiento. (Cameron et al., 2018)

- viii. **Limpieza y Almacenamiento de Datos:** Los sensores dispuestos en los activos generan un gran volumen de datos (Big data). Estos datos suelen estar dañados con ruido (sistemático o asistemático) y deben limpiarse antes de usarse para alimentar cualquier simulación o modelo. Además, estos datos deben almacenarse

para su uso futuro, lo que requiere que el “Datawarehouse” y/o el “Data Lake” estén bien mantenidos. Estos reservorios de datos deben estar protegidos contra ataques cibernéticos, deben estar bien organizados para garantizar un acceso rápido, y deben estar asegurizados con protocolos de identificación, para evitar el acceso no autorizado y modificaciones. (Wanasinghe et al., 2020)

- ix. **Precisión y validación del modelo ciencia de datos:** Es clave el seteo de métodos efectivos para el control del ajuste del modelo con la realidad y la gestión de la precisión del modelo analítico.(Cameron et al., 2018)

- x. **Innovación incremental o disruptiva:** Las principales operadoras y proveedores de servicios de la industria del petróleo y gas están invirtiendo fuertemente en nuevas tecnologías digitales. A pesar de esto, en lugar de generar disrupciones en sus operaciones con significativos impactos en sus métricas de negocio, muchas de estas tecnologías se agregan de forma incremental a sus capacidades técnicas y operativas. Al igual que con otras industrias, cuando las mejoras son incrementales, las empresas no aprovechan por completo los beneficios prometidos por la digitalización. Este problema también es válido para la adopción de DT dentro del industria de petróleo y gas. Sin una planificación adecuada, DT solo agregará beneficios marginales, o en algunos con *trade-offs* entre costos y beneficios nulos (Wanasinghe et al., 2020)

3. Gemelos digitales en procesos de V&V de producto

3.1. Gemelos Digitales en la gestión del ciclo de vida de productos. Perspectiva general.

Las empresas industriales de diferentes verticales utilizan herramientas digitales para convertir sus ideas y desarrollos en productos físicos para sus clientes. Estas herramientas se han vuelto cada vez más poderosas, y flexibles ya desde la década de 1960 y 1970, cuando las computadoras comenzaron a reemplazar los tableros de dibujo en las oficinas de diseño. Sin embargo, a medida que las herramientas de ingeniería se han vuelto más potentes, también han aumentado las exigencias a los productos. Estos productos, cada más sofisticados, combinan hardware y software y conforman sistemas complejos con capacidades de sensorización y comunicación, dando respuesta efectiva a las condiciones de funcionamiento cambiantes y a los demandantes requisitos de los usuarios. (Brossard et al., 2022)

Los modelos de negocio también están evolucionando, diluyendo los límites entre el diseño y el uso. Muchos productos funcionan como parte de un ecosistema de productos y servicios relacionados. Cada vez más, los clientes no compran productos directamente, sino que pagan por las capacidades que éstos proporcionan, según el uso o en forma de suscripción, en modelos “as a service” (Brossard et al., 2022). Esto obliga a las empresas industriales a migrar sus convencionales modelos de negocios “centrados en el producto” a modelos más orientados a servicios, creando una oferta de sistemas producto-servicio complejos (Paiola & Gebauer, 2020)

En tal contexto, **los sistemas de gestión del ciclo de vida del producto** (de aquí en más **PLM**, por sus siglas en inglés) son fundamentales para las empresas, ayudándolas a capturar, procesar y comunicar la información de producto a través de toda la organización. Los gemelos

digitales, como herramienta de representación digital de un producto físico, pueden basarse en herramientas digitales de ingeniería existentes (léase softwares del tipo CAD / CAE / CAM⁸), e incorporar fuentes de datos adicionales, agregando capacidades avanzadas de simulación y análisis, estableciendo vínculos con datos en tiempo real generados durante la fabricación, la validación y el uso del producto. Mientras que un sistema convencional de PLM utiliza un único modelo digital para representar cada variante de un producto, un gemelo digital, en cambio, puede tener un modelo para cada producto individual, el cual se actualiza continuamente utilizando datos recopilados durante el ciclo de vida del producto. Basándose en la experiencia de las empresas que ya han adoptado este enfoque, la consultora McKenzie, por ejemplo, estima que los gemelos digitales pueden impulsar un aumento de ingresos de hasta un 10%, acelerar el time to market de nuevos desarrollos en hasta un 50% y mejorar la calidad de los productos en hasta un 25%. (Brossard et al., 2022)

Antes de continuar nuestro relevamiento de casos de uso de gemelos digitales en los procesos de V&V de producto en industrias afines al petróleo y gas, nos parece relevante profundizar sobre la definición de PLM y las etapas generales que caracterizan el ciclo de vida de los productos. **En ingeniería, se define al PLM como al proceso de gestionar un producto o sistema a lo largo de su ciclo de vida, desde su concepción y diseño hasta su producción y eventual disposición.** PLM integra personas, datos, procesos y sistemas, con el objetivo de gestionar y documentar de manera efectiva diversos aspectos del ciclo de vida de un producto. Su objetivo es asegurar que la información adecuada esté disponible para las personas adecuadas en el momento adecuado, lo que permite la toma de decisiones informadas y la colaboración eficiente en las diferentes etapas del ciclo de vida del producto. (Lim et al., 2020)

⁸ CAD: Computer-aided Design, CAE: Computer-aided Engineering y CAM, Computer-aided Manufacturing

En términos generales, el ciclo de vida de un producto industrial involucra secuencialmente etapas de diseño, manufactura, distribución, uso y deposición. Los gemelos digitales se han descrito como los habilitadores claves de la Industria 4.0 y la Fabricación Inteligente. Los “fabricantes inteligentes” pueden aprovechar los gemelos digitales con múltiples aplicaciones a lo largo de todo el ciclo de vida de los productos, tal cual se ejemplifica en la **Fig. 10.**(Singh et al., 2022)

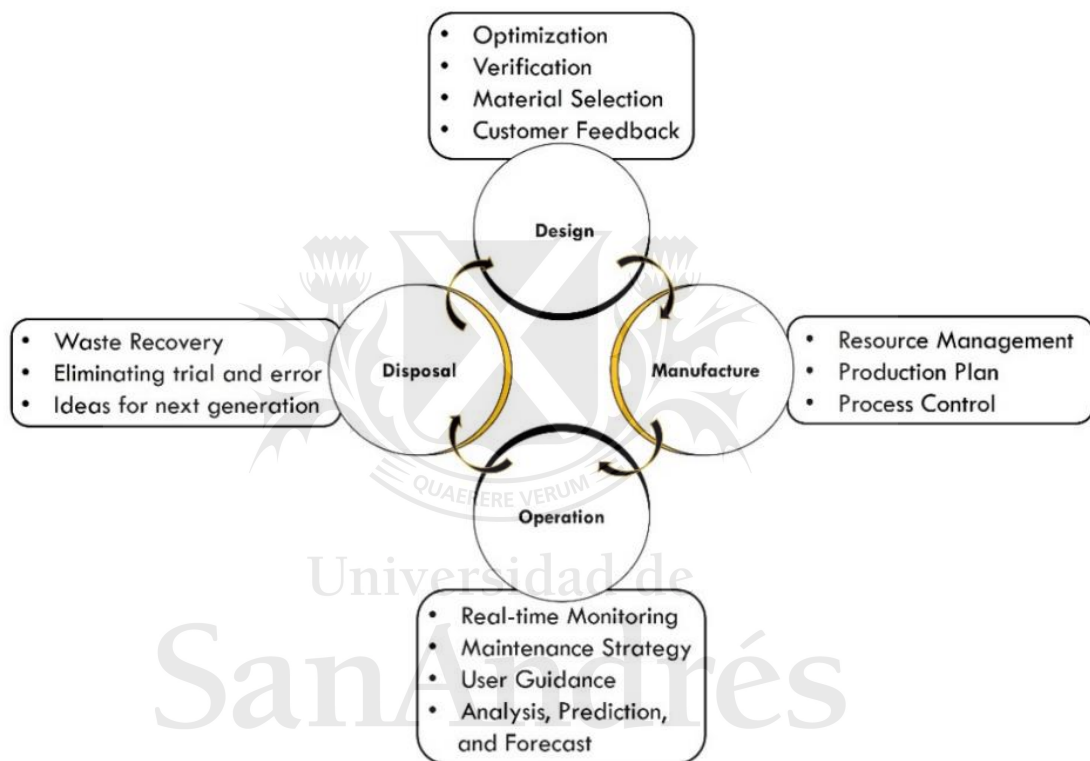


Fig. 10: Posibles aplicaciones de DT en el ciclo de vida del producto manufacturado.
Fuente (Singh et al., 2022)

Proporcionalmente, la revisión bibliográfica realizada indica referencias de uso de gemelos digitales en todas las etapas del PLM, pero mayoritariamente en etapas de manufactura y uso, y en menor medida en el diseño, tal cual puede verse en la **Fig. 11** (Lim et al., 2020)

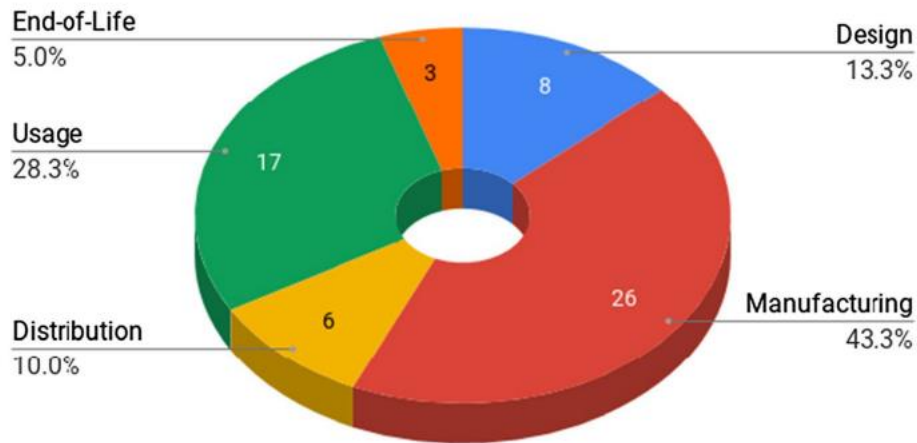


Fig. 11: Referencias de uso de DT en las distintas etapas de PLM (54 papers relevantes publicados entre 2015 y 2019). Fuente: (Lim et al., 2020).

3.2. Gemelos Digitales en la etapa de diseño de productos. Revisión de casos de uso en diferentes industrias.

En el proceso actual de diseño de productos, se utilizan comúnmente modelos 3D para ayudar a los diseñadores e ingenieros a visualizar el concepto, simular la performance y revisar los procedimientos de fabricación mediante el uso de software de fabricación asistida por computadora (CAM). **Los gemelos digitales pueden potenciar el desarrollo de nuevos productos al vincular el modelo digital con el producto o prototipo físico, mejorando todas las etapas del desarrollo de nuevos productos (NPD, por sus siglas en inglés),** tales como la generación de ideas, el análisis de mercado, el diseño, los ensayos de V&V y la comercialización. Al constituir la etapa inicial del ciclo de vida del producto, la calidad del diseño afecta de forma directa a las etapas subsiguientes. Por tanto, desarrollar y aplicar los gemelos digitales en la etapa de diseño no solo optimiza los procesos de diseño per se (por ejemplo, ayudar en la toma de decisiones de diseño, optimizar performance ó predecir características del producto), sino que también resulta beneficioso para eventos aguas arriba del ciclo de producto (por

ejemplo, planificación de fabricación, monitoreo de la salud del producto ó la gestión del reciclaje). (Lo et al., 2021)

Durante la fase de diseño, los gemelos digitales permiten a los diseñadores verificar virtualmente su diseño de producto, lo que les permite probar diferentes iteraciones del producto y elegir la mejor. Utilizando los datos en tiempo real de los productos de generaciones anteriores, los diseñadores obtienen una visión de las características que funcionan mejor para los consumidores y aquellas que necesitan mejoras. Esto facilita todo el proceso de mejora del diseño, haciéndolo más fácil y rápido. (Singh et al., 2022)

Para comenzar a mapear casos de uso específicos de gemelos digitales en las distintas fases de NPD, es interesante el consolidado obtenido por (Lo et al., 2021) en su investigación “*A review of digital twin in product design and development*”, en el cual el autor realiza una exhaustiva revisión de artículos y trabajos publicados entre 2011 al 2020. La primera observación sobre este trabajo muestra que, aunque el número de trabajos sobre gemelos digitales en el diseño y desarrollo de productos ha ido aumentando gradualmente en los últimos años (principalmente desde el 2016 en adelante), **hay relativamente pocas referencias y casos de uso**. En términos de distribución geográfica de estas referencias, se puede observar que cuatro países, China, Alemania, Estados Unidos y Singapur, representan más del 50% de las contribuciones, con China con amplia delantera en el rubro (22%). Esto es atribuible al gran desarrollo industrial de estas potencias, resultado del apoyo y promoción de iniciativas por parte de grandes empresas y organismos gubernamentales (Lo et al., 2021)

Desde el punto de vista académico, se identifican oportunidades de uso de gemelos digitales en las diferentes fases de NPD, pero principalmente en las etapas de **diseño conceptual, ingeniería de detalle, ensayos de verificación de diseño y rediseño**. Los documentos técnicos encontrados abarcan una amplia diversidad de

temas relacionados con el diseño de productos, como propuestas de frameworks para el diseño de productos impulsado por los gemelos digitales (Tao et al., 2019), selección de materiales, ensayos y evaluaciones de producto y oportunidades de rediseño (Lo et al., 2021)

En nuestro caso, dado que el enfoque de nuestra investigación se centra en identificar las oportunidades y los desafíos de implementar gemelos digitales en los procesos de V&V de productos para la E&P de Petróleo y Gas, nos parece valioso justamente enfocar la revisión de referencias encontradas en la etapa de **verificación de diseño**, para así entender posibilidades de extrapolación. En esta etapa, el uso de gemelos digitales se ha centrado en la **predicción de performance de producto a partir de simulación y ensayos sobre prototipos virtuales**. Se destaca que, para el desarrollo de un gemelo digital para ensayos, es necesario crear un prototipo físico o modelo de referencia para poder recopilar datos significativos de diseño. Desde el punto de vista académico, no se declaran limitaciones en términos de complejidad, tamaño y nivel de integración del producto. Por ejemplo, se han identificado referencias de modelados de barcos cruceros a lo largo de todo su ciclo de vida, construidos en base a varias embarcaciones del mismo tipo, para predecir comportamiento y rendimiento futuro (Arrichiello & Gualeni, 2020). También se demostró el uso de gemelos digitales de un vehículo SUV⁹ para realizar una serie de simulaciones (ej, ensayos de rigidez estática y dinámica) con el fin de reducir la cantidad de pruebas reales, ahorrando tiempo y costos en la verificación del diseño (Patrikeev et al., 2017).

Ahora bien, los gemelos digitales utilizados en etapas de V&V de producto no son solo ideas y teorías que generan interés en el ámbito académico, sino también una aplicación emergente y posible en diferentes segmentos de la industria. En tal sentido, **se identifican con preponderancia casos de uso en la industria Aeronáutica**. Los fabricantes de equipos en esta vertical pueden diseñar nuevos motores, estructuras, fuselajes o

⁹ SUV – Sport Utility Vehicle

componentes complejos, y probar cómo estos sistemas performarán a lo largo de su ciclo de vida. Estos modelos virtuales permiten a los OEM¹⁰ refinar contratos de mantenimiento y procesos de posventa; pudiendo someter al gemelo digital a pruebas de esfuerzos que no serían logísticamente posibles en un laboratorio; o probar nuevos diseños conceptuales o rediseños para determinar si es apropiado comenzar la fabricación para pruebas físicas (Bonnar Louise, 2019).

[Boeing](#), por ejemplo, construye réplicas virtuales de componentes de sus aviones B777 para simular cómo funcionarán a lo largo de su ciclo de vida. El gemelo digital se crea utilizando un software de simulación de ultra alta fidelidad que puede crear un modelo virtual funcional de sistemas y componentes altamente complejos, como los que se encuentran en los aviones de Boeing. El software de replicación es capaz de crear un modelo tridimensional virtual que puede pasar por un ciclo de vida simulado de los entornos y condiciones que el activo experimentará. Con esta herramienta, Boeing consiguió un 40% de mejora en la calidad de partes y sistemas en la primera versión de sus nuevos diseños. (Woodrow Bellamy III, 2018)

[GE Aviation](#) utiliza gemelos digitales para el diseño y mejora de motores a reacción y turbopropulsores, recopilando datos de uso para predecir fallas. GE crea réplicas digitales para sus motores, lo que le proporciona a la empresa un seguimiento digital para cada uno de ellos, permitiendo monitorear su rendimiento, predecir problemas de mantenimiento y, en última instancia, disparar mejoras de diseño en sistemas y componentes. GE ya ha construido componentes de gemelos digitales para su familia de motores GE60 e incluso ha desarrollado el primer gemelo digital del mundo para el tren de aterrizaje de un avión, realizando simulaciones integrales del sistema a partir de información real de uso. Sensores colocados en puntos de fallo típicos del tren de aterrizaje, como la presión hidráulica y la temperatura de los frenos, proporcionan datos en tiempo

¹⁰ OEM – Original Equipment Manufacturer

real para ayudar a predecir fallas tempranas o diagnosticar el resto del ciclo de vida del tren de aterrizaje. (Bonnar Louise, 2019)

[Rolls Royce](#), por su parte, crea gemelos digitales a escala de sus motores físicos para modelar digitalmente su rendimiento. Rolls-Royce los utiliza para ahorrar tiempo y dinero en las rigurosas pruebas que se requieren antes de que un motor sea certificado como apto para volar. Rolls-Royce identificó una oportunidad de uso de gemelos digitales en la simulación del rendimiento de motor cuando se rompe un aspa de la turbina durante vuelo. Tradicionalmente, los evaluadores aceleraban el motor al máximo y luego detonaban una pequeña carga explosiva para liberar una de las aspas. Para pasar la prueba y certificar, el motor tiene que mantenerse en su carcasa y demostrar que puede funcionar correctamente durante el resto del vuelo. Teniendo en cuenta el elevado costo de cada motor, el impacto de una falla en prueba y reensayo es elevado, tanto en dinero como en tiempo de desarrollo. El uso de gemelos digitales en pruebas virtuales permite a Rolls-Royce predecir cómo se comportará el diseño, sin incurrir en costos. Los ingenieros pueden iterar hasta estar seguros de que pasará la prueba real en el primer intento. (Thomas Macaulay, 2018)

Los casos de uso en la Aeronáutica no solo provienen del ámbito privado, sino también puede originarse del ámbito gubernamental, puntualmente del área de **Defensa**. En 2020, por ejemplo, el Laboratorio de Investigación de la Fuerza Aérea de Estados Unidos ([AFRL](#), por sus siglas en inglés) anunció la creación de un gemelo digital de uno de sus bombarderos supersónicos, el B-1B, con el propósito de realizar mantenimiento predictivo. Para ello, propusieron utilizar un escaneo en 3D de cada parte de la aeronave, incluyendo tuercas y pernos, para luego reensamblar la aeronave ahora digitalizada y crear un gemelo digital de la aeronave. Mediante este proceso de escaneo, se podrán detectar posibles fallas o daños estructurales, lo que permitirá crear un “registro médico” de la aeronave. A partir de los datos obtenidos, se podrán predecir las áreas más propensas a tener problemas estructurales. A lo largo del ciclo de vida de la aeronave, se superpondrán capas de datos

de mantenimiento, resultados de pruebas e inspecciones, y herramientas de análisis sobre el modelo digital. (Singh et al., 2022). Otro beneficio de esta réplica virtual será la capacidad de probar prototipos de nuevas piezas de reparación, pudiendo diseñar una pieza y realizar pruebas de verificación de ajuste en el mundo digital antes de fabricarla realmente. (Mayer Daryl, 2020)

Ahora bien, otras verticales también explotan los beneficios de esta tecnología en procesos V&V de sus productos. Tal es el caso de la industria **Aeroespacial**, como una de las áreas pioneras en la exploración de los gemelos digitales a partir de los trabajos de la NASA, utilizándolos para desarrollar nuevos productos de manera más rápida y económica, al tiempo de mejorar la calidad de producción y reducir el tiempo de mantenimiento de naves y satélites. Un nuevo actor en este segmento, [SpaceX](#), por ejemplo, ha aprovechado la tecnología de los gemelos digitales para el diseño y la prueba de sus cohetes Falcon 1, con el fin de detectar problemas y validar diseños antes de construir los productos, lo que les permite desarrollar cohetes más económicos (Singh et al., 2022). Para esto, se apalancó en el uso de una plataforma de software de PLM como la solución [Siemens Nx™](#), la cual integra herramientas de CAD, CAE, CAM y PDM¹¹, facilitando el trabajo coordinado de los tres equipos de ingeniería (propulsión, estructura y aviónica) dedicados para el diseño y desarrollo de los cohetes Falcon. (Brett Brune, 2016)

Según cita el propio Siemens a modo de caso de éxito, “SpaceX ha modelado de forma integral en Siemens Nx™ los cohetes Falcon 1 y Falcon 9, así como la cápsula Dragon”. “El software no tiene inconvenientes para manejar ensamblajes de más de 25,000 piezas, tomando solo de cinco a diez minutos”. “Una vez cargado, una maqueta virtual del cohete permite a los diseñadores encontrar fácilmente interferencias e iterar el diseño en caso de identificar conflictos”. Al 2011, fecha del citado caso, SpaceX ya había experimentado una mejora del

¹¹ PDM – Product Data Management

50% en la productividad, lo cual ya le permitía ofrecer un competitivo costo por Kg. de carga útil de lanzamiento del orden de los 12,000 usd/Kg con el Falcon 1, lo cual en ese momento representaba casi 1/3 del mercado¹².
(SpaceX delivers outer space at bargain rates, 2011)

Tal cual venimos desarrollando, la adopción de gemelos digitales en procesos de diseño y V&V en las industrias de la Aviación y Aeroespacial es altamente beneficiosa, **aunque puede ser un proceso lento debido a las regulaciones** y los mecanismos de recopilación de datos de las aeronaves, lo que lo hace costoso, además de tener preocupaciones de certificación para el equipo y software a bordo. (Singh et al., 2022)

La industria **Automotriz** también presenta casos de uso de gemelos digitales en la etapa de verificación de diseño de sus productos. Un ejemplo es la empresa rusa [Aurus Motors](#), que con la colaboración de la Universidad Politécnica de St. Petersburgo (SPbPU, por sus siglas en inglés), fue la primera en Rusia en crear un gemelo digital para el diseño y desarrollo del [Aurus Senat Limousine](#), automóvil de lujo blindado destinado para el uso del Primer Ministro V. Putin. (Lo et al., 2021). La primera versión del automóvil fue lanzada en 2017 y, según se cita, el uso de gemelos digitales para su prototipado virtual y ensayos de verificación permitieron una reducción en el ciclo de desarrollo y producción desde los típicos 5-7 años a solo 2 años y 4 meses. (Russia Today, 2020)

Otro caso de uso de gemelos digitales para modelado virtual y simulación en la industria automotriz lo da la empresa italiana [Maserati](#). Nuevamente con el soporte *end-to-end* de la *suite* de soluciones digitales para PLM provistas por Siemens, Maserati creó un gemelo digital del [Sedán Ghibli](#) que era 100% fiel al original, hasta el último tornillo (Lo et al., 2021) . Este prototipo virtual desempeñó un papel clave durante el desarrollo del automóvil, permitiendo simulaciones de ensayos en túneles de viento y

¹² Siguiendo la evolución del costo por Kg. de carga útil de lanzamiento, SpaceX continuo con su optimización de costos en los modelos posteriores al Falcon 1, alcanzando 2,600 usd/Kg. con el Falcon 9 (2010) y 1,500 usd/Kg. con el Falcon Heavy (2018). Fuente: (Our World in Data Org., 2022)

pruebas de manejo. Utilizando el gemelo digital, los datos medidos de solo unas pocas pruebas reales en túneles de viento se pueden utilizar para realizar pruebas virtuales rápidas y económicas, reduciendo costos y posiblemente conduciendo a nuevos desarrollos, que permiten ajustar la aerodinámica del modelo y optimizar la performance. Como resultado, se redujeron los costos y se redujo el tiempo de desarrollo en un 30%. (Tom Austin-Morgan, 2017)

Las empresas **Manufactureras**, fabricantes de equipos originales (OEM) de distinta naturaleza, también encuentran valioso el uso de gemelos digitales para procesos de V&V de sus productos. [Phillips](#), por ejemplo, en su vertical de **Salud**, condujo simulaciones con gemelos digitales en el desarrollo de un generador de oxígeno portátil para pacientes con problemas respiratorios. Al utilizar prototipos digitales, realizaron ensayos que habrían llevado meses y varias iteraciones si se hubieran construido los prototipos físicos primero. Mas allá de que el producto físico aún debía ser validado rigurosamente, ahorraron valioso tiempo de desarrollo, diseñándolo correctamente desde el principio. (*The rise of the digital twin: how healthcare can benefit*, 2018).

