



universidad
de león

TESIS DOCTORAL

**Modelo de Enseñanza-Aprendizaje para la
Transferencia de Conocimiento Experto a
través de Simuladores Hápticos**

Gonzalo Esteban Costales

Programa de Doctorado en Ingeniería de Producción y Computación

Directora: Dra. Dña. Camino Fernández Llamas

León, Octubre 2020

La **Dra. Dña Camino Fernández Llamas**, como Directora de la Tesis Doctoral titulada **“Modelo de Enseñanza-Aprendizaje para la transferencia de Conocimiento Experto a través de Simuladores Hápticos”** y realizada por **D. Gonzalo Esteban Costales** en el Programa de Doctorado Ingeniería en Producción y Computación de la Universidad de León, considera este documento como finalizado e informa favorable el depósito de la misma, dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

A Lucía y a la memoria de mis padres.

Agradecimientos



Atenea revelando Ítaca a Ulises
(*Giuseppe Bottani, Siglo XVIII*)

Este trabajo recoge el esfuerzo volcado durante ocho largos años, más de los que esperaba cuando tomé la decisión de iniciarme en el curioso mundo de la investigación. El camino no ha sido especialmente fácil y, desde mi humilde opinión, se asemeja bastante a lo que Ulises tuvo que vivir durante sus diez años de odisea hasta regresar a Ítaca. Al igual que él, este trabajo refleja el afán y la tenacidad necesarios para superar los continuos obstáculos y designios que presenta la vida. Por esta razón, creo que es justo dedicar unas breves palabras de agradecimiento a todas aquellas personas que han depositado su confianza en mí, ya que sin ellas, esta tesis nunca podría haberse finalizado.

En primer lugar dar las gracias a mi directora Camino, por su apoyo, paciencia y comprensión dadas las circunstancias en las que se ha desarrollado la tesis. A Vicente por brindarme la oportunidad de compaginar la tesis con diferentes oportunidades de trabajo a lo largo de estos años. A Francisco Lera (Fran) por su siempre desinteresada ayuda, y por sus ánimos e implicación en finalizar este trabajo. A mis pupilas Laura, Alba y Eva porque fueron las artífices de plasmar las ideas de trabajo en código fuente. Y en general, a toda la gente del Grupo de Robótica de la Universidad de León—pasada y presente—, por todos los buenos momentos compartidos durante este tiempo.

A mis amigos, todos ellos pero en especial a Rafa, Araceli, Joaquín, Razvan, Carlos y Ewa, por su incondicional y desinteresada amistad, que tan necesarias alegrías me ha dado durante estos años.

A mi madre, un auténtico ejemplo de humildad y valentía que me enseñó a valorar lo importante de la vida. A mi padre, por enseñarme a no rendirme nunca a pesar de no tener las circunstancias óptimas. A mis hermanos y a mi familia en general por su apoyo. A mi familia política, en particular a Charo y José Luis, por sus buenos consejos y por tratarme siempre como un hijo.

Pero sobre todo a Lucía, por estar a mi lado en los momentos difíciles, apoyarme en todas mis decisiones y creer siempre en mí.

Resumen

Michael Polanyi fue un intelectual que replanteó el concepto de conocimiento partiendo del hecho de que “sabemos más de lo que podemos decir”. Ese aspecto tácito del conocimiento resulta de especial interés cuando, por ejemplo, un experto quiere enseñar a otra persona a realizar una tarea que requiera cierta destreza con las manos. Partiendo de ese punto, ¿de qué manera puede articular el experto su conocimiento para que la otra persona lo adquiera? Es más, ¿cómo garantizar que esa persona ha adquirido tal “conocimiento experto”?

Este desafío educativo está presente en disciplinas como la cirugía, donde los planes de estudios están centrados en desarrollar ciertas competencias profesionales; especialmente aquellas relativas a destrezas manuales. En ese contexto, el proceso de enseñanza y aprendizaje tradicional ha seguido un enfoque resumido en el lema “ver, hacer, enseñar”. Pero aplicar esto en un entorno real plantea numerosas dificultades, en particular a la hora de disponer físicamente de tiempo con el que poder practicar de forma apropiada; no solo para el estudiante que está formándose, sino también para el experto que debe supervisar y evaluar su desempeño. Por ello, la aparición de herramientas educativas como los simuladores hápticos han permitido solventar estos problemas, proporcionando al estudiante un entorno seguro desde el que practicar deliberadamente cualquier tipo de situación.

Un simulador háptico es un sistema compuesto por un hardware y software específicos, cuya finalidad es la de replicar el sentido del tacto dentro de un entorno virtual o teleoperado. De este modo, lo que hace único a este tipo de simuladores frente al resto de alternativas existentes son sus ventajas: reclamo sensitivo, registro y evaluación automática de datos del desempeño e incluso la posibilidad de que el experto no este presente durante el proceso de aprendizaje. Sin embargo, y hasta la fecha, en la literatura académica de la educación médica existen opiniones ambiguas acerca de su uso e implementación frente a otros tipos de simuladores. Probablemente esto es debido tanto a la inadaptación tecnológica de las metodologías tradicionales como a la falta de un mecanismo estándar que permita representar adecuadamente, y en términos de software, tanto la transferencia como la adquisición del conocimiento experto.

La presente tesis surge como una solución a esta aparente necesidad, proponiendo un modelo capaz de representar el conocimiento experto dentro de un simulador háptico. Su principal objetivo es reflejar ese proceso de enseñanza y aprendizaje de conocimiento experto en el ámbito de la cirugía. No obstante, dada su importancia, su aplicación también es generalizable a otras disciplinas que hagan uso de simuladores hápticos como herramientas formativas.

Para materializar la propuesta, el trabajo identifica las características esenciales del conocimiento experto y también una metodología para crear modelos de forma sistemática. A continuación, y en base a las evidencias encontradas, define el modelo propuesto y detalla su formalización; dando como resultado un framework capaz de expresar el

conocimiento experto a través de un simulador háptico. Finalmente, y para validar esta solución, la tesis concluye presentando los resultados de un experimento piloto diseñado específicamente para evaluar su aceptación en un entorno real. Sus resultados, aunque preliminares, son positivos y permiten sentar las bases a una nueva línea de investigación en el ámbito de la educación basada en simulación.

Abstract

Michael Polanyi was a polymath who reconsidered the concept of human knowledge, by starting from the fact that “we can know more than we can tell”. This tacit feature of human knowledge is especially interesting when, for example, an expert wants to teach another person how to perform some task that requires hand skills. Starting from this point, how can the expert materialize his knowledge so that another person is able to acquire it? Moreover, how can it be guaranteed that the person has acquired this “expert knowledge”?

This educational challenge is present in fields such as surgery, where curriculum programmes are focused on building certain professional competences; especially those related to hand skills. In this context, the traditional teaching and learning process has been following the cliché “see one, do one, teach one”. However, it is quite difficult to apply this in a real environment, taking into account that having the sufficient time to practice correctly is a must. This does not have an impact only on the student who is practicing, but also on the expert, who has to monitor and assess the whole procedure. Hence, the arising of new educational tools such as haptic simulators, has provided a solution to this problem by giving the student a safe environment in which he can deliberately practice any scenario including those who are less frequent.

Haptic simulators are systems with a specific hardware and software, whose main goal is recreating the sense of touch in the context of a virtual or remote environment. In consequence, what makes this type of simulators unique comparing them to the rest of the existing alternatives, are their benefits: tactile enticement, automatic logging and assessment of performance data, and even the opportunity to not require the presence of an expert during the learning process. Nevertheless, evidence in academic literature shows inconclusive opinions related to their use and implementation in medical education, compared to other types of simulators. This is probably due to the technological inadaptation of traditional methodologies, as well as the lack of a standard which can represent appropriately, and in software terms, both transfer and acquisition of expert knowledge.

This PhD thesis comes up as a solution to this apparent necessity, proposing a model which is able to represent expert knowledge within haptic simulators. Its main goal is reflecting the teaching-learning process of expert knowledge inside the surgical field. However, given its relevance, its application can be generalized to other fields that make use of haptic simulators as educational tools.

In order to materialize the proposal, this research work identifies the essential features of the expert knowledge and also a methodology to create models in a systematic way. Consequently, and based on the evidence gathered, it defines the proposed model and describes in detail its formalization; giving as a result a framework able to express expert knowledge through a haptic simulator. Finally, and with the purpose of validating this solution, the thesis concludes by presenting the outcomes of a pilot experiment, which

was designed specifically in order to evaluate its acceptance in a real environment. The results, even though they are preliminary, are positive and allow to lay the foundations for a new research line within the scope of simulation-based learning.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Justificación	3
1.3. Planteamiento del trabajo de investigación	4
1.3.1. Hipótesis de investigación	4
1.3.2. Objetivos	4
1.4. Estructura y metodología del trabajo de investigación	6
2. Estudio del problema	7
2.1. Introducción	7
2.1.1. Conocimiento basado en la experiencia	7
2.2. La enseñanza y el aprendizaje en medicina	8
2.2.1. El proceso de aprendizaje	8
2.2.2. El proceso de enseñanza	11
2.3. Simuladores en la educación médica	13
2.3.1. Simulación háptica	14
2.3.2. La evaluación de las destrezas técnicas	16
2.4. Discusión	19
2.5. Conclusiones	20
3. Revisión de la literatura	23
3.1. Introducción	23
3.2. Contexto	24
3.2.1. Hierarchical Task Analysis	24
3.2.2. Surgical Process Modelling	25
3.2.3. Preguntas de investigación	25
3.3. Metodología	26
3.3.1. Extracción de los datos	27
3.3.2. Síntesis de los datos	27
3.4. Resultados	27
3.4.1. MQ1: ¿Qué revisiones de la literatura de SPMOD han sido publicadas hasta la fecha y cuántas publicaciones han sido revisadas en dichos estudios?	28
3.4.2. MQ2: ¿Cuáles son las áreas de aplicación de un SPM?	29
3.4.3. MQ3: ¿Cómo es el proceso de generación de un SPM?	30
3.4.4. MQ4: ¿Cómo es la evaluación de un SPM?	38
3.5. Discusión	39
3.5.1. RQ1: ¿Cómo adaptar el SPMOD para modelar el conocimiento experto a través de un simulador háptico?	41

3.5.2. Amenazas a la validez de la investigación	45
3.6. Conclusiones	45
4. Modelo del conocimiento experto	49
4.1. Introducción	49
4.2. Características	49
4.2.1. Nivel de granularidad	50
4.2.2. Adquisición de datos	52
4.2.3. Representación del modelo	56
4.2.4. Enfoque del modelado	57
4.3. Flujo de trabajo	57
4.3.1. Proceso de enseñanza	57
4.3.2. Proceso de aprendizaje	59
4.3.3. Proceso de ejecución de una unidad de aprendizaje	59
5. Formalización del modelo	63
5.1. Introducción	63
5.1.1. Paradigma Entidad-Componente-Sistema	63
5.2. Modelo conceptual de LEEKHS	65
5.3. Arquitectura software de LEEKHS	66
5.3.1. Módulos de bajo nivel	67
5.3.2. Módulos de alto nivel	70
6. Evaluación del modelo	89
6.1. Introducción	89
6.2. Metodología	89
6.2.1. Participantes	90
6.2.2. Actividades	91
6.2.3. Instrumento de evaluación	93
6.2.4. Variables a medir	95
6.3. Resultados	96
6.4. Discusión	98
6.4.1. RQ1: ¿Cuál es el grado de aceptación del framework?	100
6.4.2. Limitaciones del experimento	101
6.5. Conclusiones	102
7. Conclusiones	103
7.1. Cumplimiento de los objetivos	105
7.2. Aportaciones	106
7.2.1. Artículos de investigación	106
7.2.2. Trabajos académicos	107
7.3. Trabajos y futura línea de investigación	107
Bibliografía	111
A. Detalles adicionales sobre el diseño del framework LEEKHS	121
A.1. Utilidades (util)	121
A.1.1. Colaboraciones entre participantes	121
A.1.2. Detalles de implementación	122
A.2. Entidad-Componente-Sistema (ecs)	122

A.2.1. Colaboraciones entre participantes	122
A.2.2. Detalles de implementación	125
A.3. Mecánica de la interacción háptica (mechanics)	125
A.3.1. Colaboraciones entre participantes	128
A.3.2. Detalles de implementación	132
A.4. Evaluación del desempeño (assessment)	135
A.4.1. Colaboraciones entre participantes	135
A.5. Entorno de aprendizaje (learnenv)	138
A.5.1. Colaboraciones entre participantes	138
B. Datos sobre la evaluación del modelo	149
B.1. Cuestionario	149
B.2. Datos de los participantes	151
B.3. Estadísticos utilizados	151

Índice de figuras

1.1. Contribución de la tesis al proceso de enseñanza-aprendizaje de conocimiento experto	5
2.1. Modelos para clasificar por niveles la pericia de un individuo según su grado de experiencia	9
2.2. Dominios del aprendizaje propuestos por Bloom (1956)	10
2.3. Modelo de tres etapas de Fitts y Posner (1967) para explicar la adquisición de destrezas motoras mediante la práctica	11
2.4. Taxonomía de simuladores médicos propuesta por Bradley (2006)	14
2.5. Retroalimentación de un sistema háptico	15
2.6. Rol de los requisitos de la práctica deliberada en los procesos de enseñanza y de aprendizaje en cirugía	20
3.1. Diagrama PRISMA sobre los resultados de la búsqueda complementaria de revisiones de la literatura sobre SPMOD	30
3.2. Taxonomía de componentes que intervienen en el proceso de generación de un SPM	41
3.3. Propuestas de niveles de granularidad mencionadas en la literatura de SPMOD	42
3.4. Clasificación de lenguajes de modelado para formalizar la información de un SPM	43
3.5. Estrategias de modelado utilizadas en SPMOD	44
4.1. Taxonomía de los datos que componen una unidad de aprendizaje	51
4.2. Diagrama BPMN sobre el proceso de enseñanza del conocimiento experto	58
4.3. Diagrama BPMN sobre el proceso de aprendizaje de conocimiento experto	60
4.4. Diagrama BPMN sobre el proceso de ejecución de una unidad de aprendizaje	61
5.1. Modelo conceptual de LEEKHS	66
5.2. Diagrama de paquetes del framework	67
5.3. Diagrama de clases del módulo de utilidades	68
5.4. Diagrama de clases del módulo Entidad-Componente-Sistema (ECS)	69
5.5. Diagrama de clases del módulo de mecánica de la interacción háptica (parte 1)	72
5.6. Diagrama de clases del módulo de mecánica de la interacción háptica (parte 2)	76
5.7. Diagrama de clases del módulo de evaluación del desempeño (parte 1)	79
5.8. Diagrama de clases del módulo de evaluación del desempeño (parte 2)	82
5.9. Diagrama de clases del módulo de evaluación del desempeño (parte 3)	83
5.10. Diagrama de clases del módulo entorno de aprendizaje (parte 1)	85
5.11. Diagrama de clases del módulo entorno de aprendizaje (parte 2)	86

6.1. Asistentes del VetDoc 2017 participando en el experimento de evaluación sobre LEEKHS. Fuente: elaboración propia	90
6.2. Capturas de la tarea de precisión integrada en el simulador háptico para evaluar el framework	93
6.3. Capturas de la tarea de traslación integrada en el simulador háptico para evaluar el framework	93
6.4. Resultados demográficos del experimento para una población de $N=31$. .	97
6.5. Resultados del desempeño de los participantes en las dos tareas de aprendizaje propuestas con el simulador háptico y para una población de $N=31$. .	98
6.6. Opiniones de los participantes sobre la aceptación de LEEKHS para una población de $N=31$	99
6.7. Comparación de las opiniones de los participantes al ítem 4 según su área de conocimiento (para una muestra de $n=9$)	101
6.8. Comparación de las opiniones de los ítems 1 y 2 por parte de los participantes que respondieron al ítem 5 con “no lo sé” (para una muestra de $n=6$)	101
A.1. Diagrama de secuencia para añadir un objeto al registro de instancias de clases	121
A.2. Diagrama de secuencia para quitar un objeto del registro de instancias de clases	122
A.3. Diagrama de secuencia para obtener un objeto del registro de instancias de clases	122
A.4. Diagrama de secuencia para crear una entidad dentro de un contexto . . .	123
A.5. Diagrama de secuencia para quitar una entidad perteneciente a un contexto	123
A.6. Diagrama de secuencia para obtener todos los componentes de un tipo específico dentro de un contexto	124
A.7. Diagrama de secuencia para crear un componente específico asociado a una entidad perteneciente a un contexto	126
A.8. Diagrama de secuencia para quitar un componente específico asociado a una entidad perteneciente a un contexto	127
A.9. Diagrama de secuencia para describir el proceso de interacción háptica . .	129
A.10. Diagrama de secuencia para buscar una entidad asociada a un objeto ajeno al modelo dentro de un contexto	130
A.11. Diagrama de secuencia para gestionar las notificaciones de un evento de colisión detectado durante el proceso de interacción háptica	131
A.12. Diagrama de secuencia para responder ante una notificación del inicio de una colisión	132
A.13. Diagrama de secuencia para responder ante una notificación del fin de una colisión	132
A.14. Diagrama de secuencia para describir el proceso de respuesta háptica . . .	133
A.15. Diagrama de clases que ejemplifica la implementación del patrón Adapter en el módulo de las mecánicas de la interacción háptica:	134
A.16. Diagrama de clases para crear las entidades participantes en el modelo . .	135
A.17. Diagrama de secuencia para el proceso de registro de los datos de desempeño en las entidades activas en un contexto dado	136
A.18. Diagrama de secuencia para registrar los datos de desempeño de una entidad concreta	137
A.19. Diagrama de secuencia sobre el proceso de evaluación de las métricas registradas en todas las entidades de un contexto dado	139

A.20.Diagrama de secuencia para evaluar una métrica específica	140
A.21.Diagrama de secuencia sobre el proceso de ejecutar una una sesión de aprendizaje	141
A.22.Diagrama de secuencia para responder ante una notificación de error fatal	142
A.23.Diagrama de secuencia para cargar los datos de un paso en las entidades del contexto de la unidad de aprendizaje	142
A.24.Diagrama de secuencia para cargar en una entidad sus datos almacenados en el contexto de un paso	143
A.25.Diagrama de secuencia para monitorizar el desarrollo de un paso	145
A.26.Diagrama de secuencia para comprobar el cumplimiento de todos los objetivos de un paso dado	146
A.27.Diagrama de secuencia para responder ante una notificación de paso completado	147
A.28.Diagrama de secuencia para descargar los datos de un paso dentro de su contexto	147
A.29.Diagrama de secuencia para guardar los datos de una entidad en el contexto de un paso	148

Índice de tablas

2.1. Categorías de métricas utilizadas para evaluar la adquisición de destrezas técnicas mediante simuladores virtuales	18
3.1. Datos incluidos en el formulario de extracción de datos	28
3.2. Características generales de los artículos primarios analizados	29
3.3. Características relativas a las publicaciones sobre sPMOD revisadas en los artículos primarios	29
3.4. Aplicaciones de un sPM citadas en la literatura	30
3.5. Componentes de un sPM	31
3.6. Datos extraídos sobre las características del componente de nivel de granularidad	32
3.7. Datos extraídos sobre las características del componente de adquisición de datos	33
3.8. Datos extraídos sobre las características del componente de representación del modelo	35
3.9. Datos extraídos sobre las características del componente de enfoque del modelado	37
3.10. Datos extraídos sobre características de la generalización	38
3.11. Aspectos a considerar para validar un sPM	39
4.1. Planificación de una entrevista para obtener el conocimiento experto	54
4.2. Datos a extraer sobre el modelo durante una entrevista a un experto	55
5.1. Tipos de herramientas de interacción háptica y sus características	73
5.2. Tipos de acciones físicas y sus descripciones desde el punto de vista de la interacción háptica	74
5.3. Tipos de estados físicos y sus descripciones desde el punto de vista de la interacción háptica	78
6.1. Estadísticos descriptivos sobre la fiabilidad de la variable “aceptación de LEEKHS” para una población de $N=31$	98
6.2. Validez del contenido de la variable “aceptación de LEEKHS” para una población de $N=31$	100
A.1. Tipos de entidades y posibles componentes asociados a cada una	134
B.1. Datos demográficos de los participantes	151
B.2. Datos de los participantes relativos a los resultados de las tareas de aprendizaje y a la variable de aceptación del framework	152
B.3. Estadísticos sobre los datos demográficos	153

B.4. Estadísticos sobre los resultados de las tareas de aprendizaje	153
B.5. Estadísticos sobre los items de la variable “aceptación de ΛΕΒΚΗΣ”	154

Capítulo 1

Introducción

Con el tiempo, los avances en el campo de la educación y de la tecnología médica han llegado a cuestionar la utilidad de las metodologías tradicionales de enseñanza. De hecho, la tendencia apunta hacia un uso de metodologías basadas en simulación. Entre los distintos tipos de simuladores utilizados en el ámbito de la educación médica destacan los virtuales, y más en concreto los que hacen uso de tecnología háptica. No obstante, la literatura refleja que el papel de dichos “simuladores hápticos” todavía es ambiguo. Prueba de ello es la ausencia de un estándar para diseñar adecuadamente simuladores hápticos con fines educativos. Ante esta situación, este trabajo de investigación presenta *LEEKHS*, un framework que facilita la creación de dicho tipo de simuladores. Este framework es el resultado de formalizar la propuesta de un modelo cuya finalidad es reflejar el modo de transferir el conocimiento de un experto. Su principal objetivo es plasmar los procesos de enseñanza y aprendizaje, inicialmente de cirugía pero generalizable a otros campos, en cualquier tipo de simulador háptico.

1.1. Motivación

Los planes de estudios en medicina están diseñados con respecto a unos objetivos de aprendizaje centrados en el desarrollo de ciertas competencias profesionales (Miller, 1990; Epstein y Hundert, 2002; Richard M. Satava, Anthony G. Gallagher y Pellegrini, 2003). En la mayoría de especialidades médicas, y sobre todo en aquellas relacionadas con cirugía, ese diseño sigue la filosofía del modelo de Halsted (1904) porque ofrece un contacto directo con el mundo real y también la tutela de un experto. Dicha metodología educativa está inspirada en el aprendizaje de oficios (popularmente conocido como “modelo del aprendiz”) y se fundamenta en la observación y la práctica; por lo que está supeditada a la disponibilidad de unos recursos humanos—pacientes y profesionales. Debido a esto, las oportunidades de los estudiantes a la hora de practicar se ven reducidas (Kneebone, 2003; Liu *et al.*, 2003). Además, la publicación de informes como *To Err is Human* de Kohn, Corrigan y Donaldson (2000), ha servido para concienciar a la comunidad médica sobre algunos problemas latentes en este sistema (Richard M. Satava, Anthony G. Gallagher y Pellegrini, 2003; Bradley, 2006; Kunkler, 2006; Aggarwal *et al.*, 2010); a destacar:

- Predominio de errores médicos que afectan a la seguridad de los pacientes.
- Elevada carga de trabajo para los residentes.
- Subjetividad en las metodologías de evaluación y certificación de estos.

Con el tiempo estos factores se han sumado a la evolución de la educación y de la tecnología médica, logrando cuestionar la aplicabilidad del modelo del aprendiz en ciertas situaciones (Gorman, Meier y Krummel, 1999; Liu *et al.*, 2003; Reznick y Macrae, 2006;

Reiley *et al.*, 2011).

Ante este panorama, cada vez es más frecuente integrar en los planes de estudios alternativas como la simulación, porque permiten practicar deliberadamente en un entorno seguro y sin poner en peligro la vida de los pacientes (Richard M. Satava, 2001; Dunkin *et al.*, 2007; Anthony G. Gallagher y E. Matthew Ritter, 2007; Aggarwal *et al.*, 2010). Para Gorman, Meier y Krummel (1999), Ziv *et al.* (2003), Bradley (2006) y Dunkin *et al.* (2007), la simulación ha constatado su validez como herramienta educativa en industrias como la aeronáutica, la militar o la nuclear. De hecho, algunos de ellos afirman que esta herramienta tiene aplicación en todos los niveles del desarrollo profesional; desde la universidad y el posgrado hasta el propio ejercicio profesional. En cuanto a su uso educativo en medicina, Bradley (2006) y Aggarwal *et al.* (2010) demuestran que esto no es algo nuevo pues se ha venido usando de forma complementaria desde hace tiempo. Parafraseando a Bradley, el ámbito de una simulación médica abarca desde la simple réplica de una determinada parte del cuerpo hasta la complejidad de una interacción humana con un paciente. Así, por ejemplo, entre sus aplicaciones están: practicar competencias básicas de forma individual o en equipo; ensayar eventos y procedimientos médicos vanguardistas, poco comunes o complejos; diseñar y utilizar equipamiento médico; o evaluar el desempeño de todo el personal clínico (sea cual sea su nivel de experiencia). Pero teniendo en cuenta este abanico de aplicaciones, ¿existe algún criterio que permita considerar qué tipo de simulador es más apropiado para cada aplicación?

La fidelidad de un simulador suele ser un aspecto condicionante para dicha tarea. Prueba de ello son sus frecuentes referencias en la literatura científica de la simulación médica (Cook *et al.*, 2013; Hamstra *et al.*, 2014). En este contexto, la fidelidad no solo hace referencia al grado de apariencia o comportamiento que tiene un simulador con respecto al sistema real que representa, sino también a la correlación con los objetivos de aprendizaje que pretende transmitir (Farmer *et al.*, 2017; Maran y Glavin, 2003; McGaghie, Issenberg, Petrusa *et al.*, 2010; Cook *et al.*, 2013; Hamstra *et al.*, 2014). En el caso del nivel de fidelidad de un simulador, Reznick y Macrae (2006) afirman que cuanto mayor es, mayor realismo tiene y mayor coste económico implica. Sin embargo, esta “aparente” restricción no parece suponer un problema en la práctica. Algunos autores afirman que existen evidencias en la literatura que demuestran que un simulador con un nivel bajo de fidelidad puede llegar a ser tan efectivo como uno de nivel alto a la hora de transmitir determinadas competencias profesionales (Reznick y Macrae, 2006; Dunkin *et al.*, 2007; Aggarwal *et al.*, 2010; Palter y Grantcharov, 2010; Hamstra *et al.*, 2014). Dicho esto, para diseñar un plan de estudios adecuado es conveniente seleccionar un modelo específico de simulador en base a las necesidades del contexto en el que se vaya a implementar.

Un tipo de simuladores que destaca sobre el resto en el ámbito de la educación médica son los virtuales. Como su nombre indica, estos hacen uso de tecnología de realidad virtual y ofrecen un entorno de aprendizaje versátil y seguro sin importar su nivel de fidelidad (Kneebone, 2003; Liu *et al.*, 2003; R. Satava, Cuschieri y Hamdorf, 2003; Dunkin *et al.*, 2007; Anthony G. Gallagher y E. Matthew Ritter, 2007). Además, dentro de los simuladores virtuales resultan de especial interés para el aprendizaje en cirugía los simuladores hápticos (Liu *et al.*, 2003; Coles, Meglan y John, 2011). Este subtipo añade un reclamo sensitivo, pues utilizan un hardware específico para simular el sentido del tacto (Srinivasan y Basdogan, 1997; El Saddik, 2007). De esta forma, el hardware háptico permite llevar a cabo movimientos básicos de cirugía (tales como palpar, cortar o punzar), con el añadido de sentir las fuerzas físicas asociadas a tales actividades. Como sugieren Palter y Grantcharov (2010) y Coles, Meglan y John (2011), esto diferencia a los simuladores hápticos del resto en que permiten practicar deliberadamente destrezas

asociadas a casos difíciles o poco frecuentes.

1.2. Justificación

Conocer el valor de la simulación háptica con respecto al resto de modalidades es un aspecto clave para la educación médica, especialmente en el proceso de enseñanza-aprendizaje. De hecho, van der Meijden y Schijven (2009), Coles, Meglan y John (2011) y Pinzon, Byrns y Zheng (2016) analizan la literatura con ese fin y encuentran que las evidencias son escasas, relativamente recientes y concentradas en el ámbito de la cirugía. Consecuencia de ello es que la opinión general sobre el tema es ambigua (van der Meijden y Schijven, 2009; Larsen *et al.*, 2012). Por un lado, hay quienes afirman que la tecnología háptica puede afectar positivamente a la efectividad de un simulador a la hora de desarrollar destrezas técnicas, sobre todo durante las primeras etapas formativas (Gurusamy *et al.*, 2008; Modi, Morris y Mukherjee, 2010; Alaker, Wynn y Arulampalam, 2016; Pinzon, Byrns y Zheng, 2016). Aunque por otro lado hay quienes aseguran que la tecnología háptica no aporta un claro beneficio educativo frente a otros tipos de simuladores (Larsen *et al.*, 2012; Zendejas *et al.*, 2013). Sea como fuere, la respuesta a este interrogante parece residir en la propia naturaleza de la simulación virtual.

Kneebone (2003), Sutherland *et al.* (2006), Palter y Grantcharov (2010), Coles, Meglan y John (2011) y Zendejas *et al.* (2013) sugieren que las evidencias existentes no reflejan la realidad tecnológica de la simulación virtual. En muchos casos se evalúan tecnologías ya obsoletas y, por consiguiente, es probable que los resultados extraídos de los estudios estén sesgados. Además, Modi, Morris y Mukherjee (2010), Palter y Grantcharov (2010), Coles, Meglan y John (2011), Larsen *et al.* (2012) y Alaker, Wynn y Arulampalam (2016) coinciden en que hay una ausencia de estudios que demuestren adecuadamente la validez de los simuladores virtuales. Al mismo tiempo, mencionan la falta de un estándar entre simuladores que permita su evaluación y comparación de forma uniforme. Pero si bien estas dificultades en el proceso de aprendizaje son abordadas habitualmente en la literatura, los problemas del proceso de enseñanza parecen estar implícitos o dados por supuestos.

Un ejemplo de ello surge a la hora de modelar el conocimiento experto dentro de un simulador virtual; entendiendo como modelar el hecho de determinar todos los objetivos del aprendizaje que el experto considere necesarios. Para empezar, diseñar y desarrollar un simulador de este tipo requiere un equipo de personas multidisciplinar (Coles, Meglan y John, 2011; Anthony G. Gallagher y E. Matthew Ritter, 2007). Así, por un lado están los ingenieros que desarrollan el propio simulador y por el otro los expertos—profesionales y docentes—, que aportan contenido. Parafraseando a Anthony G. Gallagher y E. Matthew Ritter, durante el desarrollo de un simulador virtual los ingenieros solo se comunican con los expertos, generalmente, para resolver dudas puntuales o en las últimas etapas del proceso. En consecuencia, dicho simulador puede presentar carencias a la hora de determinar los resultados del aprendizaje. Esto se traduce en que el conocimiento experto no esté representado apropiadamente o que el tipo de feedback a recoger no sea el adecuado para evaluar el desempeño de los usuarios. En vista de ello, las evidencias encontradas en la literatura para abordar de forma directa esta situación son escasas (Anthony G. Gallagher y E. Matthew Ritter, 2007; Coles, Meglan y John, 2011). Es decir, los autores simplemente se limitan a citar algunos aspectos del diseño instruccional tales como el realizar una deconstrucción de aquella tarea que se pretende simular o el generar un feedback objetivo. Además, al igual que sucede con el proceso de aprendizaje, en este caso tampoco hay constancia aparente de la existencia de un estándar que modele el conocimiento experto dentro de un simulador virtual.

1.3. Planteamiento del trabajo de investigación

Hasta la fecha existen opiniones ambiguas sobre el uso e inclusión de simuladores hápticos en el ámbito de la educación médica. Como ya se ha argumentado, esto probablemente es debido a que las metodologías educativas tradicionales no han logrado adaptarse a la rápida evolución tecnológica de los simuladores. Además, la situación también se entorpece por la falta de un estándar que sirva tanto para evaluar y comparar los resultados del aprendizaje de un simulador como para representar apropiadamente el conocimiento experto.

La contribución de este trabajo de investigación queda resumida en la Figura 1.1. En la parte izquierda está representado el proceso de enseñanza-aprendizaje tradicional en el ámbito de la cirugía, donde un estudiante aprendía presencialmente en un entorno real mediante pacientes y bajo la supervisión de un experto. La parte derecha refleja el proceso utilizado en la actualidad, donde la formación del estudiante tiene lugar en un entorno simulado. En particular, la tesis está centrada exclusivamente en los simuladores hápticos; los cuales hacen las funciones de un paciente a través de su hardware y software. Pero si bien estos simuladores representan—con un determinado nivel de fidelidad—al paciente, ¿quién realiza las funciones del experto? Parece lógico pensar que sea el propio simulador háptico; sin embargo la literatura revisada da por hecho este aspecto. En este aparente hueco es donde encaja esta tesis, proponiendo un modelo capaz de reflejar el conocimiento experto dentro de simuladores hápticos ya existentes. Su formalización es un framework denominado *LEarning Expert Knowledge by Haptic Simulation* (LEEKHS), el cual se integra en cualquier tipo de simulador háptico existente para darle la capacidad de hacer las funciones que desempeñaría un experto en un entorno real (a grandes rasgos supervisar y evaluar el desempeño del estudiante).

Para materializar esta contribución, la tesis plantea inicialmente las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Es posible adquirir y transferir algunos aspectos del conocimiento experto de un individuo mediante el uso de simuladores hápticos?
- ¿Qué aspectos relacionados con el conocimiento experto se pueden articular para diseñar un simulador háptico con fines educativos?
- ¿Cómo evaluar, de forma objetiva y utilizando simuladores hápticos, la adquisición de ciertas aptitudes relativas al conocimiento experto?

1.3.1. Hipótesis de investigación

Tomando como referencia las preguntas de investigación planteadas, este trabajo sugiere la siguiente hipótesis de partida:

El uso complementario de simuladores hápticos es efectivo tanto para transferir como para mejorar la adquisición de ciertas aptitudes asociadas al conocimiento experto, especialmente las psicomotoras.

1.3.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es cubrir la aparente necesidad de un mecanismo que permita representar a un experto dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje en un entorno simulado, en particular de aquel que utiliza simuladores hápticos. Para ello el trabajo propone un modelo que represente el conocimiento del experto y que, en términos prácticos, pueda ser formalizado como un framework integrable dentro de cualquier tipo de simulador háptico. Inicialmente, tanto el modelo como el framework deben estar diseñados para su aplicación en simuladores del ámbito de la cirugía, pero

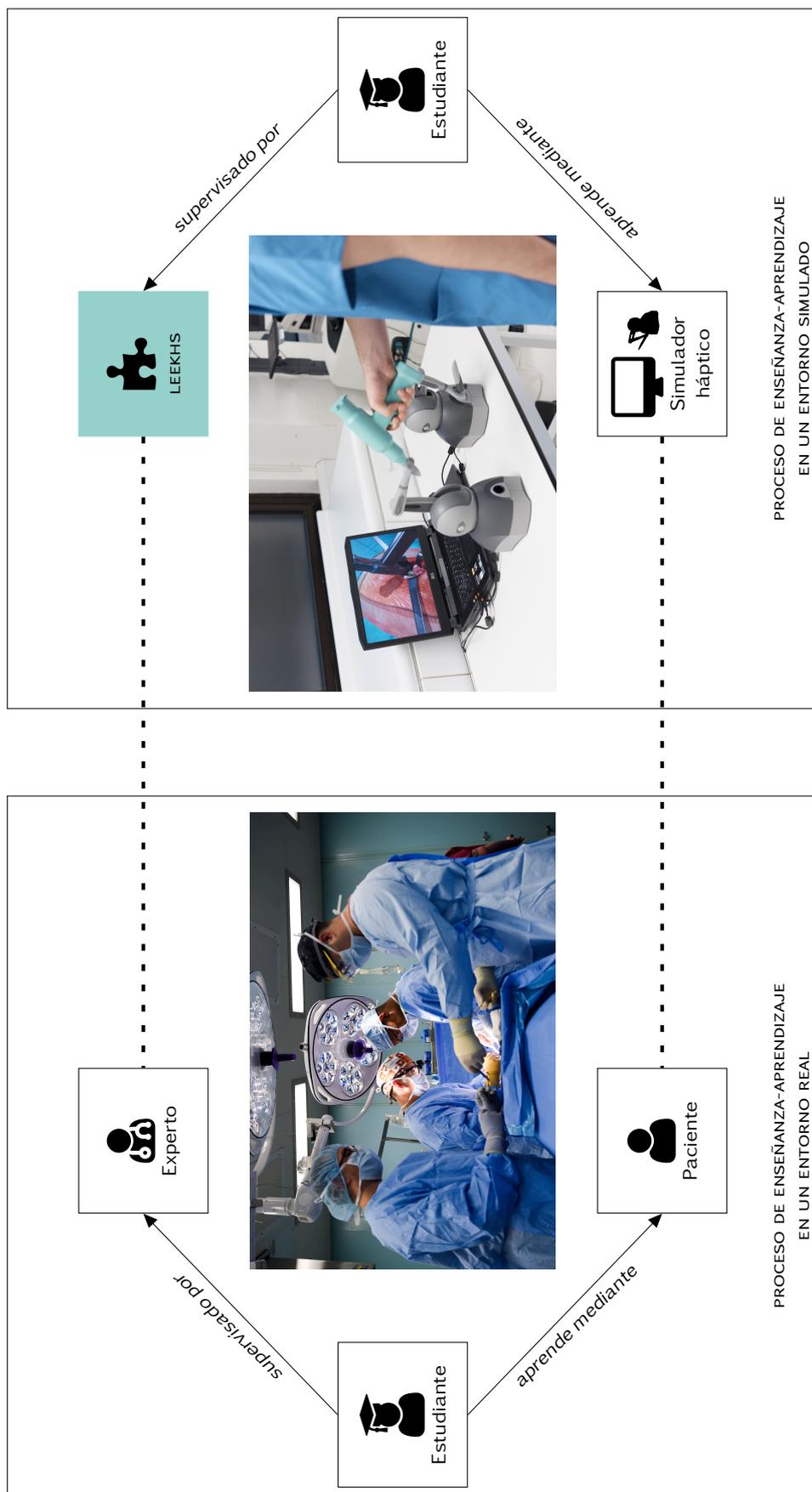


Figura 1.1 – Contribución de la tesis al proceso de enseñanza-aprendizaje de conocimiento experto. LEEKHS es la formalización de una propuesta de modelo para emular, en un entorno simulado, las funciones desempeñadas por un experto en un entorno real. Imagen izquierda: “Sailors perform surgery on a patient in an operating room aboard the ship”, por Official U.S. Navy Imagery, bajo licencia CC BY 2.0. Imagen derecha: reproducida con permiso de FundamentalVR Ltd., 2020

dada la naturaleza del conocimiento experto también deben poder ser generalizados a otras disciplinas.

Para lograr todo lo anterior, el trabajo plantea una serie de objetivos específicos a alcanzar:

1. Definir aquellas características necesarias para representar tanto la transferencia del conocimiento experto como su adquisición a través de simuladores hápticos.
2. Identificar una metodología para crear un modelo del conocimiento experto a partir de los requisitos identificados en el punto anterior.
3. Crear el modelo de conocimiento experto aplicando dicha metodología.
4. Formalizar ese modelo en términos de un lenguaje de modelado de sistemas software para obtener un framework capaz de integrarse en cualquier tipo de simulador háptico.
5. Validar dicho framework (y por ende el modelo), realizando una evaluación preliminar sobre su aceptación por parte de un público especializado.

1.4. Estructura y metodología del trabajo de investigación

El resto del trabajo de investigación está estructurado de la siguiente manera. El Capítulo 2 explica el contexto de los elementos que describen la esencia de todo el trabajo. En particular aclara que se entiende por conocimiento experto, como abordar el problema de su transferencia y adquisición y que es la simulación háptica.

El Capítulo 3 describe una revisión de la literatura académica relativa a metodologías utilizadas para modelar el conocimiento experto en el ámbito de la cirugía. De entre las identificadas, concretamente se analiza de manera sistemática una de ellas denominada *Surgical Process Modelling* (SPMOD). Dado que esta metodología está pensada para sistemas de cirugía asistida, el capítulo también estudia a mayores como adaptarla al caso particular de los simuladores hápticos.

El Capítulo 4 propone un modelo para representar el conocimiento experto con el objetivo de ser transferible mediante simuladores hápticos. La propuesta está definida siguiendo la metodología SPMOD adaptada del capítulo anterior; detallando tanto las características estáticas del modelo (elementos que lo componen, su forma de obtenerlos y representarlos formalmente) como las dinámicas (procesos de enseñanza-aprendizaje en los que poder aplicarlo).

El Capítulo 5 describe el framework *LEarning Expert Knowledge by Haptic Simulation* (LEEKHS). La descripción utiliza el lenguaje UML con el objetivo de detallar toda la arquitectura software necesaria para reflejar formalmente las características estáticas del modelo de conocimiento experto propuesto en el capítulo anterior.

El Capítulo 6 presenta un experimento piloto llevado a cabo para evaluar la aceptación de LEEKHS por parte de un conjunto de expertos docentes. Para ello muestra el diseño del experimento, informa sobre los resultados obtenidos tras su realización y finalmente los analiza de cara a determinar cual fue el grado de aceptación del framework.

Por último, el Capítulo 7 resume las principales aportaciones de los anteriores capítulos, presenta las aportaciones científicas y académicas fruto de este trabajo y también muestra los trabajos futuros y comenta una prometedora línea de investigación.

Capítulo 2

Estudio del problema

El conocimiento experto es algo difícil de articular con palabras. En el contexto de la educación médica dicho conocimiento está atribuido a unas competencias adquiridas con la experiencia y fundamentadas en hechos, destrezas y actitudes. Sin embargo, su aparente complejidad hace que tanto su transferencia como adquisición no sean tareas triviales. Este capítulo analiza en primer lugar la literatura académica de varias disciplinas para definir cuales son los aspectos que definen a un individuo como un experto, luego estudia su papel en los procesos de enseñanza y aprendizaje en cirugía para conocer como se transfiere y adquiere su conocimiento, y finalmente justifica porque la simulación háptica ha sido—en dicho ámbito—, la herramienta educativa apropiada para llevarlos a cabo.

2.1. Introducción

Desde la antigüedad la epistemología ha intentado explicar la noción de conocimiento pero incluso en la actualidad muchas disciplinas continúan abordando este tema. Un ejemplo de ello está en la gestión del conocimiento que, en términos de Alavi y Leidner (2001), es el estudio de como codificar, almacenar y transferir el conocimiento dentro de una empresa. En esta disciplina, al igual que en muchas otras, existen diferentes definiciones de conocimiento. Probablemente una de las más utilizadas sea la atribuida al filósofo Polanyi (1966), quien propone el conocimiento como la unión de dos partes. Por un lado está la tácita, que es aquella parte del conocimiento que no puede ser expresada directamente; y por el otro está la explícita, que es aquella parte generalizada que sí puede ser articulada a través de palabras o números. Dicho de otra manera, mientras que el conocimiento tácito es aquel adquirido a través de vivencias o experiencias en un contexto determinado, el conocimiento explícito es aquel obtenido a través de medios escritos como por ejemplo los libros (Nonaka, 1994).

2.1.1. Conocimiento basado en la experiencia

Pero si bien las definiciones de conocimiento tácito y explícito son correctas, en la práctica no tienen la misma importancia. Por ejemplo, muchos contextos profesionales dan más importancia al conocimiento tácito que al explícito por aquello de que al ser personal es más difícil de transmitir. Precisamente Nonaka analiza este aspecto del conocimiento tácito y lo atribuye a dos elementos. Primero está la parte cognitiva centrada en los “modelos mentales”, y luego la técnica basada en el *know-how* o “saber hacer”. Dicho de otro modo, la parte cognitiva representa la perspectiva con la que un individuo percibe y define el mundo que le rodea. Análogamente, la parte técnica representa lo que H. L. Dreyfus, S. E. Dreyfus y Athanasiou (1986, pp. 29) dicen sobre el “saber hacer”: “tener una capacidad o habilidad y utilizarla para desempeñar tareas en un determinado contexto”.

Así, por ejemplo, la parte cognitiva está presente cuando un cirujano sabe adaptarse ante una situación imprevista durante una operación, mientras que la parte técnica se manifiesta cuando el cirujano tiene la destreza necesaria para utilizar los instrumentos quirúrgicos. Dicho lo anterior, esta perspectiva del conocimiento tácito no es exclusiva de la gestión del conocimiento sino que se asemeja a algunas ideas estudiadas en otras disciplinas.

Un ejemplo de ello está en los sistemas expertos, disciplina que Giarratano y Riley (1998) definen como una rama de la inteligencia artificial que emula mediante software el conocimiento y comportamiento de un experto en un dominio. En este ámbito, la dicotomía cognitiva-técnica de Nonaka se asemeja a la idea del *expertise* o pericia de un individuo. Específicamente es similar a las “heurísticas” de Feigenbaum y McCorduck (1983); quienes las definen bien como conocimiento empírico y crítico, o bien como aquellas reglas propias—modelos mentales—, que se aplican para intentar resolver problemas—saber hacer. De ahí se puede deducir que la pericia es una habilidad adquirida con la experiencia. Esto parece algo obvio pues, por norma general, un médico residente no opera de la misma manera que un cirujano veterano. Pero, ¿cómo se podrían explicar tales diferencias?

Al igual que sucede con el conocimiento la pericia es un tema estudiado en diversas disciplinas (Farrington-Darby y Wilson, 2006). Por un lado, algunos autores de los sistemas expertos como H. L. Dreyfus, S. E. Dreyfus y Athanasiou (1986) y Hoffman *et al.* (1995) proponen unos modelos para describir la pericia según el nivel de experiencia de un individuo (ver Figura 2.1). En ambas propuestas un nivel bajo representa a alguien con nula o poca experiencia y un nivel alto a alguien competente y experimentado. Por otro lado, la pericia también se estudia desde el punto de vista de la psicología. Así, autores como Chi, Glaser y Farr (1988) y Bransford *et al.* (2003) identifican una serie de características para diferenciar a un experto—alguien que tiene pericia—, de un novato—alguien que carece de ella. Estas características se podrían resumir en que los expertos:

- Destacan en un dominio específico porque lo comprenden de forma completa.
- Tienen un conocimiento contextualizado que no se puede reducir a simples hechos o ideas aisladas.
- Pueden ver y representar los problemas de una manera profunda, ya que observan ciertas características y patrones significativos de información relativos a su dominio.
- Resuelven problemas o desempeñan tareas de forma rápida y con poco margen de error debido a que analizan las situaciones de forma cualitativa.
- Abordan las nuevas situaciones de una forma flexible intentando siempre aplicar y mejorar su pericia.
- Su pleno conocimiento en un dominio no garantiza su capacidad para enseñar a otros individuos.

2.2. La enseñanza y el aprendizaje en medicina

En cirugía, al igual que en cualquier disciplina, la transferencia y adquisición de conocimientos se rigen por unos procesos de enseñanza y aprendizaje que definen el flujo de información entre expertos y estudiantes. Así pues, para comprender el rol de un experto y el alcance de su conocimiento desde un punto de vista educativo es necesario analizar tales procesos por separado.

2.2.1. El proceso de aprendizaje

La clave para adquirir conocimiento tácito está en la experiencia (Nonaka, 1994; Kolb, 2015). De hecho, para Nonaka este se asimila a través de la experiencia con el “aprender

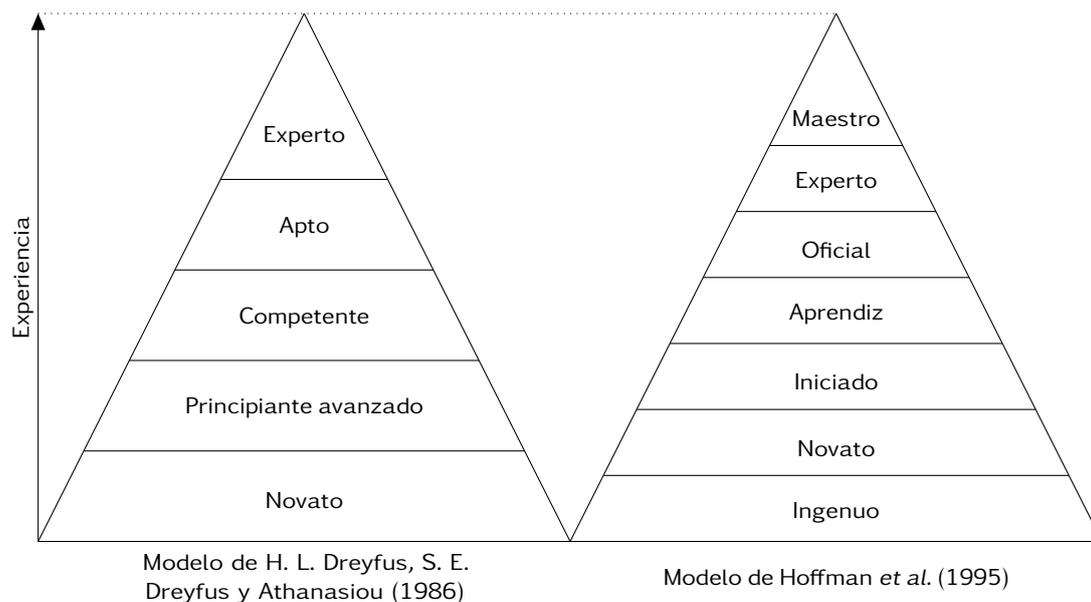


Figura 2.1 – Modelos para clasificar por niveles la pericia de un individuo según su grado de experiencia: a la izquierda el de H. L. Dreyfus, S. E. Dreyfus y Athanasiou (1986) y a la derecha el de Hoffman *et al.* (1995). En ambos casos, la pertenencia de un individuo a un determinado nivel depende principalmente del grado de experiencia acumulado hasta el momento

haciendo”, es decir, de una forma pragmática. Pero está claro que no todo el conocimiento es adquirido de la misma manera; no es lo mismo resolver una ecuación diferencial que realizar una sutura. Determinar las condiciones apropiadas para adquirir conocimiento es la esencia de la disciplina del diseño instruccional que, en palabras de Gagné *et al.* (2004), consiste en seleccionar, planificar y desarrollar aquellas tareas que mejor faciliten el aprendizaje. Así pues, como dice Driscoll (1994, pp. 348): “los teóricos del campo del diseño instruccional encuentran útil diferenciar las aptitudes que un ser humano puede adquirir”. En otras palabras, las aptitudes forman parte del conocimiento de un individuo, y para adquirir este último, primero es necesario establecer ciertos objetivos o resultados del aprendizaje.