[Schunk](#), grupo alemán de ingeniería fabricante de sistema mecatrónicos de alto valor agregado, digitalizó todo el proceso de ingeniería de producto, desde el diseño conceptual hasta la ingeniería de detalle de los sistemas mecánicos, eléctricos y de software. Esta empresa utiliza gemelos digitales para la puesta en marcha y simulación, acelerando el lanzamiento de nuevos productos, tal es el caso de su sistema de sujeción [SVH 5](#), una mano de agarre servo-eléctrica de 5 dedos destinada a robots de servicio. (Lo et al., 2021). Nuevamente con el soporte de Siemens, el gemelo digital en este caso comprende el modelo CAD 3D, los datos de CAE y un modelo de comportamiento cinemático en el que se almacena la carrera, la velocidad de extensión y retracción, la aceleración y su tasa de cambio (“*jerk*”), su fuerza nominal y la masa. La ingeniería integrada con la ayuda de la simulación virtual permite reducir significativamente la duración de los proyectos de desarrollo, acelerar la puesta en marcha y

obtener claros efectos de eficiencia para la implementación en repetición de sistemas similares. Desde el cálculo de los tiempos de ciclo hasta el diseño de los componentes, así como los cálculos de colisión, pueden ser completamente cubiertos virtualmente mediante el software de ingeniería. En lugar de comenzar la programación de software después de ensamblar físicamente el sistema, como solía ser el caso, todos los procesos individuales pueden ser coordinados, programados y optimizados sistemáticamente en forma de reglas condicionales relativas utilizando el modelo virtual, logrando un ahorro de alrededor de 30% en el tiempo de ingeniería y significativas reducciones en la duración total de los proyectos y *time-to market*. (IRT3000 Magazine, 2017)

En resumen, a partir de nuestra investigación se lograron relevar **(9) casos industriales de uso de gemelos digitales en procesos de V&V de productos**, de distinta naturaleza y complejidad, en diferentes verticales, pero con preponderancia en los sectores de **Aeronáutica, Aeroespacial, Automotriz y Manufactura**. En todos los casos el uso se enfoca en la etapa de **validación de diseño**, para la predicción y mejora de la performance de producto a partir de **simulación y ensayos sobre prototipos virtuales**. Se identifica como clave para la implementación exitosa, el soporte de soluciones de software tipo CAD/CAE/CAM en formato de plataformas digitales, que permitan incorporar a las fuentes de datos ingenieriles tradicionales, nuevas capacidades de simulación y análisis, estableciendo vínculos con datos en tiempo real generados a lo largo de todo el ciclo de vida del producto. En tal sentido, los *vendors* de soluciones de software adquieren un rol clave en su *partnership* con las empresas, identificando a Siemens, con su *suite* de PLM, como uno de los proveedores más elegidos. Una lista que consolida estos casos, con sus principales características, se encuentra disponible en el **Anexo A** del presente trabajo.

3.3. Construcción de gemelos digitales para procesos de V&V. Elementos y tecnologías facilitadoras.

A grandes rasgos y tal cual venimos desarrollando, un gemelo digital puede conceptualizarse en tres elementos esenciales, que son 1) las **entidades físicas**, 2) su **réplica virtual** y 3) la **conexión entre ellos**. Para la construcción de un gemelo digital para diseño y desarrollo de producto, además de estos elementos, tanto el 4) **ambiente de simulación** como el 5) **flujo de datos** adquieren alta relevancia. Diferentes tecnologías facilitadoras intervienen a lo largo de todo el ciclo, tal cual puede verse en la **Fig. 12**. (Lo et al., 2021)

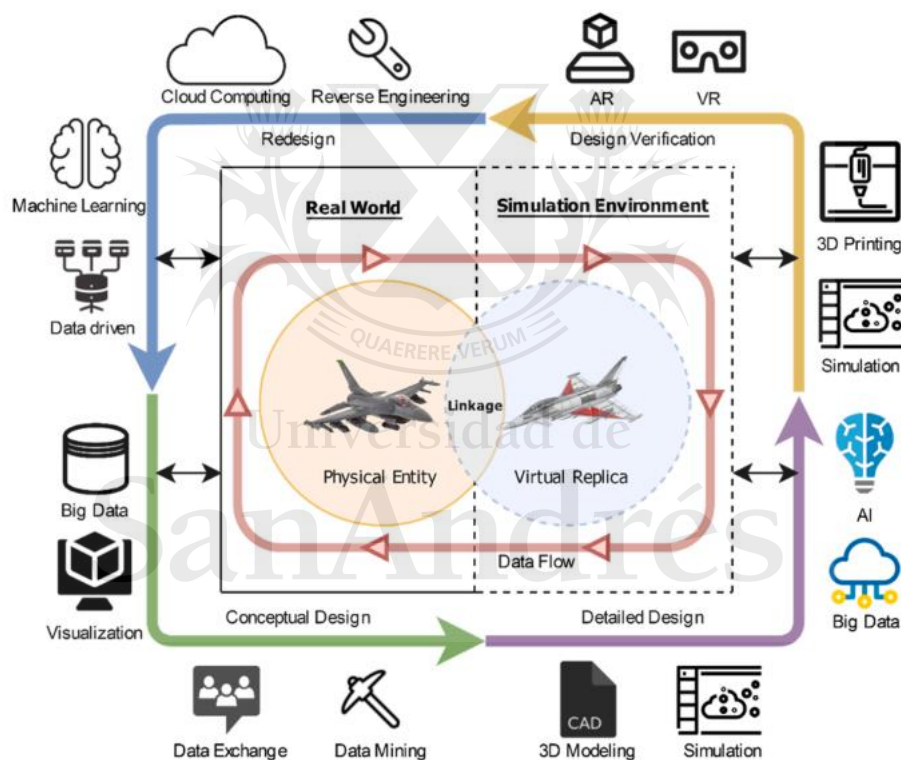


Fig. 12: Elementos y Tecnologías facilitadoras de los gemelos digitales en desarrollo de producto. Fuente: (Lo et al., 2021)

En la etapa de **verificación del diseño**, el gemelo digital contribuye a una simulación aún más real y precisa del funcionamiento del producto en operación, nutriéndose de datos en tiempo real de las pruebas de laboratorio realizadas sobre el prototipo físico. Dependiendo de la naturaleza del producto, este prototipo físico puede ser fabricado con

tecnologías de prototipado rápido, como la **manufactura aditiva** (Impresión 3D) e instrumentado con **sensores** y **dispositivos IIoT** para capturar esta data. (Lo et al., 2021)

Para cualquier tipo de evaluación, al preparar el **prototipo físico** se debe tener en cuenta la disposición e instalación de los **sensores**, ya que éstos pueden afectar el resultado de las pruebas y la precisión de los datos recabados durante los ensayos. Por su parte, la **réplica virtual** (modelo 3D digital) puede ser creada desde el diseño, por **softwares tipo CAD** o desde el producto físico, a partir de ingeniería inversa con tecnologías de **escaneo 3D**. La **conexión** entre la entidad física y su réplica virtual es clave para que puedan interactuar entre sí en tiempo real y reflejar la situación del mundo real en el entorno digital. Los componentes claves en la performance de producto deben estar equipados con **sensores** incorporados. Los datos pueden transferirse con baja latencia, mediante las emergentes **tecnologías de la comunicación**, como el 5G y la comunicación inalámbrica. (Lo et al., 2021)

El **entorno de simulación** se refiere al uso de datos del producto físico sincronizados con el modelo digital, simulando escenarios en el espacio virtual. A diferencia de la simulación tradicional, el gemelo digital simula el resultado del producto en tiempo real, basándose en métodos de "what if?". Algunos softwares de simulación (como [Matlab® Simulink®](#), [FlexSim](#), [Simul8](#) o [Siemens Simcenter](#)) admiten la simulación basada en gemelos digitales, lo que permite el análisis de datos en tiempo real con soporte de Machine Learning (ML) y Deep Learning (DL) y la comunicación con dispositivos IIoT. Mientras tanto, el **flujo de datos** será bidireccional y continuo entre la entidad física y la réplica virtual. Los sensores integrados en el prototipo proporcionan información de performance y contexto (datos ambientales, *inputs* de máquina de ensayo). Estos datos se enviarán a la réplica digital para ejecutar simulaciones y análisis. Luego, el lado digital proporcionará resultados simulados, información predicha y decisiones al producto. En este punto son importantes las consideraciones en términos de los **estándares**

industriales de transferencia y comunicación (DDS, HLA, MQTT) y la **seguridad** de la información. (Lo et al., 2021)



Universidad de
San Andrés

4. El producto usado en el Upstream y sus procesos de V&V

Para dar contexto a la investigación nos parece importante hacer una breve descripción de los productos utilizados en el *upstream* y cuáles son las actividades estandarizadas para los procesos de V&V en esta industria.

Tal cual adelantábamos al comienzo de este trabajo, para unir los tubulares y alcanzar las trayectorias y profundidades requeridas para las etapas de Exploración y Producción (hasta 30000 ft, >9000 metros), se utilizan **conexiones roscadas, con variedad de geometrías, perfiles de rosca y superficies sellantes**. Las condiciones demandantes de operación hacen que estas conexiones deban **verificar una adecuada integridad estructural y de sellabilidad** a lo largo de todo el ciclo de vida del yacimiento. A continuación, describiremos ambos puntos.

4.1. Conexiones Roscadas. Conociendo el producto

La variabilidad en el diseño en términos de geometrías, perfiles de rosca y superficies sellantes que constituyen las conexiones roscadas genera un amplio espectro de productos y performances. La propia **API define diseños estandarizados** para la industria en su especificación [API SPEC 5B:2017](#) , licenciando para su fabricación y definiendo su performance en su boletín técnico [API Technical Report 5C3:2018](#). Estas conexiones son aptas para solicitaciones estructurales típicamente más bajas con relación al cuerpo del tubo y sellabilidad con liquido a presiones medias-bajas. Para solicitaciones más demandantes, cada vez más frecuentes en la industria (pozos HP/HT, térmicos ó Shales, por citar algunas), empresas manufactureras desarrollan **conexiones roscadas propietarias**, con diseños más sofisticados. Mas allá de esta variabilidad en el diseño y de protecciones de propiedad intelectual, los tipos de conexiones roscadas y sus elementos más típicos pueden verse

conceptualizados en la **Fig. 13** y descritos brevemente a continuación.
(Pattillo, 2018b)

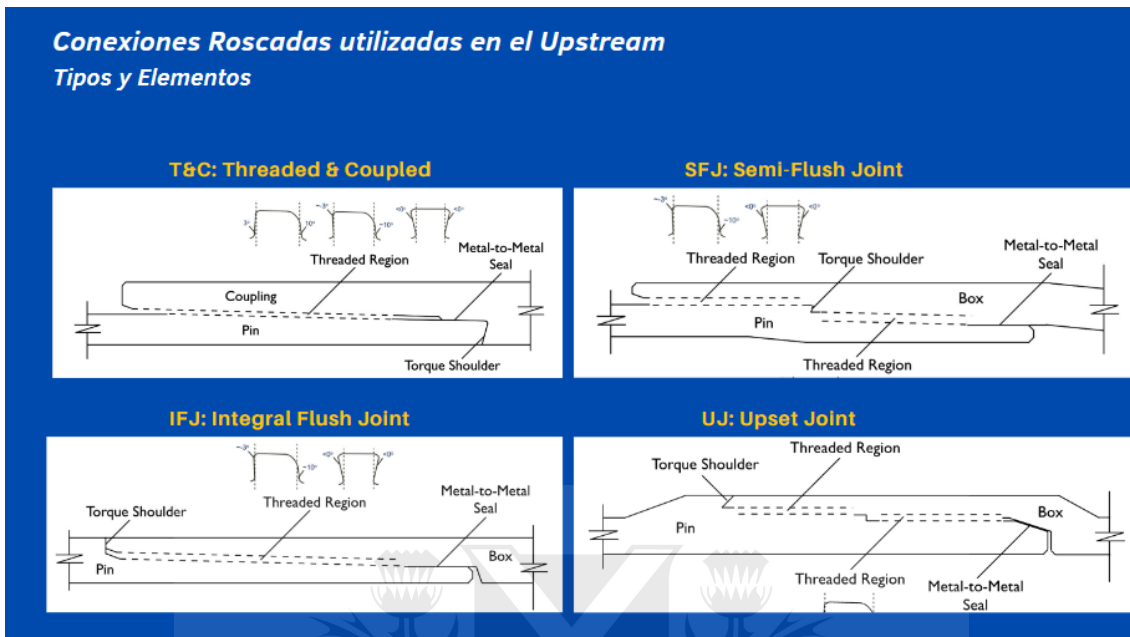


Fig. 13: Conexiones Roscadas – Tipos y Elementos. Fuente:(Pattillo, 2018b)

Tal cual puede verse arriba y a grandes rasgos:

A. Tipos de Geometría:

- Conexiones “cupladas” (T&C): Conexiones con un tercer elemento conector que une ambos tubos (cupla).
- Conexiones “integrales”: Conexiones ensambladas tubo con tubo, sin cupla, las cuales pueden mantener el diámetro externo del tubo (IFJ = Integral Flush Joint) o parcialmente (SFJ = Semi-Flush Joint)
- Conexiones “recalcadas” (UJ = Upset Joint): Conexiones roscadas sobre tuberías cuyo extremo presenta un aumento de espesor consecuencia de un proceso de recalcado (deformación en caliente en prensa).

Los diferentes tipos de geometrías de las conexiones tendrán asociadas diferentes secciones transversales en las zonas de roscas y sellos, relativas al cuerpo del tubo, derivando consecuentemente en conexiones más o menos resistentes vs. la tubería (definida típicamente en términos de % eficiencia)

B. Tipos de Perfiles de rosca: Existe una amplia diversidad en perfiles de rosca, variando en términos de **altura, ancho y ángulos de flanco de los filetes**, como así también la **conicidad de cresta y raíz del filete** respecto al eje del tubo. Otro parámetro clave en el diseño de los perfiles de rosca son los **huelgos** y los **niveles de interferencia diametral**.

Toda esta variabilidad dependerá de los diseños de los fabricantes, modificando las **presiones de contacto en rosca** y verificando diferentes comportamientos a cargas axiales (tracción-compresión), resistencia al engrane durante operaciones de M&B¹³, capacidad a la torsión ó resistencia a la fatiga, entre otros. Un detalle genérico de perfiles de rosca y sus componentes se muestra en la **Fig. 14**.

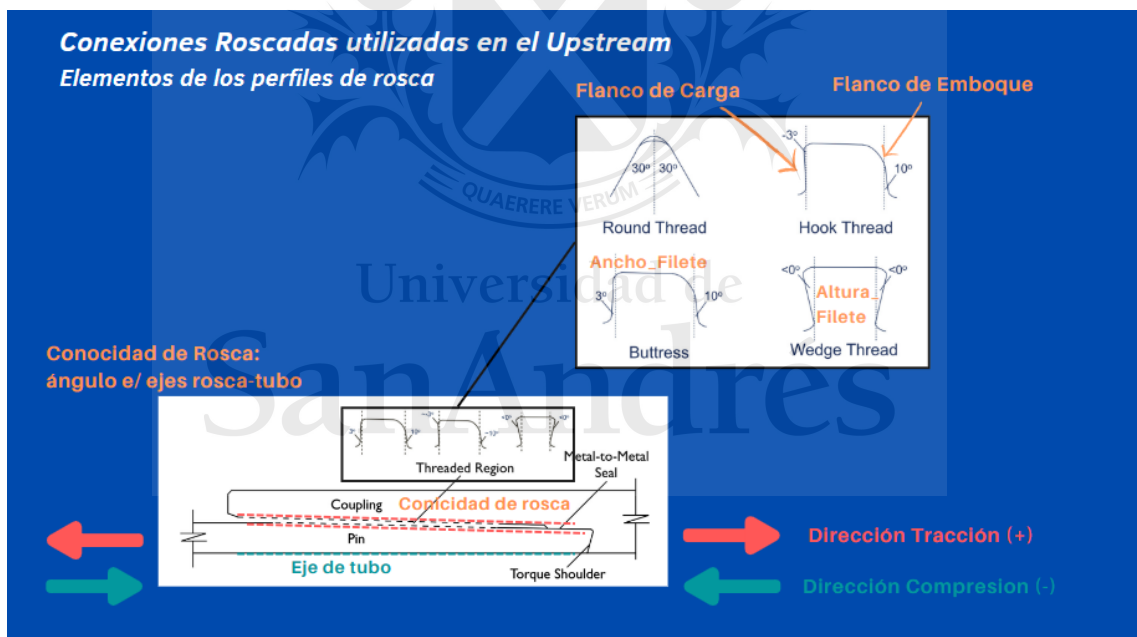


Fig. 14: Conexiones Roscadas – Elementos de los perfiles de rosca. Fuente: (Pattillo, 2018b)

C. Tipos de Superficies sellantes: Las conexiones roscadas en tubulares pueden tener uno o múltiples superficies sellantes, dependiendo el diseño. Típicamente son 3 (Pattillo, 2018b):

¹³ M&B: Make-up & Break-out

- Lubricante de rosca: La grasa lubricante utilizada en las conexiones no solo tiene como objetivo reducir fricciones, prevenir el engrane y facilitar el ensamble (*make-up*) sino que también actúa como barrera de contención a los fluidos, llenando huecos en los intersticios de rosca y brindando estanqueidad para ciertos niveles de presión (baja-media) y tipo de fluidos (líquido).
- Anillo de sellabilidad: Para aumentar la resistencia y confiabilidad de la performance a sellabilidad de las conexiones, puede adicionarse a la conexión un anillo de otro material (típicamente PTFE¹⁴), que actúe como barrera suplementaria al fluido que se transporta. Es clave para este método de sellabilidad, el diseño de los alojamientos (para garantizar interferencias mínimas sin deformar los anillos) y su estabilidad dimensional ante cambios de temperatura y contaminación.
- Sello metal-metal: Los sellos más popularmente utilizados en aplicaciones tubulares de pozos petroleros de alta presión de gas son los sellos metal-metal, activados por interferencia. En el diseño de estos sellos entran en consideración:
 - Geometrías de las superficies (perfil, diámetros),
 - Interferencia mecánica (radial y axial),
 - Longitud, posición, conicidad y relación de esbeltez
 - Patrón resultante de presiones de contacto,
 - Rugosidades,
 - Acción de lubricantes, *coatings* y tratamientos superficiales.

Tal cual puede verse, aquí las variantes son múltiples, y el impacto en la performance a sellabilidad es extremadamente sensible. En términos generales, podría decirse que mientras las presiones medias de contacto de los sellos sean superiores a la presión aplicada, la sellabilidad debiera estar garantizada. No obstante, la empírica indica que el comportamiento no es así de lineal, existiendo factores que afectan la performance a

¹⁴ PTFE: Politetrafluoroetileno (Teflón™)

sellabilidad más allá de los citados parámetros de diseño. Debido a esto, la performance a sellabilidad se evalúa vía complejos modelos de simulación (FEA) y con ensayos a plena escala (FST), tal cual veremos en siguientes secciones. Un resumen de los tipos de superficies sellantes y sus conceptos principales puede verse en la **Fig. 15**.

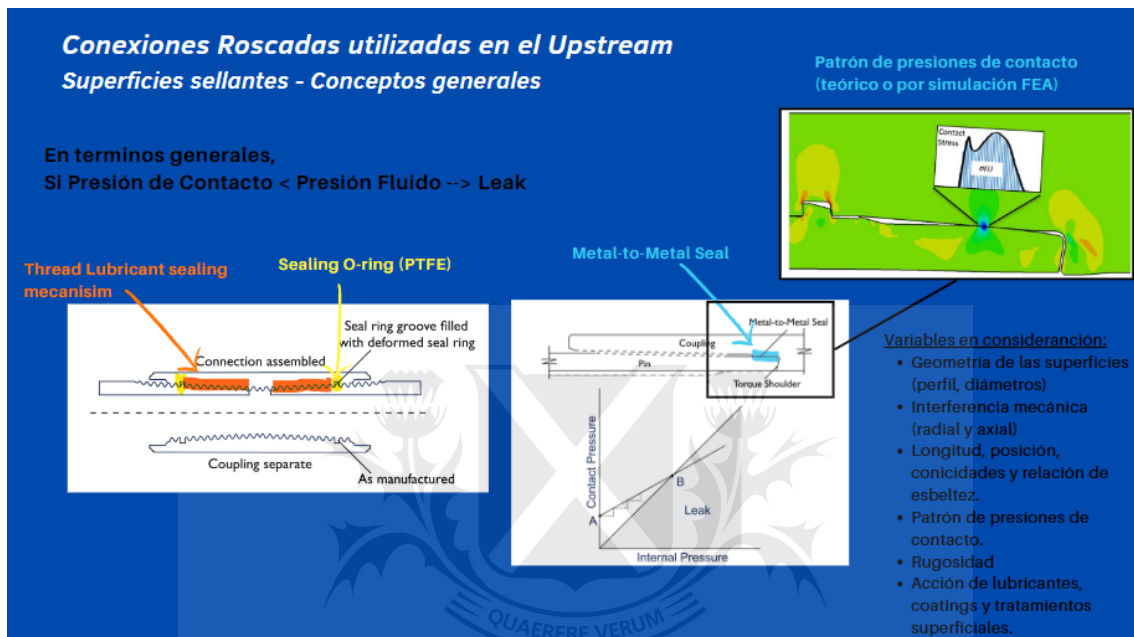


Fig. 15: Conexiones Roscadas – Superficies sellantes. Fuente: (Pattillo, 2018b) y (Xie, 2021b)

D. Hombro de torque: El hombro de torque es otra superficie mecanizada que, dependiendo de la geometría de la conexión podrá variar en términos de ubicación (interno, externo o intermedio), espesor y ángulos de contacto. Tiene como objetivos primarios ser una **referencia positiva al make-up** (garantizando el correcto ensamble de la conexión y de sus superficies sellantes) y un mecanismo complementario de **resistencia a cargas de compresión y sobretorque**. Aunque en algunos estados de carga puede actuar como barrera, no debería considerarse dentro del lote de superficies sellantes.

4.2. Procesos V&V en productos para el Upstream. Una breve introducción.

Antes de comenzar a describir los procesos de Verificación y Validación específicos utilizados en las conexiones tubulares roscadas del *Upstream*, nos parece necesario definir las sutiles, pero relevantes, diferencias entre ambos procesos. Para ello, tomaremos de referencia a la NASA en su "NASA Systems Engineering Handbook"(Steven R. Hirshorn, 2016). Allí, en términos generales se define:

- **Verificación:** Es un proceso que se centra en evaluar si el sistema o producto está diseñado e implementado correctamente según los requisitos especificados. Las actividades de verificación confirman que cada elemento del sistema se comporta como se pretende durante diferentes fases del desarrollo. Básicamente, responde a la pregunta "¿Estamos construyendo el producto correctamente?". Es típicamente un proceso interno.
- **Validación:** Es un proceso que se centra en asegurar que el sistema o producto cumple con las necesidades y expectativas de los usuarios finales o las partes interesadas. Las actividades de validación se preocupan por evaluar el producto final para asegurarse de que satisfaga el uso previsto en su entorno real. Responde a la pregunta "¿Estamos construyendo el producto correcto?". Es típicamente un proceso que implica aceptación con clientes externos.

La validación de la integridad estructural y la capacidad de sellabilidad de las conexiones tubulares seleccionadas es crucial para pozos de alta presión/alta temperatura (HPHT) y pozos térmicos, donde se experimentan condiciones de carga exigentes a lo largo de su ciclo de vida. Por lo general, se evalúan y califican los diseños de conexiones premium propietarias según **estándares de industria**, como la [ISO13679:2019](#) y [API RP 5C5:2017](#) para pozos HPHT con temperaturas

de hasta 180°C, y [ISO/PAS 12835: 2013](#) para pozos térmicos con temperaturas de 180°C a 350°C. Algunos operadores utilizan protocolos propietarios para la calificación de conexiones, tal es el caso de ExxonMobil y Aramco. (Xie & Xie, 2019b)

Sin embargo, se reconoce que **dichos programas de calificación¹⁵ pueden ser costosos y consumir mucho tiempo**, dado que hay múltiples diseños de conexiones y diferentes diámetros, espesores y grados de tuberías que deberían evaluarse para calificar una línea de productos. Recientemente, los estándares de la industria han estado haciendo esfuerzos para proporcionar marcos para la validación de líneas de productos, mediante la **interpolación y extrapolación** de los resultados establecidos a través de una **combinación de programas de ensayos a plena escala (FST) y Análisis de Elementos Finitos (FEA)**. No obstante, también se reconoce que las Prácticas Recomendadas (RP) actuales aún se encuentran en las primeras etapas de aplicación en la industria con lo cual el desarrollo de un marco práctico y pautas efectivas para lograr este resultado sigue siendo un trabajo en progreso. (Xie, 2018)

En base a esta introducción podemos resumir que, en el diseño y desarrollo de productos para el *Upstream*, coexisten 3 tipos de métodos de evaluación, a saber (**Fig. 16**):

- Modelos Analíticos
- Modelos Numéricos (FEA)
- Ensayos a plena escala (FST)

¹⁵ En la jerga, los procesos de validación de acuerdo con estándares de la industria típicamente se los denomina “procesos de calificación”

Procesos V&V en productos para el Upstream

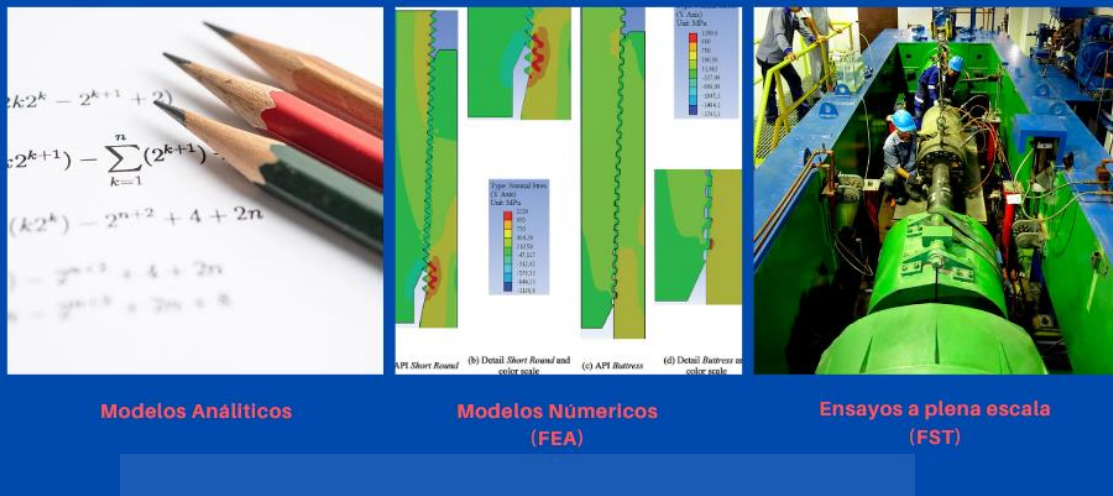


Fig. 16: Procesos V&V en productos para el Upstream

Los **modelos analíticos** constituyen el primer paso al comenzar un proceso de diseño conceptual de una conexión roscada, siendo las primeras verificaciones necesarias en la etapa de desarrollo de nuevos productos (NPD). Estas evaluaciones dimensionan parámetros básicos como geometrías, interferencias, presiones de contacto y típicamente se realizan a partir de modelos matemáticos ingenieriles “sencillos”, dispuestos en planillas de cálculo de relativa sofisticación. Si el/los diseños candidatos pasan los primeros filtros de análisis se continúan con las evaluaciones numéricas, a partir de **modelos de simulación (FEA)**, comparando indicadores e iterando repetidamente sobre los parámetros de diseño hasta optimizarlos. El diseño “ganador” continuará eventualmente hasta la etapa de fabricación de probetas para **ensayos de validación a plena escala (FST)**.