En este ámbito, varias propuestas han abordado el citado problema. Quizás la más relevante sea la de Bloom (1956), que fue el primer autor en describir el concepto de educación basada en aptitudes. Específicamente, Bloom dividió estas en tres dominios: cognitivo, psicomotor y afectivo (ver Figura 2.2). El primero hace referencia al intelecto, es decir, a las habilidades mentales encargadas de asimilar y transformar la información. El segundo representa las destrezas físicas o manuales que permiten llevar a cabo tareas. El tercero se corresponde con los sentimientos y emociones que influyen a la hora de tomar decisiones.

En lo referente a la educación médica, Epstein y Hundert (2002) interpreta el conocimiento de una forma análoga a Bloom; como un conjunto de competencias basadas en un conocimiento científico, unas destrezas técnicas básicas y un desarrollo moral. Es más, cabe señalar que en dicho contexto es frecuente utilizar la clasificación de aptitudes de Bloom para establecer aquellos resultados esperados del aprendizaje (Kneebone, 2003). Para Kneebone, las aptitudes cognitivas se adquieren a partir de fuentes de información como libros, clases, software especializado o recursos web. Las psicomotoras se desarrollan

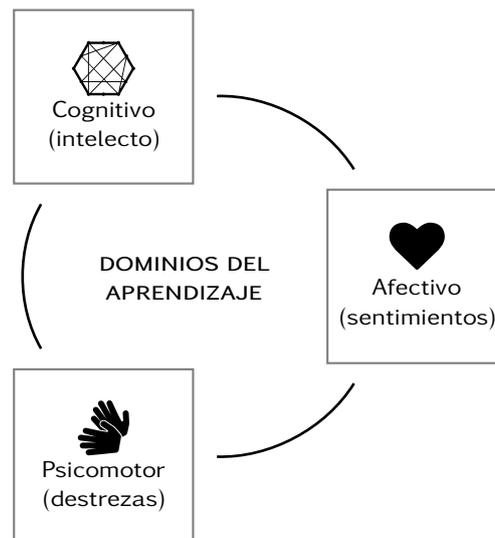


Figura 2.2 – Dominios del aprendizaje propuestos por Bloom (1956) para clasificar los objetivos educativos según las aptitudes que se pretenden adquirir

a través de la práctica; entendiendo esta como la repetición de una acción concreta (Gagné, 1972; Fitts y Posner, 1967). Por último, las afectivas se aprenden combinando las anteriores a la hora de tratar a un paciente.

De estas tres aptitudes, las psicomotoras son quizás las más importantes para un cirujano porque son realmente las que permiten ejercer la profesión (Reznick, 1993; Kovacs, 1997). De hecho, entre los resultados del aprendizaje de un cirujano debería figurar el adquirir un conjunto de destrezas motoras tales como suturar, cortar, hacer nudos, etc (R. Satava, Cuschieri y Hamdorf, 2003). No obstante, el aprendizaje de una destreza motora también implica la adquisición implícita de habilidades intelectuales (conocer criterios y reglas) y de estrategias cognitivas (tener habilidades para controlar el comportamiento) (Driscoll, 1994). Por ejemplo, al realizar una operación de cataratas, el cirujano necesita saber cómo utilizar el instrumental quirúrgico—destreza motora—, pero también cuáles son las características de la catarata a tratar—habilidades intelectuales—, y cuál es la mejor manera de retirarla con los medios disponibles—estrategias cognitivas. Por otra parte, si bien conocer hechos o conceptos y regirse por los sentimientos son resultados a tener en cuenta para un cirujano, se podría considerar que ambos tienen un carácter secundario con respecto a las destrezas motoras.

La práctica deliberada

En cuanto al aprendizaje de aptitudes psicomotoras, Fitts y Posner (1967) proponen una teoría para explicar su desarrollo. La teoría, reconocida tanto en la literatura de las destrezas motoras como en la médica (Reznick y Macrae, 2006), parte de la siguiente hipótesis: cualquier acción motora se desarrolla progresivamente a través de un proceso dividido en tres etapas (ver Figura 2.3). En dicho proceso, el aprendizaje comienza observando a otros individuos a fin de identificar un patrón de movimiento y llega hasta su propia adquisición, cuando se consigue realizar el movimiento de forma autónoma y precisa. Con el propósito de lograr este objetivo, el proceso gira entorno a la práctica, que en combinación con el *feedback* informativo de un experto, refinan progresivamente la mecánica del movimiento. En realidad, este proceso constante en el tiempo, con unos objetivos determinados y supervisado por un experto, es lo que a grandes rasgos Ericsson,

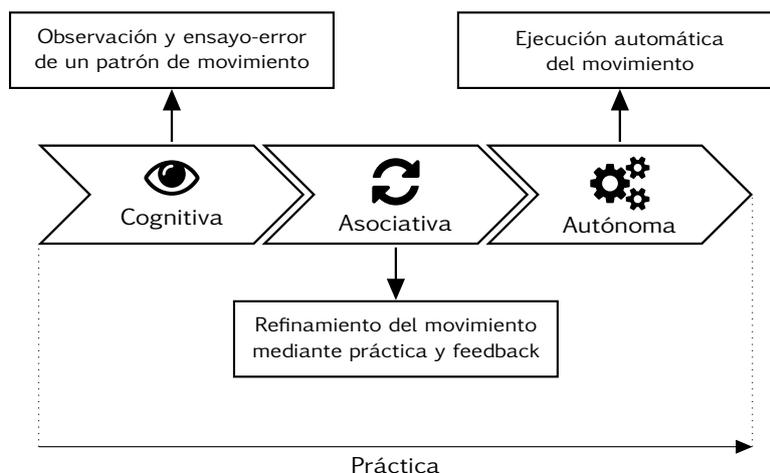


Figura 2.3 – Modelo de tres etapas de Fitts y Posner (1967) para explicar la adquisición de destrezas motoras mediante la práctica

Krampe y Tesch-Römer (1993) denominan como “práctica deliberada”.

Para Ericsson (2004), Reznick y Macrae (2006) y McGaghie, Issenberg, Petrusa *et al.* (2010), la práctica deliberada es un elemento crucial en el campo de la educación médica. Esta no solo permite la adquisición de competencias y de pericia, sino que también implica una mejora constante de ambas con el paso del tiempo. Además, McGaghie, Issenberg, Petrusa *et al.* (2010) señalan que para alcanzar estos objetivos educativos la práctica deliberada debe cumplir nueve requisitos. Sin embargo, estos se pueden resumir en cuatro:

1. Estudiantes altamente motivados y con capacidad de concentración.
2. Tarea u objetivo de aprendizaje claramente definido, con un nivel de dificultad adecuado para cada estudiante, ejecutable de forma voluntaria, repetible en el tiempo y con capacidad para ser evaluada mediante métricas rigurosas y precisas.
3. Metodología de evaluación que certifique un determinado nivel de pericia.
4. Agente experto que supervise el desempeño de los estudiantes y les ofrezca feedback informativo y correctivo.

2.2.2. El proceso de enseñanza

Entre las características que describen a un experto está la de que su conocimiento no garantiza su diseminación. Si se aplica esto al conocimiento basado en la experiencia, existe la necesidad de identificar una metodología de enseñanza apropiada basada en la práctica deliberada. Considerando que el conocimiento de un experto está asociado a un único dominio, y que este se adquiere de forma pragmática, una opción es recurrir a la clásica metodología de enseñanza y aprendizaje de oficios comúnmente denominada como “del aprendiz” (en inglés *apprenticeship*).

A pesar de que su interpretación varía histórica y culturalmente, lo cierto es que en el campo de la educación esta metodología se asocia generalmente con la formación de un aprendiz dentro de un determinado gremio u organización profesional (Lave y Wenger, 1991; Ainley y Rainbird, 1999). Incluso en la educación médica, autores como Gorman, Meier y Krummel (1999), Reznick y Macrae (2006) y Reiley *et al.* (2011), afirman que el sistema de residencias médicas actual está basado en un trabajo de Halsted (1904); que

data de principios del siglo xx y propone adaptar una variante de dicha metodología a la cirugía. La idea detrás de la metodología del aprendiz se resume en un lema atribuido al propio Halsted: “ver, hacer, enseñar” (del inglés *see one, do one, teach one*). En otras palabras, se basa en observar e imitar a un experto de forma análoga a la teoría de Fitts y Posner (1967). De este modo, y parafraseando a Collins, Brown y Holum (1991), la formación tradicional de un aprendiz consiste en que un experto demuestra como realizar una tarea, para luego supervisar y ayudar al primero mientras practica reiteradamente las diferentes partes que componen dicha tarea. Durante la práctica, el experto sustituye gradualmente su feedback por determinadas responsabilidades dentro de la tarea. Así, el proceso de enseñanza-aprendizaje finaliza cuando el experto considera que el aprendiz está capacitado para desempeñar la mencionada tarea de forma independiente.

Por otro lado, cabe señalar que para algunos teóricos de la psicología como Collins, Brown y Holum; Pratt, esta metodología se relaciona con lo que Lave y Wenger (1991) entienden como aprendizaje situado. Es decir, aquel aprendizaje que tiene lugar dentro de un contexto práctico o de aplicación real. Esto significa que la metodología del aprendiz se utiliza tanto en situaciones previas como en posteriores a la incorporación de un individuo a un entorno real. Por ejemplo, antes de graduarse como médico, un estudiante debe cursar un plan formativo de prácticas en laboratorio donde observa y practica bajo la tutela de varios docentes. Del mismo modo, y para especializarse, el estudiante pasa a ser un residente y debe completar otro plan formativo de prácticas reales, aunque esta vez en un hospital y bajo la supervisión de cirujanos que ejercen profesionalmente. Sin embargo, esta metodología dista de ser perfecta, ya que puede presentar ciertos inconvenientes a la hora de utilizarse (Pratt, 1998):

- Articular el conocimiento experto para definir una tarea puede resultar complicado debido a su naturaleza tácita.
- En ocasiones, replicar las condiciones de un entorno de trabajo real dentro de una tarea formativa puede ser difícil por la aparición de problemas de tipo logístico, económico o ético.
- Como el experto tiene un rol autoritario durante todo el proceso, la evaluación de un aprendiz puede ser subjetiva y, en algunos casos, englobar todo el procedimiento sin tener en cuenta la relevancia de algunas partes del mismo.
- Como el experto enseña a todos los estudiantes por igual, el nivel de dificultad de una tarea puede no corresponderse con las capacidades de algún aprendiz.

La simulación como respuesta

En el caso de la educación médica, Kneebone (2003), Liu *et al.* (2003), Kunkler (2006) y Dunkin *et al.* (2007), presentan la simulación como una herramienta auxiliar para paliar algunos de los problemas identificados por Pratt (1998). En este contexto, la simulación se entiende en el sentido de Gorman, Meier y Krummel (1999, pp. 1204): “acto de suponer las cualidades o apariencia externa de un objeto, proceso o conjunto de procesos”. Conforme a ello, la simulación está caracterizada principalmente por involucrar a unos participantes con un rol determinado, y también por realizar una actividad con la suficiente cantidad de información o recursos como para que los participantes puedan desempeñar unas determinadas tareas o funciones (Jones, 2013). Por ejemplo, en medicina los participantes son estudiantes, docentes o profesionales, y las actividades pueden variar desde un diagnóstico patológico hasta una neurocirugía. Además, los recursos utilizados en tales actividades se manifiestan, entre otras opciones, a través de maniqués, sistemas informáticos o incluso entornos que combinan ambos (Kneebone, 2003; Bradley, 2006; Kunkler, 2006; Reznick y Macrae, 2006; Palter y Grantcharov, 2010). Otras características a destacar de la simula-

ción (derivadas de su naturaleza) son la oportunidad de practicar en un entorno seguro y la posibilidad de ser evaluado y de recibir feedback informativo (Kneebone, 2003; Ziv *et al.*, 2003; Bradley, 2006; Tavakol, Mohagheghi y Dennick, 2008; McGaghie, Issenberg, Petrusa *et al.*, 2010; Cook *et al.*, 2013; Jones, 2013). Esto es, los estudiantes pueden experimentar las consecuencias de un fallo sin poner en peligro a alguien (o algo) y también pueden ser evaluados y corregidos; bien a través de un observador externo que utilice alguna rúbrica o bien a través de algún tipo de tecnología que registre su desempeño en detalle.

2.3. Simuladores en la educación médica

Desde un punto de vista anatómico, los animales y los cadáveres humanos han sido tradicionalmente los modelos de simulación escogidos para la educación médica. Sin embargo, su uso es costoso (tanto logística como económicamente) y acarrea cuestiones éticas (Ziv *et al.*, 2003; Reznick y Macrae, 2006; Palter y Grantcharov, 2010). Por otro lado, el desarrollo de la tecnología y su consecuente abaratamiento con el paso del tiempo han provocado el surgimiento de modelos alternativos que mitigan tales problemas. De hecho, varios autores de la simulación médica clasifican estos modelos en función del tipo de tecnología con el que están contruidos (Kneebone, 2003; Maran y Glavin, 2003; Bradley, 2006; Reznick y Macrae, 2006; Palter y Grantcharov, 2010).

De entre estas taxonomías, la más completa y concisa quizás sea la de Bradley, quien divide los simuladores en cuatro categorías (ver Figura 2.4). Primero están los simuladores de entrenamiento básico (en inglés *task trainers*), que utilizan una parte específica de un maniquí (piel, extremidad, torso, etc) para realizar una tarea específica con la que adquirir una habilidad o unas destrezas técnicas concretas. Luego están los simuladores basados en sistemas informáticos, cuyo uso va desde ser un material auxiliar de los métodos formales de enseñanza-aprendizaje, hasta ser una réplica virtual e interactiva de un procedimiento médico completo. Otra categoría son los pacientes y los entornos estandarizados, los primeros utilizan actores reales para fomentar el aprendizaje de habilidades comunicativas y también para evaluar el desempeño de los estudiantes, y los segundos replican lugares físicos (consulta médica, quirófano, sala de urgencias, etc) para desarrollar el trabajo en equipo. Por último están los simuladores integrados, que combinan maniquíes de cuerpo completo con algún sistema de control por ordenador para replicar fielmente cualquier tipo de parámetro fisiológico y así responder ante la interacción humana.

Ahora bien, sabiendo que hay evidencias en la literatura científica que demuestran que la educación basada en simulación es una alternativa efectiva a la formación tradicional en medicina (McGaghie, Issenberg, Cohen *et al.*, 2011), ¿hay algún tipo de simulador que destaque sobre los demás como herramienta de aprendizaje? Para Kneebone (2003) y Liu *et al.* (2003), ese tipo son los simuladores basados en sistemas informáticos—ya sean por sí solos o integrados en otros—, sobre todo en el ámbito de la cirugía. Autores como Gorman, Meier y Krummel (1999), Liu *et al.* (2003), Riva (2003) y Anthony G. Gallagher y E. Matthew Ritter (2007), presentan en sus trabajos una diversidad de aplicaciones formativas para este tipo de simuladores siendo la más común el desarrollo de destrezas psicomotoras o técnicas. Además, según Liu *et al.* (2003), Reznick y Macrae (2006) y Palter y Grantcharov (2010), los simuladores basados en sistemas informáticos aportan una serie de ventajas frente al resto de modalidades:

- No necesitan de un laboratorio ni un mantenimiento especiales, por lo que pueden montarse y configurarse para reproducir diferentes escenarios en un tiempo mínimo.
- Registran automáticamente los datos relacionados con el desempeño de un usuario.



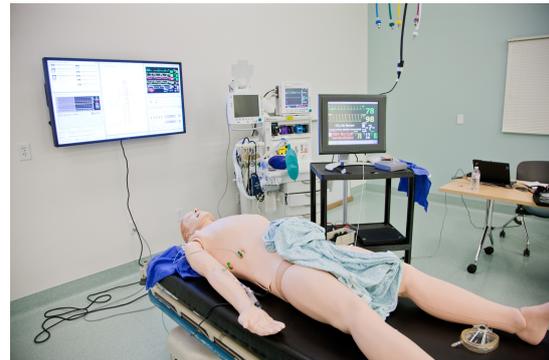
I. Entrenamiento básico



II. Basados en sistemas informáticos



III. Pacientes y entornos estandarizados



IV. Simuladores integrados

Figura 2.4 – Taxonomía de simuladores médicos propuesta por Bradley (2006). Imagen I: “Learning to suture”, por AllieKF, bajo licencia CC BY-NC-SA 2.0. Imagen II: reproducida con permiso de FundamentalVR Ltd., 2020. Imagen III: “College of DuPage Simulation Center 8”, por COD Newsroom, bajo licencia CC BY 2.0. Imagen IV: “IMG_4384”, por Stanford EdTech, bajo licencia CC BY-NC-ND 2.0

- No requieren la presencia de un experto para evaluar el desempeño de un usuario.

2.3.1. Simulación háptica

En la literatura de la simulación médica se intercambian frecuentemente los términos “simulación basada en sistemas informáticos” por “realidad virtual” o incluso “simulación virtual” (Anthony G. Gallagher y E. Matthew Ritter, 2007). En este contexto, se entiende por realidad virtual la definición proporcionada por Riva (2003). Es decir, como una interfaz de comunicación basada en la visualización de imágenes—bi o tridimensionales—, que permite experimentar un entorno realista mediante tecnología hardware y software. En consecuencia, un simulador virtual modela un paciente o un órgano tanto en apariencia visual como en propiedades físicas y mecánicas. Además, permite la ejecución y evaluación de tareas derivadas de su interacción tales como palpar, cortar o manipular tejidos (Richard M. Satava, 2001; Liu *et al.*, 2003). Por otra parte, los simuladores virtuales modernos combinan principalmente tecnología visual con háptica: la primera para replicar entornos u objetos mediante imágenes por ordenador, y la segunda para replicar el sentido del tacto (Liu *et al.*, 2003; Bradley, 2006; Coles, Meglan y John, 2011). Dicho esto, cabe señalar que aquellos simuladores virtuales que hacen uso de tecnología háptica se denominan comúnmente como *simuladores hápticos*, y resultan de especial relevancia para la educación

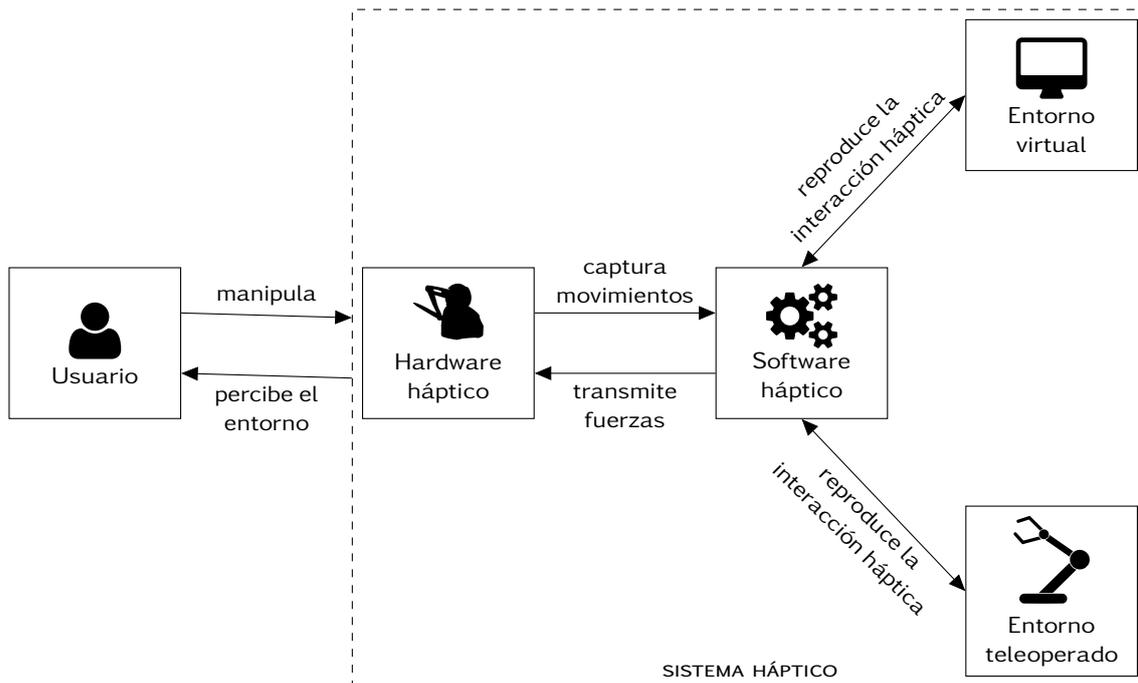


Figura 2.5 – Retroalimentación de un sistema háptico. El hardware es el encargado de capturar la información háptica del usuario (movimiento) para que el software, en función del entorno que esté simulando (virtual o teleoperado), reproduzca dicha información y procese una respuesta apropiada (fuerza) para transmitírsela al usuario y así poder percibir dicho entorno mediante el tacto

médica.

Con respecto al término “háptico”, Srinivasan y Basdogan (1997) y El Saddik (2007) lo definen como aquella interacción realizada por un humano o una máquina mediante el tacto con el propósito de percibir o manipular un entorno o un objeto (ya sean estos reales o virtuales). Así mismo, en el estudio de la “háptica” como disciplina científica, se suele considerar que el sentido del tacto tiene un componente cutáneo y otro cinestésico (Lederman y Klatzky, 1987; Massie y Salisbury, 1994; Srinivasan y Basdogan, 1997; Burdea, 1999). Por un lado, el primero representa aquella información percibida de forma pasiva por el contacto directo con la piel—como puede ser la geometría, textura o temperatura de un objeto. Por otro lado, el segundo representa la información percibida de forma activa al combinar las fuerzas físicas aplicadas sobre la piel con la propiocepción del individuo—como puede ser el peso, la dureza o la inercia al manipular un objeto. En consonancia con lo anterior, la tecnología háptica engloba todo aquel hardware y software encargado de retroalimentar—capturar y transmitir—, la información asociada a la interacción manual (también llamada “háptica”) entre un individuo y una máquina; que principalmente se resumen en movimientos y fuerzas (ver Figura 2.5).

En lo referente al hardware háptico, hay diversas formas de clasificarlo; aunque la más común es hacerlo según el tipo de información que retroalimenta (Srinivasan y Basdogan, 1997; Burdea, 1999; Hayward *et al.*, 2004; Coles, Meglan y John, 2011). En el caso de la información cutánea se dice que los dispositivos reproducen un feedback táctil, y suelen tener una pieza en forma de panel que al entrar en contacto directo con el individuo estimula su piel mediante aire, vibraciones o impulsos eléctricos. En el caso de la infor-

mación cinestésica se dice que los dispositivos poseen un feedback háptico o de fuerza, y tienen una pieza con forma de instrumento—generalmente un lápiz o un pomo—, a través del cual se transmiten fuerzas o pares de fuerzas opuestas al movimiento del individuo. También hay un tercer caso, los dispositivos híbridos, que integran ambos tipos de feedback.

A su vez, cabe resaltar que el uso de un determinado tipo de dispositivo háptico condiciona el ámbito de aplicación de un simulador háptico (Coles, Meglan y John, 2011). Así pues, en la educación médica la presencia de tecnología háptica se da principalmente en el ámbito de la cirugía, probablemente por la semejanza entre el instrumental médico y los dispositivos con feedback de fuerza. Sirvan de ejemplos algunas de las evidencias presentadas por El Saddik (2007) y Coles, Meglan y John (2011) en sus trabajos: palpar tumores, realizar punciones o llevar a cabo procedimientos de cirugías de mínima invasión.

2.3.2. La evaluación de las destrezas técnicas

En el ámbito de la educación médica, y por consiguiente en el de la cirugía, la finalidad de un simulador virtual es la de desarrollar las competencias necesarias para poder llevar a cabo una tarea o procedimiento quirúrgico de forma satisfactoria (Liu *et al.*, 2003). Parafraseando a Liu *et al.* y a Kneebone (2003), para verificar que una tarea funciona es necesario determinar una metodología capaz de evaluar el grado de cumplimiento de sus objetivos de aprendizaje. Hasta hace un par de décadas, las metodologías para evaluar la adquisición de destrezas técnicas se limitaban al uso de instrumentos tipo pruebas escritas u orales, libros de registros o la simple observación del desempeño sin aplicar ningún tipo de criterio (Moorthy *et al.*, 2003). Pero la inherente subjetividad unida a la escasa validez y fiabilidad de este tipo de técnicas ha provocado el desarrollo de alternativas objetivas e imparciales.

El uso de metodologías objetivas es un tema presente en la literatura de la simulación médica (Moorthy *et al.*, 2003; Tavakol, Mohagheghi y Dennick, 2008; van Hove *et al.*, 2010; Reiley *et al.*, 2011). Dicha objetividad se atribuye al uso de diferentes instrumentos de evaluación: desde criterios como *checklists* específicas o escalas de calificación global, hasta parámetros relativos al movimiento de las manos. Generalmente, los criterios se utilizan en metodologías basadas en observar el desempeño de un individuo (en vivo o en vídeo); pero su aplicación implica cierto grado de subjetividad al requerir la presencia de expertos evaluadores. Por otra parte, los parámetros relativos al movimiento de las manos se utilizan en metodologías “no observables”, cuya finalidad es eliminar la subjetividad a través de un análisis estadístico del movimiento; utilizando para ello sistemas que capturan, modelan y evalúan este de forma automática.

En cuanto a las metodologías de evaluación basadas en el “análisis de destrezas”, Reiley *et al.* (2011) distinguen dos: las que usan estadística descriptiva y las que usan modelos del lenguaje estadístico. La primera sirve para obtener indicios sobre determinados aspectos del desempeño durante una tarea específica, y la segunda permite entender en profundidad todos los componentes subyacentes al desempeño en función del nivel de detalle requerido (procedimiento, tarea o incluso acciones llevadas a cabo por un cirujano). La principal diferencia entre ambas metodologías es que la estadística descriptiva no es aplicable a la evaluación de destrezas en tiempo real, mientras que los modelos del lenguaje sí. Esto se debe a la propia naturaleza de la estadística descriptiva, ya que para calcular estimaciones se necesita que los datos estén previamente grabados; en contraposición con los modelos del lenguaje que permiten representar los componentes del desempeño en cualquier instante de tiempo.

Pero a pesar de que los modelos del lenguaje estadístico son superiores en términos de conseguir una metodología de evaluación objetiva, la estadística descriptiva está

consolidada en la literatura académica y su efectividad ha sido demostrada en simuladores virtuales con un bajo nivel de fidelidad y cuyo objetivo es el aprendizaje (Moorthy *et al.*, 2003; Tavakol, Mohagheghi y Dennick, 2008; van Hove *et al.*, 2010; Reiley *et al.*, 2011). Como afirman Reiley *et al.*, esta metodología se caracteriza por requerir menos recursos que la observación directa y por presentar los resultados de la evaluación de forma rápida. Particularmente, los únicos recursos necesarios para un simulador virtual son un ordenador y algún tipo de hardware para capturar el movimiento como por ejemplo las interfaces hápticas.

Así pues, los simuladores virtuales utilizan como instrumento de evaluación los datos de salida generados por un ordenador; comúnmente denominados como métricas (Moorthy *et al.*, 2003). Existen diversas fuentes para calcular métricas: movimientos, fuerzas, tiempo, errores, etc (van Hove *et al.*, 2010; Reiley *et al.*, 2011; Schmitz *et al.*, 2014). No obstante, el trabajo de Schmitz *et al.* analiza la literatura académica y propone una taxonomía de métricas. En dicha clasificación los autores destacan que, para el caso particular de los simuladores virtuales, se utilizan cuatro categorías de métricas (ver Tabla 2.1):

1. *Tiempo*. Describe aspectos relacionados con el desempeño durante un período de tiempo. Entre los objetivos de este tipo de métricas están: (1) que el individuo consiga cierto grado de automaticidad con respecto a alguna destreza técnica o algún procedimiento quirúrgico; (2) bien entender el proceso mental que conlleva aplicar una destreza técnica o bien entender que componentes tiene un procedimiento; y (3) cumplir con ciertas normas de seguridad del paciente durante una ventana de tiempo dada. Así pues, sirvan como ejemplos de este tipo de métricas el tiempo total en completar un procedimiento quirúrgico, el porcentaje de tiempo empleado al trabajar sobre un elemento anatómico concreto o el completar un objetivo dentro de un límite de tiempo específico.
2. *Técnicas manuales*. Describe aspectos relativos a las destrezas que permiten realizar acciones con las manos. Este tipo de métricas sirven para evaluar: (1) la adquisición de una determinada destreza manual; (2) la propiocepción sobre una de esas destrezas manuales; (3) la eficiencia en los movimientos; o (4) la adopción de buenas prácticas, de aptitudes cognitivas o de comportamiento que un experto considere necesarias. Así pues, ejemplos de métricas de técnicas manuales son la trayectoria que se sigue con un instrumento quirúrgico al realizar una determinada acción sobre un elemento anatómico, el posicionamiento o movimiento del propio instrumento quirúrgico durante un paso o el ejercer algún tipo de sensación háptica con la herramienta (tipo fuerza o presión).
3. *Errores*. Describe aspectos que se han realizado de forma equivocada durante el desempeño. Esta categoría mide: (1) la ausencia de una destreza manual o de su propiocepción; (2) la carencia de un juicio o conocimiento cognitivo; o (3) la presencia de un fallo crítico de seguridad cometido sobre el paciente. Algunos ejemplos de métricas de esta categoría son la cantidad de movimientos o decisiones erróneas, la selección de un instrumento quirúrgico inadecuado para una actividad, el tiempo en recuperarse de un error, o los propios errores clínicos (hacer sangrar al paciente, desgarrar un tejido, perforar un órgano, etc).
4. *Pasos procedurales*. Describe aspectos relacionados con la consistencia e integridad a la hora de desempeñar una parte concreta de una tarea o procedimiento quirúrgico. Esta categoría sirve para medir tanto la retención de un patrón de comportamiento ante un evento como la capacidad para integrar y ejecutar una serie de objetivos. El ejemplo más representativo de métrica es utilizar una lista de verificación compuesta

Tabla 2.1 – Categorías de métricas utilizadas para evaluar la adquisición de destrezas técnicas mediante simuladores virtuales. Tabla adaptada a partir de la propuesta de Schmitz *et al.* (2014)

Categoría	Ejemplos	Ideas subyacentes
Tiempo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tiempo para completar una tarea o actividad rutinaria ▪ Porcentaje de tiempo empleado al trabajar sobre un área anatómica concreta ▪ Completar una tarea dentro de un límite de tiempo específico (por ejemplo, durante una obstrucción respiratoria) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Conseguir la automatización con ciertas destrezas motoras básicas o con ciertas tareas ▪ Comprender de forma cognitiva una destreza o los componentes de una tarea
Técnicas manuales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Longitud de una trayectoria (en comparación con un patrón anterior) ▪ Suavidad en el movimiento (relativa a la aceleración o a la curvatura de una trayectoria) ▪ Posicionamiento o movimiento adecuados con una herramienta quirúrgica concreta ▪ Medida háptica adecuada (por ejemplo, ejercer cierta fuerza o presión) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cumplir con las normas de seguridad del paciente, es decir, minimizar los peligros a los que el paciente puede estar expuesto ▪ Adquisición de una determinada habilidad manual ▪ Habilidad para controlar de forma precisa los músculos de la mano que intervienen durante una actividad ▪ Eficiencia o economía de movimientos ▪ Adquisición de las estrategias cognitivas, comportamientos o técnicas que un experto considere ▪ Adopción de las mejores prácticas asociadas a como ejecutar una tarea de forma satisfactoria ▪ Ausencia de destreza manual o de control motor ▪ Ausencia de un juicio o conocimiento cognitivo ▪ Fallo crítico sobre un estándar de seguridad del paciente
Errores	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cantidad de movimientos o decisiones incorrectas ▪ Selección de una herramienta quirúrgica inadecuada ▪ Tiempo de recuperación tras un error ▪ Errores clínicos: sangrado, tejido desgarrado, órgano perforado, quemar el tejido equívocado 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Retención de un patrón de comportamiento ante un determinado evento ▪ Capacidad para integrar y ejecutar en secuencia una serie de pasos
Pasos procedurales	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aplicar una lista de verificación específica a un paso o a un procedimiento concretos 	

por una serie de criterios que un individuo debe cumplir a lo largo de toda la tarea o procedimiento quirúrgico.

2.4. Discusión

Un individuo puede ser considerado experto cuando acumula la pericia necesaria para resolver un problema o para completar una determinada tarea de forma óptima. En el caso de la medicina, tal conocimiento es mayoritariamente tácito y puede interpretarse como un conjunto de competencias profesionales. Según Epstein y Hundert (2002), las competencias son un conjunto de aspectos fundamentados sobre un conocimiento científico, unas destrezas técnicas básicas y un desarrollo moral. Estos tres aspectos, análogos a las aptitudes de Bloom (1956), pueden adquirirse a través de la práctica deliberada. Para que esta pueda existir son necesarios cuatro requisitos:

1. Estudiantes motivados.
2. Tarea con objetivos de aprendizaje claramente definidos.
3. Metodología de evaluación para certificar unos conocimientos.
4. Agente experto que supervise a los estudiantes y les ofrezca feedback informativo.

En lo referente a los procesos de enseñanza y de aprendizaje en cirugía, cada uno de estos requisitos ocupa un lugar concreto (ver Figura 2.6). Para empezar, los estudiantes utilizan la práctica deliberada a fin de adquirir unas determinadas competencias. Estas competencias están asociadas a una tarea basada en una actividad o procedimiento quirúrgico real que, parafraseando a Ericsson (2004), está diseñada bajo el criterio de un experto en base a su conocimiento. De igual modo, Reznick y Macrae (2006) sugieren la necesidad de que el experto incorpore una metodología de evaluación capaz de certificar la adquisición de las mencionadas competencias. Finalmente, existe un agente experto que supervisa a los estudiantes durante la práctica deliberada; calificándoles y aportándoles un feedback según su desempeño y los objetivos de aprendizaje logrados.

Una vez determinado el rol de la práctica deliberada en los procesos de enseñanza-aprendizaje, es necesario buscar una herramienta que integre tales requisitos; y en el contexto de la medicina la simulación es el candidato ideal. Autores como McGaghie, Issenberg, Petrusa *et al.* (2010) sugieren que la práctica deliberada es uno de los pilares básicos de una educación basada en simulación. Además, el principal objetivo de un simulador es desarrollar las competencias necesarias para poder llevar a cabo un procedimiento quirúrgico de forma satisfactoria (Liu *et al.*, 2003). De entre los diferentes tipos de simuladores, en el caso de la cirugía es necesario destacar los simuladores hápticos pues su presencia en la literatura es relevante (Coles, Meglan y John, 2011).

En consonancia con todo lo anterior, y partiendo de las premisas de que el conocimiento de un experto está constituido por aptitudes y de que la simulación es una herramienta aparentemente viable para transferirlo, ¿qué aspectos son necesarios para modelar el conocimiento experto dentro de un simulador háptico? Una posible forma de abordar esta pregunta radica en analizar los requisitos de la propia práctica deliberada. El objetivo de dicho análisis es especificar un conjunto de requisitos que estén condicionados por el experto. No obstante, cabe señalar que para la práctica deliberada tan solo la tarea de aprendizaje y la metodología de evaluación están condicionados por el experto; los estudiantes y el agente experto son más bien actores de los procesos de enseñanza-aprendizaje.

Por consiguiente, para modelar el conocimiento experto en un simulador háptico es necesario definir dos aspectos: una tarea de aprendizaje y una metodología de evaluación. En el caso de la tarea de aprendizaje, y como el conocimiento experto está basado en

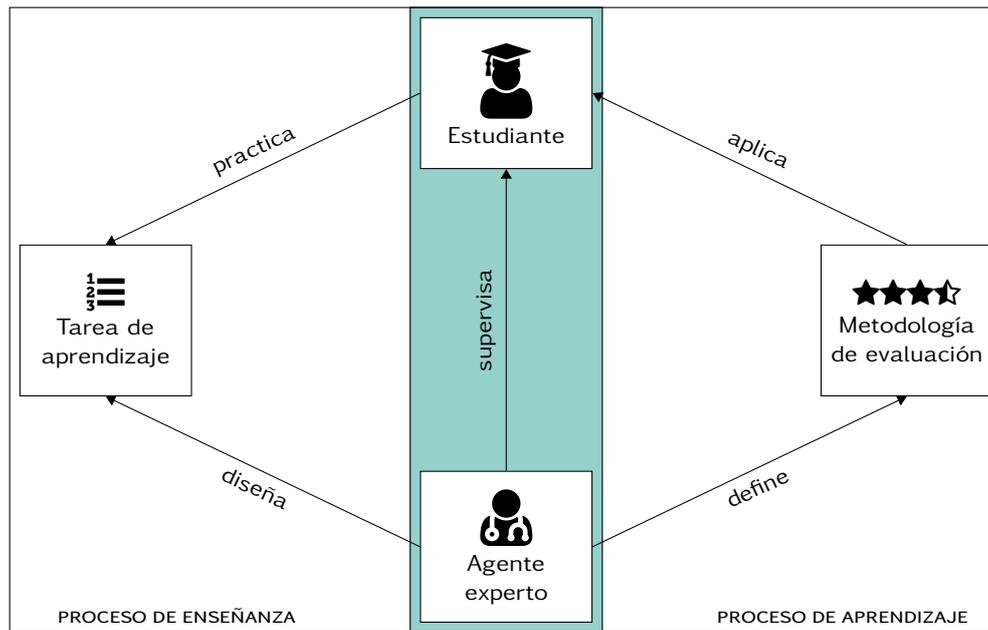


Figura 2.6 – Rol de los requisitos de la práctica deliberada en los procesos de enseñanza y de aprendizaje en cirugía. El agente experto es el encargado de diseñar la tarea de aprendizaje, definir la metodología de evaluación para medir el desempeño y supervisar al estudiante

aptitudes, bastaría con definir una serie de objetivos o resultados del aprendizaje relativos a esta. En el caso de la metodología de evaluación, el hecho de utilizar un simulador háptico ofrece la posibilidad de registrar automáticamente los datos del desempeño, por lo que bastaría con definir una serie de métricas para estimar el grado de cumplimiento de los objetivos de aprendizaje definidos anteriormente.

2.5. Conclusiones

En la literatura existen numerosas propuestas para definir el conocimiento de un experto. Sirvan de ejemplo disciplinas como la gestión del conocimiento, los sistemas expertos o la psicología. Además de su definición, todas ellas tienen en común que distinguen el conocimiento de un individuo—entre otros aspectos—, por la cantidad de experiencia que este tiene. Así pues, ni todos los expertos han adquirido sus conocimientos de la misma manera, ni todos ellos transfieren sus conocimientos de la misma forma. En el caso de la cirugía, como en el de otras profesiones cuyo desempeño conlleva riesgos, el diseño de unos procesos de enseñanza y aprendizaje adecuados resulta clave para garantizar que los individuos tengan un determinado nivel de competencias. Este capítulo ha analizado la literatura académica de varias disciplinas para identificar de que manera se adquiere y transfiere el conocimiento de un experto dentro del ámbito de la cirugía.

El conocimiento de un cirujano experto está compuesto principalmente de destrezas técnicas o motoras; aunque también de criterios, reglas y comportamientos. Bajo estos requisitos, las evidencias en la literatura muestran la “práctica deliberada” como una posible metodología para adquirir este tipo de conocimiento. Por otra parte, la enseñanza en el ámbito de la educación médica se ha guiado tradicionalmente por el modelo del aprendiz (con unos fundamentos similares a los de la práctica deliberada). Sin embargo, este modelo ha quedado obsoleto con el paso del tiempo porque presenta ciertas carencias en la práctica como pueden ser la incapacidad de articular el conocimiento o la subjetivi-

dad de los expertos a la hora de evaluar la adquisición de conocimientos. En este ámbito, y con el avance de la tecnología, hoy en día la simulación ha surgido como una herramienta auxiliar que, además de cubrir dichas carencias, es compatible con los requisitos de la práctica deliberada. En la literatura de la educación basada en simulación se mencionan diferentes tipos de simuladores, siendo los virtuales los más versátiles. En el caso particular de la cirugía se utilizan frecuentemente los simuladores hápticos; aunque este hecho se debe probablemente al reclamo sensitivo que aportan. A esto hay que añadir la ventaja de que los simuladores virtuales permiten registrar automáticamente el desempeño de los usuarios; ofreciendo una metodología de evaluación basada en métricas.

Para terminar, al final del capítulo se han planteado aquellos aspectos del conocimiento experto susceptibles de ser modelados en un simulador. Partiendo de los requisitos de la práctica deliberada se han propuesto dos: la tarea de aprendizaje y la metodología de evaluación. En consecuencia, los dos aspectos se utilizarán como base para buscar evidencias en la literatura acerca de su modelado en simuladores hápticos.

Capítulo 3

Revisión de la literatura

La falta de comunicación entre ingenieros y expertos es un problema frecuente en la industria del software, y los simuladores virtuales no están exentos de ello. Los ingenieros suelen abordar este contratiempo con el análisis de requisitos; una técnica que permite modelar el conocimiento como una serie de objetivos. Algo similar sucede en el ámbito de la educación médica, donde para determinar los objetivos de aprendizaje se realiza un análisis de tareas sobre el trabajo de un experto. Pero, ¿existe alguna manera de analizar sistemáticamente el desempeño de un experto durante una tarea y que además permita representar la información asociada a ese trabajo dentro de un sistema informático? En este capítulo se presenta el estado de la cuestión de las metodologías utilizadas en la educación médica para este fin. Concretamente se analiza en profundidad el *Surgical Process Modelling* como propuesta para modelar el conocimiento experto a través de un simulador háptico.

3.1. Introducción

Los expertos son individuos que destacan en un dominio por tener un conocimiento profundo del mismo. Por ejemplo, Ericsson (2004) define a un experto en el ámbito de la medicina como alguien con experiencia cuyo desempeño es significativamente mejor que el de otros individuos menos experimentados. Este tipo de conocimiento se puede definir como un conjunto de competencias profesionales (Epstein y Hundert, 2002); aunque comúnmente se tiende a asociarlo con una serie de destrezas y con la capacidad de tomar decisiones. Dicha forma tácita de entender el conocimiento conlleva cierto grado de complejidad a la hora de representar o “modelar” este en términos de un simulador.

Para empezar, diseñar e implementar un simulador virtual (o háptico) requiere un equipo multidisciplinar de personas (Anthony G. Gallagher y E. Matthew Ritter, 2007; Coles, Meglan y John, 2011). Por un lado están los ingenieros que desarrollan el propio simulador (tanto la parte hardware como la software) y por el otro los expertos que aportan el contenido (propósito del simulador, público al que va dirigido, flujo de trabajo, etc). Citando a Anthony G. Gallagher y E. Matthew Ritter: “en ocasiones el desarrollo de simuladores es realizado por ingenieros que se limitan a consultar al usuario final en lugar de involucrarlo estrechamente durante todo el proceso”. Este hecho es común en la industria del software y está asociado a un análisis de requisitos pobre. Además, en el caso de los simuladores educativos también indica una carencia a la hora de representar adecuadamente el conocimiento experto.

Por otra parte, el capítulo anterior concluyó con que el conocimiento experto puede representarse a partir de una tarea de aprendizaje y una metodología de evaluación. De este modo, para poder definir mejor el proceso de creación del modelo de conocimiento

experto puede resultar de interés conocer que técnicas de modelado se aplican en la actualidad en el ámbito de la educación médica.

3.2. Contexto

Diseñar una tarea de aprendizaje asociada a un procedimiento quirúrgico requiere utilizar un enfoque lógico que, a partir del conocimiento de un experto, defina unos objetivos de aprendizaje basados en aptitudes (Kneebone, 2003). Tradicionalmente muchas disciplinas definen estos objetivos a través de un análisis de tareas; una metodología que describe sistemática y cronológicamente un conjunto de actividades secuenciales y simultáneas realizadas por una persona (Patrick, 1992; Farmer *et al.*, 2017). Aunque sus orígenes se remontan al campo de la psicología, con el tiempo se ha exportado a otras disciplinas que buscan optimizar o enseñar tareas complejas (Stanton, 2006), incluida la medicina.

3.2.1. Hierarchical Task Analysis

Con respecto a la cirugía, cabe señalar que una variante aparentemente consolidada en la literatura es el *Hierarchical Task Analysis* (HTA) (Sarker *et al.*, 2008). HTA es una metodología para modelar el flujo de trabajo de un experto (cirujano, anestesista o enfermero) dentro de un procedimiento quirúrgico. En esencia, las evidencias existentes en la literatura deconstruyen gradualmente un procedimiento—o parte de él—en componentes individuales (pasos, actividades, movimientos del instrumental quirúrgico, etc) que representan objetivos de aprendizaje evaluables (Cao *et al.*, 1999; Munchenberg *et al.*, 2000; Pierre Jannin, Raimbault *et al.*, 2001; MacKenzie *et al.*, 2001). Estos componentes se extraen a partir de la literatura y de grabaciones en vídeo de cirugías realizadas por expertos para más tarde ser completados y validados por un conjunto de expertos. Pero, parafraseando a Sarker *et al.* (2008), con el HTA solo se obtiene una descripción genérica de los elementos y objetivos de un procedimiento quirúrgico; no se tiene en cuenta ni la técnica del individuo (conocimiento experto) ni las posibles acciones entre los elementos participantes de la tarea (cirujano, paciente, instrumental quirúrgico, etc). Además, tampoco se contempla la formalización del modelo resultante por lo que generalmente acaba siendo necesario complementar el HTA con otras metodologías.

Una metodología complementaria en cuanto a determinar las acciones y elementos participantes en un procedimiento quirúrgico es el *Human Error Identification* (HEI). En realidad, el HEI es un conjunto de técnicas para identificar aquellos eventos o comportamientos adversos que son consecuencia de alguna acción inesperada por parte de una persona (Kirwan, 1992). En el caso particular de una cirugía resulta de interés identificar los errores técnicos, que son errores provocados por un cirujano durante una operación (Kohn, Corrigan y Donaldson, 2000); como por ejemplo omitir un paso/actividad, intercambiar el orden de ejecución de algún paso o desempeñar erróneamente una actividad. La revisión de la literatura de Bonrath *et al.* (2013) señala que el análisis de este tipo de errores no está extendido y son pocas las evidencias que lo describen y evalúan. Conforme a ello, dichas evidencias suelen seguir la misma metodología: aplicar el HTA a un procedimiento quirúrgico y luego analizar vídeos relacionados a fin de identificar sus errores. Específicamente, a partir de la deconstrucción de la tarea se identifican para cada elemento estructural: los órganos o tejidos involucrados, el instrumental quirúrgico utilizado y las posibles complicaciones o consecuencias de las acciones de cada individuo. Pero a pesar de que esta metodología complementa el HTA, sigue existiendo el problema de no tener en cuenta la técnica del experto ni la formalización del modelo resultante.

3.2.2. Surgical Process Modelling

En línea con lo anterior, recientemente ha surgido en la literatura el *Surgical Process Modelling* (SPMOD) como una metodología centrada en modelar el flujo de trabajo de una cirugía (Lalys y Pierre Jannin, 2014; Neumuth, 2017; Gholinejad, J. Loeve y Dankelman, 2019). A diferencia de la anterior propuesta (en la que hay que combinar dos metodologías para obtener un modelo “completo”), el SPMOD es una metodología modular cuyos componentes abarcan todo el proceso de modelado; desde definir el nivel de detalle de la información del problema junto con sus formas de analizarlo y formalizarlo, hasta determinar de que manera deben adquirirse los datos. Las principales ventajas de esta metodología frente al HTA es que el proceso de modelado es sistemático y ello hace que su diseño sea flexible (pudiendo adaptar el modelo resultante a cualquier circunstancia o necesidad). No obstante, el SPMOD es una metodología emergente y hasta la fecha se ha utilizado principalmente en sistemas de cirugía asistida por ordenador.