Dado que en general los modelos numéricos de simulación tratan de replicar condiciones de ensayo de validación, y éstos a su vez, intentan cubrir el abanico de condiciones operativas más demandantes encontradas en yacimiento, nos parece relevante explicar brevemente primero, en qué consiste un estándar de calificación como el API RP

5C5:2017 y luego, más en detalle, en qué consisten y cómo se construyen los modelos numéricos de simulación.

4.2.1. Ensayos a plena escala (FST): Un repaso sobre la API RP 5C5:2017

La edición más reciente de la Práctica Recomendada (RP) 5C5 del American Petroleum Institute (API) "Procedimientos para Ensayos de conexiones Tubing y Casing" (API RP 5C5 2017) **define los ensayos para determinar la resistencia al engrane, la performance a sellabilidad y la integridad estructural de las conexiones tubulares.** Especifica (4) Niveles de Aplicación (CAL¹⁶) para los programas de calificación, siendo el CAL IV el programa más riguroso. Involucra (5) probetas en los extremos de sus tolerancias de diseño y fabricación, ensambladas a diferentes niveles de torque y lubricación según especificación, las cuales son ensayadas bajo demandantes condiciones de carga y ciclos térmicos en función de su aplicación esperada. Este protocolo puede utilizarse como medio para calificar conexiones de tubería para aplicaciones HPHT hasta 180°C. (Xie & Xie, 2019b)

En términos generales, se requieren los siguientes 3 tipos de ensayos para un programa de calificación CAL IV de conexiones tubulares:

- ✓ Ensayos de Make-up & Break-out (M&B) para evaluación de resistencia de engrane;
- ✓ Ensayos de sellabilidad sobre elipse de carga:
 - Test Series A (TS-A): tensión/compresión y presión interna/externa (4 cuadrantes, Q1Q2-Q3Q4) a temperatura ambiente y alta temperatura (180°C), y ciclos de presión Q1Q3;
 - Test Series B (TS-B): tensión/compresión, presión interna (Q1Q2), con bending (flexión) a temperatura ambiente y alta temperatura (180°C)

¹⁶ CAL: Connection Application Level

- Test Series C (TS-C): ciclos térmicos y termomecánicos con tensión y presión interna (Q1)
- ✓ Ensayos a rotura con cargas combinadas, según 5 modos de falla principales.

El objetivo principal de estos ensayos es evaluar la capacidad estructural y la resistencia a las fugas del diseño de la conexión, estableciendo la tasa máxima de fugas aceptable en 1×10^{-4} cm³/s (0.9 ml/15 min). Esta tasa se aplica a todos los diámetros de producto. Si se supera el umbral máximo aceptable, se considera que el diseño de conexión ha fallado el programa de calificación. (Xie & Xie, 2019b).

En la **Fig. 17** se muestran ejemplos de los ensayos de sellabilidad (TS-A, TS-B y TS-C) y de rotura definidos por la norma API RP 5C5:2017 para conexiones tubulares. Allí también pueden verse las **elipses de evaluación y servicio de la conexión (CEE y CSE¹⁷)**, las cuales constituyen la representación gráfica de la resistencia estructural y de sellabilidad a cargas combinadas (carga axial – presión) de la conexión.

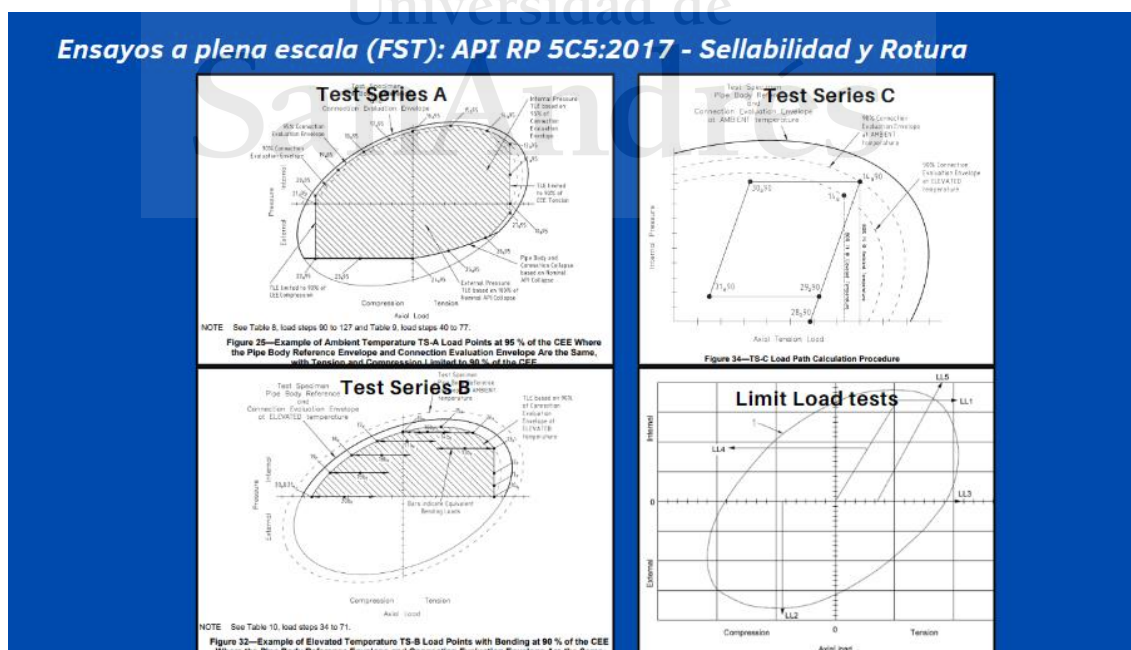


Fig. 17: Ensayos a Plena Escala – Ejemplos de cargas a sellabilidad y rotura.
 Fuente: (American Petroleum Institute, 2017b)

¹⁷ CEE: Connection Evaluation Envelope; CSE: Connection Service Envelope

En la **Fig. 18** se muestra la matriz de ensayos requerida para CAL IV a modo de referencia. (American Petroleum Institute, 2017b)

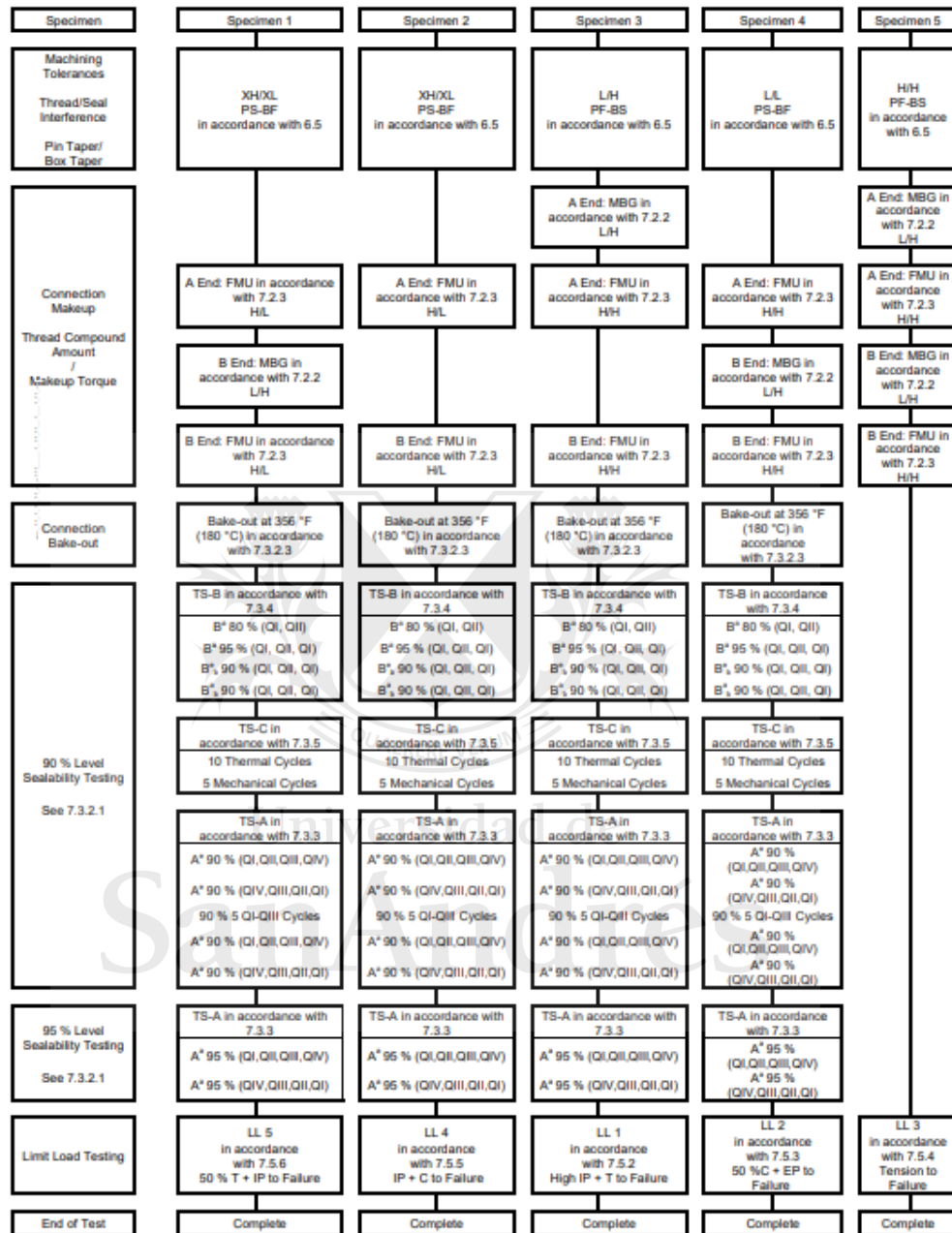


Figure 7—CAL IV Test Requirements and Sequence

Fig. 18: Matriz de Ensayos CAL IV Fuente: (American Petroleum Institute, 2017b)

Tal cual puede inferirse, estos programas de calificación de conexiones tubulares son extremadamente demandantes en términos de tiempos y costos, pudiendo requerir entre 6 – 9 meses para su ejecución completa

en una combinación específica de diámetro/espesor/grado y un costo aproximado de hasta 1,25 millones de dólares (Coe, 2015)

4.2.2. Modelos de Simulación: FEA 101

La importancia del Análisis de Elementos Finitos (FEA) en la evaluación de conexiones ha sido ampliamente reconocida por los protocolos y estándares de calificación de tubulares, pero el uso de modelado de simulación numérica mayormente se ha limitado a estudios cualitativos, comparando la performance entre conexiones o diseños. (Xie & Xie, 2019b). Esto es consecuencia a que también es reconocido que, debido a la complejidad matemática (efectos de contacto, grandes deformaciones y plasticidad) y a limitaciones computacionales (cada vez en menor medida pero aún presentes), los modelos numéricos son representaciones simplificadas del sistema físico real. (Xie, 2021b)

A pesar de estas limitaciones, los modelos de simulación son ampliamente utilizados por los fabricantes, en combinación con los ensayos a plena escala, y como veremos más adelante, son herramientas claves en los procesos de interpolación y extrapolación de productos. Para ello, son necesarias consideraciones generales en términos del **modelado estructural de la conexión, del material constitutivo del modelo digital y de las cargas simuladas.** Un resumen de estas consideraciones puede verse en la **Fig. 19** (Xie, 2018)

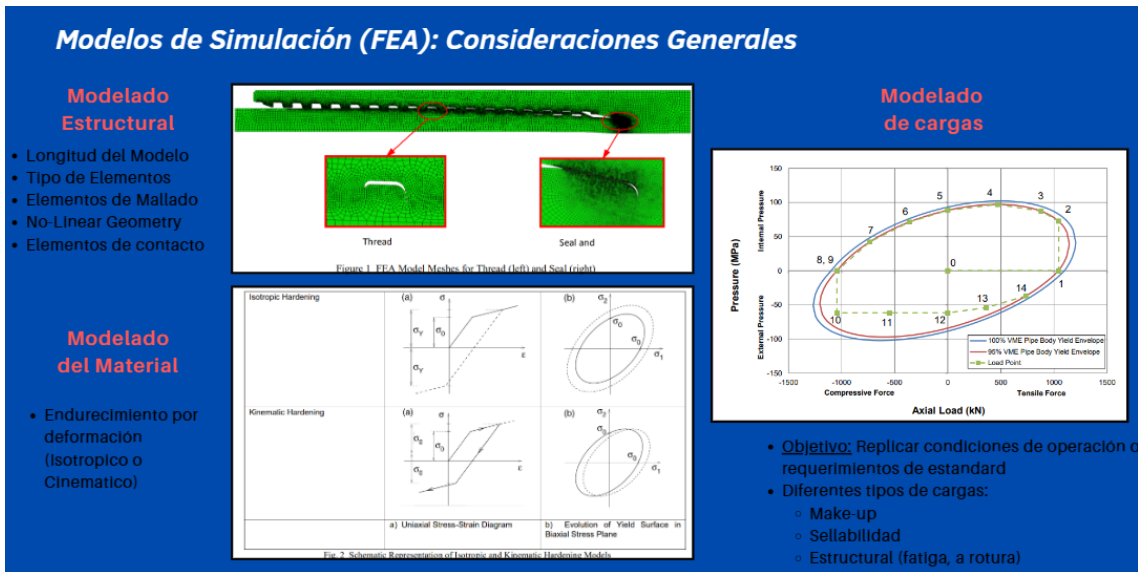


Fig. 19: FEA – Resumen de consideraciones generales. Fuente:(Xie, 2018)

Tomando como ejemplo el modelado de la performance a sellabilidad de las conexiones tubulares, un **análisis de FEA generará resultados de tensión y deformación en las distintas zonas de la conexión, para los distintos estados de carga.** A partir de estos resultados pueden construirse **modelos e indicadores** que intenten predecir la performance a sellabilidad de una conexión. El modelo más utilizado para evaluar el rendimiento de la conexión se basa en la distribución de presiones de contacto en la superficie del sello. El proceso conceptual se muestra en la **Fig. 20.** (Xie & Xie, 2019b)

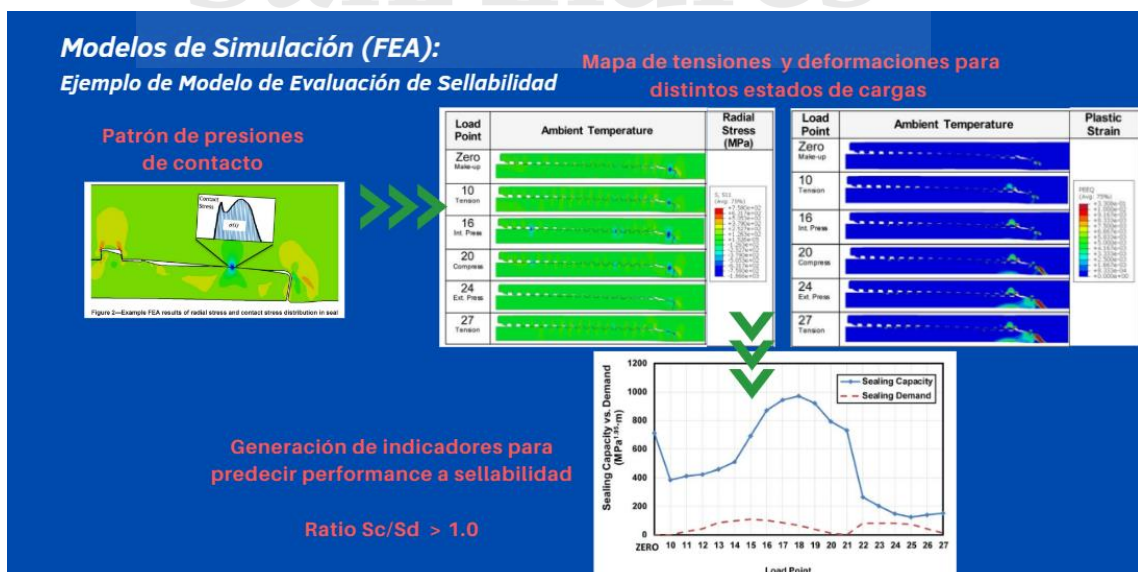


Fig. 20: FEA – Proceso Conceptual para el Modelado de la performance a Sellabilidad en conexiones tubulares. Fuente: (Xie & Xie, 2019b)

Ahora bien, uno de los desafíos al evaluar la capacidad de sellado de una conexión mediante FEA es la **falta de criterios y relaciones** que predigan unívocamente la resistencia a las fugas en función de las presiones de contacto en la interfaz del sello. Adicionalmente, existen variables como la presión del lubricante o la rugosidad de las superficies sellantes (entre otras) que tienen impacto en la sellabilidad pero que aún son de difícil modelado (Xie, 2021b)

Con mayor o menor nivel de incertidumbre, se puede repetir el proceso conceptual descrito y modelar otro tipo de solicitaciones, de manera de soportar otros procesos de V&V en conexiones tubulares como pueden ser evaluaciones de make-up y sobretorque, fatiga a cargas alternadas ó ensayos para tuberías de pozos térmicos.

Por otra parte, tal cual veíamos, la industria coincide en que realizar **ensayos físicos a plena escala en cada combinación de diámetro, espesor y grado de material** de un diseño de conexión candidato **no es práctico ni eficiente** en términos de tiempo ni costos. En línea con esto, los estándares y prácticas recomendadas de la industria han estado haciendo esfuerzos para proporcionar **marcos para la validación de líneas de productos**, mediante metodologías de **interpolación y extrapolación** que combinan resultados **de programas de ensayos a plena escala y análisis de modelado numérico**. Sin embargo, también se reconoce que las Prácticas Recomendadas (RP) actuales aún están en las primeras etapas de aplicación dentro de la industria, y se espera que estos lineamientos para evaluaciones vía FEA requieran nuevas revisiones y validaciones. (Xie, 2018)

Mas allá de que estos marcos propuestos no estén complementamente definidos, nos parece interesante hacer un breve resumen de los criterios que define la API RP 5C5:2017 para la interpolación/extrapolación de diseños de conexiones dentro de una línea de productos. Lo desarrollaremos en la próxima sección.

4.3. Validación de línea de productos. Criterios de interpolación y extrapolación de diseños.

Tal cual mencionamos, la industria y en particular la norma **API RP 5C5:2017** reconoce, en su **Anexo F**, que realizar FST en cada combinación de diámetro, peso y grado de un diseño de conexión candidato no es práctico ni necesario. También señala que, aunque los fabricantes a menudo utilizan FEA en el diseño rutinario de conexiones y en la correlación y comparación con otros diseños probados, depender completamente de FEA puede no ser suficiente para calificar un diseño de conexión debido a limitaciones en:

- (i) Predecir la fuga de un sello de metal a metal;
- (ii) Capturar, vía el modelo, las diferencias entre las condiciones de fuga de gas y de líquido; y
- (iii) Falta de correlaciones confiables entre la resistencia a la fuga y otros factores como el lubricante o la rugosidad.

Por tanto, API RP 5C5:2017 sugiere que los resultados de un subconjunto de conexiones completamente ensayadas y calificadas se pueden extender a otras combinaciones de diámetro y espesor, y al hacerlo, validar éstas otras conexiones mediante ensayos reducidos y/o análisis de elementos finitos. **El principio para este método de interpolación/extrapolación es la similitud de los criterios de diseño dentro de una línea de productos**, manteniendo consistencia en términos de los parámetros de producto (léase perfil de rosca, conicidades, interferencias, espesor de hombro de torque, tratamientos superficiales, torques, etc.)

El Anexo F señala que la(s) región(es) validada para interpolación puede considerarse como un mapa formado por el espesor de pared sobre diámetro exterior (t/OD) vs. el diámetro exterior (OD), encontrándose limitado por:

- (i) Las combinaciones de t/OD calificadas por FST;
- (ii) Conexiones que se validan mediante FEA o FST reducidos; y
- (iii) Regiones generadas a partir de líneas rectas entre las combinaciones calificadas con FST.

El Anexo establece que **cualquier combinación de t/OD que cumpla con los criterios de diseño y que se encuentre dentro de esta región limitada puede considerarse validada** mediante el marco de validación de la línea de productos (**Fig. 21**)

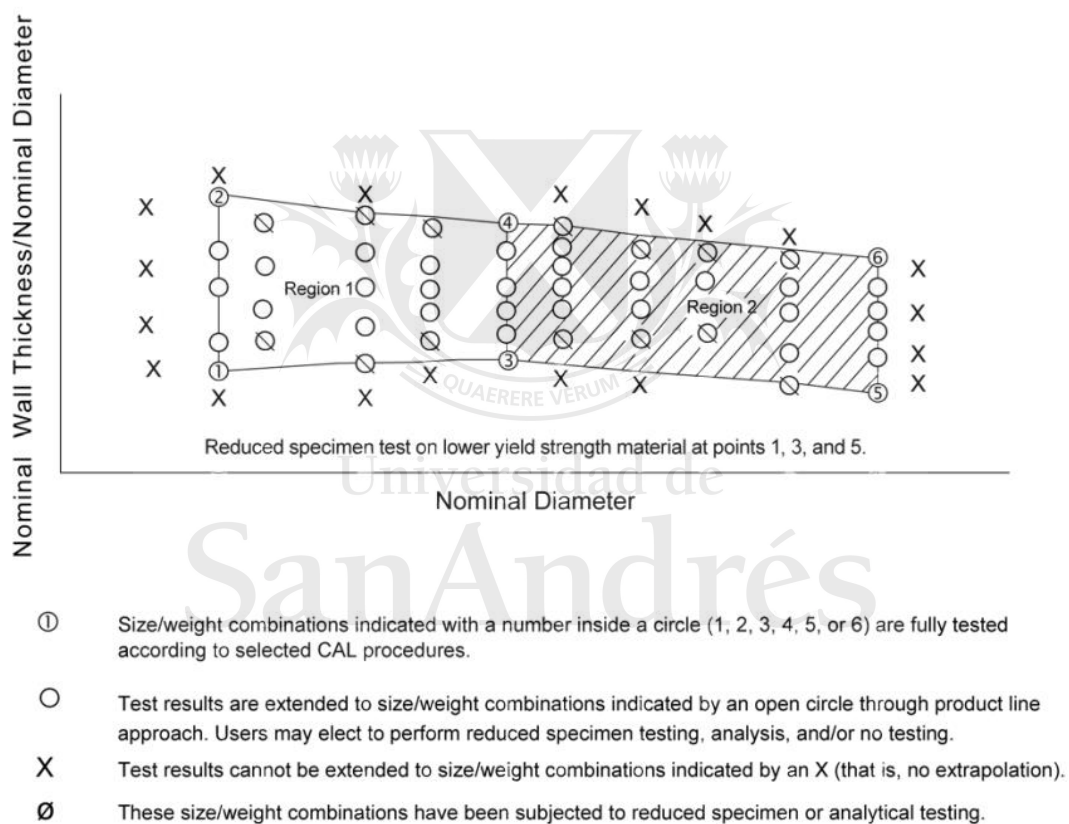


Figure F.1—Product Line Validation (Example 1)

Fig. 21: Criterios de interpolación/extrapolación de Línea de Productos. Fuente: (American Petroleum Institute, 2017b)

Adicionalmente a los criterios de diseño, se deben tener en cuenta para interpolación/extrapolación de resultados de FST, variables como la severidad de los ensayos (mayor severidad califica menor), la fluencia del material (mayor fluencia califica menor) y tipo de material (aceros tipo Cr13

califican aceros de bajo contenido de carbono). Es clave en este sentido la correcta selección de los productos a ensayar a plena escala para favorecer la interpolación/extrapolación analítica, minimizando evaluaciones.

Es importante aclarar que, para otro tipo de evaluaciones con o sin el amparo de una normativa (léase ensayos de sobretorque, fatiga, termales), podrían aplicarse metodologías similares para la validación de líneas de productos, manteniendo el espíritu de lo expuesto en la API RP 5C5:2017 Anexo F. Por último, es importante destacar que este Anexo es de **carácter informativo**, pudiendo establecerse criterios y acuerdos específicos entre fabricantes y empresas operadoras.



Universidad de
San Andrés

5. Posibilidades de utilizar gemelos digitales en los procesos de V&V de productos del Upstream. Discusión.

5.1. Punto de inicio: Benchmark y análisis de los casos de uso en industrias afines.

Para comenzar a analizar más en detalle las oportunidades reales de implementar gemelos digitales en los procesos de V&V de productos para la E&P de Petróleo y Gas, conceptualizaremos los casos de uso identificados en industrias afines y consolidados en la sección 3.2 del presente trabajo. Para ello, construiremos un *benchmark* entre los casos, identificando ejes temáticos relevantes que nos permitan encontrar características comunes para una exitosa implementación. Los ejes temáticos propuestos se detallan a continuación:

- ✓ Eje 1: *Industria-Producto*
- ✓ Eje 2: *Modelo de Simulación*
- ✓ Eje 3: *Parámetros del Gemelo Digital*
- ✓ Eje 4: *Contexto Colaborativo*

El Eje 1 de “*Producto/Industria*” tiene como objetivo una clasificación macro de las posibilidades de uso de gemelos digitales en etapas de diseño y desarrollo de producto para procesos de V&V. Bajo esta perspectiva, para cada caso mapeado se identifica la vertical de industria, el país origen de la empresa, el tipo de producto y una clasificación (subjetiva) del grado de estandarización del sector. La clasificación bajo este eje temático se resume en la **Tabla 2**.