Así pues, el SPMOD es una metodología que representa una cirugía como un proceso (utilizando para ello la descripción de su flujo de trabajo). Su resultado es un modelo denominado *Surgical Process Model* (SPM) que se define, en palabras de Neumuth (2017), como “una representación simplificada (de manera formal o semi-formal), de una serie de actividades propias o relativas a una cirugía, de los criterios que marcan el comienzo y finalización de todo el proceso, y de la información particular de cada una de dichas actividades”. Al ser una simplificación, un SPM solo describe aquellas actividades que aportan un mayor valor añadido al proceso quirúrgico y, generalmente, excluye aquellas relativas al pre y postoperatorio (aunque las puede tener en cuenta). De este modo para una cirugía de cataratas, la apertura de una vía principal en el ojo o la transferencia del instrumental quirúrgico son actividades adecuadas para ser modeladas en un SPM; mientras que la aplicación de anestesia previa a la operación no.

Para crear un SPM primero hay que considerar que una cirugía es un proceso con un cierto grado de complejidad y con una gran cantidad de información que analizar y formalizar (Neumuth, Pierre Jannin *et al.*, 2009); incluyendo el conocimiento experto que está implícito y oculto. Esto está reflejado en la literatura del SPMOD, ya que con el tiempo se ha pasado de representar un proceso como una secuencia de pasos a representarlo mediante ontologías (Lalys y Pierre Jannin, 2014; Gholinejad, J. Loeve y Dankelman, 2019). A grandes rasgos, una ontología es una descripción formal y explícita de todas las entidades que intervienen dentro de un proceso; por lo que su creación se puede abordar de diferentes maneras dependiendo del propósito que se le vaya a dar a la información que contiene (Pierre Jannin y Morandi, 2007).

3.2.3. Preguntas de investigación

La literatura académica muestra que el modelado de una tarea de aprendizaje se puede hacer bien mediante un análisis de tareas o bien mediante SPMOD. En el primer caso la combinación HTA y HEI es una opción aparentemente viable para representar una tarea de aprendizaje y sus objetivos; a pesar de que su naturaleza no tiene en cuenta la técnica del experto. Además, las revisiones de la literatura encontradas denotan que ambas metodologías están ya consolidadas (Sarker *et al.*, 2008; Bonrath *et al.*, 2013). Pero según el presente trabajo de investigación, hasta la fecha solo hay constancia de un trabajo que combine estas metodologías y que además “formalice” de algún modo el modelo resultante (Al-Hakim, Maiping y Sevdalis, 2014). Por otra parte, el SPMOD también es una opción a considerar ya que, además de cubrir las carencias del análisis de tareas, su finalidad es crear una ontología (o dicho de otra manera, un modelo formal). A pesar de su relativa juventud ya existen varias revisiones sistemáticas sobre el tema (Lalys y Pierre

Jannin, 2014; Neumuth, 2017; Gholinejad, J. Loeve y Dankelman, 2019), y todas coinciden en que esta metodología puede llegar a tener un gran impacto sobre la educación médica. Pero aunque su aplicación a simuladores virtuales no está todavía claramente definida, sus características hacen que sea una opción atractiva.

Dicho esto, quizás la opción más apropiada para el objetivo de esta tesis sea el *SPMOD*. Si bien es cierto que ambas metodologías tienen el mismo objetivo (realizar un análisis de requisitos para obtener un modelo que represente una cirugía), el *SPMOD* está enfocado a crear un modelo software (ontología) mientras que el *HTA* no. Además, el hecho de que el proceso de creación de un *SPM* esté definido y sea sistemático facilita la tarea de diseñar, implementar y evaluar nuevos modelos; aspectos que el *HTA* deja en manos del diseñador del modelo.

Partiendo de esta decisión, y para saber como aplicar el *SPMOD* a la creación de un modelo de conocimiento experto a través de simuladores hápticos, es necesario estudiar tanto el estado de la cuestión de *SPMOD* como el proceso de creación de un *SPM*. Para cumplir este propósito, la investigación debe responder inicialmente a las siguientes preguntas generales (MQ)¹:

MQ1 ¿Qué revisiones de la literatura de *SPMOD* han sido publicadas hasta la fecha y cuántas publicaciones han sido revisadas en dichos estudios?

MQ2 ¿Cuáles son las áreas de aplicación de un *SPM*?

MQ3 ¿Cómo es el proceso de generación de un *SPM*?

MQ4 ¿Cómo es la evaluación de un *SPM*?

A partir de este punto, y con el objetivo de adaptar el proceso de generación de un *SPM* a las necesidades de un modelo de conocimiento experto para simuladores hápticos, la investigación deberá responder a la siguiente pregunta de investigación (RQ)²:

RQ1 ¿Cómo adaptar el *SPMOD* para modelar el conocimiento experto a través de un simulador háptico?

3.3. Metodología

El principal objetivo de este capítulo es identificar una metodología que permita construir un modelo del conocimiento experto de manera sistemática, y que además pueda ser formalizado en un framework. Una posibilidad es a través del *SPMOD*, que a pesar de utilizarse en sistemas de cirugía asistida sus fundamentos pueden ser extrapolados al ámbito de los simuladores.

De este modo, y bajo la premisa de conocer el funcionamiento del *SPMOD* para posteriormente aplicarlo en simuladores hápticos, el trabajo planteó inicialmente una revisión sistemática de la literatura. Pero teniendo en cuenta que en el Apartado 3.2 ya se identificaron varios estudios secundarios³ sobre el tema, no fue necesario llevar a cabo una revisión sistemática completa pues estos ya satisfacían las necesidades de la investigación. En su lugar se optó por analizar sistemáticamente dicho conjunto de artículos siguiendo la metodología propuesta por Kitchenham, Budgen y Brereton (2016) para llevar a cabo revisiones sistemáticas en el ámbito de la ingeniería del software. Esto se debe a que los artículos de dicho conjunto se consideraron como primarios desde un primer momento, es decir, como artículos cuyo contenido responde directamente a las preguntas de investigación planteadas. Para validar este conjunto de artículos se llevó a cabo una búsqueda complementaria con las siguientes características:

¹Del inglés, *Mapping Questions*.

²Del inglés, *Research Questions*.

³Término utilizado en el contexto de las revisiones sistemáticas para referirse a revisiones de la literatura.

- Artículos escritos en inglés hasta febrero de 2020.
- Web of Science, Scopus y PubMed como fuentes de información.
- Descartar cualquier artículo que no sea una revisión de la literatura sobre SPMOD como único criterio de exclusión.
- Utilizar la siguiente cadena de búsqueda en todas las fuentes de información: “surgical process model*” AND (review OR survey).

Conforme a esto, para realizar el análisis sistemático no fue necesario llevar a cabo las fases de búsqueda, selección y evaluación de la calidad de una revisión sistemática normal; pero sí las de extracción y síntesis de los datos.

3.3.1. Extracción de los datos

El proceso de extracción se realizó de manera electrónica utilizando un formulario implementado como una hoja de cálculo. Este proceso consistió en revisar individualmente cada artículo primario para extraer la información necesaria para rellenar el formulario. La Tabla 3.1 refleja la información recopilada, y su elección se debe a las necesidades de las preguntas formuladas en el Apartado 3.2.3. En cuanto a la estructura del formulario, este tiene tres partes: una para responder a las preguntas MQ1 y MQ2, otra para responder a la pregunta MQ3 y una última para responder a la pregunta MQ4.

3.3.2. Síntesis de los datos

El proceso de síntesis de datos se realizó de forma subjetiva tabulando los datos; aunque no todos de la misma manera. Para las preguntas MQ1 y MQ2 se crearon tablas en las que cada fila presenta los datos extraídos por cada artículo. Sin embargo, para el resto de preguntas (preguntas MQ3 y MQ4) hubo que determinar un criterio con el que resumir los datos extraídos: utilizar como modelo el artículo primario más reciente y hacer equivalencias de los datos con el resto. Además, para cada celda se indica la procedencia del dato correspondiente utilizando el siguiente convenio:

- Entre corchetes para indicar la lista de artículos que menciona ese dato.
- No indicar nada para hacer referencia a que el dato ha sido extraído únicamente del artículo primario más reciente.

La decisión de utilizar este criterio se debe a que cada uno de los artículos primarios propone las mismas hipótesis pero descritas de manera diferente y el presentar estos resultados en forma de tablas resulta inviable.

3.4. Resultados

El conjunto de artículos primarios está formado por tres trabajos identificados en el Apartado 3.2, etiquetados como PS1, PS2 y PS3⁴, y publicados en 2014, 2017 y 2019 respectivamente (ver Tabla 3.2). Con respecto a los autores de los tres trabajos, algunos son figuras relevantes dentro del SPMOD. Por ejemplo, Pierre Jannin (uno de los autores de PS1) publicó uno de los primeros trabajos que propone estudiar el flujo de trabajo de una cirugía como una secuencia de pasos (Pierre Jannin, Raimbault *et al.*, 2001), mientras que Thomas Neumuth (autor de PS2) es responsable de acuñar el término SPM (Neumuth, Trantakis *et al.*, 2007). Por otra parte, a grandes rasgos todos los trabajos tienen el mismo objetivo: presentar el proceso de generación de un SPM. Esta coincidencia puede deberse a que, como se menciona en PS3, hasta la fecha de redacción del artículo no se había definido claramente dicho proceso.

⁴Del inglés, *Primary Study*.

Tabla 3.1 – Datos incluidos en el formulario de extracción de datos

(a) – Datos para las preguntas MQ1 y MQ2

Dato	Tipo	Descripción
ID	T	Identificador único de un artículo primario. Su numeración sigue el convenio psx, donde x es un número
Referencia	T	Referencia bibliográfica completa de un artículo. Para abreviarla solo se indican los autores y el año
Objetivo	T	Objetivo o hipótesis de un artículo
Tipo de revisión	O	Metodología aplicada para realizar la revisión de la literatura en un artículo. Posibles opciones: (1) sistemática (sigue una metodología) o (2) narrativa (no sigue una metodología)
Bases de datos	T	Lista de bases de datos consultadas para obtener las evidencias revisadas en un artículo
Núm. evidencias	N	Número de publicaciones revisadas pertenecientes a un artículo
Rango	N	Rango de fechas en el que se han publicado las evidencias revisadas en un artículo
Aplicaciones	T	Lista de aplicaciones de un SPM mencionadas en el artículo

(b) – Datos para la pregunta MQ3

Dato	Tipo	Descripción
Componente	T	Nombre del componente o elemento perteneciente al proceso de generación de un SPM
Descripción (componente)	T	Breve definición del componente y de su función
Dependencias	T	Lista de dependencias o criterios a tener en cuenta a la hora de considerar como estudiar el componente
Metodología	T	Técnica correspondiente a un elemento que permite realizar su función
Equivalencias	T	Lista de metodologías equivalentes a una dada, tomando como criterio de equivalencia la similitud en sus funciones
Descripción (metodología)	T	Breve definición de la metodología y de su función
Ventajas	T	Atributos característicos de una metodología frente a otras
Desventajas	T	Inconvenientes de la metodología frente a otras
Otras características	T	Cualquier otro tipo de característica a mencionar relacionado con un componente o una metodología

(c) – Datos para la pregunta MQ4

Dato	Tipo	Descripción
Término	T	Nombre del elemento o componente perteneciente al proceso de evaluación
Descripción	T	Breve definición de un término
Procedimiento	T	Forma o técnica para aplicar un aspecto al proceso de evaluación
Otras características	T	Cualquier otro tipo de característica relacionada con un aspecto

Tipo: T (texto); O (opción); N (número);

3.4.1. MQ1: ¿Qué revisiones de la literatura de SPMOD han sido publicadas hasta la fecha y cuántas publicaciones han sido revisadas en dichos estudios?

La Tabla 3.3 recoge los resultados de cada artículo a esta pregunta. Los tres artículos analizados son estudios secundarios sobre SPMOD. Concretamente, ps1 y ps3 son revisiones “parcialmente sistemáticas”⁵ mientras que ps2 es una revisión de la literatura “tradicio-

⁵Parcialmente sistemática es que la metodología solo indica la estrategia de búsqueda seguida.

Tabla 3.2 – Características generales de los artículos primarios analizados

ID	Referencia	Objetivo
ps1	Lalys y Pierre Jannin (2014)	Proponer una taxonomía de componentes para clasificar las diferentes metodologías utilizadas en la generación de un SPM
ps2	Neumuth (2017)	Presentar los diferentes métodos utilizados en la literatura para generar un SPM, así como varios casos de uso
ps3	Gholinejad, J. Loeve y Dankelman (2019)	Definir una guía para seleccionar las diferentes estrategias disponibles a la hora de generar un SPM

Tabla 3.3 – Características relativas a las publicaciones sobre SPMOD revisadas en los artículos primarios

ID	Tipo de revisión	Bases de datos	Número de evidencias	Rango
ps1	Parcialmente sistemática	Google Scholar	46	2000–2012
ps2	Narrativa	No se indica	50	2001–2016
ps3	Parcialmente sistemática	Scopus	168	2000–2018

nal”⁶. En cuanto a las evidencias analizadas en los tres artículos, hay un total de 264 artículos (aunque sin contar los duplicados), repartidos entre los años 2000 y 2018. De esos 264, 46 se encontraron a través de Google Scholar y 168 a través de Scopus. Los 50 restantes corresponden al artículo ps2 pero no hay indicaciones sobre su procedencia más allá de las correspondientes citas a lo largo del trabajo.

Un aspecto importante que cabe resaltar sobre estos resultados es que, hasta donde se ha investigado en esta tesis, los tres artículos primarios son las únicas revisiones de la literatura de este tema disponibles hasta febrero de 2020. Para comprobar esto, se realizó una búsqueda complementaria de revisiones de la literatura cuyos resultados resume el diagrama PRISMA de la Figura 3.1. En concreto, se encontraron 15 resultados entre los que figuraban los tres artículos primarios ya identificados. No obstante—e ignorando estos tres—, el resto de evidencias no eran revisiones de la literatura por lo que la búsqueda complementaria no arrojó nuevos resultados.

3.4.2. MQ2: ¿Cuáles son las áreas de aplicación de un SPM?

La Tabla 3.4 recoge las respuestas de cada artículo a esta pregunta. En suma, un SPM sirve para modelar el flujo de trabajo de una cirugía y se utiliza integrado en sistemas de cirugía asistida (bien en un ordenador o bien en un robot quirúrgico) para:

- Evaluar el impacto sobre el flujo de trabajo de una cirugía cuando se introduce una nueva herramienta, sistema o técnica quirúrgica.
- Gestionar, optimizar o evaluar el flujo de trabajo dentro del quirófano.
- Elaborar un análisis de requisitos para la creación de nuevos sistemas de cirugía asistida.
- Entrenar y evaluar el desempeño de los cirujanos.

Estos dos últimos datos son muy importantes para la investigación, ya que confirman la existencia de evidencias tanto para la aplicación del SPMOD a la educación médica como para su uso como técnica de análisis de requisitos. No obstante, también hay que señalar que en ningún artículo se menciona explícitamente la integración de un SPM en

⁶Tradicional significa que no especifica la metodología seguida para realizar la revisión.

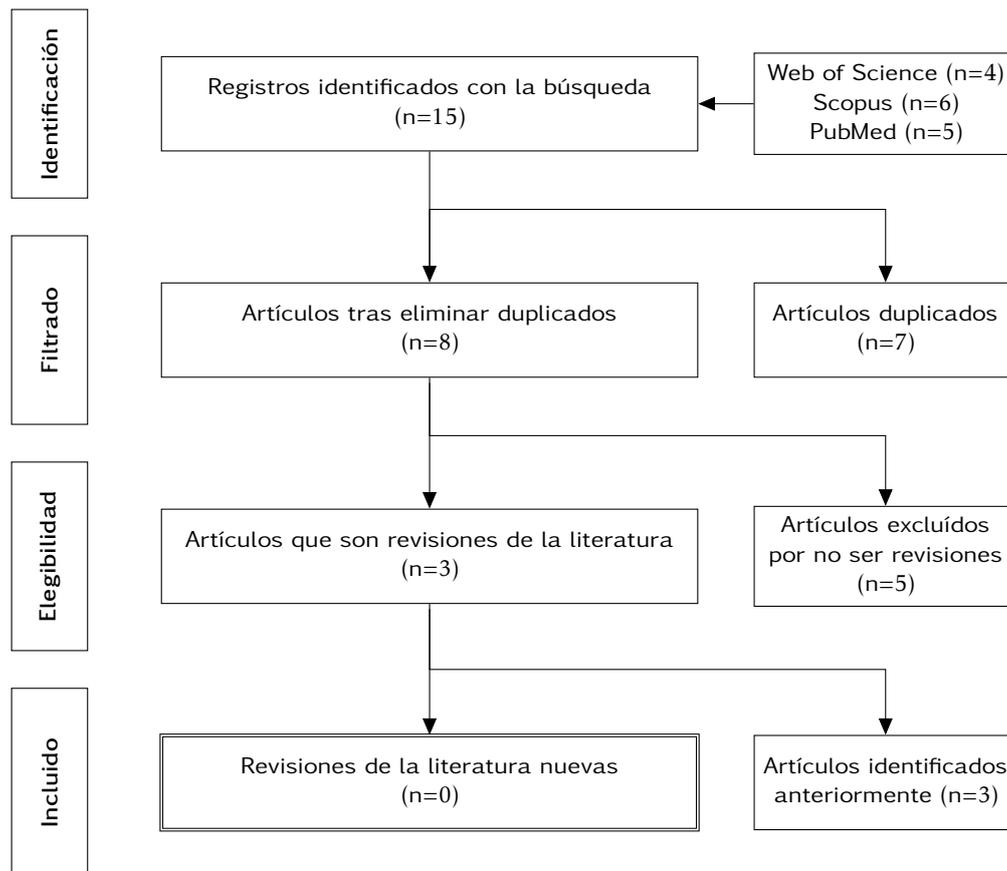


Figura 3.1 – Diagrama PRISMA sobre los resultados de la búsqueda complementaria de revisiones de la literatura sobre SPMOD

Tabla 3.4 – Aplicaciones de un sPM citadas en la literatura

ID	Aplicaciones
ps1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluación de herramientas, sistemas o procedimientos quirúrgicos ▪ Entrenamiento y evaluación de cirujanos ▪ Optimización de la gestión de recursos en un quirófano ▪ Integración de sistemas de cirugía asistida por ordenador en un quirófano ▪ Integración de sistemas de cirugía asistida mediante robots
ps2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Visualización del transcurso de una cirugía ▪ Análisis de requisitos para la creación de sistemas de cirugía asistida ▪ Integración de sistemas de cirugía asistida en un quirófano ▪ Optimización de un procedimiento quirúrgico ▪ Evaluación del grado de cumplimiento de una cirugía ▪ Gestión del flujo de trabajo en un quirófano
ps3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Evaluación de la introducción de herramientas o tecnologías en un quirófano ▪ Optimización de un procedimiento quirúrgico ▪ Análisis de requisitos para la creación de sistemas de cirugía asistida

simuladores virtuales o hápticos.

3.4.3. MQ3: ¿Cómo es el proceso de generación de un sPM?

Para responder a esta pregunta antes hay que mencionar una serie de criterios establecidos para poder entender los datos extraídos. Como se dijo al principio de este apartado, el objetivo de los tres artículos primarios es a grandes rasgos el de presentar el proceso

Tabla 3.5 – Componentes de un SPM

Componente	Equivalencias	Descripción
1. Nivel de granularidad	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelado: nivel de granularidad y agente [ps1] 	Grado de detalle o abstracción de los datos con los que describir el flujo de trabajo de una cirugía
2. Adquisición de datos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adquisición de datos [ps1 y ps2] 	Recogida de datos del flujo de trabajo para su posterior modelado y análisis
3. Representación del modelo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Tipo de modelo [ps2] ▪ Modelado: formalización [ps1] ▪ Estrategia de transformación [ps2] 	Expresión de los datos adquiridos en información representable a través de un modelo
4. Enfoque del modelado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis: de datos a modelo [ps1] ▪ Estrategia de modelado [ps2] 	Dirección en la que se procesan los datos del modelo
5. Generalización	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis: agregación / fusión [ps1] ▪ Generalización del modelo [ps2] 	Análisis de varios modelos de una misma cirugía para abstraer un modelo común que represente su variabilidad

de generación de un SPM. Para ello, cada uno define dicho proceso a través de una serie de elementos o componentes que describen partes concretas del mismo. Parafraseando a Gholinejad, J. Loeve y Dankelman (2019) (autores de ps3), estos componentes hacen referencia a diferentes estrategias o metodologías; por lo que para abordar esta pregunta es necesario describir individualmente tales componentes.

Así pues, la Tabla 3.5 resume la respuesta a esta pregunta de investigación. Cada artículo primario plantea una propuesta de componentes diferente, aunque la de ps3 contempla todos los componentes de las otras dos; a excepción de tres de ps1 que no tienen nada que ver con la generación de un SPM y por tanto se han ignorado: (1) análisis mediante comparación-clasificación; (2) aplicaciones; y (3) validación-evaluación. En vista de ello, existen cinco componentes que aportan funcionalidad dentro del proceso de creación de un SPM y que a continuación se describen.

1. Nivel de granularidad

El nivel de granularidad define el grado de detalle o abstracción de los datos con el que describir el flujo de trabajo de una cirugía. Concretamente, cada nivel “divide” el modelo en partes o constructos con un determinado significado. Así, un nivel de granularidad bajo quiere decir que la cirugía se representa con pocos constructos caracterizados por tener un alto nivel de abstracción, y un nivel de granularidad alto significa todo lo contrario (muchos constructos de un nivel bajo de abstracción). En otras palabras, con un nivel de granularidad bajo se puede describir la cirugía como una serie de objetivos quirúrgicos (retirar una catarata o introducir una lente en un ojo), mientras que con un nivel de granularidad alto se puede describir la misma cirugía como una secuencia de partes específicas o técnicas (diferentes trayectorias de la mano del cirujano durante la operación).

Con respecto a sus características, la Tabla 3.6 recoge los datos extraídos sobre ello. Para empezar, ps1 y ps3 contemplan de forma similar los niveles de granularidad de un SPM citando las mismas propuestas de niveles utilizados en la literatura: la del grupo de MacKenzie *et al.* (2001) y la de Lalys y Pierre Jannin (2014) (autores de ps1). Cada una de estas propuestas tiene seis niveles de granularidad ordenados de mayor a menor

Tabla 3.6 – Datos extraídos sobre las características del componente de nivel de granularidad

Dependencias	Otras características
<ul style="list-style-type: none"> ▪ El número de niveles que utilizar y los tipos concretos es arbitrario y dependen del propósito que tenga el estudio ▪ Su elección restringe el tipo de adquisición de datos que se puede realizar 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Propuestas [ps1 y ps3]: <ul style="list-style-type: none"> • MacKenzie <i>et al.</i> (2001): procedimiento > paso > subpaso > tarea > subtarea > movimiento • Lalys y Pierre Jannin (2014): procedimiento > fase > paso > actividad > movimiento > información de bajo nivel • Otras [ps3]: episodio quirúrgico; gesto; tarea de alto nivel; tarea de bajo nivel ▪ En la práctica se utiliza un único nivel de granularidad (generalmente pasos o actividades) aunque también hay evidencias del uso de dos o más [ps1]

abstracción, siendo la de MacKenzie *et al.* más generalista y la de Lalys y Pierre Jannin más específica. En ambas propuestas se abordan los mismos constructos como, por nombrar algunos de ellos, el procedimiento (representa toda la cirugía), el paso (secuencia de actividades que juntas logran un objetivo quirúrgico), la tarea o actividad (acción que implica uno o varios movimientos de la mano y que tienen una finalidad concreta) y el movimiento (trayectoria de una mano sin semántica alguna). También hay que mencionar la existencia de otros niveles de granularidad utilizados con menor frecuencia, como es el caso del episodio quirúrgico, el gesto y las tareas de alto o bajo nivel.

En cuanto a como se utilizan los niveles de granularidad, cabe señalar que su número es arbitrario y depende por completo del propósito del estudio que se vaya a llevar a cabo. Parafraseando a Gholinejad, J. Loeve y Dankelman (autores de ps3), un estudio cuyo objetivo sea analizar el desempeño con un instrumento quirúrgico, sobre un tejido y dentro de un determinado procedimiento, necesita un nivel de granularidad alto para poder representar los datos de los tejidos y del instrumento. De igual modo, si el objetivo es analizar el resultado del procedimiento al utilizar ese mismo instrumento, el nivel de granularidad debe ser bajo para saber cuales son los objetivos a cumplir para desempeñar correctamente el procedimiento.