EJE 1: Industria-Producto						
Case #	Empresa	Industria	Producto	País	Año	Grado de Estandarización de la industria
1	Boeing	Aeronáutica	Avion Comercial	Estados Unidos	2017	Alto
2	GE Aviation	Aeronáutica	Motores a reacción y Tren de aterrizaje	Estados Unidos	<2019	Alto
3	Rolls Royce	Aeronáutica	Motores a reacción	Reino Unido	2017	Alto
4	Air Force Research Lab (AFRL)	Aeronáutica / Defensa	Avión Supersónico	Estados Unidos	2020	Alto
5	SpaceX	Aerospacial	Cohetes de retropropulsión	Estados Unidos	2016	Alto
6	Aurus Motors	Automotriz	Automovil	Rusia	2017	Medio-Alto
7	Maserati	Automotriz	Automovil	Italia	<2017	Medio-Alto
8	Phillips	OEM (Healthcare)	Generador de oxígeno portátil	Países Bajos	<2018	Medio-Alto
9	Schunk	OEM (Industrial Automation)	Sistemas de sujeción	Alemania	2017	Medio

Tabla 2: Benchmark casos de uso de DT: Eje Industria-Producto (autoría propia)

Tal cual venimos desarrollando en este trabajo, a partir de nuestra investigación se lograron relevar **(9) casos industriales de uso de gemelos digitales en procesos de V&V de productos, de distinta naturaleza y complejidad**, en diferentes verticales, pero con preponderancia en los sectores de **Aeronáutica, Aeroespacial, Automotriz y Manufactura (OEM)**. Los casos identificados se reparten fundamentalmente entre **Estados Unidos (4)** y **Europa (5)**, con referencias de implementación desde el **2016 en adelante**.

En lo que respecta al **grado de estandarización de una industria**, nos enfocamos específicamente en el conjunto de normas técnicas y especificaciones que regulan la ejecución de procesos, la fabricación de productos y la prestación de servicios en un sector particular. Estos estándares técnicos son desarrollados por organismos de normalización o consorcios técnicos con el objetivo de garantizar la calidad y la seguridad de los productos durante su uso, mantener la consistencia en los diseños y los procesos de producción, y asegurar la interoperabilidad entre los distintos actores que componen el ecosistema de esa industria.

Cumplir con estándares específicos puede ser un requisito contractual obligatorio o una práctica recomendada en un sector, lo que subraya la importancia de considerar y alinear estos estándares en el diseño y desarrollo de nuevos productos y servicios.

De nuestra búsqueda, desafortunadamente no logramos identificar ningún ranking reconocido que defina taxativamente el grado de estandarización de las industrias bajo análisis. Mas aún, es importante reconocer que, dentro de una misma industria, puede incluso haber variaciones según la ubicación geográfica y/o agencias reguladoras específicas de cada país o región. A pesar de estas complejidades, proponemos una escala subjetiva para las industrias en consideración. Esta clasificación relativa refleja los diferentes niveles de estandarización en las industrias, donde "Alto" indica el grado más alto y "Medio" representa un grado más moderado. La industria Aeronáutica, Aeroespacial y de Defensa se destaca con el más alto grado de estandarización debido a sus críticos requisitos de seguridad y calidad a nivel componente, subsistemas y sistemas. Por su parte, la industria automotriz también muestra un alto grado de estandarización, principalmente en lo que respecta a la seguridad y la interoperabilidad, pero en términos relativos, de una leve menor criticidad que las anteriores. La industria manufacturera de equipos originales de Salud comparte esta clasificación "Media-Alta", dada la relevancia de la seguridad del paciente y los requerimientos de efectividad del producto. Por su parte, la industria manufacturera de equipos de automatización industrial, aunque todavía tiene un grado de estandarización moderado, presenta un grado ligeramente menor en comparación con las demás, ya que dicho nivel puede variar según nichos específicos dentro de este sector, dependiendo del contexto de uso del equipamiento.

En este contexto y siguiendo la clasificación propuesta, la conclusión que podemos establecer bajo este eje temático es que **el uso de gemelos digitales en procesos de V&V no presenta a priori limitaciones en términos de la complejidad de los productos bajo evaluación ni del grado de estandarización de la industria objetivo**, siendo de utilidad

para la verificación y validación de productos incluso bajo solicitaciones críticas y niveles “Medio-Alto” de estandarización de la industria.

Continuando nuestra comparativa, proponemos un segundo eje temático cuyo objetivo es caracterizar, a grandes rasgos, el “*Modelo de Simulación*” de los casos relevados. Para tal fin, seleccionamos dimensiones como el medio de digitalización del activo físico, el alcance general de la simulación y un nivel de complejidad (inferido) a partir de los detalles e información disponible en bibliografía. El consolidado de los casos bajo este eje temático puede verse en la **Tabla 3**.

		EJE 2: Modelo de Simulación		
Case #	Empresa	Medio de Digitalización	Alcance de la Simulación	Complejidad de la Simulación (inferida)
1	Boeing	Software	Life prediction. Maintenance and Design refinement	Alta (múltiples condiciones a lo largo del ciclo de vida del sistema)
2	GE Aviation	Software	Life prediction. Maintenance and Design refinement	Alta (Seguimiento digital de sistemas y componentes)
3	Rolls Royce	Software	Virtual Testing and Performance Prediction	Alta (Failure tests, pre-calificación)
4	Air Force Research Lab (AFRL)	Real Asset (3D Scanning)	Life prediction. Maintenance. Spare Parts design and virtual testing	Alta (múltiples condiciones y componentes)
5	SpaceX	Software	Diseño. Prototipado y Testing Virtual	Media (Resolución de ensambles y simulación de condiciones de despegue)
6	Aurus Motors	Software	Diseño. Prototipado y Testing Virtual	Media (Simulaciones de Rigidez, Vibraciones)
7	Maserati	Software	Diseño. Prototipado y Testing Virtual	Alta (Tuneles de viento)
8	Phillips	Software	Prototipado y Simulación.	Media (Simulación de performance en condiciones de uso)
9	Schunk	Software	Virtual Testing and Commissioning of the full system	Alta (Simulación y comisionamiento integral de Hardware + Software)

Tabla 3: Benchmark casos de uso de DT: Eje Modelo de Simulación (autoría propia)

En primer lugar, en términos del **medio de digitalización del modelo de simulación**, se observa una marcada tendencia al origen directo desde el modelo digital 3D CAD / CAE del producto y/o sus componentes, valiéndose de software PLM dedicado. Dichos modelos digitales a su vez son enriquecidos por las propiedades reales del activo físico (materiales, propiedades mecánicas, deformaciones, geometrías) y por la vinculación con datos en tiempo real generados durante la fabricación, la validación y el uso del producto. A pesar de este patrón, también hemos encontrado un caso de construcción del gemelo digital con ingeniería inversa, desde el modelo físico, a partir de un escaneo 3D de componentes y posterior

resolución del reensamble, con la complejidad adicional de la agregación de información de daños estructurales, fisuras y defectos reales al modelo digital (caso #4, US Air Force Research Lab).

En este punto, una posible observación radica en que **la generación del gemelo digital puede darse de forma bidireccional**, tanto desde el tradicional modelo CAD (de diseño, teórico y enriquecido con data real) o con ingeniería inversa desde el modelo físico a partir de un escaneo laser 3D, con capacidades de digitalización que capturan geometría y defectología con máxima precisión.

En términos del **alcance del modelo de simulación**, los casos relevados cubren un amplio abanico de necesidades dentro de las distintas etapas del ciclo de vida de los productos, tanto en fases de desarrollo de nuevos productos (NPD) como así también en su ingeniería de mantenimiento luego de su lanzamiento al mercado.

En tal sentido, se identificaron usos en etapas tempranas de diseño conceptual y prototipado virtual, resolviendo ensambles e identificando interferencias entre componentes previa a la manufactura de la primera unidad. Una vez definido el diseño, se detectaron repetidos usos en ensayos de verificación y validación (V&V), testeando virtualmente productos a partir de simular su performance en condiciones de uso regulares y extremas, supliendo ensayos a plena escala de alto costo y complejidad de ejecución. Algunos ejemplos de estos casos son las simulaciones de automóviles en túneles de viento virtuales (caso #7, Maserati), el modelado de ensayos a rotura en turbinas y motores a reacción (caso #3, Rolls Royce) ó la predicción de la performance de despegue de cohetes de retropropulsión (caso #5, SpaceX).

Siguiendo el camino dentro del ciclo de vida de los productos, la puesta en marcha virtual ("*virtual commisioning*") de sistemas es otro de los casos que se identificó en nuestra investigación, el cual representa un paso superador en términos del objetivo del modelo de simulación, verificando

de manera integral la funcionalidad de sistemas complejos en un entorno virtual, previa a la implementación o puesta en marcha física del sistema. En particular, relevamos el caso de Grupo Schunk (caso #9), fabricante alemán de robots y sistemas de automatización industrial, quienes realizan simulaciones y comisionamiento integral de hardware y software de sus sistemas de sujeción (por ejemplo, su mano de agarre servo-eléctrica SVH-5 para sus robots de servicio de asistencia en procesos industriales).

Por último, ya el estadio de producto fabricado y en uso, se han encontrado ejemplos de modelos de simulación cuyo objetivo se centra en la determinación de la vida de útil de componentes a partir de datos *real-time* de funcionamiento y la superposición de modelos de predicción de desgaste, fatiga y/o resistencia de materiales con fines de programar tareas de mantenimiento predictivo, dándole seguimiento digital a sistemas y componentes durante su uso. Complementariamente, esta información de performance en uso retroalimenta procesos de refinamiento de diseño de componentes y repuestos. Este tipo de modelos de simulación y aplicaciones son frecuentes en la industria aeronáutica, en sistemas de ingeniería compleja como son los motores a reacción, fuselajes y trenes de aterrizaje (casos #1 al #3, Boeing, GE Aviation y Rolls Royce) dadas las severas implicancias de roturas en servicio (seguridad, costos) y los elevados costos de paradas de mantenimiento no programadas por no garantizar la alta disponibilidad de vuelo a las aerolíneas.

Por otra parte, consecuencia de las lógicas políticas de protección de la propiedad intelectual de los fabricantes, los detalles técnicos específicos que se pueden obtener en la literatura abierta de estos modelos de simulación son escasos. A pesar de ello, la **complejidad (inferida) de los modelos de simulación** de todos estos casos encontrados entendemos podrían clasificarse como “Media-Alta”. Nos basamos para ello en la complejidad intrínseca de los sistemas bajo simulación (sistemas multicomponentes), la cantidad de variables en consideración (data de

diferentes orígenes) y la sofisticación necesaria de los modelos para poder representar y predecir de forma confiable el comportamiento de estos sistemas.

En resumen, bajo este eje temático logramos identificar que **el uso de gemelos digitales en procesos de V&V se apalanca de sofisticados modelos de simulación, de alta complejidad, que permiten cubrir un amplio rango de alcances y tipos de evaluación en diferentes etapas del ciclo de vida de los productos.** La digitalización de los activos físicos parece haber alcanzado una gran madurez, dejando de ser un problema independientemente de la geometría ó cantidad de componentes, pudiendo lograrse de forma bidireccional, ya sea desde el modelo CAD o desde el modelo físico a partir de un escaneo laser 3D de las piezas.

Siguiendo nuestro *benchmark*, proponemos un tercer eje temático enfocado en los *Parámetros del Gemelo Digital*. A los fines de nuestro análisis, tomamos como parámetros distintivos de esta tecnología algunos de los citados en la sección 2.2 del presente trabajo, en donde exploramos de la bibliografía la definición del término gemelo digital y sus conceptos relacionados. Los parámetros seleccionados que combinaremos para generar este eje, con sus fuentes y su descripción general se muestran en la **Fig. 22**.

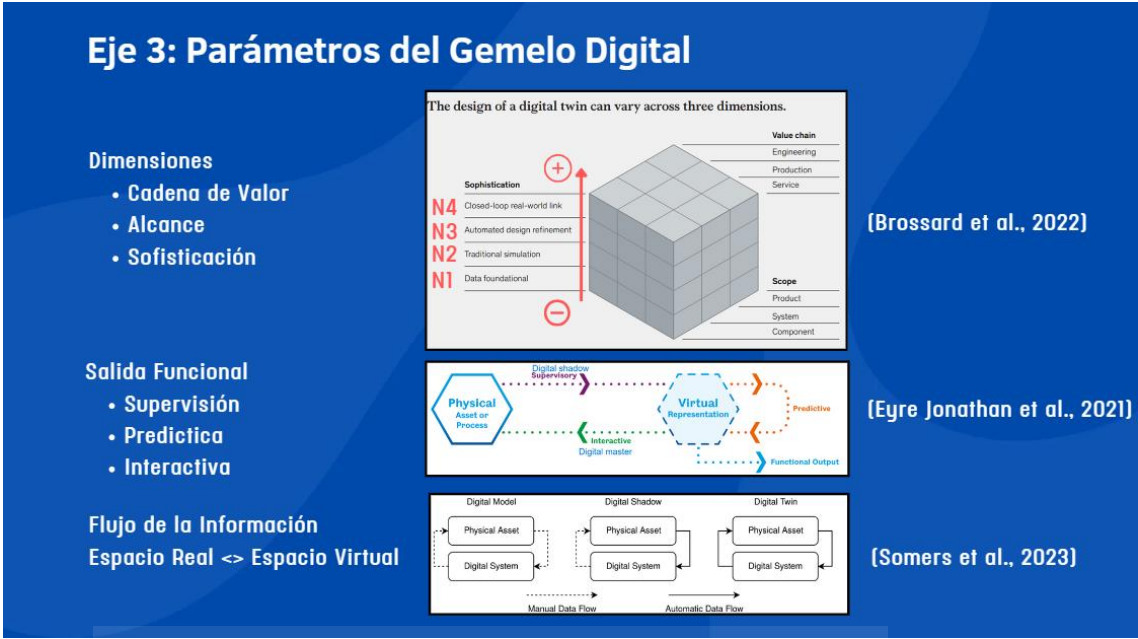


Fig. 22: Eje 3: Parámetros del Gemelo Digital – Selección de Parámetros (autoría propia)

El análisis de los casos de uso de gemelos digitales en procesos de V&V relevados bajo estos parámetros puede verse en la **Tabla 4**.

EJE 3: Parámetros del Gemelo Digital						
Case #	Empresa	Dimensiones			Salida Funcional	Flujo Información Real <-> Virtual
		Cadena de Valor	Alcance	Sofisticación		
1	Boeing	Ingeniería	Componente & Sistema	Simulación tradicional y Refinamiento de diseño Automático (N2-N3)	Predictiva	Digital Model or Shadow
2	GE Aviation	Ingeniería	Componente & Sistema	Simulación tradicional y Refinamiento de diseño Automático (N2-N3)	Predictiva	Digital Shadow
3	Rolls Royce	Ingeniería	Producto	Simulación tradicional y Refinamiento de diseño Automático (N2-N3)	Predictiva	Digital Shadow
4	Air Force Research Lab (AFRL)	Ingeniería	Producto	Simulación tradicional y Refinamiento de diseño Automático (N2-N3)	Predictiva	Digital Shadow
5	SpaceX	Ingeniería	Producto	Simulación tradicional y Refinamiento de diseño Automático (N2-N3)	Predictiva	Digital Model
6	Aurus Motors	Ingeniería	Producto	Simulación Tradicional	Predictiva	Digital Model
7	Maserati	Ingeniería	Producto	Simulación Tradicional	Predictiva	Digital Shadow
8	Phillips	Ingeniería	Producto	Simulación Tradicional	Predictiva	Digital Model
9	Schunk	Ingeniería	Producto	Simulación tradicional y Refinamiento de diseño Automático (N2-N3)	Predictiva	Digital Shadow

Tabla 4: Benchmark casos de uso de DT: Eje Parámetros del Gemelo Digital (autoría propia)

En términos de las dimensiones de los gemelos digitales que propone McKinsey (Brossard et al., 2022), claramente al estar nuestra investigación orientada a procesos de diseño y desarrollo de productos, todos los casos se encuentran concentrados dentro de la cadena de valor en la etapa de **Ingeniería**, cubriendo toda la gama de alcances propuestos, con aplicaciones de gemelos digitales en procesos V&V a nivel **componentes, sistemas y hasta productos**, con ejemplos en productos complejos de alto nivel de integración (+25,000 componentes) como lo son motores a reacción (Rolls Royce), cohetes de retropropulsión (SpaceX) y automóviles (Aurus Motors, Maserati).

Con relación a la sofisticación del gemelo digital, a pesar de no contar en muchos casos con detalles técnicos en la literatura pública (misma situación que con las condiciones del modelo de simulación), de la información disponible podemos inferir una **sofisticación en escala N2 – N3** (ver Fig. 22) a partir de combinar, en la mayoría de los casos, **métodos de simulación tradicional con técnicas iterativas de refinamiento automático de diseño**, utilizando algoritmos, herramientas automatizadas y aprendizaje automático para mejorar, optimizar y ajustar el diseño de un producto, sistema o componente. En ninguno de los casos relevados se pudieron encontrar referencias explícitas de un enlace en bucle cerrado con el mundo real, que, a partir del output funcional del gemelo digital se modifiquen los parámetros operativos del activo físico de forma automática y/o autónoma.

En este mismo sentido, la **salida funcional** de los gemelos digitales analizados según la clasificación de (Eyre Jonathan et al., 2021) pareciera limitarse a una salida netamente **predictiva**, sin interactividad con el activo físico. En todos los casos, los gemelos digitales reportan la posibilidad de pronosticar los estados futuros de los sistemas utilizando información recopilada en tiempo real y data agregada, permitiendo que los equipos de diseño y fabricación tomen decisiones informadas basadas en resultados y desempeño directos, pero en ningún caso actuando como

“*digital máster*”, tal cual propone un gemelo digital con salida funcional del tipo iterativa.

Todo esto lleva a que, según la clasificación propuesta por (Somers et al., 2023), aun se observa un elevado componente manual en el **flujo de la información, no calificando ninguno de los casos analizados como un “*Digital Twin*” por definición**, sino más bien enlistándose en casos del tipo “*Digital Shadow*” o incluso algunos limitándose a ser estrictamente un “*Digital Model*”.

A modo de conclusión de lo analizado bajo este eje temático nos parece interesante resaltar entonces que, siendo críticos con los componentes y clasificaciones dadas por la literatura, **los casos prácticos encontrados en la industria parecen no necesariamente cumplir con todos “los casilleros” para ser clasificados como gemelo digital**. Se detectan salidas funcionales limitadas al tipo predictivo, aparentemente sin interactividad del espacio virtual al activo físico en modo de bucle cerrado, aún con un alto componente de flujo manual de información en esa dirección, lo cual aumenta la participación humana en la toma de decisiones y la operatividad. Esto no deja de ser llamativo pues, a priori, no se infieren limitaciones tecnológicas para cerrar este loop.

Para finalizar, proponemos un cuarto y último eje temático enfocado en identificar factores de *Contexto Colaborativo* que pudieran tener un impacto positivo para una implementación exitosa de esta tecnología en el ámbito industrial. En este punto analizamos el impacto de colaboraciones entre industrias (B2B¹⁸), entre el ámbito académico y la industria (A2B¹⁹) y entre el ámbito gubernamental público y la industria (G2B²⁰). El consolidado de los casos bajo este eje temático puede verse en la **Tabla 5**.

¹⁸ B2B: Business to Business.

¹⁹ A2B: Academia to Business.

²⁰ G2B: Government to Business.

		EJE 4: Contexto Colaborativo		
Case #	Empresa	Partnership (B2B)	Academia2Business (A2B)	Government2Business (G2B)
1	Boeing	No	No	No
2	GE Aviation	No	No	No
3	Rolls Royce	No	No	No
4	Air Force Research Lab (AFRL)	No	No	Si
5	SpaceX	Si (Siemens)	No	No
6	Aurus Motors	No	Si	Si
7	Maserati	Si (Siemens)	No	No
8	Phillips	No	No	No
9	Schunk	Si (Siemens)	No	No

Tabla 5: Benchmark casos de uso de DT: Eje Contexto Colaborativo (autoría propia)

La primera observación que surge de analizar bajo este eje temático es que **el éxito en la implementación pareciera tener una fuerte correlación con el uso de soluciones de software y plataformas digitales**, idealmente que integren información de producto a lo largo de todo su ciclo de vida. De hecho, más del 30% (3 casos sobre 9, en particular SpaceX, Maserati, Schunk), hacen explícito un esquema de *Partnership B2B* con **Siemens**, utilizando su **plataforma de software de PLM** la cual contiene un amplio e integrado portafolio de soluciones dedicadas CAD, CAE y PDM para el diseño, simulación y gestión del ciclo de vida de los productos, tal cual puede ver en la **Fig. 23**.

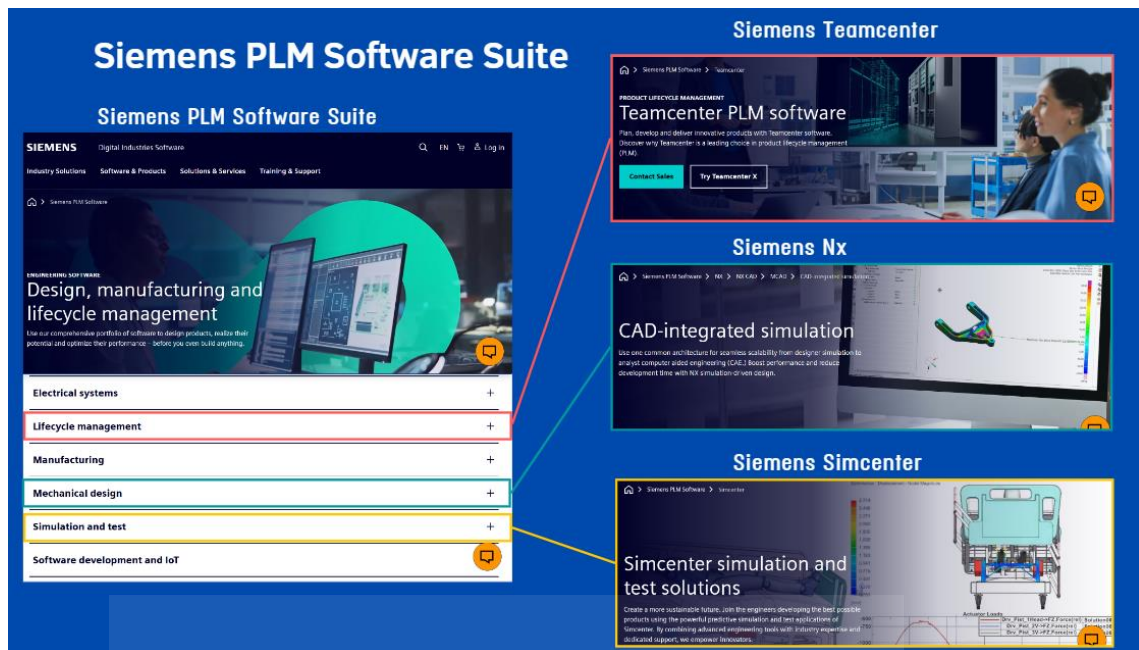


Fig. 23: Siemens PLM Software Suite (autoría propia)

Tal cual revisamos en la sección 3.3 del presente trabajo, además de [Siemens Simcenter](#), existen varias otras plataformas de software de simulación ([Matlab® Simulink®](#), [FlexSim](#), [Simulia](#) ó [Simul8](#), entre otras) que admiten la simulación basada en gemelos digitales, analizando datos en tiempo real proveniente de dispositivos IIoT y con soporte de Machine Learning (ML) y Deep Learning (DL). A pesar de ello, la frecuente mención de Siemens como partner facilitador para la implementación de gemelos digitales puede deberse, más allá de una posible excelente estrategia de marketing, al alto nivel de integración que tiene su *suite*, brindando soluciones *end-to-end* a lo largo de todo el ciclo de vida de producto y bajando las barreras de adopción de la tecnología para las empresas.

En términos de colaboración y transferencia de conocimiento entre instituciones académicas a la industria, de los casos relevados se puede destacar el caso de la automotriz rusa [Aurus Motors](#) y la **Universidad Politécnica de St. Petersburg (SPbPU)**, que fue la primera en Rusia en crear un gemelo digital de un automóvil para el diseño y desarrollo del [Aurus Senat Limousine](#), automóvil de lujo blindado destinado para el uso del primer ministro V. Putin.

Tal cual se indica en el artículo *“Polytech Days in Berlin: Why new digital technology is the backbone of industrial production and the global economy”* encontrado en (Russia Today, 2020), se cita a SPbPU como *“uno de los líderes en el campo del diseño digital, modelado y creación de gemelos digitales para sistemas mecánicos complejos”* y cuyos investigadores mantienen *“estrecha colaboración con destacadas empresas alemanas y globales, incluyendo Siemens AG, Airbus, Philips GmbH, SAP SE, Robert Bosch y Boeing”*. Esto apalanca el hecho de que **empresas de punta en la implementación de gemelos digitales mantengan relacionamiento y colaboración con universidades y centros de investigación, capitalizando del ámbito académico experiencias, hallazgos, tecnologías y/o recursos humanos capacitados.**

Complementado el análisis relativo al contexto colaborativo, nos parece relevante identificar la influencia positiva de la colaboración gubernamental a la industria para una implementación exitosa de los gemelos digitales en procesos V&V. En nuestro relevamiento identificamos dos casos con apoyo gubernamental explícito. El primero nuevamente involucra el caso de la automotriz rusa Aurus Motors y el Gobierno Ruso de V. Putin, quien en 2017 con su proyecto pionero **“Cortege”** busco incentivar el desarrollo de la economía digital en Rusia, a partir del uso de gemelos digitales en etapas de diseño y desarrollo de producto, proponiéndola como política de estado y un nuevo paradigma para la industria nacional. El trabajo titulado *“An Example of A Digital Product Design in Russian Industry”* (Gromova, 2019) así lo describe.