No obstante, en los estudios citados en la literatura generalmente se utiliza un único nivel (los pasos o las actividades) aunque también hay evidencias del uso de múltiples niveles de granularidad. Por otra parte también cabe mencionar que la elección del nivel de granularidad afecta directamente al tipo de adquisición de datos que se puede realizar, ya que, por ejemplo, si los datos se recogen entrevistando a expertos ello implica que el nivel de granularidad debe ser obligatoriamente bajo.

2. Adquisición de datos

La adquisición de datos determina la forma de recoger los datos dentro del flujo de trabajo de una cirugía; con el objetivo de modelarlos y analizarlos posteriormente. Como se indica en ps1, estos datos proceden tanto de los participantes en la cirugía (personal médico, pacientes o sistemas que intervengan durante su desarrollo) como de partes del cuerpo de los mismos (mano, muñeca, ojo, etc). Además, la adquisición se realiza durante un período de tiempo concreto y dentro del flujo de trabajo—que por norma general suele ser el intraoperatorio.

En cuanto a sus características, todos los artículos primarios describen la adquisición

Tabla 3.7 – Datos extraídos sobre las características del componente de adquisición de datos

(a) – Metodologías			
Metodología	Equivalencias	Descripción	
Manual	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Basada en observador [PS1] ▪ Observación [PS2] 	Una persona es la encargada de recoger datos de carácter estructural, anotándolos en un dispositivo y respondiendo a una serie de preguntas de tipo “quién”, “qué”, “cómo”, “dónde” y “cuándo”	
Informatizada	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Basada en sensor [PS1] ▪ Sistemas de sensores [PS2] 	Un sistema informático es el encargado de recoger datos técnicos, utilizando sensores o cámaras especializadas	

(b) – Características de las metodologías			
Metodología	Ventajas	Inconvenientes	Otras características
Manual	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El proceso es flexible con respecto a las necesidades del estudio [PS1, PS2 y PS3] ▪ Es posible interactuar directamente con el equipo médico durante el proceso [PS1, PS2 y PS3] ▪ El proceso puede hacerse fuera del quirófano utilizando otras fuentes de información [PS3] ▪ Los datos obtenidos son fáciles de interpretar para las personas [PS1, PS2 y PS3] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El proceso es lento y subjetivo [PS1, PS2 y PS3] ▪ No es posible obtener datos de bajo nivel como por ejemplo las trayectorias [PS3] ▪ Posibilidad de introducir errores humanos [PS3] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fuentes de información: <ul style="list-style-type: none"> • Entrevistas con expertos [PS3] • Documentación clínica [PS2 y PS3] • Estudios publicados en la literatura médica [PS3] • Observación offline (vídeos) y online (presencial) [PS1, PS2 y PS3]
Informatizada	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El proceso es rápido, automático y objetivo [PS1 y PS3] ▪ Los datos obtenidos representan detalladamente el movimiento o las acciones realizadas dentro de un quirófano [PS1, PS2 y PS3] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Los datos carecen de semántica y necesitan ser interpretados [PS1, PS2 y PS3] ▪ Es necesario configurar el sistema dentro del quirófano y generalmente también sobre los participantes [PS1 y PS3] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fuentes de información [PS1, PS2 y PS3]: <ul style="list-style-type: none"> • Sensores ópticos o eléctricos • Registros de vídeo y/o de audio

(c) – Dependencias del componente
Dependencias
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Depende del o de los niveles de granularidad definidos ▪ Depende del tipo de enfoque del modelado elegido ▪ Está limitado al equipamiento y los recursos disponibles

de datos de la misma manera (ver Tabla 3.7). Esto es, a través de como realizar el propio proceso: si de forma manual o de forma informatizada.

En una metodología manual una persona es la encargada de recoger datos respondiendo a una serie de preguntas relacionadas con un constructo determinado dentro de la cirugía (PS2 y PS3). Por ejemplo, en el caso de que el constructo sea una actividad las preguntas serían del estilo a: ¿cuál es el objetivo de la actividad?, ¿quién se encarga de

realizarla?, ¿qué herramientas hay que utilizar?, etc. Generalmente, el proceso se realiza de forma presencial en un quirófano observando el flujo de trabajo del equipo médico (lo que permite interactuar directamente con este en caso de ser necesario), aunque también se puede realizar fuera de él a través de otras fuentes como los vídeos (endoscópicos o de todo el quirófano), las entrevistas con los expertos del equipo médico, los informes de los pacientes, los manuales clínicos de procedimientos o incluso los estudios publicados en la literatura médica. Pero el hecho de que sea una persona quien se encargue de recoger los datos hace que el proceso sea lento y subjetivo; sin contar que también cabe la posibilidad de que se recojan datos erróneamente. Otra consecuencia de que una persona sea la responsable de la recogida es la imposibilidad de obtener datos de bajo nivel de abstracción a partir de las fuentes de información anteriormente citadas. No obstante, el hecho de que los datos recogidos tengan un alto nivel de abstracción hace que estos sean fáciles de interpretar o verificar por otras personas.

En el lado opuesto está la metodología informatizada, en la que un sistema informático es el responsable de recoger los datos de forma totalmente rápida, automática y objetiva. Este tipo de sistemas recoge datos “reales” de gestos, bien configurando y utilizando sensores repartidos entre las entidades participantes en una cirugía (por ejemplo, a través de etiquetas RFID colocadas sobre el instrumental quirúrgico), o bien configurando y utilizando cámaras especiales que graban el flujo de trabajo en un quirófano. Los datos obtenidos a través de estas fuentes de información son de un bajo nivel de abstracción (se suelen denominar técnicos) y representan la realidad. No obstante, cabe señalar que estos datos se corresponden con señales eléctricas y carecen de semántica, por lo que necesitan ser analizados e interpretados para que puedan servir al SPM y así poder expresar información. *ps2* describe claramente esto con un ejemplo, y es que a simple vista no es posible distinguir a que corresponden unos datos capturados por el uso de un bisturí eléctrico: ¿a una incisión sobre la piel o a retirar el tejido tumoral de un órgano?

Con respecto a las dependencias de este componente, hay que aclarar que la elección de un tipo concreto de metodología está supeditada tanto por el nivel de granularidad definido como por el enfoque del modelado con el que se van a procesar los datos. Parafraseando el ejemplo de Gholinejad, J. Loeve y Dankelman (2019) (autores de *ps3*), si el objetivo del estudio es obtener datos espaciales de un instrumento quirúrgico, la única opción viable para recogerlos es la informatizada, ya que el nivel de granularidad para representar esa información es alto; cosa que también afecta al tipo de enfoque de modelado que se utilizará para procesarlos. Por otro lado, si la finalidad del estudio es obtener los principales objetivos quirúrgicos de una cirugía de cataratas, la recogida de datos debe ser manual ya que el nivel de granularidad es bajo. Al mismo tiempo, otro factor limitador a la hora de elegir una metodología es la propia disponibilidad que tiene el diseñador en cuanto a equipamiento y a recursos (tanto humanos como temporales).

3. Representación del modelo

La representación del modelo es la forma de expresar los datos adquiridos en información útil que pueda ser interpretada y utilizada por otros. Esta forma de expresar los datos se conoce en la literatura como formalización, y aunque se aborda de manera diferente en cada artículo primario, todos tienen en común que se realiza a través de un lenguaje de modelado (ver Tabla 3.8). En concreto, *ps1* considera este elemento como la parte de formalización dentro del componente de modelado y se limita a listar los tipos de lenguajes citados en la literatura. Por otro lado, para *ps2* son dos componentes como tal; distinguiendo entre representación del modelo y formalización. Sea como fuere, desde el punto de vista de *ps3* se contemplan todos estos aspectos y además se resumen en que la representación puede ser de tipo descriptiva o de tipo numérica.

Tabla 3.8 – Datos extraídos sobre las características del componente de representación del modelo

(a) – Metodologías			
Metodología	Equivalencias	Descripción	
Descriptiva	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelado: formalización [ps1] ▪ Simbólico [ps2] 	Expresa la información en texto plano	
Númérica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modelado: formalización [ps1] ▪ Formalización [ps2] ▪ Numérico [ps2] 	Expresa la información en forma de números, relaciones matemáticas o lenguajes de programación	

(b) – Características de las metodologías			
Metodología	Ventajas	Inconvenientes	Otras características
Descriptiva	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es flexible con las respecto a las necesidades del estudio [ps2 y ps3] ▪ Es fácil de comprender para las personas [ps3] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Describe el flujo de trabajo de forma parcial [ps2 y ps3] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Formalización a través de: <ul style="list-style-type: none"> • Lista secuencial o lista no secuencial [ps1 y ps3]
Númérica	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Describe detalladamente todo el flujo de trabajo [ps2 y ps3] ▪ Es ideal para crear simuladores o analizar cualitativamente una cirugía [ps3] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es específica para un único problema [ps3] ▪ Necesita una interpretación para que las personas puedan comprenderlo [ps2 y ps3] ▪ Su creación requiere un gran esfuerzo inicial debido a sus requisitos [ps3] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Formalización a través de un lenguaje de modelado [ps1, ps2 y ps3]: Redes de Petri, UML, BPMN, etc

(c) – Dependencias del componente	
Dependencias	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Depende del tipo de adquisición de datos definido 	

Una representación descriptiva es aquella que expresa los datos del flujo de trabajo de una cirugía como información en texto plano. Esto obliga al modelo a describir los datos utilizando términos relativos a constructos de un alto nivel de abstracción; lo que por otra parte facilita la comprensión de los resultados a otras personas. Así, una lista de palabras para describir las fases de una cirugía de forma secuencial o una lista desordenada de elementos participantes durante todo el flujo de trabajo, son ejemplos de información descriptiva. Pero utilizar texto plano hace que la descripción del flujo de trabajo sea limitada, especialmente a la hora de expresar las relaciones entre los participantes de una cirugía. Por consiguiente, este tipo de representaciones se suelen complementar con otras basadas en una representación numérica (ps2).

Por su parte, una representación numérica describe los datos del flujo de trabajo mediante información codificada en números, símbolos, relaciones matemáticas o lenguajes de programación. Este tipo de representación está muy extendida en la literatura y es gracias a la diversidad de lenguajes de modelado que existen: redes de Petri, UML, BPMN, etc. De hecho, en ps2 se cita el trabajo de Neumann *et al.* (2015) quienes revisan y evalúan la viabilidad de algunos de estos lenguajes. Pero a diferencia de la representación descriptiva, la numérica describe detalladamente todo el flujo de trabajo utilizando datos técnicos

(como por ejemplo la trayectoria de la mano de un cirujano). Esto hace que los modelos de este tipo sean ideales para crear simuladores o analizar aspectos cualitativos de una cirugía, pero no para ser interpretados por personas. Además, el hecho de trabajar con datos de un bajo nivel de abstracción hace que el modelo resultante sea específico para un problema; y que también requiera un análisis exhaustivo de sus requisitos durante las etapas iniciales de su creación.

Por lo que se refiere a las dependencias de este componente, la elección de un tipo depende por completo del tipo de adquisición de datos escogido. De este modo, para crear una representación numérica vale cualquier tipo de recogida de datos (manual o informatizada) pero para crear una representación descriptiva solo vale la adquisición manual.

4. Enfoque del modelado

El enfoque del modelado hace referencia a la dirección en la que procesar los datos del modelo. Dicho de otro modo, hace referencia a la forma en la que abordar el análisis de los datos adquiridos con el fin de poder interpretarlos y de que más tarde puedan ser expresados como información en un modelo.

Todos los artículos primarios describen el enfoque de modelado de forma análoga utilizando estrategias que dirigen el proceso de análisis de los datos (ver Tabla 3.9). En consecuencia, todos distinguen dos estrategias opuestas según la dirección del análisis. Así, cuando la dirección del procesamiento es “de arriba a abajo” se le llama *top-down* y cuando la dirección es “de abajo a arriba” se le llama *bottom-up*.

Una estrategia *top-down* consiste en formular una visión general de una cirugía para luego analizar gradualmente su desarrollo por partes o constructos; que a su vez son refinados hasta alcanzar un determinado nivel de detalle. Para realizar este tipo de análisis se utilizan técnicas como la lógica descriptiva, los árboles de decisión, o los motores de inferencia entre otras. Pero el hecho de trabajar con un alto nivel de abstracción no sólo permite obtener resultados de forma rápida, sino también adaptar el proceso de creación a las necesidades del estudio en el que se realiza. Otro rasgo de esta estrategia es que facilita la comprensión del flujo de trabajo de una cirugía lo que, por un lado, reduce la probabilidad de identificar erróneamente constructos de bajo nivel y por otro permite reutilizar los constructos ya modelados. No obstante, cabe señalar que este tipo de estrategia la suele realizar una persona, lo que hace que el procesamiento de los datos sea subjetivo. Además, cabe la posibilidad de que los constructos de alto nivel no se modelen de forma correcta por no disponer directamente de datos técnicos.

Por su parte, una estrategia *bottom-up* parte de datos técnicos a fin de procesarlos y abstraerlos de forma gradual, bien agrupándolos o bien relacionándolos en constructos que representan partes significativas de una cirugía. En la literatura se mencionan muchas formas de realizar este análisis: modelos gráficos probabilísticos, técnicas de visión por computador, termografía, etc. A su vez, la principal ventaja de trabajar con estos datos—que están a un bajo nivel de abstracción—, es que el modelo resultante es detallado y fiel a la realidad. Sin embargo, la propia abstracción de los datos puede llegar a ser compleja e incluso hacer que los constructos resultantes disten de la realidad; al no conocer completamente el contexto en el que han sido adquiridos.

Por último, en lo que respecta a las dependencias de este componente, hay que decir que se ve afectado por la elección del nivel de granularidad (y por ende del tipo de adquisición de datos). Una estrategia *top-down* necesita trabajar con datos de alto nivel de abstracción, que a su vez deben adquirirse de forma manual. En contraposición, una estrategia *bottom-up* trabaja con datos de bajo nivel de abstracción lo que significa que han sido adquiridos de forma informatizada.

Tabla 3.9 – Datos extraídos sobre las características del componente de enfoque del modelado

(a) – Metodologías			
Metodología	Equivalencias	Descripción	
Top-down	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis (de datos a modelo): top-down [ps1] ▪ Top-down [ps2] 	Formular una visión general de una cirugía para luego analizar gradualmente su desarrollo en partes cada vez más pequeñas	
Bottom-up	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Análisis (de datos a modelo): bottom-up [ps1] ▪ Bottom-up [ps2] 	Obtener datos técnicos de una cirugía para procesarlos y abstraerlos a fin de construir gradualmente partes significativas de la misma	

(b) – Características de las metodologías			
Metodología	Ventajas	Inconvenientes	Otras características
Top-down	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Es flexible y permite obtener un modelo rápidamente [ps2] ▪ Ayuda a comprender el procedimiento a un nivel alto de abstracción, lo que [ps2 y ps3]: <ul style="list-style-type: none"> • Reduce la probabilidad de identificar erróneamente constructos de más bajo nivel de abstracción • Permite reutilizar los constructos de alto nivel ya creados 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dado que los datos de bajo nivel no están disponibles inicialmente, los constructos de alto nivel pueden estar descritos inadecuadamente [ps2 y ps3] ▪ Todo el proceso es subjetivo con respecto a la persona que lo realiza [ps2 y ps3] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Técnicas para transformar la información en datos [ps1]: <ul style="list-style-type: none"> • Lógica descriptiva • Instanciación del modelo • Árboles de decisión • Motores de inferencia • Motores de flujo de trabajo
Bottom-up	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El modelo resultante es detallado y fiel a la realidad [ps2 y ps3] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Abstraer constructos de alto nivel puede ser complejo y además puede que los resultados no se asemejen a la realidad [ps2 y ps3] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Técnicas para transformar la información en datos [ps1 y ps2]: <ul style="list-style-type: none"> • Modelos gráficos probabilísticos: redes bayesianas, modelos de Markov y filtros de Kalman • <i>Dynamic Time Warping</i> (DTW) • Técnicas de visión por computador • Termografía • Otros: análisis estadístico, análisis secuencial, minería de datos, etc

(c) – Dependencias del componente	
Dependencias	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Depende de la adquisición de datos elegida ▪ Depende del nivel de granularidad 	

Tabla 3.10 – Datos extraídos sobre características de la generalización

Otras características
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Formas de fusionar SPMS: <ul style="list-style-type: none"> • Métricas de similitud (granularidad, contenido, tiempo, transición o frecuencia de transición) [PS3] • Análisis estadístico (descartar aquellos constructos que se repiten o aquellos que tienen una baja probabilidad de ocurrir) [PS1,3] • Técnicas de minería y almacenamiento de datos [PS1,2,3] ▪ El uso de una de estas metodologías es totalmente subjetivo y únicamente depende de los objetivos del estudio y de la cantidad de constructos creados [PS2] ▪ Alternativa a la fusión: representar todas las posibles transiciones del flujo de trabajo [PS1]

5. Generalización

La generalización es el último componente del proceso de generación de un SPM y corresponde al análisis de varios flujos de trabajo de una misma cirugía para abstraer un modelo común que represente toda su variabilidad. La Tabla 3.10 recopila los datos extraídos para este componente. Los tres artículos primarios se limitan básicamente a exponer las formas en las que se pueden fusionar los constructos de un SPM. Así, la generalización puede conseguirse utilizando:

1. Métricas de similitud entre constructos basadas en niveles de granularidad, contenido, duración de tiempo, etc.
2. Análisis estadístico de los propios constructos; como por ejemplo el descartar aquellos intermitentes o aquellos que tienen una baja probabilidad de ocurrir.
3. Técnicas de minería y almacenamiento de datos.

La elección de una de estas técnicas es subjetiva y depende tanto de los objetivos del estudio como de la cantidad de constructos creados en los diferentes SPMS que se vayan a fusionar.

Por otra parte, a la par de la fusión cabe señalar que en PS1 se menciona una alternativa a crear un SPM generalizado consistente en representar todas las posibles transiciones dentro de un flujo de trabajo.

3.4.4. MQ4: ¿Cómo es la evaluación de un SPM?

La Tabla 3.11 resume la respuesta para esta pregunta. Tan solo los artículos PS1 y PS3 describen el proceso de evaluación de un SPM y además lo hacen de manera similar. Para empezar, cabe señalar que la evaluación de cualquier sistema o metodología consiste en estudiar su valor añadido a fin de ver su aceptación entre los usuarios finales (PS1).

En el caso de la evaluación de un SPM se distinguen dos términos: la validación y la verificación. El término validación se refiere a tratar de confirmar que el SPM generado es adecuado para el propósito con el que se ha creado, es decir, para comprobar si el modelo representa totalmente el flujo de trabajo de una cirugía o de una parte concreta de la misma. Por su parte, el término verificación se refiere a comprobar que el modelo generado refleja el procedimiento real al ponerlo en práctica. En cuanto al propio procedimiento de evaluación, ambos artículos primarios coinciden en que debe incluir tanto la validación como la verificación.

No obstante, no hay una metodología específica para llevar a cabo el proceso de evaluación y prueba de ello es que cada artículo propone una opción. Los autores de PS3 proponen utilizar una estrategia cualitativa o cuantitativa en función de las propiedades que tenga el SPM, sugiriendo que es la persona encargada de crear el modelo la que debe determinar el propio proceso de evaluación. Por su parte, los autores de PS1 referencian el

Tabla 3.11 – Aspectos a considerar para validar un sPM

Término	Descripción	Procedimiento	Otras características
Validación [PS1 y PS3]	Confirmación de que el modelo desarrollado se adecúa al propósito del estudio y de un análisis concreto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Seguir un conjunto de pasos propuestos por Pierre Jannin, Grova y Maurer (2006) [PS1]: <ol style="list-style-type: none"> 1. Especificar el objetivo a validar 2. Definir los parámetros de entrada 3. Calcular o estimar una referencia con la que comparar resultados 4. Definir unas métricas de validación 5. Definir el agente que utiliza el sistema ▪ Aplicar una estrategia cualitativa o cuantitativa [PS3] 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Se aplica a todos los componentes ▪ Tipos de datos: <ol style="list-style-type: none"> 1. Artificiales <ul style="list-style-type: none"> • Fuentes: simuladores virtuales; maniquíes; entornos simulados + Facilidad a la hora de crear, procesar, analizar y controlar los datos - Carecen de factor humano 2. Reales
Verificación [PS3]	Confirmación de que el modelo desarrollado refleja el procedimiento real al ponerlo en práctica	Aplicando una estrategia cualitativa o cuantitativa como en la validación	Lo mismo que para la validación

trabajo de Pierre Jannin, Grova y Maurer (2006) en donde se propone una metodología de evaluación que contempla cinco pasos:

1. Especificar el objetivo que se quiere validar dentro del contexto médico. Posibles ejemplos de ello son el retirar una catarata o el hacer un injerto de un hueso.
2. Definir aquellos parámetros que pueden influenciar el desempeño de la propia cirugía. Por ejemplo, el instrumental quirúrgico disponible o la existencia de patologías concretas.
3. Calcular o estimar un patrón de referencia sobre el que comparar resultados. Esta referencia puede ser tanto real como artificial y estar basada en el flujo de trabajo de un experto concreto o en un conocimiento a priori sobre el objetivo a validar.
4. Definir unas métricas de validación que permitan cuantificar la comparación de los resultados. Por citar algunos ejemplos, el número de movimientos erróneos cometidos, el tiempo empleado en completar el objetivo o las decisiones tomadas para cumplirlo.
5. Definir el agente que desempeñará el flujo de trabajo. Generalmente suele ser el cirujano, pero en realidad puede ser cualquier miembro del equipo médico.

Ahora bien, en lo que ambos artículos coinciden es que para el proceso de evaluación es necesario generar un conjunto de datos que se obtiene de diferentes fuentes, ya sean de cirugías reales o de cirugías “artificiales” a través de simuladores virtuales, maniquíes o entornos simulados.

3.5. Discusión

El resultado de este trabajo ha sido la identificación de las únicas tres revisiones de la literatura existentes hasta la fecha sobre el *Surgical Process Modelling* (sPMOD), las cuales revisan un total de 264 artículos publicados entre los años 2000 y 2018. El sPMOD es una

metodología que sirve para analizar sistemáticamente el flujo de trabajo de una cirugía y obtener un modelo denominado *Surgical Process Model* (SPM) cuya finalidad es representar este de forma precisa. Normalmente estos modelos se utilizan en sistemas de cirugía asistida con diversos propósitos:

- Evaluar el impacto de introducir nuevas herramientas, sistemas o técnicas en una cirugía.
- Gestionar, optimizar o evaluar el flujo de trabajo dentro de un quirófano;
- Elaborar análisis de requisitos.
- Entrenar y evaluar el desempeño de los cirujanos.

Prosiguiendo con los resultados, la generación de un SPM es un proceso en el que intervienen cinco componentes (ver Figura 3.2). En primer lugar está el nivel de granularidad, que determina el grado de detalle con el que describir el flujo de trabajo de una cirugía. De este modo, una cirugía se puede describir con un alto nivel de granularidad identificando todos los posibles movimientos que un cirujano puede hacer con la mano; o con un bajo nivel de granularidad identificando únicamente los objetivos quirúrgicos que se deben cumplir. Luego está la adquisición de datos, en la que se describe la forma en la que recoger los datos de dicho flujo (manual o automática) con vistas a modelarlos y analizarlos posteriormente. A continuación está la representación del modelo, que es el componente encargado de formalizar los datos para que puedan ser interpretados y utilizados. Con respecto a ello existen dos formas de representar los datos: bien de forma descriptiva a través de texto plano o bien de forma numérica utilizando algún lenguaje de modelado; desde lenguajes formales como las redes de Petri hasta lenguajes de proceso de negocio como el *Business Process Modeling Notation* (BPMN). El siguiente componente en la generación de un SPM es la estrategia de modelado, cuya finalidad es determinar la dirección en la que se deben analizar los datos adquiridos. En concreto, el enfoque del modelado tiene dos estrategias que son opuestas; la estrategia top-down (que trabaja con datos de baja granularidad para refinar detalles y conseguir obtener detalles) y la estrategia bottom-up (que trabaja con datos de alta granularidad para abstraer detalles y conseguir interpretar lo que significan dentro de la cirugía). En último lugar está el componente de generalización, cuya función es analizar un conjunto de SPM sobre un mismo flujo de trabajo; a fin de generalizar su información y obtener un modelo común que represente toda su variabilidad.

Por otro lado, una vez creado un SPM es necesario realizar un proceso de evaluación que permita estimar su valor a la hora de utilizarse en la práctica. En la evaluación de un SPM se distinguen dos aspectos que a pesar de ser similares tienen finalidades distintas. Por una parte está la validación con la que se pretende comprobar si el SPM creado representa el propósito con el que fue creado, y por otra la verificación con la que se pretende confirmar si el SPM refleja el procedimiento real que pretende modelar. Pero en contraste con estos aspectos, en la actualidad no existe una definición estándar de como evaluar un SPM. A pesar de ello, los artículos revisados proponen dos opciones: una en la que definir abiertamente una estrategia cualitativa o cuantitativa en función del objetivo que tenga el SPM, y otra basada en una serie de pasos con el objetivo de obtener un conjunto de datos que puedan compararse frente a una referencia.