Tal cual desarrollamos en la sección 3.2 del presente trabajo, otro ejemplo de empuje gubernamental para la implementación de los gemelos digitales en procesos V&V de productos complejos lo hemos encontrado en el Laboratorio de Investigación de la Fuerza Aérea de Estados Unidos ([AFRL](#)). Este laboratorio, que actúa como centro de investigación científica y de desarrollo para el Departamento de la Fuerza

Aérea (combinando ámbito gubernamental y académico), utiliza gemelos digitales de sus bombarderos supersónicos para optimizar tareas de mantenimiento predictivo y de diseño de piezas de reparación.

Justamente, la revista especializada [FedTech](#) publicó un reciente artículo en donde menciona que la “*La Optimización de los Gemelos Digitales respalda los esfuerzos en ensayos e innovación del DoD*”²¹ (Krishna Sai, 2023), citando que el AFRL no solo utiliza gemelos digitales para diseñar, prototipar y evaluar aeronaves y sistemas armamentísticos, sino que incluso está desarrollando un entorno digital llamado “*The Colosseum*”, donde sistemas de proveedores pueden probarse y competir virtualmente.

Mas allá de estas referencias recientes, existen múltiples ejemplos que demuestran que el apoyo gubernamental favorece el avance tecnológico. De hecho, la NASA ha sido un claro caso de éxito en este sentido, y como, desde sus orígenes en la década del 60s, sus investigaciones durante la carrera espacial derivaron en significativos avances para la ciencia y la tecnología, incluso para lo que a la simulación en la ingeniería y los gemelos digitales se refiere, tal cual hemos desarrollado en este trabajo.

En resumen, de nuestra investigación se deriva que, al igual que en otros múltiples avances de la ciencia y tecnología en la historia, **la colaboración entre industria, academia y gobierno acelera la innovación y la implementación de nuevas tecnologías**, no siendo los gemelos digitales una excepción a esta regla.

²¹ DoD: Department of Defense.

5.2. ¿Existen factores limitantes para la implementación de gemelos digitales en procesos de V&V de productos del Oil & Gas?

A partir de la investigación que venimos realizando y en particular del *benchmark* de la sección anterior, podemos concluir que a priori **no se detectan factores limitantes a nivel industria, producto y modelos de simulación** para el uso de gemelos digitales en procesos de V&V de productos del Upstream.

Si tomamos por ejemplo el Eje 1 de “Industria-Producto”, y en particular el **grado de estandarización** de la industria, bajo nuestro criterio, la industria del Petróleo y Gas podría clasificarse como “**Medio-Alto**”, con un grado **comparable a la industria Automotriz pero no necesariamente superior al nivel de estandarización que presenta la industria Aeronáutica, Aeroespacial y de Defensa.**

Haciendo un poco de historia y para dar contexto, los estándares de la industria del petróleo y gas existen desde que **Det Norske Veritas (DNV)** fue fundada en Oslo en 1864 por aseguradoras marítimas que intentaban establecer un conjunto de reglas y procedimientos estandarizados. El **American Petroleum Institute (API)**, por su parte, fue fundado en 1919 para establecer estándares en la producción de petróleo en los Estados Unidos, promover la industria petrolera e influir en las políticas. La API, desarrolla y publica numerosos estándares técnicos para la industria del petróleo y gas en todo el mundo, cubriendo una amplia gama de actividades, desde la perforación y la producción hasta el transporte y la refinación. Mientras tanto, en 1947, la **Organización Internacional de Normalización (ISO)** fue establecida por delegados de 25 países, reflejando la creciente tendencia hacia estándares que pudieran aplicarse en todo el mundo.

En tal sentido, la ISO emite estándares internacionales multiindustria que también son aplicables a la industria del petróleo y gas. Algunos de estos

estándares están diseñados específicamente para la gestión de la calidad, la gestión ambiental y la gestión de la seguridad en el Oil & Gas. Un muy completo compendio de los estándares ISO aplicables a la industria del O&G puede encontrarse en la página del comité ("[ISO Standards for use in the oil & gas industry List](#)").

En contrapartida, tomando como ejemplo la industria aeronáutica y aeroespacial, estas industrias son altamente reguladas para garantizar la seguridad y la calidad en el diseño, la fabricación y el mantenimiento de aeronaves. Algunas de los estándares y organizaciones más relevantes incluyen (British Standard Institution (BSI), 2023):

- AS/EN 9100: Especificación técnica de la serie ISO 9000 adaptada específicamente para la industria aeroespacial. Define los requisitos para los sistemas de gestión de calidad en organizaciones que participan en el diseño, la producción y el mantenimiento de productos aeroespaciales.
- ISO 9001: Norma internacional que establece requisitos para un sistema de gestión de calidad, siendo aplicable también a la industria aeroespacial.
- FAA (Administración Federal de Aviación): En los Estados Unidos, la FAA emite regulaciones para aeronaves civiles. Las regulaciones de la Parte 21 y la Parte 25 son especialmente importantes para el diseño y la certificación de aeronaves.
- EASA (Agencia Europea de Seguridad Aérea): Similar a la FAA, la EASA emite regulaciones para la aviación civil en la Unión Europea.
- ARP4754A: Esta norma guía el proceso de desarrollo y certificación de sistemas aeronáuticos.
- ARP4761: Estándar para la gestión de seguridad y evaluación de riesgos en sistemas aeronáuticos.
- DO-178C: Norma para la certificación de software en sistemas aeronáuticos.

- DO-254: Norma para la certificación de hardware en sistemas aeronáuticos.
- NADCAP (National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program): Programa de acreditación para procesos de manufactura y pruebas en la industria aeroespacial.
- MIL-STD-810: Estándar militar estadounidense que establece procedimientos para probar la resistencia de los equipos a entornos ambientales adversos.

Estos son algunos de los ejemplos que muestran lo **intensivo del grado de estandarización y normativo de la industria aeronáutica y aeroespacial**, lo cual, en vistas de los resultados de nuestra investigación, **no constituyeron en una barrera limitante para la implementación de gemelos digitales en procesos de V&V de sus productos**, tal cual lo vimos en los casos de Boeing, GE Aviation, Rolls Royce, AFRL y SpaceX. A partir de ello, podemos concluir que el grado de estandarización en el Oil & Gas tampoco debiera ser un limitante a la hora de analizar la implementación de esta tecnología en este segmento.

Siguiendo en esta línea y conjeturando un poco, puede que la existencia de estándares de industria que definan las prácticas recomendadas, procedimientos de evaluación y criterios de aceptación/rechazo para la ejecución de procesos de V&V de productos sean incluso beneficiosos para la implementación de este tipo de tecnologías pues circunscribe taxativamente los requerimientos de evaluación y las variables físicas a considerar, facilitando la conceptualización de los modelos digitales que representan los activos físicos bajo análisis.

Continuando bajo el mismo eje temático de “Industria-Producto” pero ahora enfocándonos en la dimensión “Producto”, nos resulta un poco más evidente la ausencia de limitantes. Los casos relevados en industrias afines incluyen el uso de gemelos digitales en procesos V&V de productos de diferente envergadura, complejidad y naturaleza, con ejemplos en motores a reacción, trenes de aterrizaje, fuselaje de aviones,

cohetes de retropropulsión y automóviles, a distintos niveles de integración, desde nivel básico de componente o repuesto, pasando a subsistema/sistema y alcanzando la evaluación funcional integral a nivel producto.

Tal cual desarrollamos en la Sección 4, el producto utilizado en el Upstream, las conexiones roscadas en tubulares OCTG, se evalúan a nivel individual ensamble (Pin <> Box), caracterizando su performance en términos de tendencia al engrane, sellabilidad e integridad estructural, simulando el abanico de solicitaciones posibles a los cuales la conexión está sometida durante su vida útil en operación. A pesar de las variedades de geometrías, perfiles de rosca, superficies sellantes y lubricantes, **las conexiones roscadas a nivel de probetas y procesos de V&V en laboratorio podrían considerarse como un sistema, de complejidad moderada** respecto a lo que podría ser la sarta y más aún, que otros sistemas y productos para los cuales relevamos aplicación de gemelos digitales para prototipado digital y testing virtual en otras industrias.

Siguiendo nuestro análisis, haremos foco ahora en los parámetros que caracterizan los “**modelos de simulación**” que se utilizan para la generación de los gemelos digitales, analizando, desde la óptica de los procesos de V&V de producto del Upstream del Oil & Gas, los parámetros utilizados en el Eje 2 del benchmark de la sección 5.1. Allí, desmenuzamos los casos de industria en términos del medio de digitalización, el alcance y la complejidad de los modelos de simulación.

Repasando brevemente y en términos generales, el modelado de conexiones roscadas en el upstream puede involucrar uno o varios de los siguientes casos:

- Modelado estructural y mecánico del conjunto tubo – conexión;
- Simulación de proceso de ensamble (*make-up*);

- Simulación de cargas combinadas bajo diferentes secuencias (ciclos de carga axial – presión - temperatura) y evaluación de indicadores de sellabilidad;
- Simulación de cargas extremas a rotura (*Limit Load Paths*)
- Simulación de performance a cargas repetitivas (Fatiga)

Adicionalmente, pueden modelarse cargas extremas derivadas de aplicaciones específicas en campo y/o condiciones anormales de operación, como lo puede ser condiciones de sobretorque (en aplicaciones de DwC), ciclos de temperatura en pozos térmicos o cargas de pandeo (*buckling*) de tuberías.

Mas allá de las inherentes limitaciones que tiene cualquier modelo en capturar el fenómeno físico y las dificultades para representar algunas condiciones reales (ej, presión de grasa dentro de la conexión, rugosidad de superficies sellantes, degradación de materiales por carga cíclica/histéresis), **la complejidad y alcance de este lote de evaluaciones utilizadas en el Oil & Gas para procesos de V&V de conexiones roscadas es de orden similar a las relevadas en la bibliografía para otras industrias.** Según vimos, se tienen en otras industrias ejemplos de resolución de ensambles, simulaciones de rigidez, vibraciones y resistencia a la fatiga de componentes y sistemas, como así también *failure tests* y ensayos de túneles de viento en productos complejos como turbinas y automóviles, cubriendo diferentes etapas dentro del diseño, prototipado y ensayo virtual de productos.

En términos de los medios de digitalización y en base a mi experiencia en producto en esta vertical, **en el diseño de conexiones roscadas en tubulares y la preparación de modelos de simulación, predomina el uso de software PLM integrado y la generación de forma directa desde el modelo digital 3D CAD / CAE.** A partir de esta metodología, es posible la generación tridimensional de ambos componentes pin y box, por separado, barriendo las diferentes tolerancias geométricas de fabricación y luego, resolver el ensamble para el armado de la “probeta

virtual”. Complementariamente, pueden utilizarse herramientas de escaneo laser 3D, para casos en donde se requiera digitalizar y modelar performance de conexiones con cierta historia de uso y/o alguna defectología de fabricación.

Como conclusión, **los modelos de simulación utilizados en procesos de V&V de productos para el Oil & Gas no presentan limitaciones de origen para poder ser utilizados en la construcción de gemelos digitales.**

Un aspecto adicional que podría actuar como limitante y que no fue analizado en el *benchmark* de casos de uso por no contar con referencias, es el de los **sensores y actuadores** utilizados, y su estado del arte actual. Aunque no es el propósito de este trabajo, es importante reconocer que estos dispositivos son claves en el ecosistema de los gemelos digitales, y el Oil & Gas no es la excepción. Como venimos desarrollando, los sensores son de vital importancia para obtener data en tiempo real de las variables físicas de relevancia, y así, enriquecer los modelos de simulación y luego, los actuadores, para justamente actuar sobre el activo físico en base a los análisis y predicciones obtenidos en el espacio virtual.

Para el caso de los procesos de V&V de conexiones roscadas en tubulares, los esfuerzos sobre las probetas en ensayos de laboratorio se corresponden a las sollicitaciones esperadas al producto en operación, encontrándose circunscriptas a un lote bastante reducido y “tradicional” de variables físicas <> sensores de campo. Los principales se listan en la siguiente **Tabla 6**:

Solicitud/ Variable Física	Sensorización
CARGAS AXIALES (+) Traccion <--> (-) Compresión	Celdas de Carga
PRESIONES DE FLUIDO P.Interna (gas) P.Externa (agua)	Transductor de presión
TEMPERATURA	Sensores de Temperatura
DEFORMACION MATERIALES	Strain Gauges 2D/3D Digital Image Correlation (DIC)
TORQUE	Transductor de Torque (directo) Celda de Carga (indirecto)
LEAK (gas o liquido)	.IP (gas): Bubble Method, Helium Mass Spectrometer .EP (agua): Bubble method

Tabla 6: Variables Físicas y sensorización típica en procesos V&V de O&G (autoría propia)

En términos generales, la industria de los sensores ha tenido un progreso tecnológico sustancial en el último tiempo, logrando precisión y confiabilidad cada vez menores costos, agregándole mayor resistencia a las condiciones demandantes como las del O&G (HP/HT, ambientes corrosivos, fluidos complejos), con bajo consumo de energía y capacidades de conectividad.

En términos de adquisición y conectividad de los datos, existe también la posibilidad de utilizar equipos de borde tipo *Endpoints* IIoT para capturar las señales electrónicas de sensores sin conectividad, a pie de fenómeno, y enviar el dato a nube para almacenamiento y procesamiento, resolviendo esa “primera milla” del dato. Mas aún, es común el uso en laboratorios de sofisticados **sistemas de adquisición de datos** que consolidan las señales de múltiples tipos y orígenes, incluso, como en el caso de dispositivo [Siemens Simcenter SCADAS](#), ya embebido con integración a plataformas de software PLM, simulación y *virtual testing*, facilitando la generación de la contraparte digital del activo físico bajo ensayo.

Otro punto para destacar en este apartado de sensorización radica en que, a pesar de que existan fenómenos ó tipos de instrumentos de medición “discretos”, como pueden ser por ejemplo las mediciones de

pérdidas en la conexión (*leaks*) a partir de sistemas de medición tipo “burbuja”, existen tecnologías disponibles para “digitalizar” estas lecturas a partir de cámaras de video de alta resolución y software de análisis de imágenes. Otro ejemplo de estos sofisticados sistemas de análisis de imágenes es el método denominado [Digital Image Correlation \(DIC\)](#), el cual analiza el desplazamiento de un patrón superficial aplicado artificialmente sobre el componente o sistema bajo ensayo pudiendo determinar en tiempo real un mapa de deformaciones 3D de la pieza.

Por último, a modo de consideración final es importante mencionar que las condiciones de laboratorio, en donde se ensayan las probetas a plena escala de las cuales se tomaran los datos en tiempo real para enriquecer el modelo digital, resultan mucho más favorables y menos demandantes que el de operación en yacimiento, beneficiando así un correcto set-up de sensores, confiabilidad y precisión de los datos generados en ensayo, con baja latencia de comunicación bidireccional, todos factores relevantes para la robustez y representatividad del gemelo digital.

En resumen y tal cual puede verse en la **Fig. 24**, según nuestra perspectiva y tomando referencia el *benchmark* con otras industrias, **no identificamos factores limitantes a nivel 1) industria, 2) producto, 3) condiciones de los modelos de simulación y 4) tecnología de sensores y actuadores para el uso de gemelos digitales en procesos de V&V de productos del Upstream.**



Fig. 24: Análisis de limitantes para implementar Gemelos digitales en O&G (autoría propia)

5.3. Análisis de Campo. Presentación de Resultados y Discusión de observaciones.

Para capturar la visión de la industria sobre esta temática se diseñó un breve cuestionario, tipo encuesta, circulándola de forma privada a colegas y pública en redes profesionales (LinkedIn). El público objetivo comprendió primariamente a profesionales especialistas de la industria del petróleo y gas, en diferentes roles y empresas dentro de la cadena de valor. También se buscaron opiniones de expertos en modelado numérico y especialistas en ensayos a plena escala en laboratorios y entes certificadores.

El cuestionario se estructuró en 4 secciones macro, a saber:

- Sección 1: Información general de la audiencia.
- Sección 2: "Gemelos Digitales - Conocimiento de la tecnología y estado de implementación (general de industria y en específico en su ámbito laboral)".
- Sección 3: "Gemelos Digitales - Beneficios, desafíos y últimos avances"

- Sección 4: Opinión, perspectivas futuras y comentarios adicionales"

El cuestionario propuesto, denominado "[Digital Twins in Oil & Gas: Industry Survey](#)", puede verse en el **Anexo B. Se registraron (29) respuestas en aprox. 1 mes de circulación en redes y contactos, lo cual consideramos razonable dado las características de nicho de la investigación y el propósito del trabajo.** Se estableció como corte de recepción de respuestas al 17 de noviembre de 2023, llegando a cierto grado de saturación, con tendencias marcadas en cada una en las dimensiones relevadas.

Los detalles y el análisis de las respuestas recibidas se discuten a continuación, organizadas por sección.

En términos de audiencia (Sección 1), se observa un **grupo heterogéneo y experimentado de profesionales dentro de la cadena de valor del Oil & Gas**, con lógica preponderancia en el sector manufacturero OCTG²² (>40%) consecuencia de mi red de contactos, pero con representantes especialistas en simulación numérica (20%) y ensayos de laboratorio (10%), proveedores de servicios (10%) y operadoras (7%). Casi el 90% de los profesionales encuestados supera los 10 años en la industria. Los resultados de esta sección pueden verse en la **Fig. 25**

²² OCTG: Oil Country tubular Goods

Analisis de Campo - Encuesta: Digital Twins in Oil & Gas: Industry Survey Section 1: Respondent Information

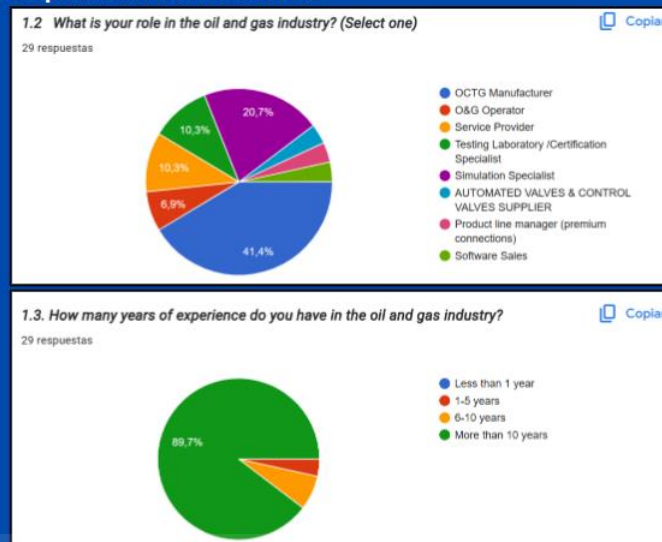


Fig. 25: Sección 1 - Información de la audiencia – Encuesta Propia

Con relación al conocimiento y estado de implementación de los gemelos digitales en la industria (Sección 2a), los datos se resumen en la Fig. 26. Como puede verse, **más del 80% del lote de encuestados indica estar familiarizado total o parcialmente con la tecnología**. A pesar de ello, **la penetración en la industria es clasificada entre limitada y en sus primeras etapas por casi el 83% de la muestra, con mayoritariamente solo algunas empresas pioneras experimentando con la tecnología**.

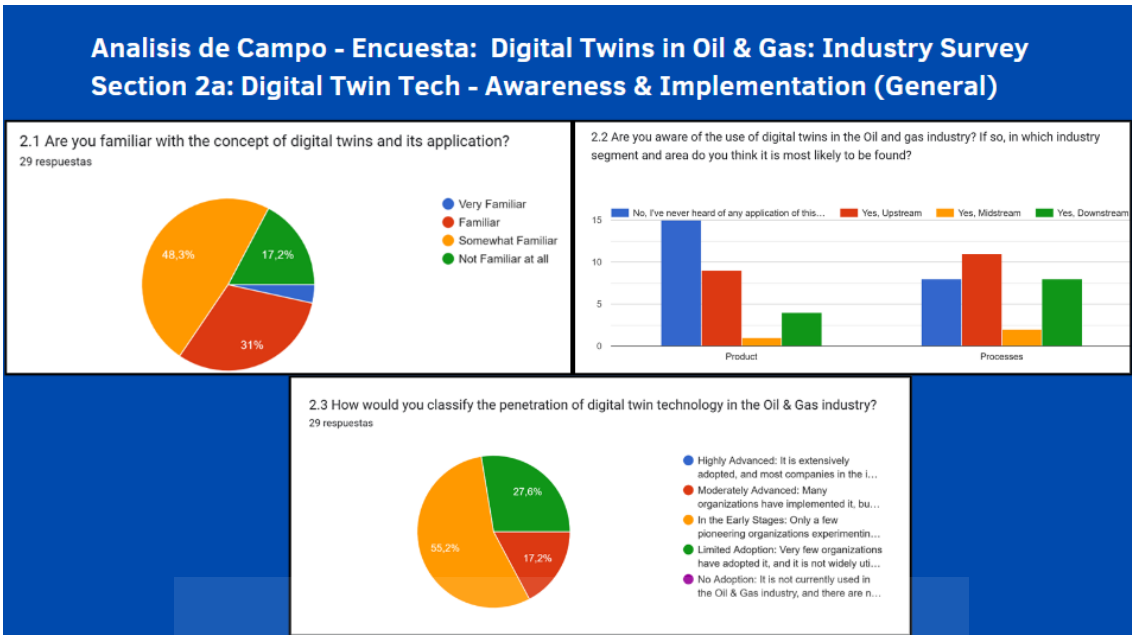


Fig. 26: Sección 2a - Conocimiento y estado de implementación (general de industria) – Encuesta Propia

Para hacer foco en la percepción de los campos de aplicación de los gemelos digitales en el Oil & Gas y desagregar las respuestas obtenidas en la sección 2.2 de la encuesta, transformamos los datos obtenidos del cuestionario en la siguiente **Tabla 7**.

Sección 2.2) Are you aware of the use of digital twins in the Oil and gas industry? If so, in which industry segment and area do you think it is most likely to be found?

	Total Encuestados		Total Segmento O&G	
	29		Count	%
	Producto	Proceso		
Segmentos Oil & Gas	Upstream	9	11	20 ✓ 69%
	Midstream	1	2	3 ✗ 10%
	Downstream	4	8	12 ⚠ 41%
Total x Área de Aplicación	Count	14	21	
	%	✗ 48%	✓ 72%	
	Sin Referencia	15	8	
	● 52%	● 28%		

Tabla 7: Detalle Sección 2.2 – Implementación de la tecnología en la Industria (Autoría Propia)

Bajo este enfoque, el 52% de los encuestados (15 de 29) no tiene referencia de uso de gemelos digitales en Producto mientras que, del mismo modo, solo el 28% (8 de 29) no tiene referencia de su uso en Procesos. En tal sentido, efectivamente la percepción es que hay más

familiaridad con el uso de gemelos digitales en ámbito de procesos (21 de 29) que de producto (14 de 29), más allá del segmento. De esto se puede inferir que, de aplicarse, **Procesos parecería ser un ámbito más extendido y conocido de aplicación de los gemelos digitales, por sobre Producto**. En términos de segmento de la industria, **Upstream presenta una aplicación más pronunciada**. En este último punto es relevante mencionar que tal vez la audiencia tenga alguna inclinación hacia este segmento, dado su background y expertise, con lo cual la opinión pueda tener algún componente de sesgo.

Siguiendo el análisis de los resultados de campo, ahora nos enfocamos en el conocimiento y estado de implementación de los gemelos digitales en específico en el área de cobertura y empresa del encuestado (Sección 2b). Los datos se resumen en la **Fig. 27**.

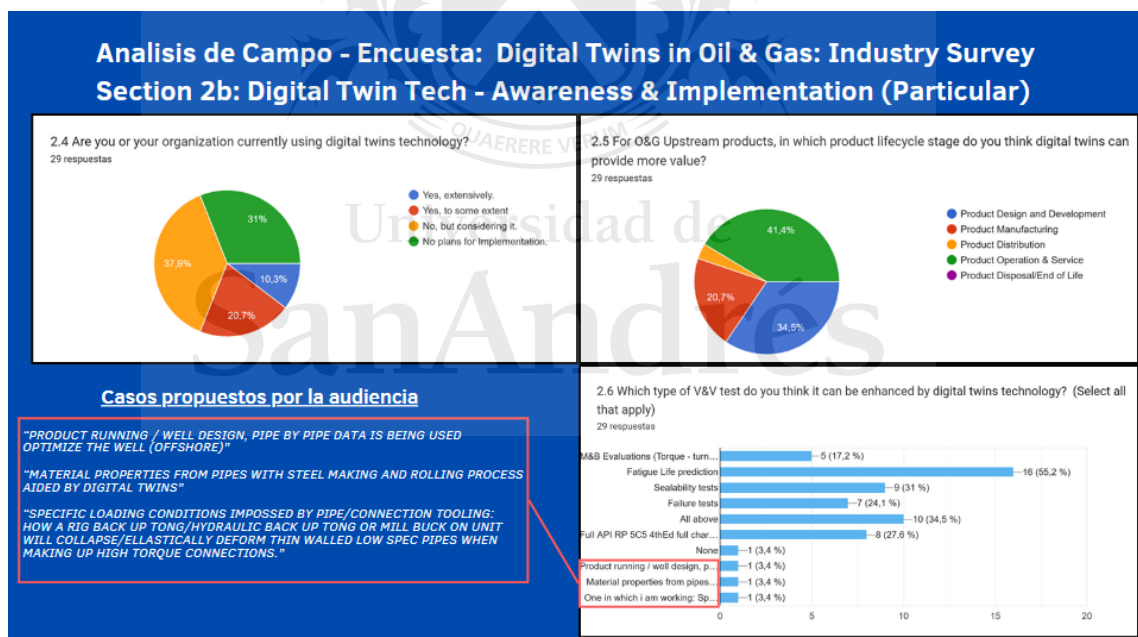


Fig. 27: Sección 2b - Conocimiento y estado de implementación (particular empresa) – Encuesta Propia

Tal cual puede verse del consolidado de arriba, el grado de implementación de los gemelos digitales a nivel empresa es dispar dentro del ámbito de los encuestados. A pesar de ello, **casi el 70% expresa escasa implementación en la de los gemelos digitales dentro de su**

organización actual. El 30% restante expresa implementación en cierto grado y **solo el 10% informa un uso intensivo.**

Dentro del ciclo de vida de productos del Upstream, la audiencia consultada mayormente identifica valor en el uso de gemelos digitales en primer lugar en la etapa de **operación y servicio (>40%)** y recién luego en **diseño y desarrollo de producto (35%)**, seguido en tercer lugar en la etapa de **manufactura (20%)**.

Enfocándonos particularmente a los procesos V&V, las respuestas a nuestro cuestionario muestran como una primera lectura una percepción de un **alto potencial de aplicación, en evaluaciones de diferente índole**, pudiendo cubrir desde **ensayos de M&B, Sellabilidad y Rotura** e incluso para **evaluaciones integrales**, tal cual propone la normativa API RP 5C5:2017. En línea con la experiencia observada en otras industrias, pareciera haber un consenso en términos de que los gemelos digitales pueden tener una amplia aplicabilidad para la **predicción y determinación de la vida a fatiga de tubulares y conexiones (55%, 16 de 29)**.

Adicionalmente, se citan espontáneamente algunos casos de uso sobre los cuales la audiencia está trabajando en la actualidad, lo cual demuestra el interés que tiene la industria por explorar resolver diferentes problemáticas de negocio a partir del uso de esta tecnología. Basándose en la somera descripción, las problemáticas descritas son variadas, pero en algunos casos dejan dudas si califican como gemelo digital per se o quedan mejor circunscriptos como “sombras digitales” o incluso “modelos digitales”, sofisticados.

Siguiendo nuestra evaluación en campo, la Sección 3 pretende capturar los beneficios y desafíos que se pueden llegar a derivar de la implementación de gemelos digitales para los procesos de V&V en el Oil & Gas. Los resultados se muestran en la **Fig. 28** a continuación.

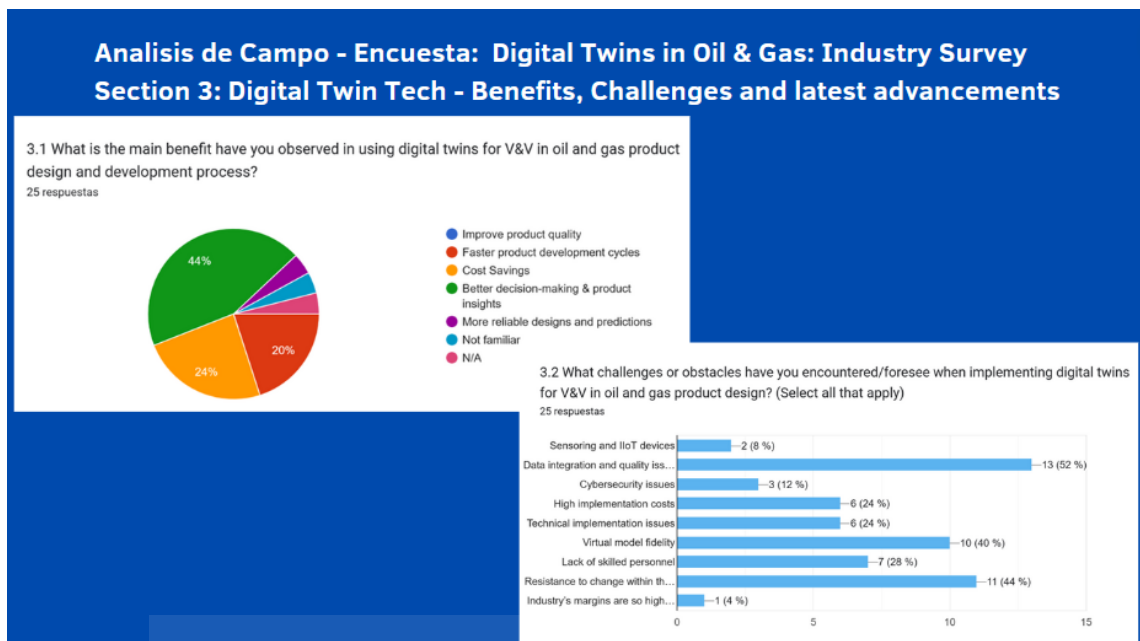


Fig. 28: Sección 3 – Beneficios y desafíos – (Encuesta Propia)

Tal cual puede verse, en términos de beneficios se identifican, en orden de selección, una **mejora en la toma de decisiones** para el diseño de productos (44%), una **reducción de costos** dedicados a procesos V&V (24%) y una **aceleración de los ciclos de desarrollo** de nuevos productos (20%).

Por su parte, en relación con los desafíos, el Top #3 de elecciones combina tanto **aspectos técnicos como culturales**, destacando problemas de **integración y calidad de los datos** (52%), **resistencia al cambio dentro de las organizaciones** (44%) y **fidelidad del modelo virtual** (40%). Inconvenientes técnicos en la implementación, altos costos de ejecución y falta de recursos calificados le siguen en el listado. Los desafíos relacionados con la capa de sensorización, dispositivos IoT ó incluso la ciberseguridad, a priori parecen representar una preocupación de menor orden.

Ante la consulta de cuáles son las últimas innovaciones en las cuales se están trabajando en el campo de la evaluación de productos tubulares (Sección 3.3.), los principales *insights* se listan a continuación (**Tabla 8**)

3.3 What are the latest innovations have you been working on the field of testing and evaluating OCTG tubular products?

Sector en la Industria	Ultimas innovaciones reportadas
OCTG Manufacturer - Product Area	"Corrosion tests, Manufacturing process optimization" "High resistance to external pressure" "Thread sealability characterization and prediction" "From the testing and evaluation stand point I not aware of significant innovations in recent years" "Implementation of PLM software, test results database management"
OCTG Manufacturer - Field Service Area	"Smart Pipe, 3d mapping, pipe tracer, iRun tool." "High frequency sensing for DwC" "3D mapping for accurate prediction of collapse and internal yield pressure ratings joint by joint" "Combined torsional & axial loading; thin wall, low grade pipe crushing during make up; pipe deformation due to formation movements"
Testing Laboratory /Certification Specialist	"Electronic leak detection" "Full scale stress corrosion test simulating field condition"
Simulation Specialist	"Trying to mimic exactly what happens in the testing frame and understanding why we were not able to capture issues it in the design phase." "Finite element analysis with 3D elements compared to axisymmetric mesh"
Software Sales/Service Provider	"Utilization of AI to perform failure analysis and interpretation of FEA outputs "
O&G Operator	"CCS performance"

Tabla 8: Detalle Sección 3.3 – Últimas innovaciones en la evaluación de tubulares (autoría propia)

De estas opiniones se pueden desprender algunas observaciones:

- ✓ El **baricentro de la innovación en empresas manufactureras de tubulares** pareciera estar levemente **inclinado en servicios por sobre productos**, con interesantes iniciativas enfocadas en mejoras y optimización en operaciones del Upstream (make-up y rotación de tuberías para DwC²³, selección y separación de tubos para optimizar performance de pozo).
- ✓ Las zonas de trabajo en el ámbito de producto tubular (tubo y conexión) presentan foco en **optimizar la performance de los tubos** (presión interna/externa, resistencia a la corrosión), en **mejorar los modelos para predecir la performance a sellabilidad de las conexiones y en consolidar data del producto** a lo largo de su ciclo de vida (implementación software PLM, consolidación de base de datos de ensayos).
- ✓ **En el campo de la simulación numérica se observan esfuerzos en refinar modelos** que permitan predecir y ajustar de mejor manera con los resultados a plena escala (comparativas de modelos 2D vs. 3D, modelado de la máquina de ensayos – “*testing frame*”)

²³ DwC: Drilling with Casing

- ✓ **Los especialistas de ensayos y responsables de laboratorio**, por su parte, informan iniciativas para **mejorar la captura de fenómenos físicos** que ocurren durante las evaluaciones, a nivel **sensorización** (medición de perdidas en ensayos de sellabilidad) o aumentar la **representatividad de los ensayos** con relación a las condiciones de operación (ensayos de corrosión a plena escala).

Por último, la Sección 4 de nuestra encuesta tiene el objetivo de capturar opiniones en relación con las perspectivas futuras y comentarios adicionales relacionados a la implementación de esta tecnología en la industria. A pesar de ser mayormente cualitativa, unos de los feedbacks relevantes de esta sección es que **el 65% de los encuestados no vislumbra que normativas como la API 5C5:2017 (o similares) adopten tecnologías como los gemelos digitales para complementar o reemplazar requerimientos de evaluación**, tal cual lo muestra la **Fig.29**

4.1 Do you foresee industry standards (i.e. API RP 5C5 4thEd or similar) can adopt digital twins technology to complement or replace current evaluations requirements in the next 5 years?
29 respuestas

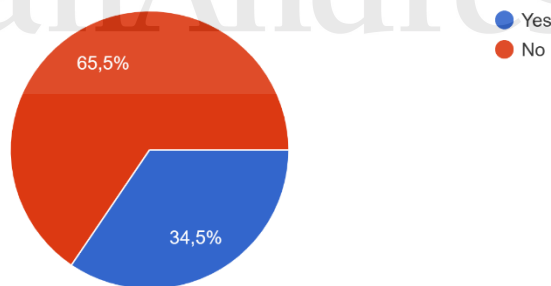


Fig. 29: Sección 4 – Expectativa de adopción de gemelos digitales por normativas (Encuesta Propia)

Para tratar de representar las opiniones de la audiencia en cuanto a la probable evolución del rol de los gemelos digitales en el campo de los procesos de V&V del Oil & Gas en los próximos 5 años, generamos una

participantes expresaron **conservadurismo en la industria**, especialmente en el diseño de productos, pero con potencial de crecimiento en los próximos años.

- ✓ Aplicaciones y Áreas de Enfoque:
 - Énfasis en el **monitoreo en tiempo real**, análisis de datos para la detección de problemas y reducción de costos.
 - Con más probabilidad que se implemente primero en el **monitoreo de procesos de fabricación, antes que en procesos de V&V.**
 - **Integración con análisis de datos, IA y aprendizaje automático para V&V sofisticado** y toma de decisiones.
- ✓ Desafíos y Limitaciones:
 - **Conservadurismo** de la industria y adopción lenta, especialmente para propósitos de calificación.
 - Desafíos relacionados con la **capacidad computacional, pruebas extensas (R&R²⁵)** y proyectos a más largo plazo.
- ✓ Beneficios:
 - **Reducción del tiempo de llegada al mercado y costos de calificación.**
 - Potencial en aplicaciones de alto costo.
 - Reducir brechas entre diseño y aplicación.
- ✓ Expectativas Específicas de la Empresa: Expectativas variadas, con algunas empresas siendo lentas en la adopción, mientras que otras anticipan crecimiento, especialmente en operaciones con clientes.

Ampliando el alcance de nuestro cuestionario, le consultamos a la audiencia cuales son, en base a su experiencia y rol, los mayores **desafíos que enfrenta el O&G en su camino hacia la transformación digital**. Las palabras e insights principales se muestra en la **Fig. 31**.

²⁵ R&R: Repeatability and Reproducibility

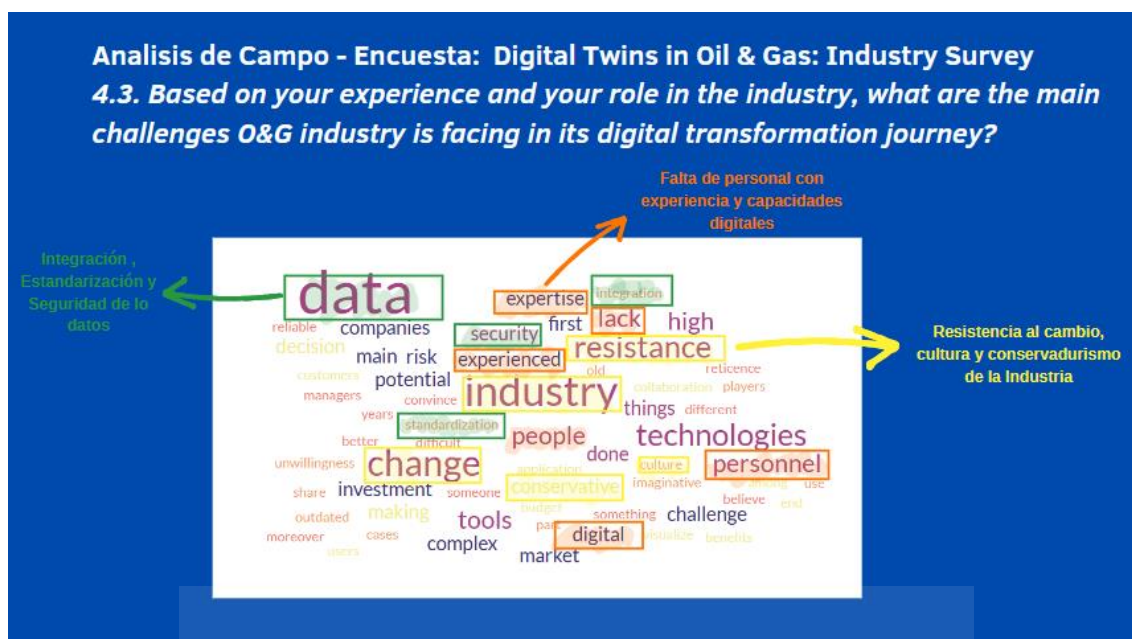


Fig. 31: Desafíos del O&G en su camino hacia la transformación digital (Encuesta Propia)

Tal cual puede verse, de los desafíos citados podemos destacar:

- **Resistencia al cambio, cultura y conservadurismo de la industria:**
 - La industria de petróleo y gas es una industria tradicional, con una cultura de alta aversión al riesgo, consecuencia del impacto de fallos en términos económicos, de seguridad y medio ambiente.
 - Este contexto genera resistencia al cambio y conservadurismo en la toma de decisiones, cultivando gerentes, decisores y personal experimentado escépticos o reacios a adoptar nuevas tecnologías.

- **Integración, Estandarización y Seguridad de los datos:**
 - Desafíos en la integración y estandarización de datos de diversas fuentes para un uso efectivo.
 - La renuencia a compartir datos entre áreas de una misma empresa y falta de colaboración entre los distintos actores dentro de la cadena de valor de la industria obstaculizan el progreso.
 - El control de datos, la propiedad y la seguridad de los datos son preocupaciones clave.

- **Falta de personal con experiencia y capacidades digitales:**
 - Preocupa la brecha de talento, con falta de personal capacitado, con expertise en tecnologías digitales, analíticas de datos y ciberseguridad.
 - Dificultad para encontrar y retener talento con las habilidades necesarias para la transformación digital.

5.4. Delineando un roadmap conceptual para la implementación en procesos V&V de producto del Upstream

Habiendo analizado intensivamente los casos de uso de gemelos digitales para procesos V&V de producto en industrias afines y evaluando referencias primarias y secundarias sobre el estado de arte, potencial y desafíos de su uso específico en conexiones roscadas en tubulares, podemos concluir que su **aplicación en este entorno es técnicamente factible**, hay consenso de que **puede agregar valor en múltiples tipos de evaluaciones** dentro de las típicas de este segmento, **pero que su estado de implementación en producto, a diferencia de lo observado en procesos, es aún limitado.**

También se desprende de nuestra investigación que el concepto de “gemelo digital” se encuentra extendido, pero no necesariamente bien clasificado. La mayoría de los casos encontrados se clasifican como “gemelo digital” pero a priori **no cumplen taxativamente con la condición de bidireccionalidad automática del flujo de la información y una salida funcional del tipo interactiva.** En tal sentido, una clasificación del tipo “**sombra digital**” **con salida funcional del tipo predictiva** parecería ajustarse más al estado del arte en procesos de V&V de producto y pudiera considerarse como un **primer paso natural para la transformación digital en este segmento.**

A pesar de esto, como mencionamos, hay consenso de que existe potencial de implementación en procesos de V&V de productos del

upstream. Tal cual puede verse en la **Fig. 27** de la sección anterior, nuestra encuesta de campo a expertos del sector **identificó con preponderancia** (16 sobre 29 respuestas) **la posibilidad de potenciar evaluaciones de predicción de performance de fatiga de tubulares.**

En tal sentido, una posible interpretación de esta tendencia tal vez derive en que la performance a fatiga es un tipo de evaluación con **características propicias para el modelado numérico**, con modelos teóricos ampliamente validados y representativos del fenómeno físico, los cuales pueden enriquecerse a partir de datos de diferentes fuentes, ya sea históricos (propiedades mecánicas y curvas S-N del material, datos de fabricación de los tubulares y las conexiones) y en tiempo real de la aplicación (esfuerzos sobre las distintas secciones de la tubería, curvatura de la sarta, velocidades de rotación, condiciones de perforación).

Bajo estas condiciones, preliminarmente es posible generar una “sombra digital” de alta fidelidad del producto, sobre el cual se pueden correr simulaciones y potentes modelos predictivos gracias a los actuales beneficios de las herramientas de la analítica de datos. Yendo un paso más, sería posible generar un “gemelo digital” con capacidad de actuación sobre la probeta física, modificando las condiciones de ensayos (ej, presión interna, velocidad de rotación) con el fin de extender la vida útil del conjunto tubo + conexión, retardando la iniciación de fisuras y obteniendo como resultado curvas de uso que caracterizan la performance de fatiga. Esta información es crucial para garantizar la seguridad y confiabilidad de las estructuras tubulares en las actividades de exploración y producción de petróleo y gas, favoreciendo la eficiencia del uso de los productos en operaciones de perforación y completación.

Dentro del abanico de evaluaciones típicas para productos roscados en tubulares, los **ensayos del tipo estructural-mecánico a rotura, indistintamente al modo de carga (axial, presión, make-up torque)**, son otro lote de ensayos con **características propicias para el modelado numérico**, ya que las variables de interés son limitadas, con

impacto conocido en la performance general del producto y con modelos teóricos-matemáticos robustos y conocidos.

En contrapartida, **evaluaciones de sellabilidad bajo cargas combinadas pueden ser más desafiantes para beneficiarse de tecnologías como los gemelos digitales**, pues está probada la dependencia de múltiples variables de difícil modelado, aun en la actualidad (ej., presión de grasa, rugosidad de superficie sellantes, historia de cargas de los materiales).

Por tal motivo, **es clave como paso previo a la implementación de la tecnología, un mejor entendimiento del fenómeno físico y de las condiciones de modelado numérico**. Esta situación en algún punto esta alineada a los actuales esfuerzos de innovación relevados en empresas manufactureras y listados en la **Tabla 8** del presente trabajo, con iniciativas tendientes a mejorar los modelos predictores de la performance a sellabilidad de las conexiones ó el refinamiento de modelos de simulación numérica para ajustar de mejor manera con los resultados a plena escala.

En base a este contexto, **proponemos (2) flujos conceptuales para la transformación digital en procesos de V&V de productos para el Upstream**, diferenciando las rutas en función del estado de madurez del producto y con beneficios derivados diferenciados. A saber:

- **Caso A – “New Product Development (NPD)”**: En este caso incluimos aquellos productos aún en etapa de diseño conceptual, a priori sin un prototipo físico fabricado. Para este caso el uso de gemelos digitales tiene el impacto acelerar los ciclos de desarrollo de nuevos productos en procesos de verificación, acortando *time-to-market* a partir del potencial de uso de prototipado y testeo virtual y de herramientas analíticas y automáticas de refinamiento de diseño de productos y componentes.

- **Caso B - “Manufactured Products”**: Este caso cubre aquellos productos con un prototipo físico fabricado y eventualmente ya

lanzado al mercado, de los cuales puede obtenerse información a partir de ejecutar ensayos a plena escala en condiciones de laboratorio y/o datos de uso en campo. En este caso, el uso de gemelos digitales tiene el potencial de **brindar herramientas para mejorar el entendimiento sobre estos productos potenciando procesos de verificación interna como también reducción de requerimientos en proyectos de validación de producto, bajo estándares de industria o específicos de operadoras.**

Mas allá de estas dos rutas identificadas vemos que ambos caminos en realidad son complementarios, y que debieran darse de forma secuencial, siguiendo el ciclo de vida de los productos.

Justamente, el Caso A que planteamos, de **desarrollo de nuevos productos (NPD)**, comienza en las **primeras etapas de diseño conceptual del producto y se ejecuta íntegramente en el espacio virtual**, previo a la fabricación de cualquier tipo de prototipo. Debido a esto, bajo nuestra perspectiva aquí no hablamos de gemelo digital por definición sino en realidad de **modelos digitales puros**, pues no se cumplen las características básicas de tener una contraparte física y comunicación bidireccional entre ambos espacios físico <> digital. Este esquema es que el que parece ser el adoptado por la mayoría de los casos de uso en industria descritos en la Sección 3.2 y catalogados como gemelos digitales por la bibliografía.

Para conceptualizar este proceso, generamos el esquema de la **Fig.32** que representa la secuencia de actividades y tecnologías que se utilizan en la etapa de diseño conceptual, ingeniería de detalle y verificaciones de diseño.

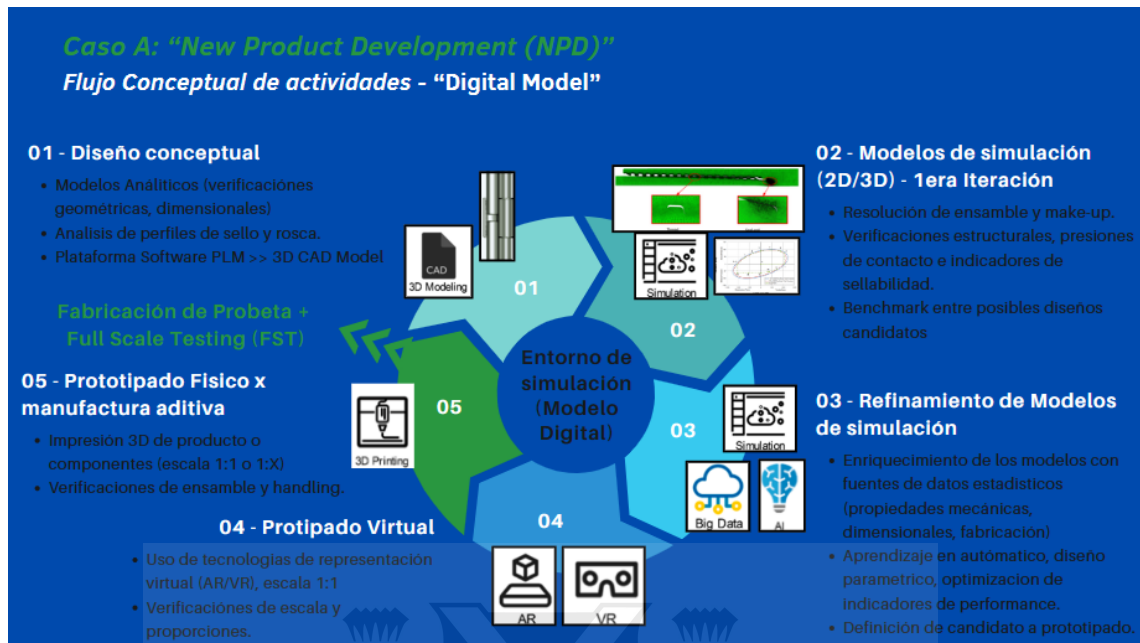


Fig. 32: Flujo Conceptual de Actividades - Caso A "Desarrollo de Nuevos Productos" (Autoría Propia)

Según se muestra en este flujo conceptual, este proceso constituye un proceso iterativo, de refinamiento del modelo y del diseño hasta llegar a un prototipo físico, que transcurre integralmente en el espacio virtual (o casi, si consideramos la impresión en 3D). Tal cual mencionamos, **esto no debiera considerarse como una implementación de gemelos digitales, pero si claramente en un proceso de validación digital de producto en la etapa de desarrollo.**

Continuando nuestra conceptualización, para el Caso B proponemos el roadmap que se muestra en la **Fig. 33**. Aquí si consideramos una implementación progresiva que desemboca en los gemelos digitales, pues partimos de la premisa de ya tener un producto fabricado, pudiendo recorrer el camino desde "Digital Model" > "Digital Shadow" > "Digital Twin".