Finalmente, y teniendo en cuenta todos los resultados resumidos anteriormente, ahora es posible estudiar la viabilidad del SPMOD como una opción para representar el conocimiento experto a través de simuladores hápticos.

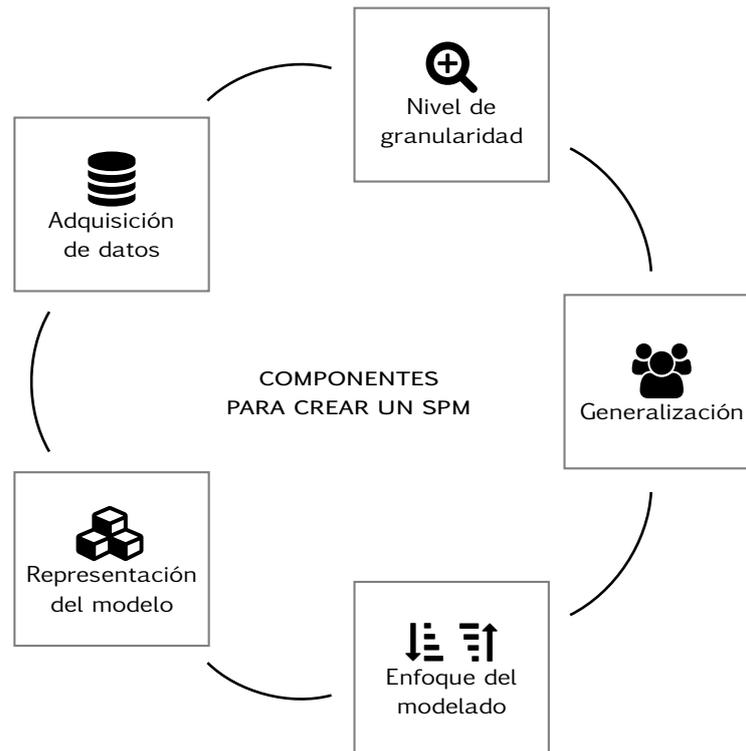


Figura 3.2 – Taxonomía de componentes que intervienen en el proceso de generación de un SPM

3.5.1. RQ1: ¿Cómo adaptar el sPMOD para modelar el conocimiento experto a través de un simulador háptico?

Antes de responder a esta pregunta cabe recordar que este trabajo de investigación busca modelar el conocimiento experto a través de un simulador háptico. En el Capítulo 2 se estudió este problema precisamente, determinando el rol del conocimiento experto dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje en cirugía. La conclusión a la que se llegó fue que dicho conocimiento puede representarse como una tarea de aprendizaje (definida a través de una serie de objetivos o resultados del aprendizaje) y una metodología de evaluación.

Dicho esto, para responder a esta pregunta es necesario revisar el proceso de creación de un SPM. El objetivo no es otro que el de analizar cada uno de los cinco componentes para determinar cual de sus metodologías es la más apropiada para crear un modelo del conocimiento experto.

Nivel de granularidad

El nivel de granularidad desempeña un papel básico en la generación de un SPM. Al ser el componente encargado de fijar el grado de detalle con el que el modelo va a trabajar, su decisión afecta en gran medida al resto de componentes. Por otra parte, en el Apartado 3.4.3 se presentaron algunos ejemplos de niveles de granularidad utilizados en la literatura (ver Figura 3.3). No obstante, cabe recordar que la elección es arbitraria y depende por completo del propósito que tenga el problema concreto que se quiere modelar.

Ahora bien, si se tiene en cuenta la naturaleza del conocimiento experto, cabe men-

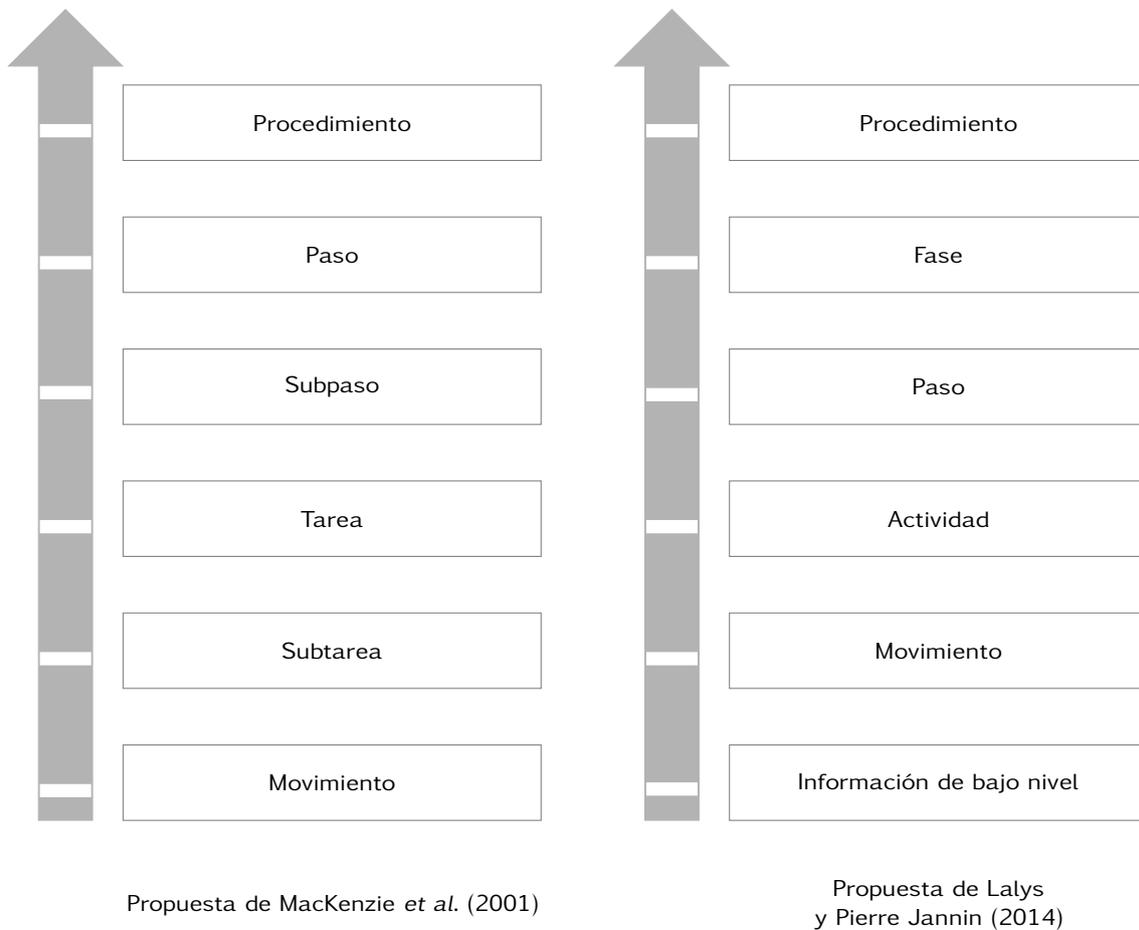


Figura 3.3 – Propuestas de niveles de granularidad mencionadas en la literatura de SPMD

cionar que es muy probable que a la hora de adquirir los datos el propio experto no sepa expresar correctamente todos los detalles técnicos al desarrollador. En su lugar, si que podrá definir aspectos de alto nivel de abstracción sin mayor problema. Por consiguiente, para utilizar este componente se propone el uso de uno o varios niveles de baja granularidad. Concretamente, y tomando como referencia las propuestas mencionadas en la literatura, lo más adecuado sería utilizar los pasos y/o las tareas/actividades; entendiendo como paso una secuencia de actividades para llevar a cabo un objetivo concreto dentro de la cirugía, y la tarea/actividad como una acción física que se lleva a cabo con las manos durante la cirugía.

Adquisición de datos

El proceso de recogida de datos es otro componente indispensable en la creación de un SPM, ya que es la forma de obtener los datos relativos al flujo de trabajo de la cirugía. Básicamente hay dos formas de llevar a cabo este proceso y es de manera manual o de manera informatizada. La principal diferencia entre ambas, es que mientras la adquisición manual obtiene datos de bajo nivel de granularidad procedentes de diferentes fuentes de información (que pueden estar fuera del quirófano), la adquisición informatizada obtiene datos de alto nivel de granularidad (pero únicamente utilizando el quirófano como fuente de información). Obviando el factor de la disponibilidad de recursos de equipamiento y humanos, la elección de una u otra metodología queda condicionada principalmente por

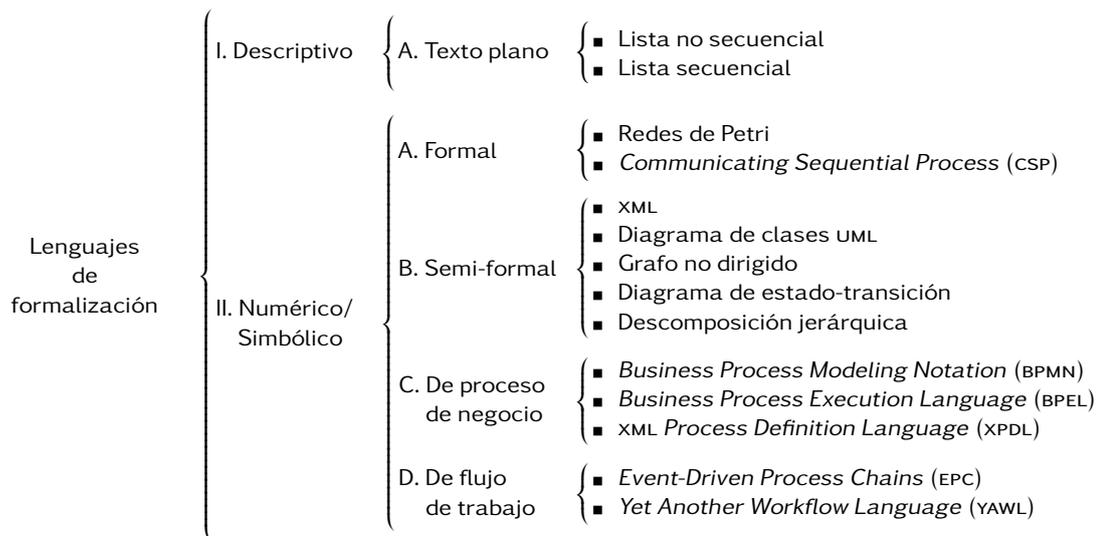


Figura 3.4 – Clasificación de lenguajes de modelado para formalizar la información de un SPM

el objetivo del problema a modelar y por el tipo de nivel de granularidad elegido.

Llegados a este punto, la opción más adecuada para adquirir los datos del conocimiento experto parece ser la manual. Esto no solo se debe a la elección de un bajo nivel de granularidad en el componente anterior, sino a que la adquisición manual sea la única de las dos metodologías que permita la interacción directa con el equipo médico (y por ende con el conocimiento experto); por ejemplo, a través de entrevistas personales. Además, adquirir datos de bajo nivel de granularidad no solo permitirá interpretarlos, sino también verificarlos con el propio experto. Sin embargo, también cabe señalar que no hay que descartar del todo la adquisición informatizada a largo plazo, ya que puede ser útil desde el punto de vista del proceso de aprendizaje. Concretamente, el tener datos precisos sobre los movimientos de un experto durante una cirugía permitiría comparar fielmente estos con el desempeño de los estudiantes.

Representación del modelo

Para poder transformar los datos adquiridos en información que el modelo pueda analizar, es necesario recurrir al componente de la representación. Este componente se aborda a través de la formalización, bien de forma descriptiva en texto plano o bien de forma numérica a través del uso de lenguajes de modelado (ver Figura 3.4). Con respecto a este último tipo de representación existen numerosas opciones para elegir, desde lenguajes formales o semiformales hasta lenguajes de modelado del proceso de negocio o del propio flujo de trabajo. La elección de un tipo u otro depende exclusivamente del problema a modelar y de las propias capacidades de expresión del lenguaje que se quiera utilizar.

Considerando estas características, es probable que exista más de una opción a la hora de utilizar este componente para modelar el problema del conocimiento experto. Por un lado, el adquirir manualmente datos de bajo nivel de granularidad hace que la opción coherente para representar el modelo sea la descriptiva. Pero el hecho de que el modelo deba representarse en un simulador háptico lo hace insuficiente, y restringe la expresión de su información a una representación numérica. Sin embargo, ahí aparece un nuevo obstáculo y es que existen numerosos lenguajes de modelado. Por una parte, se puede tomar como criterio el hecho de que el modelo propuesto en esta tesis trata de representar el proceso de enseñanza-aprendizaje; lo que hace indicar que se podría utilizar

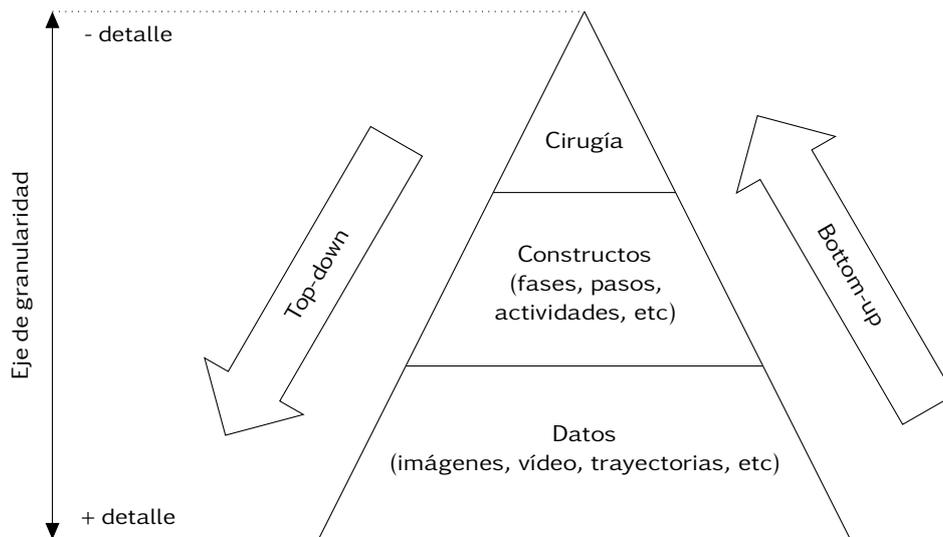


Figura 3.5 – Estrategias de modelado utilizadas en SPMOD

un lenguaje de proceso de negocio o de flujo de trabajo para formalizar este aspecto. Por otra parte, también se puede tomar como criterio el que el modelo necesite de los simuladores hápticos para existir; lo que deja caer que el uso de lenguajes semiformales como el UML son útiles para llevar a cabo su diseño e implementación.

En consecuencia y resumiendo, para aplicar este componente al problema de esta tesis es necesario utilizar una doble representación numérica: por una parte, un lenguaje semiformal para representar el conocimiento experto en un simulador háptico, y por la otra, un lenguaje de modelado del proceso de negocio para representar el flujo de trabajo de la enseñanza-aprendizaje en cirugía.

Enfoque del modelado

El enfoque del modelado es un componente que analiza los datos adquiridos para poder procesarlos con el objetivo de que se puedan utilizar en el modelo. Este análisis se realiza desde dos perspectivas (ver Figura 3.5): top-down (cuando se quieren obtener detalles a partir de una visión general de la cirugía) o bottom-up (cuando se quiere comprender con cierta abstracción las partes significativas de la cirugía partiendo de datos técnicos). La elección de una u otra perspectiva está condicionada tanto por el nivel de granularidad elegido como por el tipo de adquisición de datos realizado. Así, el trabajar con datos de baja granularidad hace que la adquisición sea manual y por consiguiente el análisis deba realizarse de “arriba a abajo” (top-down), mientras que trabajar con datos de alta granularidad obliga a que la adquisición sea informatizada y el análisis deba realizarse de “abajo a arriba” (bottom-up).

Dicho lo anterior, el top-down es la única opción a utilizar para llegar a modelar el conocimiento experto. Esto se debe exclusivamente a como se han elegido algunos de los componentes anteriores: un nivel bajo de granularidad y una adquisición de datos manual.

Generalización

Estrictamente hablando, la generalización no es un componente necesario en el proceso de generación de un SPM ya que su función es la de analizar varios SPM individuales para abstraer otro que sea común. Considerando esto, la mejor opción de cara a modelar el conocimiento experto es simplemente descartarlo del proceso de creación del modelo. La

razón es sencilla, pues el modelo que se busca debe reflejar exactamente el conocimiento experto de un solo individuo sin ningún tipo de generalización.

3.5.2. Amenazas a la validez de la investigación

El objetivo de este capítulo ha sido llevar a cabo una revisión de la literatura para identificar una metodología sistemática capaz de crear un modelo del conocimiento experto aplicable a simuladores hápticos; dando como resultado el *sPMOD*. La revisión de la literatura se ha realizado de forma sistemática basándose en la metodología de Kitchenham, Budgen y Brereton (2016). Pero esta revisión no ha sido una revisión sistemática a lo sumo, sino más bien un análisis sistemático de tres estudios secundarios sobre *sPMOD*. Aún con todo, el hecho de haber realizado una investigación implica que sus resultados no están exentos de limitaciones y de amenazas a la validez.

Así pues, como el trabajo de investigación se enmarca dentro de una tesis doctoral, es probable que la principal amenaza a la validez sea el sesgo del propio autor frente a todo el proceso de revisión de la literatura. Para mitigar este problema en la medida de lo posible, el capítulo se ha redactado siguiendo las recomendaciones de la guía *PRISMA* (Moher *et al.*, 2009), que a pesar de ser una guía para redactar revisiones sistemáticas, se ha utilizado con el objetivo de reflejar la transparencia y reproducibilidad de todo el proceso de investigación. Es más, para mitigar el sesgo, también se ha verificado el conjunto de artículos primarios a través de una búsqueda complementaria sobre tres de las principales fuentes de información utilizadas actualmente en el mundo de la investigación: Web of Science, Scopus y PubMed.

La otra amenaza a la validez presente en este capítulo es la elección de las fuentes de información utilizadas para redactarlo. Para obtener todos los artículos citados en el Apartado 3.2 se consultaron tres fuentes de información: Google Scholar, Web of Science y PubMed. En conjunto, estas fuentes cubren un amplio espectro de bases de datos de publicaciones; tanto de propósito general (Google Scholar y Web of Science) como especializada en el ámbito de las ciencias de la salud (PubMed). A pesar de que todas estas fuentes enlazan a su vez con otras bases de datos más específicas, el sesgo radica en que los resultados están sujetos a los que se han identificado a través de esas bases de datos.

3.6. Conclusiones

Durante el desarrollo de un simulador virtual intervienen multitud de personas de diferentes contextos, principalmente ingenieros y expertos. Uno de los problemas más frecuentes que surgen durante este proceso es la falta de comunicación entre profesionales, lo que, por norma general, desemboca en que el simulador tenga fallos inherentes a la información que pretende representar. Dado que un simulador virtual no deja de ser un tipo de software, este problema se suele mitigar realizando un análisis de requisitos durante su fase de diseño.

Un problema similar sucede en otras disciplinas como la cirugía a la hora de definir como completar una tarea con el objetivo de enseñarla u optimizar sus resultados. En estos casos se suele recurrir al *Hierarchical Task Analysis* (HTA), una metodología que representa el flujo de trabajo de una tarea concreta. Por sí sola esta metodología consigue su objetivo parcialmente, por eso suele complementarse con otras como el *Human Error Identification* (HEI), que identifica situaciones adversas dentro del flujo de trabajo. Sin embargo, en el caso particular de la cirugía ha surgido una nueva alternativa en la literatura llamada *Surgical Process Modelling* (*sPMOD*). A diferencia de la combinación de HTA y HEI, el *sPMOD* tiene como objetivo crear un modelo del flujo de trabajo de una cirugía para sistemas de cirugía asistida (llamado *Surgical Process Model* o simplemente *sPM*), siguiendo una metodología sistemática que abarca desde su diseño hasta su evaluación.

En este capítulo se ha revisado el estado de la cuestión sobre *SPMOD* a fin de entender como funciona para así poder aplicarlo al problema de modelar el conocimiento experto a través de un simulador háptico. Los resultados de esta investigación se resumen en los siguientes puntos:

- Hasta donde se ha investigado a fecha de febrero de 2020, existen tres revisiones de la literatura sobre *SPMOD*.
- El *SPMOD* crea modelos del flujo de trabajo de una cirugía de forma sistemática y que se integran en sistemas de cirugía asistida por ordenador para:
 - Evaluar el impacto de introducir en un quirófano nuevas herramientas, sistemas o técnicas.
 - Gestionar, optimizar o evaluar el flujo de trabajo dentro de un quirófano.
 - Elaborar un análisis de requisitos para sistemas de cirugía asistida.
 - Entrenar o evaluar el desempeño de cirujanos.
- El proceso de generación de estos modelos consta de cinco componentes:
 1. Nivel de granularidad. Grado de detalle de los datos que el modelo representa.
 2. Adquisición de datos. Forma manual o informatizada de recoger dichos datos.
 3. Representación del modelo. Formalización descriptiva o numérica de tales datos.
 4. Enfoque del modelado. Análisis de los datos recogidos para poder adaptarlos a una representación y convertirlos en información.
 5. Generalización. Análisis de un conjunto de modelos que describen de formas distintas un mismo flujo de trabajo con el objetivo de crear un modelo genérico que abarque todo.
- A la hora de evaluar un *SPM* hay que distinguir entre validación (confirmación de que el modelo cumple con el propósito para el que se creó) y verificación (confirmación de que el modelo simula correctamente el flujo de trabajo de la cirugía que pretende representar). Sin embargo, hoy en día no hay una manera concreta de evaluar un *SPM*, aunque sí se contemplan dos opciones:
 1. Definir una estrategia cualitativa o cuantitativa en función del propósito del modelo.
 2. Seguir un procedimiento cuyo objetivo es obtener un conjunto de datos que puedan compararse con otro tomado como referencia.

Aunque el *SPMOD* esté pensado para sistemas de cirugía asistida, lo cierto es que sus principios se pueden extrapolar a otro tipo de sistemas como los simuladores virtuales y, además, entre sus aplicaciones está el entrenamiento y evaluación de cirujanos. Por consiguiente, a partir de estos resultados se ha abordado el uso del *SPMOD* como metodología para crear un modelo del conocimiento experto a través de simuladores hápticos. En particular se ha propuesto un proceso de creación con las siguientes características:

- Nivel de granularidad bajo para poder definir la tarea de aprendizaje como una serie de pasos y actividades.
- Adquisición manual de los datos a través de entrevistas a expertos.
- Representación numérica del modelo a fin de poder crear un simulador háptico de la tarea de aprendizaje. En concreto se ha planteado formalizarlo mediante

la combinación de un lenguaje semiformal con otro de modelado de proceso de negocio.

- Enfoque top-down para modelar los datos.
- Prescindir del componente de generalización, ya que se busca un único modelo individual que refleje el conocimiento experto.

Capítulo 4

Modelo del conocimiento experto

El trabajo de investigación realizado hasta el momento ha servido tanto para definir el problema del conocimiento experto como para identificar una metodología capaz de crear un modelo de forma sistemática. Conforme a toda esta información recabada, ya solo resta ponerla en práctica para describir un modelo capaz de representar el conocimiento experto y que, además, permita su transferencia en términos de simuladores hápticos. El objetivo de este capítulo es precisamente el de presentar la propuesta de tal modelo, describiendo por un lado sus características internas y por el otro los procesos que definen su flujo de trabajo.

4.1. Introducción

En disciplinas como la cirugía, un experto es un individuo que con el tiempo ha adquirido la pericia necesaria para resolver situaciones y tareas de forma óptima. El Capítulo 2 determinó que el conocimiento de dicho experto está fundamentado sobre tres aptitudes o competencias profesionales relativas al intelecto, las destrezas psicomotoras y a los sentimientos. Debido a la importancia de las destrezas psicomotoras para el conocimiento experto, el capítulo también reveló como la literatura justifica que la adquisición de este tipo de conocimiento se realiza a través de la práctica deliberada, y esta, en el caso de la medicina y la cirugía, se pone en práctica a través de los simuladores. Tras analizar el rol del conocimiento experto en los procesos de enseñanza y aprendizaje, el capítulo concluyó con la siguiente hipótesis: es posible representar el conocimiento experto definiendo una tarea de aprendizaje y una metodología de evaluación. De este modo, para describir la tarea de aprendizaje es necesario definir una serie de objetivos o resultados del aprendizaje, y para la metodología de evaluación es necesario definir una serie de métricas que evalúen el cumplimiento de tales objetivos.