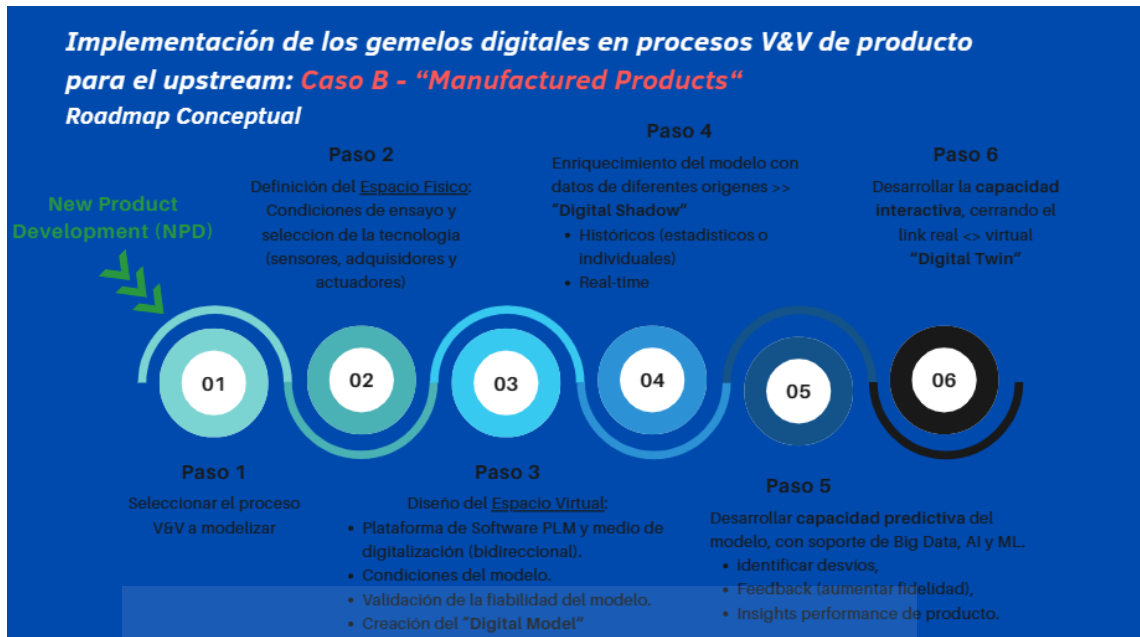


Fig. 33: Roadmap Conceptual Caso B – "Released Products" (Autoría Propia)

A continuación, detallamos brevemente cada uno de estos pasos dentro del Roadmap:

- Paso 1: Seleccionar el proceso V&V a modelizar: Paso clave por obvias razones. Mas allá del **impacto al negocio** en términos de reducción de costos y/o aceleración de tiempos de ciclo, es necesario ponderar **evaluaciones con características propicias para el modelado numérico**, con modelos teóricos validados y variables físicas bien definidas, de peso y representativas.
- Paso 2: Definición del espacio físico: Luego de haber definido el tipo de evaluación sobre la cual generar el gemelo digital, el próximo paso radica en **diseñar el arreglo de ensayo en laboratorio**, seleccionando **la tecnología** adecuada para capturar y actuar sobre las variables representativas del fenómeno físico. La selección del tipo de sensores, su ubicación y tipo de comunicación, equipos de adquisición de datos, *endpoints* de comunicación y actuadores serán parte del arreglo.

Dada la diversidad en términos de tamaño, forma y ubicación de montaje, precisión, tipo de señal, cantidad de canales ó latencia de comunicación, es muy importante hacer un profundo análisis comparativo para la selección del adecuado en función de las necesidades.

- Paso 3: Diseño del Espacio Digital: En esta etapa se generará el modelo digital que represente virtualmente el activo físico, ya sea a partir del diseño desde una plataforma de software CAD/CAE, a partir del escaneo 3D de la probeta o una combinación de ambas (bidireccional). Con herramientas de simulación embebidos en la plataforma de software PLM, podremos correr modelos sobre este espacio virtual que predigan la performance del producto bajo diferentes estados de carga, replicando las solicitaciones en operación. Tal cual vimos en este trabajo, existen numerosas plataformas de software sobre las cuales correr estas simulaciones, siendo [Siemens Simcenter](#) el más reconocido.

Punto clave en esta etapa la validación es la **fiabilidad del modelo**, analizando la representatividad sobre el fenómeno físico y la sensibilidad de los resultados, identificando si hay alguna variable de peso que no esté siendo considerada, si hay alguna condición impuesta sobre modelo que este afectando los resultados (condiciones geométricas de los elementos, modelado del material, de las cargas) ó la definición de los indicadores deba ser revisada.

- Paso 4: Enriquecimiento del Modelo (“Digital Shadow”): Esta es una etapa incremental en el roadmap en donde se **enriquece el modelo de simulación con datos de diferentes orígenes, ya sea “históricos” y en “tiempo real”**. Los datos históricos podrán ser **estadísticos**, de los lotes de manufactura o **individuales**, de la probeta específica bajo ensayo. Se pueden citar:

- Curvas de performance de material (tensión-deformación, S-N fatiga),
- Datos estadísticos del lote de fabricación de tubulares (diámetros, espesores, ovalidad)
- Datos estadísticos de parámetros críticos de roscado del producto (diámetros de sello, rosca, conicidades, ovalidades)
- Tensiones de fluencia, diámetro de sello, rosca y ovalidad de los componentes pin y box de la probeta.

Adicionalmente, se podrían agregar a este lote de datos de fuentes externas, **datos estadísticos del producto en operación**, los cuales podrían aportar valor significativo para entender el funcionamiento de los productos en ambientes reales de uso, complementando los datos de manufactura y laboratorio. El uso de este set de datos **podría acortar la brecha entre la performance de los productos obtenidas en procesos V&V vs. operación real**. Al momento, este punto lo planteamos como potencial ya que según nuestro entendimiento ambos universos de datos aún se encuentran mayormente desacoplados, con baja interacción y colaboración entre empresas manufactureras de tubulares y las operadoras.

Por su parte, los datos en tiempo real de la probeta durante el ensayo son los capturados por los arreglos de sensores y adquisidores en laboratorio (Paso 2). Aquí se tienen fundamentalmente los listados en la **Tabla 6** del presente trabajo, los cuales se podrían clasificar entre las **solicitaciones instantáneas aplicadas a la probeta** (cargas axiales, presiones, temperaturas, torque) y su correspondiente **respuesta mecánica** (mapa de deformaciones del material, curvatura de probeta, pérdidas de sellabilidad).

Este conjunto de datos **enriquece los modelos de simulación teóricos y estáticos que se tienen en la etapa de diseño**, logrando crear una **representación digital dinámica, espejada y de alta fidelidad** de la probeta bajo evaluación en la máquina de ensayo. Su correspondiente **“sombra digital”**.

- Paso 5: Desarrollo de la capacidad predictiva del modelo: En esta etapa se trabaja sobre la “sombra digital”, en el espacio virtual, iterando los modelos de simulación de manera de **desarrollar capacidad predictiva de la performance del producto ante el set de solicitaciones** impuesta sobre la probeta en el espacio físico.

El objetivo aquí es generar escenarios “*what-if?*” y **correlacionar** los resultados de los modelos con el feedback real de la probeta, **identificando desvíos, retroalimentando su fidelidad y generando insights sobre el comportamiento de producto**. En este punto, el uso de técnicas de Big Data y Aprendizaje Automático son claves para el análisis de los grandes volúmenes de datos de diferentes orígenes y la resolución de estos escenarios.

- Paso 6: Desarrollo de la capacidad interactiva (“Digital Twin”): En esta última etapa se busca **cerrar el enlace entre los espacios virtual y físico**, implementando en la probeta de ensayo, los *outcomes* de los modelos de simulación predictivos refinados en la etapa anterior.

Volviendo al ensayo de fatiga, por ejemplo, podría determinarse en el laboratorio un perfil de cargas tal que maximice la performance del conjunto tubo + conexión, modificando la carga axial, curvatura o velocidades de rotación en función de las probabilidades de falla e indicadores que arrojan los modelos de simulación, extendiendo la vida útil del producto. Esta

información puede ser de gran utilidad para los operadores, permitiéndole aumentar su eficiencia en actividades de perforación e instalación. En esta última etapa se produce la **evolución de una “sombra digital” a un “gemelo digital”**.



Universidad de
San Andrés

6. Resumen y conclusiones

Este trabajo de investigación se llevó a cabo con el objetivo primario de analizar como el uso de gemelos digitales puede transformar y hacer más eficientes los procesos de validación y verificación (V&V) de productos para la Exploración & Producción (E&P) de Petróleo y Gas. En el proceso, nos propusimos entender el concepto y la tecnología detrás los gemelos digitales, su aplicación actual en el petróleo y gas y el estado del arte de su uso específico en procesos de V&V de producto, identificando cuales pueden llegar a ser los principales desafíos para su adopción en procesos de V&V de productos para el Upstream.

Desde el punto de vista del **concepto**, la idea de **conectar un espacio físico con su contraparte virtual, a partir de un enlace bidireccional para el flujo de datos entre ambos espacios**, no es nueva. Su origen data en el 2002, siendo formalmente acuñado el término “gemelo digital” en el 2016 por el Dr. Michael Grieves. Por su parte, la disciplina de simulación en ingeniería tiene orígenes en los años 50s-60s, pocos años después del lanzamiento de las primeras computadoras. En ese entonces presentándose en formato de cálculos numéricos y métodos de optimización basados en computación, para aplicaciones específicas, ejecutadas por expertos y con alta demanda de poder de cómputo.

Desde estos orígenes, la simulación se utiliza principalmente en la fase de diseño y desarrollo de producto. Con el progreso de la tecnología, estos modelos de simulación han evolucionado en términos de herramientas, alcances y sofisticación, extendiendo su aplicación a las siguientes fases del ciclo de vida del producto, a partir de simulaciones en tiempo real del producto durante el uso y la operación. De ahí que ambos conceptos se entrecruzan, pudiendo considerarse a **los gemelos digitales como la evolución de las tecnologías de simulación**.

Tal cual desarrollamos en este trabajo, en el último tiempo (2021 – 2023), se le ha dado más granularidad a la definición de gemelo digital. Como un ejemplo de estas clasificaciones más completas, encontramos una clasificación en términos del **tipo y dirección del flujo de información** entre el activo físico y el entorno virtual, estableciendo la diferenciación entre “**model**”, “**shadow**” y “**twin**” digital. Otra clasificación, que puede también asociada indirectamente con el flujo de información, categoriza la **salida funcional** del gemelo digital, estableciendo sistemas con salida de **supervisión, predictiva ó interactiva**, dependiendo el caso.

Combinado ambos conceptos, podemos concluir que aquellos sistemas tipo “Digital Shadow” típicamente pueden adquirir solo salidas funcionales del tipo de supervisión o predictivos, siendo **solo los “Digital Twins” aquellos sistemas que combinan comunicación bidireccional automática y salida funcional interactiva**, estableciéndose una interacción dinámica entre ambos espacios y convirtiendo al gemelo digital en un “digital master”. A partir de esta construcción nos parece relevante destacar que, de la revisión bibliográfica realizada, pareciera **frecuente la sobreutilización del término gemelo digital en la industria**, en muchos casos **sobre calificando modelos y sombras digitales como “gemelos”**.

En términos de su implementación, los gemelos digitales involucran un abanico de tecnologías que cubren el **Internet of Things (IoT/IIoT), Cloud y Edge Computing, Big Data, Inteligencia Artificial (IA), Machine Learning (ML) y Realidad Virtual/Aumentada (VR/AR)**, entre otras. La evolución exponencial de cada una de estas tecnologías potencia del mismo modo las capacidades de los gemelos digitales, apalancando los posibles casos de uso a partir de mayores beneficios a menores costos.

Estas tecnologías se materializan en un gemelo digital típicamente en **5 capas tecnológicas: sensores, datos, tecnologías de integración, capa analítica y actuadores**. A modo de proceso general, los **sensores**

permiten al gemelo capturar **datos** operativos y de contexto relacionados con el activo físico en el mundo real. Estos datos se combinan y consolidan con datos de otras fuentes (negocio, procesos, terceros). Los sensores comunican los datos al mundo digital a través de **tecnologías de integración**. Las técnicas de **análisis de datos** combinan simulaciones algorítmicas y rutinas de visualización, siendo utilizadas por el gemelo digital para producir **insights**. El lado digital del modelo per se es el **gemelo digital**, que integra los mencionados componentes en un modelo digital casi en tiempo real del activo físico. El objetivo de un gemelo digital es identificar desvíos y oportunidades para ahorrar costos, mejorar la calidad o lograr mayores eficiencias. La oportunidad identificada puede resultar en una acción en el mundo físico la cual se ejecuta a partir de **actuadores**, completando así una retroalimentación entre el mundo físico y digital y viceversa.

Del mismo modo, en un gemelo digital se ejecutan **6 procesos** que se secuencian 1) crear/capturar información del mundo físico, 2) comunicarla, 3) consolidarla, 4) analizarla y modelarla construyendo escenarios “what-if?”, 5) generación de *insights* que aumentan el entendimiento del proceso y 6) actuar, tomando acción nuevamente en el mundo físico, conformando un loop físico-digital-físico.

En este análisis conceptual de los gemelos digitales proponemos entonces lo que podemos llamar la “**Relación 3-5-6 de los Gemelos Digitales**”, a saber:

- **3 - Espacios:** Físico, Virtual y Enlace
- **5 - Capas Tecnológicas:** Sensores, datos, tecnologías de integración, capa analítica y actuadores.
- **6 - Procesos:** 1) Capturar, 2) Comunicar, 3) Consolidar, 4) Analizar y modelar, 5) Generar *insights* y 6) Actuar.

En términos de su uso práctico en la industria, la tecnología de los gemelos digitales ha encontrado su aplicación en diferentes verticales, apalancadas por las necesidades de la transformación digital que las atraviesa. Aunque el Oil & Gas no es la excepción, existe consenso y datos que demuestran una **adopción a priori más lenta comparadas con otras industrias**. Con relación a esto, verificamos un claro dominante de casos de uso en la industria manufacturera (>50%), cuyas investigaciones y aplicaciones se centran en la simulación y optimización de procesos de producción y en el monitoreo y pronóstico de vida útil de máquinas-herramientas. En el resto de las verticales, las referencias de uso de gemelos digitales se identifican bastante atomizadas (<10%).

Puntualmente en relación con el uso de gemelos digitales en el Oil & Gas, y considerando el ciclo completo del Upstream, Midstream y Downstream, en un primer relevamiento del estado del arte, identificamos usos preponderantemente en **procesos por sobre producto**, y principalmente en:

1. **Actividades de monitoreo y mantenimiento de activos,**
2. **Planificación y gestión de ciclo de vida de proyectos,**
3. **Perforación,**
4. **Monitoreo de operaciones e infraestructuras de plataformas offshore.**

Haciendo foco en el potencial de uso de gemelos digitales en la **gestión del ciclo de vida de los productos manufacturados (PLM)**, transversalmente a la industria, se identifican referencias de aplicabilidad mayoritariamente en etapas de **manufactura y uso (>70%) siendo limitadas las referencias en diseño y desarrollo de productos (<15%)**. En términos de distribución geográfica de estas referencias, se puede observar que cuatro países, China, Alemania, Estados Unidos y Singapur, representan más del 50% de las contribuciones, con China con amplia delantera en el rubro (22%). Esto es atribuible al gran desarrollo industrial de estas potencias,

resultado del apoyo y promoción de iniciativas por parte de grandes empresas y organismos gubernamentales.

A pesar de esta tendencia, **desde el punto de vista académico se identifican oportunidades de uso de gemelos digitales en las diferentes fases de NPD**, pero principalmente en las etapas de diseño conceptual, ingeniería de detalle, ensayos de verificación de diseño y rediseño/mejora iterativa de componentes y sistemas. En particular, **haciendo foco en los procesos de verificación y validación (V&V) de producto**, el uso de gemelos digitales se ha centrado en la **predicción de performance de producto a partir de simulación y ensayos sobre prototipos virtuales**. Se destaca que, para el desarrollo de un gemelo digital para ensayos, es necesario crear un prototipo físico o modelo de referencia para poder recopilar datos significativos de diseño. A priori, desde el punto de vista de la academia, no se declaran limitaciones en términos de complejidad, tamaño y nivel de integración del producto.

Ahora bien, desde el punto de vista práctico y a partir de nuestra investigación se lograron relevar **(9) casos industriales de uso de gemelos digitales en procesos de V&V de productos**, de distinta naturaleza y complejidad, en diferentes verticales, pero con preponderancia en los sectores de **Aeronáutica, Aeroespacial, Automotriz y Manufactura (OEM)**. Los casos identificados se reparten fundamentalmente entre **Estados Unidos (4) y Europa (5)**, con referencias de implementación desde el **2016 en adelante**. La muestra incluye casos de empresas privadas como Boeing, GE Aviation, Rolls Royce, SpaceX, Aurus Motors, Maserati, Phillips y Schunk. Se identificó también un caso en vertical de Defensa, como es el caso del Laboratorio de Investigación de la Fuerza Aérea de Estados Unidos (AFRL).

Haciendo un **benchmark** de los casos de industria relevados, se puede resaltar, a modo de *insights*, los siguientes factores comunes

para una implementación exitosa de los gemelos digitales en procesos V&V:

- ✓ No se detectan limitaciones en términos de la complejidad de los productos bajo evaluación ni del grado de estandarización de la industria objetivo.
- ✓ Apalancamiento en sofisticados modelos de simulación, de alta complejidad, que permiten cubrir un amplio rango de alcances y tipos de evaluación en diferentes etapas del ciclo de vida de los productos.
- ✓ La digitalización de los activos físicos no resulta ser problemática, independientemente de la geometría ó cantidad de componentes, pudiendo lograrse de forma bidireccional (ya sea desde el modelo CAD o desde el modelo físico a partir de un escaneo laser 3D de las piezas)
- ✓ El alcance de los gemelos digitales relevados cubre desde nivel componentes, sistemas y hasta productos, con ejemplos en productos complejos de alta nivel de integración (>25,000 componentes) como lo son motores a reacción, cohetes de retropropulsión o automóviles.
- ✓ El nivel de sofisticación de los gemelos digitales relevados puede inferirse en una escala intermedia, combinando en la mayoría de los casos, métodos de simulación tradicional con técnicas iterativas de refinamiento automático de diseño, utilizando algoritmos, herramientas de aprendizaje automático para mejorar, optimizar y ajustar el diseño de un producto, sistema o componente.
- ✓ En ninguno de los casos relevados se pudieron encontrar referencias explicitas de un enlace en bucle cerrado entre el espacio digital y el activo físico.
- ✓ La salida funcional de los gemelos digitales analizados pareciera limitarse a una salida netamente predictiva, sin interactividad con el activo físico.

- ✓ Uso extensivo de gemelos digitales para testing virtual en procesos de verificación (interno) pero sin referencias de uso en procesos de validación (externo) vs. entes regulatorios u organismos de certificación.
- ✓ Con relación al contexto colaborativo requerido para una implementación exitosa, se detecta:
 - Partnership B2B: Fuerte correlación con el uso de soluciones de software y plataformas digitales que integren información de producto a lo largo de todo su ciclo de vida. Más del 30% (3 casos sobre 9, SpaceX, Maserati, Schunk), hacen explícito una asociación con Siemens, cuya plataforma (como otras del mercado) admiten la simulación basada en gemelos digitales, analizando datos en tiempo real proveniente de dispositivos IIoT y con integración de herramientas de Machine Learning (ML) y Deep Learning (DL).
 - Academia2Business (A2B): Lógico impacto positivo de la colaboración y transferencia de conocimiento entre instituciones académicas hacia la industria, citando el caso de la de la automotriz rusa Aurus Motors y la Universidad Politécnica de St. Petersburg (SPbPU) para el diseño y desarrollo del Aurus Senat Limousine. Se identifican trabajos similares de la misma universidad con empresas como Airbus, Philips GmbH, SAP SE, Robert Bosch y Boeing.
 - Government2Business (G2B): En menor orden, pero también relevante, se identifica una influencia positiva de la colaboración gubernamental, incentivando el uso de este tipo de tecnologías a modo de políticas de estado, con el fin de incentivar el desarrollo económico. Aquí el caso insignia nuevamente involucra el caso de la automotriz rusa Aurus Motors y el Gobierno Ruso de V. Putin, con su proyecto “Cortege” (2017)

Extrapolando los ejes temáticos analizados en nuestro benchmark ahora al universo específico del Upstream, las conexiones roscadas y sus procesos de V&V, **no identificamos factores limitantes a nivel 1) industria, 2) producto, 3) condiciones de los modelos de simulación y 4) tecnología de sensores y actuadores, para el uso de gemelos digitales en procesos de V&V de productos del Upstream.** A saber:

- Cualitativamente, el **grado de estandarización** del Oil & Gas podría clasificarse como **“Medio-Alto”**, con un grado comparable a la industria Automotriz pero no necesariamente superior al nivel de estandarización encontrado en verticales como la Aeronáutica, Aeroespacial y de Defensa.
- Las conexiones roscadas (el producto), a nivel de probetas y procesos de V&V en laboratorio, podrían considerarse como un sistema, de **complejidad moderada** respecto a lo que podría ser la sarta y más aún, que otros sistemas y productos para los cuales relevamos aplicación de gemelos digitales para prototipado digital y testing virtual en otras industrias.
- **Las condiciones de modelo de simulación en términos de medios de digitalización (bidireccional), complejidad global (“Media-Alto”) y alcance, son comparables** a las relevadas en la bibliografía para otras industrias. En relación con el alcance, es importante destacar que los modelos de simulación utilizados para la validación de conexiones tubulares varían en términos de las variables en consideración, su complejidad y las limitaciones intrínsecas para representar el fenómeno físico. Este combo determinará tipos de evaluaciones con características más o menos propicias para el modelado numérico y por consiguiente para la implementación de tecnologías como los gemelos digitales. A grandes rasgos:
 - **Ensayos del tipo estructural, a rotura (por modos simples de cargas) ó evaluaciones de predicción de performance de fatiga de tubulares,** constituyen

ensayos con **características propicias** para el **modelado numérico**, ya que las variables de interés son limitadas, con impacto conocido en la performance general del producto y con modelos teóricos-matemáticos robustos y validados.

- Por contrapartida, **evaluaciones de sellabilidad bajo cargas combinadas pueden ser más desafiantes para beneficiarse de tecnologías como los gemelos digitales**, pues está probada la dependencia de múltiples variables de difícil modelado, aun en la actualidad (léase, correlación del efecto de presión de grasa, rugosidad de superficie sellantes ó historia de cargas sobre los materiales sobre la performance a sellabilidad)
- **La tecnología en la capa de sensores y actuadores no presenta limitaciones** dado que las variables físicas en consideración requieren sensores sencillos, con cada vez mayores capacidades a menores costos (precisión, confiabilidad, conectividad, robustez). Adicionalmente, existen comercialmente sistemas de adquisición complementamente integrados a plataformas de software de simulación (tal es el caso de Siemens con su dispositivo SCADAS)

A partir del análisis de campo realizado en el contexto de esta investigación, en términos generales, la audiencia consultada tiene una **perspectiva positiva** de la implementación de gemelos digitales en procesos V&V, avizorando una **adopción gradual, pero sin llegar a alcanzar a impactar dentro de los estándares de industria al menos en los próximos 5 años**. Las expectativas están centradas en las capacidades de monitoreo en tiempo real, integradas con analítica de datos, IA y aprendizaje automático para potenciar las evaluaciones y la toma de decisiones de diseño.

A nivel macro, los principales beneficios se identifican en la **reducción del *time-to-market* y de los costos de calificación de productos**, reduciendo brechas entre diseño y aplicación. En contrapartida, entre los desafíos más significativos que se citan están el **conservadurismo de la industria y la fiabilidad/repetibilidad de los modelos**.

A modo de resumen de los resultados de la encuesta, se pueden destacar los siguientes *findings* más relevantes sobre la implementación de gemelos digitales en la industria del Oil & Gas en general, y procesos de V&V en particular:

- ✓ Mas del 80% de los encuestados indica estar familiarizado total o parcialmente con la tecnología.
- ✓ La penetración en la industria es clasificada entre limitada y en sus primeras etapas por casi el 83% de la muestra, con mayoritariamente solo algunas empresas pioneras experimentando con la tecnología.
- ✓ Procesos parecería ser un ámbito más extendido y conocido de aplicación de los gemelos digitales, por sobre Producto.
- ✓ Casi el 70% de la audiencia expresa escasa implementación en la de los gemelos digitales dentro de su organización actual. El 30% restante expresa implementación en cierto grado y solo el 10% de éstos informa un uso intensivo.
- ✓ Los encuestados mayormente identifican valor en el uso de gemelos digitales 1) en la etapa de operación y servicio, 2) en el diseño y desarrollo de producto y 3) en la etapa de manufactura.
- ✓ Se visualiza alto potencial de aplicación en evaluaciones de diferente índole, pero con alto consenso en validaciones tendientes a la predicción y determinación de la vida a fatiga de tubulares y conexiones.
- ✓ En términos de beneficios, se resalta 1) la mejora en la toma de decisiones para el diseño de productos, 2) la reducción

de costos dedicados a procesos V&V y 3) la aceleración de los ciclos de desarrollo de nuevos productos.

- ✓ En términos de desafíos, se destacan aspectos técnicos como culturales, identificando 1) problemas de integración y calidad de los datos, 2) resistencia al cambio dentro de las organizaciones y 3) la fidelidad del modelo virtual.
- ✓ El 65% de los encuestados no vislumbra que normativas como la API 5C5:2017 (o similares) adopten tecnologías como los gemelos digitales para complementar o reemplazar requerimientos de evaluación.

Habiendo analizado intensivamente los casos de uso de gemelos digitales para procesos V&V de producto en industrias afines y evaluando referencias primarias y secundarias sobre el estado de arte, potencial y desafíos de su uso específico en conexiones roscadas en tubulares, podemos concluir que su **aplicación en este entorno es técnicamente factible**, hay consenso de que **puede agregar valor en múltiples tipos de evaluaciones** dentro de las típicas de este segmento, **pero que su estado de implementación en producto**, a diferencia de lo observado en procesos, **es aún limitado**.

Tal cual mencionado, de nuestra investigación se desprende que el concepto de “gemelo digital” se encuentra extendido, pero no necesariamente bien clasificado según lineamientos más modernos del concepto. La mayoría de los casos encontrados se clasifican como “gemelo digital” pero a priori **no cumplirían, según nuestra interpretación, la condición de bidireccionalidad automática del flujo de la información y una salida funcional del tipo interactiva**. En tal sentido, una clasificación del tipo **“sombra digital” con salida funcional del tipo predictiva** parecería ajustarse más al estado del arte en procesos de V&V de producto y pudiera considerarse como un **primer paso natural para la transformación digital en este tipo de aplicaciones**.

De lo relevado, identificamos como clave **un profundo entendimiento del fenómeno físico y de las condiciones de modelado numérico**. Esto es transversal al tipo de producto y/o industria objetivo en donde se intente implementar esta tecnología, siendo una condición necesaria para la adecuada selección del caso de uso. Ni la complejidad del producto o el grado de estandarización de la industria aparecen como limitantes. Tampoco lo es la tecnología necesaria para su implementación en laboratorio.

En base a este contexto, se proponen **(2) hojas de rutas conceptuales para la transformación digital en procesos de V&V de productos para el upstream**, diferenciando las rutas en función del estado de madurez del producto y con beneficios diferenciados. Ambas rutas se identifican como complementarias, pudiendo darse de forma secuencial, siguiendo el ciclo de vida de los productos.

El primer caso propuesto cubre el **desarrollo de nuevos productos (NPD)**, desde su etapa de diseño conceptual a priori **sin un prototipo físico fabricado**. Para este caso, el uso de tecnología tiene el impacto de acelerar los ciclos de desarrollo de nuevos productos en **procesos de verificación interna, acortando *time-to-market* y reduciendo costos** a partir del uso de prototipado y testeo virtual y de herramientas analíticas y automáticas de refinamiento de diseño de productos y componentes. La **calidad final del producto** también se verá impactada, asegurando de mejor manera el cumplimiento de la especificación técnica de diseño e impactando aguas abajo en la cadena de valor, en etapas de manufactura y operación en servicio.

En este caso, mayoritariamente las actividades se ejecutan en el espacio virtual, con lo cual, desde nuestra perspectiva, **aquí no hablamos de gemelo digital por definición sino en realidad de modelos digitales “puros”**. Para este flujo de actividades se podrán combinar diferentes tecnologías, entre las cuales se pueden destacar Big Data, Inteligencia Artificial (IA), Machine Learning (ML), Realidad Virtual/Aumentada (VR/AR) y hasta manufactura aditiva (AM).

El segundo caso propuesto cubre aquellos productos **con un prototipo físico fabricado y eventualmente ya lanzado al mercado**, de los cuales puede obtenerse información a partir de ejecutar ensayos a plena escala en condiciones de laboratorio y/o datos de uso en campo. En este caso, el uso de gemelos digitales brinda herramientas para **mejorar el entendimiento** sobre estos productos, potenciando procesos de **verificación interna**. Del mismo modo, tiene el potencial de **reducir requerimientos en proyectos de validación de producto**, bajo estándares de industria o específicos de operadoras.

Respecto a este último punto, a pesar de su potencial, **no se encontraron referencias de que los gemelos digitales logren de forma práctica suplantarse el ensayo a plena escala ni lograr reducir requerimientos de ensayo en proyectos de calificación**. Del mismo modo, debido al conservadurismo de la industria, nuestra investigación de campo arroja que existe una **expectativa limitada** de que se convierta en mainstream o de que llegue a impactar en los estándares de industria en los próximos 5 años, visionando una **adopción gradual en procesos de validación externa**.

A pesar de ello, el potencial para **robustecer los análisis de interpolación /extrapolación de diseños y aumentar la confiabilidad de los productos** cuyo proceso de verificación interna haya sido beneficiado por esta tecnología tendrá, indirectamente, un impacto positivo en proyectos de calificación, **minimizando riesgos por un mejor entendimiento de los límites de performance, reduciendo fallos y repetición de ensayos, y por ende costos y tiempos de ejecución**.

Por último, consideramos para este caso una **implementación progresiva** que desembocará eventualmente en un gemelo digital, pues partimos de la premisa de ya tener un producto fabricado, **puediendo recorrer el camino desde “Digital Model” > “Digital Shadow” > “Digital Twin”**. En su etapa final y en términos de tecnología, para este flujo de actividades se le sumarán, a las ya mencionadas para la etapa

de verificación, las capas de sensores y actuadores, completando el ecosistema tecnológico típico de un gemelo digital.

Finalmente, teniendo en cuenta todo lo expuesto hasta este momento dentro del apartado, se considera que se ha dado respuesta a las preguntas de investigación propuestas y se han cumplido los objetivos generales y específicos originalmente planteados para esta tesis.



Universidad de
San Andrés

7. Listado de Abreviaciones

A2B: Academia to Business.

AFRL: Air Force Research Laboratory

API: American Petroleum Institute

B2B: Business to Business.

CAL: Connection Application Level

CEE: Connection Evaluation Envelope

CSE: Connection Service Envelope

DDS: Data Distribution Service

DNV: Det Norske Veritas

DoD: Department of Defense

DwC: Drilling with Casing

E&P: Exploración & Producción

FAA: Federal Administration Agency

G2B: Government to Business.

HLA: High Level Architecture

HP/HT: High Pressure / High Temperature

ISO: International Organization for Standardization

LEO: Low Earth Orbit

M&B: Make-up & Break-out

MQQT: Message Queuing Telemetry Transport.

NADCAP: National Aerospace & Defense Contractors Accreditation Program

NPD: New product Development

OCTG: Oil Country Tubular Goods

OEM: Original Equipment Manufacturer

PDM: Product Data Management

PLM: Product Life-cycle Management

PTFE: Politetrafluoroetileno

R&R: Repeatability and Reproducibility

TIC: Tecnologías de Información y Comunicación

V&V: Verification & Validation

VV&A: Verification, Validation, and accreditation

NASA: National Aeronautics and Space Administration

8. Bibliografía

- Aaron Parrott, & Dr. Lane Warshaw. (2017). *Industry 4.0 and the digital twin Manufacturing meets its match*.
https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/kr/Documents/insights/deloitte-newsletter/2017/26_201706/kr_insights_deloitte-newsletter-26_report_02_en.pdf
- American Petroleum Institute. (2017a). *Procedures for Testing Casing and Tubing Connections (API RP 5C5 4th Edition, January 2017)*.
https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=API%20RP%205C5&item_s_key=00114624
- American Petroleum Institute. (2017b). *Procedures for Testing Casing and Tubing Connections (API RP 5C5 4th Edition, January 2017)*.
https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=API%20RP%205C5&item_s_key=00114624
- Arrichiello, V., & Gualeni, P. (2020). Systems engineering and digital twin: a vision for the future of cruise ships design, production, and operations. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 14(1), 115–122.
<https://doi.org/10.1007/s12008-019-00621-3>
- Bonnar Louise. (2019). Twinning: Digital Twins Show Their Power. *Aerospace Tech Review*.
<https://www.aerospacetechreview.com/twinning-digital-twins-show-their-power-by-louise-bonnar/>
- Brett Brune. (2016, May 17). *Siemens Gives Some Details of 'Digital Twin' Work with SpaceX, Maserati*. SME Organization Web Site (Society of Manufacturing Engineers).
<https://www.sme.org/technologies/articles/2016/may/siemens-gives-some-details-of-digital-twin-work-with-spacex-maserati/>
- British Standard Institution (BSI). (2023). *Sector standards - aviation and aerospace standards*.
<https://www.bsigroup.com/en-GB/Aerospace/>
- Brossard, M., Chaigne Sebastien, Corbo, J., Mühlreiter, B., & Stein, J. P. (2022, April 28). *Digital twins: The art of the possible in product development and beyond*. McKinsey & Company.
- Cameron, D. B., Waaler, A., & Komulainen, T. M. (2018). Oil and Gas digital twins after twenty years. How can they be made sustainable, maintainable, and useful? *Proceedings of The 59th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 59), 26-28 September 2018, Oslo Metropolitan University, Norway*, 153, 9–16. <https://doi.org/10.3384/ecp181539>
- Coe, D. (2015). API RP 5C5: Procedures for Testing Casing and Tubing Connections. *BSEE International and Domestic Standards Workshop*.
<https://www.bsee.gov/sites/bsee.gov/files/technical-presentations/bsee/coe-5c5-rev5.pdf>
- DNV GL Research Company. (2020). Global Pilot Launched to Secure Greater Trust in Digital Twins. *Pipeline & Gas Journal*, 247(6), 55. <https://pgjonline.com/magazine/2020/june-2020-vol-247-no-6/tech-notes/global-pilot-launched-to-secure-greater-trust-in-digital-twins>

- Elijah, O., Ling, P. A., Rahim, S. K. A., Geok, T. K., Arsad, A., Kadir, E. A., Abdurrahman, M., Junin, R., Agi, A., & Abdulfatah, M. Y. (2021). A Survey on Industry 4.0 for the Oil and Gas Industry: Upstream Sector. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3121302>
- Eyre Jonathan, Hyde Sam, Walker Daniel, Ojo Seun, Hayes Oliver, Hartley Robin, Scott Rab, & Bray Jonthan. (2021). *Untangling the requirements of a Digital Twin*. https://www.amrc.co.uk/files/document/406/1605271035_1604658922_AMRC_Digital_Twin_AW.pdf
- Gartner. (2023). *Gartner Glossary - Digital Twin*. Gartner. <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-twin>
- Grand View Research. (2023). *Digital Twin Market Size, Share & Trends Analysis Report By End-use (Manufacturing, Agriculture), By Solution (Component, Process, System), By Region, And Segment Forecasts, 2023 - 2030*. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/digital-twin-market>
- Grieves, M. (2016). *Origins of the Digital Twin Concept*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>
- Gromova, E. (2019). An example of a digital product design in Russian industry. *5th International Conference on Engineering, Technology, and Industrial Application (ICETIA)*, 020009. <https://doi.org/10.1063/1.5112393>
- IBM. (2023, November 14). *What is a digital twin?* IBM. <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>
- IRT3000 Magazine. (2017, March 20). Virtual production: SCHUNK models digital gripper twins for high-performance assembly. *IRT3000 Magazine*. https://www.irt3000.com/en/news/2017032012145764/virtual_production_schunk_models_digital_gripper_twins_for_highperformance_assembly/
- Krishna Sai. (2023, November 1). *Optimizing Digital Twins Supports DOD Testing and Innovation Efforts*. <https://fedtechmagazine.com/article/2023/11/optimizing-digital-twins-supports-dod-testing-and-innovation-efforts>
- Leblanc, M. B. (2020). *Digital Twin Technology for Enhanced Upstream Capability in Oil and Gas* [Massachusetts Institute of Technology]. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/132840>
- Lim, K. Y. H., Zheng, P., & Chen, C.-H. (2020). A state-of-the-art survey of Digital Twin: techniques, engineering product lifecycle management and business innovation perspectives. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(6), 1313–1337. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01512-w>
- Lo, C. K., Chen, C. H., & Zhong, R. Y. (2021). A review of digital twin in product design and development. *Advanced Engineering Informatics*, 48, 101297. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101297>
- Mayer Daryl. (2020, April 23). *Air Force partners to create B-1B “digital twin.”* Wright-Patterson AFB Web Site. <https://www.wpafb.af.mil/News/Article-Display/Article/2163089/air-force-partners-to-create-b-1b-digital-twin/>
- Mcclay, R. (2022). *How the Oil and Gas Industry Works*. <https://www.investopedia.com/investing/oil-gas-industry-overview/>

- Our World in Data Org. (2022). *Cost of space launches to low Earth orbit*.
<https://ourworldindata.org/grapher/cost-space-launches-low-earth-orbit?time=2004..latest>
- Paiola, M., & Gebauer, H. (2020). Internet of things technologies, digital servitization and business model innovation in BtoB manufacturing firms. *Industrial Marketing Management*, 89, 245–264. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2020.03.009>
- Patrikeev, A. V, Tarasov, A., Borovkov, A., Aleshin, M., & Klyavin, O. (2017). NVH analysis of offroad vehicle frame. Evaluation of mutual influence of the body-frame system components. *Materials Physics and Mechanics*, 70–75.
- Pattillo, P. D. (2018a). Connections. In *Elements of Oil and Gas Well Tubular Design* (pp. 245–272). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811769-9.00009-8>
- Pattillo, P. D. (2018b). Connections. In *Elements of Oil and Gas Well Tubular Design* (pp. 245–272). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811769-9.00009-8>
- Pattillo, P. D. (2018c). Introduction. In *Elements of Oil and Gas Well Tubular Design* (pp. 1–17). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811769-9.00001-3>
- The rise of the digital twin: how healthcare can benefit, (August 30, 2018).
<https://www.philips.com/a-w/about/news/archive/blogs/innovation-matters/20180830-the-rise-of-the-digital-twin-how-healthcare-can-benefit.html>
- Russia Today. (2020, February 12). ‘Polytech Days in Berlin’: Why new digital technology is the backbone of industrial production and the global economy. *RT News*.
<https://www.rt.com/sponsored-content/480670-polytech-days-in-berlin/>
- Shane McArdle. (2021). Unlocking the hidden value of data with a unified digital twin. *World Oil Magazine*, 242(5), 46–48. <https://www.worldoil.com/magazine/2021/may-2021/features/unlocking-the-hidden-value-of-data-with-a-unified-digital-twin/>
- SpaceX delivers outer space at bargain rates, (2011).
https://media.plm.automation.siemens.com/nx/CAD_design-solutions/pdf/10/NXCAD01_10_en_spacex_CS.pdf
- Singh, M., Srivastava, R., Fuenmayor, E., Kuts, V., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2022). Applications of Digital Twin across Industries: A Review. *Applied Sciences*, 12(11), 5727. <https://doi.org/10.3390/app12115727>
- Sircar, A., Nair, A., Bist, N., & Yadav, K. (2022). Digital twin in hydrocarbon industry. *Petroleum Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2022.04.001>
- Somers, R. J., Douthwaite, J. A., Wagg, D. J., Walkinshaw, N., & Hierons, R. M. (2023). Digital-twin-based testing for cyber–physical systems: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 156, 107145. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.107145>
- Steven R. Hirshorn. (2016). *NASA SYSTEMS ENGINEERING HANDBOOK*.
https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2018/09/nasa_systems_engineering_handbook_0.pdf

- Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S. C.-Y., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3935–3953. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229>
- Thomas Macaulay. (2018, June 26). Rolls-Royce CDO Neil Crockett drives data into engine design. *CIO Magazine*. <https://www.cio.com/article/195755/rolls-royce-cdo-neil-crockett-drives-data-into-engine-design.html>
- Tom Austin-Morgan. (2017, October 2). Maserati has fused cutting-edge digitalisation methods with Italian passion to meet customer demand. *Eureka! Magazine*. <https://www.eurekamagazine.co.uk/content/interview/maserati-has-fused-cutting-edge-digitalisation-methods-with-italian-passion-to-meet-customer-demand>
- Wanasinghe, T. R., Wroblewski, L., Petersen, B. K., Gosine, R. G., James, L. A., de Silva, O., Mann, G. K. I., & Warriar, P. J. (2020). Digital Twin for the Oil and Gas Industry: Overview, Research Trends, Opportunities, and Challenges. *IEEE Access*, 8, 104175–104197. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998723>
- Wang, L., & Stewart, C. (2022). Real-time operations center drives new ESG opportunities by integrating personnel and data. *World Oil*. <https://www.worldoil.com/magazine/2022/april-2022/special-focus-offshore-technology/real-time-operations-center-drives-new-esg-opportunities-by-integrating-personnel-and-data/>
- Woodrow Bellamy III. (2018, September 14). Boeing CEO Talks ‘Digital Twin’ Era of Aviation. *Aviation Today*. <https://www.aviationtoday.com/2018/09/14/boeing-ceo-talks-digital-twin-era-aviation/>
- Xie, J. (2018, December). *Finite Element Analysis for Tubular Connection Product Line Validation*. https://www.researchgate.net/publication/325721778_Finite_Element_Analysis_for_Tubular_Connection_Product_Line_Validation/citation/download
- Xie, J. (2021a, November 26). Considerations for Analytical Qualification of Tubular Connections for Thermal and HPHT Wells. *Day 1 Fri, November 26, 2021*. <https://doi.org/10.2118/208439-MS>
- Xie, J. (2021b, November 26). Considerations for Analytical Qualification of Tubular Connections for Thermal and HPHT Wells. *Day 1 Fri, November 26, 2021*. <https://doi.org/10.2118/208439-MS>
- Xie, J., & Xie, J. (2019a, November 17). Enhancement of Current Methodologies Used for Tubular Connection Product Line Validation. *Day 1 Tue, November 19, 2019*. <https://doi.org/10.2118/198701-MS>
- Xie, J., & Xie, J. (2019b, November 17). Enhancement of Current Methodologies Used for Tubular Connection Product Line Validation. *Day 1 Tue, November 19, 2019*. <https://doi.org/10.2118/198701-MS>

9. Anexos

9.1. Anexo A: Resumen de casos de uso relevados en la industria de DT en procesos de V&V.

Empresa	País	Aplicación de gemelos digitales	Vertical de Industria	Tipo de Producto	Modelo	Highlights	Referencias Complementarias	Año
Boeing	USA	Construcción de réplicas virtuales de componentes de aviones y simulación de cómo funcionarán a lo largo de su ciclo de vida.	Aeronáutica	Avión Comercial	B777	.40% de mejora en la calidad de las piezas y sistemas en el lanzamiento de producto.	"Boeing CEO Talks 'Digital Twin' Era of Aviation"	2017
SpaceX	USA	Modelado virtual para verificación de diseño y simulación de proceso de lanzamiento.	Aeroespacial	Cohete turbopropulsor	Falcon 1	.50% de mejora en productividad	"Siemens Gives Some Details of 'Digital Twin' Work with SpaceX, Maserati"	2016
						. Reducción en 1/3 los costos de lanzamiento (objetivo 1/10)		
GE Aviation	USA	Diseño y mejora de motores a reacción y turbopropulsores, recopilando datos de uso para predecir fallas. Simulación integral del tren de aterrizaje de aeronaves.	Aeronáutica	Motor a reacción	GE60		"Twinning: Digital Twins Show Their Power"	<2019
Roll Royce	UK	Modelado y simulación de rendimiento y salud de los motores a reacción. Las réplicas digitales a escala de los motores físicos se utilizan para simular las rigurosas pruebas requeridas para la certificación del motor.	Aeronáutica	Motor a reacción	-	.Uso de DT en procesos VV&A para ensayos de falla de turbina en vuelo. .Ahorro de tiempo y dinero previo a los ensayos de certificación del motor como apto para volar.	"Rolls-Royce CDO Neil Crockett drives data into engine design"	2017

Anexo A: Resumen de casos de uso relevados en la industria de DT en procesos de V&V - Continuación

Empresa	País	Aplicación de gemelos digitales	Vertical de Industria	Tipo de Producto	Modelo	Highlights	Referencias Complementarias	Año
Aurus Motors	Rusia	Prototipado virtual y verificación de producto. Simulación del modelo de un automóvil de lujo, que pudo ser representado, analizado y probado como una máquina física real.	Automotriz	Automóvil Alta Gama (Blindado para el Presidente de Rusia)	Senat Limousine	<ul style="list-style-type: none"> . Colaboración entre industria y universidad (SPbPU - Universidad Politécnica St. Petersburgo) . Reducción de tiempo de producción (5-7 años a 2,4 años) . Apoyo Gubernamental al desarrollo de la Economía Digital (Proyecto "Cortege") 	"Polytech Days in Berlin": Why new digital technology is the backbone of industrial production and the global economy"	2017
Maserati	Italia	Prototipado virtual, modelado y simulación de pruebas en túneles de viento y manejo.	Automotriz	Automóvil Sedan Deportivo	Sedan Ghibli	<ul style="list-style-type: none"> . Uso end-to-end de la solución de Software PLM Siemens . Reducción del tiempo de desarrollo (-30%) 	"Maserati has fused cutting-edge digitalisation methods with Italian passion to meet customer demand"	<2017
Schunk	Alemania	Utilizan gemelos digitales para el desarrollo de productos, en etapas de puesta en marcha y simulación, reduciendo tiempos en el ciclo de desarrollo.	OEM	Sistemas de sujeción	SVH 5 Finger Gripping Hand		"Virtual production: SCHUNK models digital gripper twins for high-performance assembly"	2017
Phillips	Países Bajos	Utilizan gemelos digitales para realizar simulaciones durante el proceso de desarrollo, testeando prototipos digitales de producto e iterando el diseño antes de fabricar el prototipo físico.	OEM	Equipos Médicos	Generador de Oxígeno portátil		"The rise of the digital twin: how healthcare can benefit"	<2018
U.S Force	Estados Unidos	Modelado y simulación de la aeronave para planificación de actividades de mantenimiento preventivo. Diseño y V&V de piezas de reparación.	Defensa	Aviones bombarderos Supersónicos	B-1B	<ul style="list-style-type: none"> . Escaneo 3D y reensamble para generación del gemelo digital. . Agregación de información de daños estructurales, fisuras y defectos reales al modelo digital. 	"Air Force partners to create B-1B digital twin"	2020

9.2. Anexo B: Análisis de Campo. Cuestionario propuesto (Google forms).

12/23/23, 5:46 PM

Digital Twins in Oil & Gas: Industry Survey

Digital Twins in Oil & Gas: Industry Survey

Thanks for participating in this survey. It will help me to get valuable insights for my master's in business & technology degree thesis, which is aiming to understand the opportunities and challenges of using Digital Twins in V&V processes for O&G Upstream Products.

* Indica que la pregunta es obligatoria

Section 1: Respondent Information

1. 1.1 Name

2. 1.2 What is your role in the oil and gas industry? (Select one)*

Marca solo un óvalo.

- OCTG Manufacturer
 O&G Operator
 Service Provider
 Testing Laboratory /Certification Specialist
 Simulation Specialist
 Otro: _____

12/23/23, 5:46 PM

Digital Twins in Oil & Gas: Industry Survey

3. 1.3 How many years of experience do you have in the oil and gas industry?*

Marca solo un óvalo.

- Less than 1 year
 1-5 years
 6-10 years
 More than 10 years

Section 2: Digital Twin Tech - Awareness & Implementation

4. 2.1 Are you familiar with the concept of digital twins and its application?*

Marca solo un óvalo.

- Very Familiar
 Familiar
 Somewhat Familiar
 Not Familiar at all

In case you are not very much familiar either with the concept, the technology or the possible applications of digital twins in the industry, find below some short video which may give you some more background.



<http://youtube.com/watch?v=iVS-AuSjp00>

https://docs.google.com/forms/d/1nV0P1vgQ_vvKf-byKLnr1to6COpV7p_ajDxbLSlaQ/edit

1/7

https://docs.google.com/forms/d/1nV0P1vgQ_vvKf-byKLnr1to6COpV7p_ajDxbLSlaQ/edit

2/7

Anexo B: Análisis de Campo. Cuestionario propuesto (Google forms) - Continuación

12/23/23, 5:46 PM

Digital Twins in Oil & Gas: Industry Survey

5. **2.2 Are you aware of the use of digital twins in the Oil and gas industry? If so, in which industry segment and area do you think it is most likely to be found?** *

Marca solo un óvalo por fila.

No, I've never heard of any application of this technology in the industry	Yes, Upstream	Yes, Midstream	Yes, Downstream
Product	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Processes	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

6. **2.3 How would you classify the penetration of digital twin technology in the Oil & Gas industry?** *

Marca solo un óvalo.

- Highly Advanced:** It is extensively adopted, and most companies in the industry are actively using it for various applications.
- Moderately Advanced:** Many organizations have implemented it, but its adoption is not yet universal. It is used for specific applications
- In the Early Stages:** Only a few pioneering organizations experimenting with this technology
- Limited Adoption:** Very few organizations have adopted it, and it is not widely utilized.
- No Adoption:** It is not currently used in the Oil & Gas industry, and there are no plans for its implementation.

https://docs.google.com/forms/d/1nV0P1vgQ_vvKf-byKLnhr1to6COpV7p_sjXrblSLaQ/edit

3/7

12/23/23, 5:46 PM

Digital Twins in Oil & Gas: Industry Survey

7. **2.4 Are you or your organization currently using digital twins technology?***

Marca solo un óvalo.

- Yes, extensively.
- Yes, to some extent
- No, but considering it.
- No plans for Implementation.

8. **2.5 For O&G Upstream products, in which product lifecycle stage do you think digital twins can provide more value?** *

Marca solo un óvalo.

- Product Design and Development
- Product Manufacturing
- Product Distribution
- Product Operation & Service
- Product Disposal/End of Life

9. **2.6 Which type of V&V test do you think it can be enhanced by digital twins technology? (Select all that apply)** *

Selecciona todos los que correspondan.

- M&B Evaluations (Torque - turns, Connection assembly, Galling)
- Fatigue Life prediction
- Scalability tests
- Failure tests
- All above
- Full API RP 5C5 4thEd full characterization (or any other customer specific testing protocol)
- None
- Otro: _____

https://docs.google.com/forms/d/1nV0P1vgQ_vvKf-byKLnhr1to6COpV7p_sjXrblSLaQ/edit

4/7

Anexo B: Análisis de Campo. Cuestionario propuesto (Google forms) - Continuación

12/23/23, 5:46 PM

Digital Twins in Oil & Gas: Industry Survey

Section 3: Digital Twins Tech - Benefits, Challenges and latest advancements

10. **3.1 What is the main benefit have you observed in using digital twins for V&V in oil * and gas product design and development process?**

Marca solo un óvalo.

- Improve product quality
 Faster product development cycles
 Cost Savings
 Better decision-making & product insights
 Otro: _____

11. **3.2 What challenges or obstacles have you encountered/foresee when implementing digital twins for V&V in oil and gas product design? (Select all that apply)**

Selecciona todos los que correspondan.

- Sensing and IIoT devices
 Data integration and quality issues
 Cybersecurity issues
 High implementation costs
 Technical implementation issues
 Virtual model fidelity
 Lack of skilled personnel
 Resistance to change within the organization
 Otro: _____

12/23/23, 5:46 PM

Digital Twins in Oil & Gas: Industry Survey

12. **3.3 What are the latest innvations have you been working on the field of testing * and evaluating OCTG tubular products?**

Section 4: Future Outlook & Additional Comments

13. **4.1 Do you foresee industry standards (i.e. API RP 5C5 4thEd or similar) can adopt * digital twins technology to complement or replace current evaluations requirements in the next 5 years?**

Marca solo un óvalo.

- Yes
 No

14. **4.2 How do you foresee the role of digital twins for V&V processes evolving in the * oil and gas industry over the next 5 years?**

Anexo B: Análisis de Campo. Cuestionario propuesto (Google forms) – Continuación

12/23/23, 5:46 PM

Digital Twins in Oil & Gas: Industry Survey

15. *4.3. Based on your experience and your role in the industry, what are the main challenges O&G industry is facing in its digital transformation journey?*

16. *4.4. Do you have any additional comments or insights related to the possibility of using digital twins for V&V in oil and gas product design and development you would like to share?*

Thanks!

Thank you for taking the time to complete this survey. Your input is highly valuable for my research. Really appreciate your support!

Kind Regards,

Luis Innamorati

Este contenido no ha sido creado ni aprobado por Google.

Google Formularios