Conforme a estos requisitos, a continuación se describe la proposición del modelo buscado por esta tesis. Dicha descripción está dividida en dos partes. En una se presentan las características estáticas que definen el modelo a partir de los resultados obtenidos en capítulos anteriores, y en la otra se explica su flujo de trabajo, es decir, como funciona en la práctica con respecto a los usuarios finales.

4.2. Características

Para definir las características del modelo se ha utilizado la metodología identificada en el Capítulo 3: el *Surgical Process Modelling* (SPMOD). En concreto se ha aplicado la versión descrita en el Apartado 3.5 para describir el modelo a partir de cuatro componentes: nivel de granularidad, adquisición de los datos, representación del modelo y enfoque del modelado. Siguiendo este orden, los siguientes apartados abordan cada componente en

detalle definiendo las características que conforman el modelo.

4.2.1. Nivel de granularidad

Una tarea de aprendizaje refleja el conocimiento experto y, debido a su naturaleza, un experto describe su información utilizando un nivel bajo de detalle. Por esta razón, el modelo plantea la descripción de los datos de una tarea de aprendizaje desde tres niveles de granularidad distintos y basados en algunos de los propuestos por Lalys y Pierre Jannin (2014). Estos son:

1. *Procedimiento*. Lista ordenada de pasos que en conjunto forman un objetivo final. Es el nivel más alto de abstracción y representa una cirugía o una técnica quirúrgica concreta. Un ejemplo de cirugía puede ser la artroscopia de rodilla con el objetivo de retirar fragmentos sueltos de hueso y un ejemplo de técnica quirúrgica puede ser la facoemulsificación de cataratas con el objetivo de sustituir el cristalino opaco por una lente intraocular nueva.
2. *Paso*. Secuencia de actividades que en conjunto forman un subobjetivo quirúrgico. La granularidad de este nivel es algo más alta que la del anterior y cada paso representa un hito específico dentro del procedimiento que contribuye a completar el objetivo final. Por ejemplo, el objetivo de la facoemulsificación de cataratas se podría describir como una secuencia de cinco pasos:
 - a) Preparación (crear una vía de acceso en el ojo).
 - b) Capsulorrexia (retirar un trozo de la cápsula anterior).
 - c) Facoemulsificación (eliminar el cristalino).
 - d) Lente intraocular (introducir y posicionar una lente nueva).
 - e) Cerrar (cerrar la vía de acceso al ojo).
3. *Actividad*. Tarea manual que implica realizar una determinada acción con un instrumento quirúrgico sobre un elemento anatómico concreto, la cual altera—en consecuencia—el estado de este último. Es el nivel con más granularidad y, en conjunto, describen el flujo de trabajo de un paso concreto. Así pues, un ejemplo de actividad dentro del paso de “preparación” de la “facoemulsificación de cataratas” es el de utilizar una lanceta pequeña para cortar la córnea y que esta quede abierta en consecuencia (obteniendo así una vía de acceso para trabajar dentro del ojo).

A partir de estos niveles de granularidad se hace necesario especificar cuales son los datos sobre los que sustentar el modelo en la práctica. El objetivo de estos datos es construir una base de conocimiento o vocabulario común entre el ingeniero que modela el sistema y el experto que tiene el conocimiento. En el contexto del sPMOD es frecuente utilizar ontologías para este cometido y, por ello, la definición se ha realizado de forma descriptiva aunque sin utilizar ningún lenguaje específico para ontologías.

A partir de la hipótesis para representar el conocimiento experto, y las necesidades de los niveles de granularidad detallados anteriormente, el modelo agrupa todos los datos en un único constructo denominado unidad de aprendizaje. Cada unidad de aprendizaje contiene cuatro tipos de datos que se detallan a continuación (ver Figura 4.1).

1. Entidades

Las entidades son los elementos participantes con los que interaccionar dentro de una tarea de aprendizaje. Hay dos tipos:

- *Elemento anatómico*. Es cualquier parte del paciente—a nivel anatómico—, sobre la que trabajar durante el desarrollo de la tarea: desde áreas concretas del cuerpo como

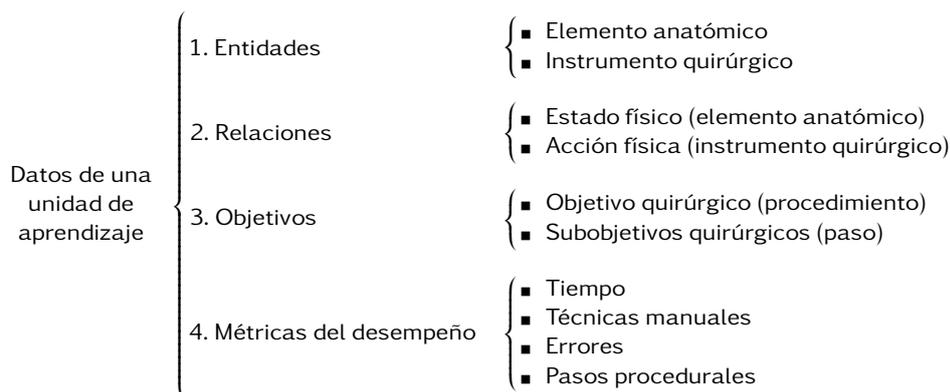


Figura 4.1 – Taxonomía de los datos que componen una unidad de aprendizaje

el abdomen o una pierna, pasando por órganos o partes de órganos (como el ojo y el cristalino) hasta llegar a tejidos orgánicos (músculo o hueso).

- *Instrumento quirúrgico*. Cualquier tipo de herramienta utilizada con las manos para desarrollar la tarea de aprendizaje, como por ejemplo un bisturí, una aguja de inyección o unas pinzas.

2. Relaciones

Las relaciones describen la manera de enlazar las entidades. Al estar ligados a estas últimas, también existen dos tipos:

- *Estado físico*. Conjunto finito de estados característicos por los que pasa un elemento anatómico durante el transcurso de la tarea de aprendizaje. Algunos ejemplos de estados físicos para un elemento anatómico pueden ser:
 1. Intacto (cuando aún no se ha interactuado con el ojo).
 2. Abierto (tras abrir una vía de acceso al interior del ojo).
 3. Cerrado (al tapar la vía de acceso).
- *Acción física*. Conjunto finito de acciones o movimientos que puede realizar un instrumento quirúrgico dentro del contexto de la tarea de aprendizaje. De este modo, por ejemplo, hay herramientas que solo pueden hacer una acción como el bisturí (cortar un tejido) o la aguja de inyección (introducir fluidos dentro de un área anatómica), mientras que herramientas como las pinzas pueden realizar varias acciones en diferentes instantes (cerrar las pinzas para agarrar un objeto, tirar de un objeto mientras están cerradas o simplemente abrir las pinzas). Cabe resaltar la importancia que tienen estas acciones para el modelo, pues son las desencadenantes de los posibles cambios de estado físico de un elemento anatómico.

3. Objetivos

El diseño de una tarea de aprendizaje se define en términos de un conjunto de objetivos o resultados del aprendizaje. En el modelo estos objetivos se describen como estados físicos a los que debe llegar un elemento anatómico. Puesto que la tarea de aprendizaje tiene varios niveles de granularidad, se distinguen dos tipos de objetivos:

- *Objetivo quirúrgico*. Representa, a nivel del procedimiento, la meta final de la tarea de aprendizaje. Dado que un procedimiento es en realidad una secuencia de pasos, el objetivo quirúrgico se define como el hecho de completar todos y cada uno de los subobjetivos quirúrgicos.

- *Subobjetivo quirúrgico*. Representa, a nivel de paso, una meta en el camino de completar un objetivo quirúrgico. Cada subobjetivo quirúrgico involucra a todos los elementos anatómicos participantes durante un único paso. De este modo, un subobjetivo quirúrgico está compuesto por todos los estados finales a los que tienen que llegar los elementos anatómicos involucrados exclusivamente en dicho paso.

4. Métricas del desempeño

El último aspecto relativo al conocimiento experto es la metodología de evaluación, la cual se encarga de evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos marcados para la tarea de aprendizaje. En el Apartado 2.3.2 se vio que la metodología de evaluación que suelen implementar los simuladores virtuales está basada en la definición de métricas; entendiendo estas como aquellos datos generados por el propio simulador para evaluar el desempeño de las destrezas técnicas. Al haber diferentes tipos, en ese mismo apartado se indicó una taxonomía de métricas propuesta por Schmitz *et al.* (2014) y basada en cuatro categorías: tiempo, técnicas manuales, errores y pasos procedurales. El modelo contempla estas cuatro categorías como métricas para evaluar el desempeño del estudiante, y se definen a nivel de paso para cada una de las entidades participantes. De este modo, se distinguen las siguientes métricas:

1. *Tiempo*. Mide el tiempo de interacción del estudiante sobre un elemento anatómico. También sirve para medir el tiempo de uso de un instrumento quirúrgico.
2. *Técnicas manuales*. Mide aspectos relativos a la interacción háptica, es decir, trayectorias o fuerzas ejercidas; bien desde la perspectiva del elemento anatómico o bien desde la del instrumento quirúrgico.
3. *Errores*. Mide la cantidad de acciones “no esperadas” sobre un elemento anatómico concreto; entendiendo el error como que el estudiante ha interactuado durante un paso concreto con un elemento anatómico que no debía. También contempla el caso de un “error clínico”, es decir, cuando un elemento anatómico ha llegado a un estado físico no contemplado por el modelo. Cabe señalar que la mera existencia de este último tipo de error implica el fracaso de la tarea de aprendizaje.
4. *Pasos procedurales*. Mide el cumplimiento de una lista de criterios para un elemento anatómico; entendiendo por criterio un estado físico opcional por el que debería de pasar el elemento anatómico en un paso determinado.

4.2.2. Adquisición de datos

Aunque existen muchas fuentes de información para obtener el conocimiento experto, en este caso se ha optado por la flexibilidad que ofrecen las entrevistas semiestructuradas (Robson y McCartan, 2016). La Tabla 4.1 recoge la planificación inicial y simplificada de una entrevista semiestructurada adaptada a la obtención del conocimiento experto sobre una tarea; de la que se han excluido tanto los comentarios introductorios como los de cierre por considerarlos secundarios de cara a obtener el modelo. Eso sí, durante los comentarios introductorios es necesario compartir con el experto la taxonomía de datos propuesta en el Apartado 4.2.1 de cara a obtener propiamente los datos del modelo.

Planificación de la entrevista

La planificación de la Tabla 4.1 consta de un conjunto de preguntas orientativas que sirven para obtener todos los aspectos de la tarea de aprendizaje (tanto estructurales como de comportamiento). Estas preguntas están dispuestas de mayor a menor nivel de granularidad, comenzando por identificar y describir el procedimiento y los pasos que forman la secuencia de objetivos de la tarea de aprendizaje, para luego concretar los

elementos anatómicos e instrumentos quirúrgicos que intervienen en cada uno de ellos. A partir de ahí, las preguntas tienen el objetivo de relacionar cada instrumento quirúrgico con cada elemento anatómico a través de las acciones que definen el flujo de trabajo de un paso. La última pregunta sirve para determinar una serie de métricas que permitan evaluar a posteriori el desempeño en cada una de las acciones y en cada uno de los pasos identificados. Al mismo tiempo, cabe señalar que al ser una entrevista semiestructurada el orden cronológico de las preguntas se puede modificar en función del desarrollo de la misma. Por ejemplo, antes de preguntar por los elementos anatómicos (pregunta 2) se podría preguntar por los instrumentos quirúrgicos (pregunta 4) o comenzar directamente describiendo el desarrollo de un paso (pregunta 6), y a partir de ahí derivar las entidades anteriormente mencionadas.

Datos a recoger

Es importante resaltar que durante el transcurso de la entrevista los datos deben ser recogidos manualmente mediante un formulario que sintetiza todos los aspectos del modelo. El formulario puede estar en formato físico o electrónico, pero debe contener los datos mostrados en la Tabla 4.2, que están separados en cuatro partes:

1. *Datos del procedimiento* (ver Tabla 4.2: (a)). Se recogen una única vez durante toda la entrevista y corresponden a diferentes aspectos del procedimiento, tales como su nombre, objetivo, duración y métricas empleadas para evaluar dicho objetivo. Así, por ejemplo, un experto puede describir la tarea de aprendizaje para realizar la técnica de “facoemulsificación de cataratas” como la sucesión de 6 pasos. El objetivo de dicha técnica es sustituir el cristalino con catarata por una lente intraocular o, en términos del modelo:

- Que la cámara posterior del ojo tenga una lente intraocular.
- Que el cristalino se haya eliminado.
- Que la cámara anterior esté vacía de viscoelástico.
- Que se haya cerrado la vía de acceso de la córnea.

Para evaluar este objetivo el experto puede establecer una métrica de tipo pasos procedurales como la de comprobar que los 6 pasos se han completado satisfactoriamente sin errores.

2. *Datos por cada entidad y relación* (ver Tabla 4.2: (b)). Se recogen tantas veces como sea necesario durante la entrevista y corresponden tanto a los instrumentos quirúrgicos y sus acciones como a los elementos anatómicos y sus estados físicos. Por ejemplo, una herramienta utilizada durante la facoemulsificación de cataratas es la sonda ultrasónica cuya finalidad es eliminar la catarata que ha hecho que el cristalino sea opaco. Esta herramienta puede realizar dos acciones:

- Vibrar, para que al entrar en contacto con el cristalino este se fragmente.
- Aspirar, para poder retirar los fragmentos de cristalino que quedan en suspensión dentro del ojo

El cristalino es a su vez un ejemplo de elemento anatómico dentro del procedimiento y puede pasar por tres estados distintos:

- Intacto, cuando todavía no se ha interactuado con él.
- Fragmentado, cuando el cristalino queda dividido en un determinado porcentaje.
- Eliminado, cuando se ha retirado el 100% de los fragmentos del cristalino.

Tabla 4.1 – Planificación de una entrevista para obtener el conocimiento experto

#	Pregunta	Indicaciones
1	¿Cómo se denomina el procedimiento o técnica quirúrgica que va a describir y cuál es, en pocas palabras, su objetivo?	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Esta pregunta trata de identificar el tipo de tarea de aprendizaje a modelar y su objetivo ▪ Es posible que el experto no defina claramente el objetivo en términos del estado de un elemento anatómico al principio, aunque esto se puede concretar más adelante
2	¿Qué pasos relevantes son a grandes rasgos necesarios para completar satisfactoriamente el objetivo de la [cirugía/técnica quirúrgica]?	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La finalidad de esta pregunta es identificar y definir la secuencia cronológica de objetivos que el experto sigue para completar una cirugía o técnica quirúrgica determinada ▪ Puede pasar algo similar a la pregunta anterior a la hora de que el experto defina el objetivo del paso, aunque en este caso se incidirá en la pregunta 7 ▪ Los pasos deben ceñirse exclusivamente a aquellos realizados dentro del período intraoperatorio
3	¿Sobre qué elemento/s anatómico/s trabaja durante el desarrollo del [paso]?	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Esta pregunta pretende identificar de forma precisa todos los elementos anatómicos involucrados en un determinado paso ▪ Si es necesario, ampliar la pregunta para identificar directamente los elementos involucrados en todo el procedimiento
4	¿Por qué estados pasa el [elemento anatómico] desde el inicio de un [paso] hasta cumplir el objetivo?	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La finalidad de esta pregunta es identificar todos los posibles estados que puede tener un elemento anatómico concreto de cara a confirmar el objetivo de un paso concreto ▪ De manera similar al caso anterior, es posible ampliar la pregunta para identificar directamente los estados de todos los elementos anatómicos con los que se trabaja durante el procedimiento
5	¿Qué instrumento/s quirúrgico/s utiliza para desarrollar el [paso]?	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Esta pregunta tiene como finalidad identificar las herramientas utilizadas dentro de un determinado paso ▪ De forma análoga a los casos anteriores, si es necesario es posible ampliar la pregunta para identificar directamente todas las herramientas utilizadas durante el procedimiento
6	¿Qué tipo de acciones puede realizar con el [instrumento quirúrgico]?	<ul style="list-style-type: none"> ▪ La pregunta sirve para cuantificar todas las posibles acciones que puede realizar una herramienta concreta
7	¿Cómo describiría el desarrollo del [paso]?	<ul style="list-style-type: none"> ▪ El objetivo de esta pregunta es determinar el flujo de trabajo (en orden cronológico) que desencadena el lograr el objetivo de aprendizaje fijado en un paso concreto ▪ La descripción debe realizarse en términos de actividades, relacionando cada acción de una herramienta con un elemento anatómico correspondiente. Para ello, se podría preguntar algo del estilo: <ul style="list-style-type: none"> • ¿Qué acciones realiza con el [instrumento quirúrgico] sobre el [elemento anatómico] para llegar al [estado]? • ¿Qué consecuencias tiene dicha acción sobre el [estado] del [elemento anatómico]?
8	¿Cómo evaluaría que una [actividad / paso / procedimiento] se ha realizado correctamente?	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Esta pregunta pretende asignar una o varias métricas bien a cada actividad (a fin de evaluar si esta es correcta o no), bien a cada paso (para comprobar si se ha completado correctamente), o bien a todo el procedimiento

Tabla 4.2 – Datos a extraer sobre el modelo durante una entrevista a un experto

(a) – Datos del procedimiento			
Dato	Tipo	Descripción	Ejemplo
Procedimiento	t	Nombre de la cirugía o técnica quirúrgica	Facoemulsificación de cataratas
Objetivo	t	Objetivo final del procedimiento. Definido en términos del estado/s de un elemento/s anatómico/s	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Córnea [cerrada] ▪ Cámara anterior [vacía] ▪ Cristalino [eliminado] ▪ Cámara posterior [lente intraocular]
Duración	n	Número total de pasos del procedimiento	6
Métricas	o	Medida/s para evaluar el desempeño del objetivo. A elegir entre las presentadas en el Apartado 4.2.1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pasos procedurales: <ul style="list-style-type: none"> • Completar satisfactoriamente los 6 pasos
(b) – Datos por cada entidad y relación dentro de la cirugía			
Dato	Tipo	Descripción	Ejemplo
Instrumento	t	Nombre de un instrumento quirúrgico	Sonda ultrasónica
Acciones	t	Lista de tareas manuales que un instrumento concreto puede realizar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vibrar ▪ Aspirar
Elemento anatómico	t	Parte del cuerpo, órgano, parte de un órgano o tejido involucrado en un determinado paso	Cristalino (ojo)
Estados	t	Situaciones por las que pasa un determinado elemento anatómico durante el procedimiento	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Intacto ▪ Fragmentado (%) ▪ Eliminado
(c) – Datos estructurales para cada paso			
Dato	Tipo	Descripción	Ejemplo
Paso	t	Nombre del paso	Facoemulsificación
Posición	n	Orden cronológico que ocupa un paso dentro del transcurso del procedimiento y con respecto a otros pasos	3
Objetivo	t	Subobjetivo quirúrgico o finalidad del paso dentro del procedimiento. Definido en términos del estado de un elemento anatómico	Cristalino [eliminado]
Métricas	o	Medida/s para evaluar el cumplimiento del subobjetivo quirúrgico. A elegir entre las presentadas en el Apartado 4.2.1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pasos procedurales (0% de fragmentos de cristalino remanentes)
(d) – Datos de comportamiento para cada paso			
Dato	Tipo	Descripción	Ejemplo
Paso	t	Nombre del paso	Facoemulsificación
Actividad	t	Asociación entre la acción física de un instrumento quirúrgico y un elemento anatómico dentro de un determinado paso	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Instrumento: sonda ultrasónica ▪ Acción física: vibrar ▪ Elem. anatómico: cristalino
Consecuencia	t	Cambio de estado físico de un elemento anatómico provocado por la realización de una actividad	Para el cristalino: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Antes: Intacto / Fragmentado (x%) ▪ Después: Fragmentado (x+y%)
Métricas	o	Medida/s de evaluación para valorar el desempeño de una actividad. A elegir entre las presentadas en el Apartado 4.2.1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Error (número de veces que se activa la sonda sobre un elemento distinto al cristalino)

Tipo: t: texto; o: opción; n: número

3. *Datos estructurales de un paso* (ver Tabla 4.2: (c)). Se recogen tantas veces como pasos tenga el procedimiento que describe el experto. Estos datos se corresponden con la parte estructural de un paso: nombre, posición dentro del procedimiento, objetivo y métricas para su evaluación. Por ejemplo, para un hipotético experto un paso puede ser el de la “facoemulsificación”, que ocupa el tercer lugar de un total de 6 y cuyo objetivo es eliminar el cristalino. Para evaluar este paso, el experto puede considerar necesario utilizar una única métrica de pasos procedurales: no deben quedar ningún tipo de fragmento de cristalino flotando dentro del ojo.
4. *Datos de comportamiento de un paso* (ver Tabla 4.2: (d)). Este tipo de datos se recogen tantas veces como actividades haya dentro del procedimiento. Estos datos describen como desarrollar un paso y en consecuencia representan todas las actividades necesarias para poder llevarlo a cabo. De este modo, para cada actividad se recoge la relación que hay entre un instrumento quirúrgico, su acción y el elemento anatómico al que afecta; además de la consecuencia que tiene dicha actividad sobre un elemento anatómico concreto y la métrica con la que evaluar su desempeño. A modo de ejemplo, y para el paso de “facoemulsificación”, una posible actividad es la provocada por la sonda ultrasónica al vibrar sobre el cristalino. Esta actividad puede desencadenar diferentes cambios de estado para el cristalino:
 - Si el cristalino está intacto la vibración lo fragmentará en un determinado porcentaje.
 - Si ya estaba fragmentado dicho porcentaje aumentará.

Finalmente, para evaluar la actividad se puede utilizar una métrica de tipo error (contar el número de veces que se activa la sonda sobre un elemento anatómico que no es el cristalino).

4.2.3. Representación del modelo

En términos prácticos, el objetivo principal del modelo es poder ser integrado dentro de un simulador háptico para así habilitar la transferencia y adquisición del conocimiento experto a través de este. Para las necesidades del modelo propuesto en este capítulo, la formalización debe abordarse utilizando un lenguaje semi-formal; y más concretamente el lenguaje UML (del inglés *Unified Modeling Language*).

UML es un lenguaje muy popular en el ámbito de la ingeniería del software y sirve para describir gráficamente sistemas software basados en el paradigma de la orientación a objetos (Fowler, 2004). Para ello, el lenguaje ofrece un conjunto de diagramas con los que describir aspectos estructurales y de comportamiento relativos al sistema software. En concreto se han utilizado tres tipos de diagramas UML:

1. *De clases*. Para describir las clases, atributos, características y relaciones que hay entre los elementos básicos que componen el sistema software (en este caso, el conocimiento experto).
2. *De paquetes*. Para describir, con un alto nivel de abstracción, la organización de todas las clases pertenecientes al sistema software.
3. *De secuencia*. Para representar la interacción entre los elementos del sistema software en relación con las actividades más importantes del mismo (por ejemplo, la supervisión de la tarea de aprendizaje o la evaluación del desempeño).

La descripción del modelo utilizando UML da como resultado un framework que, debido a su extensión, se detallará más adelante en el Capítulo 5.

4.2.4. Enfoque del modelado

El enfoque del modelado debe seguir una estrategia top-down debido al bajo nivel de granularidad de sus datos y a la elección de una metodología manual para la adquisición de estos últimos. Concretamente, de entre todas las metodologías top-down mencionadas en la literatura del sPMOD, se ha optado por una “instanciación del modelo” al estilo del trabajo de P. Jannin *et al.* (2003) que, a grandes rasgos, consiste en crear una “instancia” del modelo a partir de los datos obtenidos con el componente de adquisición establecido.

Para el objetivo de este trabajo, la instanciación simplemente consiste en expresar los datos adquiridos durante una entrevista con un experto en términos del lenguaje con el que ha sido formalizado (UML). Dicho de otra manera, como la representación UML del modelo está compuesta por clases, primero hay que instanciar las clases correspondientes a los datos adquiridos durante la entrevista al experto, y luego integrarlo todo en un simulador háptico.

4.3. Flujo de trabajo

Tras describir todas las características estáticas del modelo, ya solo falta explicar como funciona en la práctica. Puesto que la finalidad del modelo está ubicada dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje en un entorno simulado, para explicar su funcionamiento se ha recurrido a interpretar tal proceso como un proceso de negocio; de forma análoga a como el sPMOD representaba una cirugía a través de su flujo de trabajo. Concretamente se ha utilizado el lenguaje *Business Process Model and Notation* (BPMN) para su representación. Este lenguaje está estandarizado y se caracteriza por ofrecer una notación gráfica simple que facilita el entendimiento del flujo de trabajo de una actividad por parte de personas que no sean expertas en un dominio Dumas *et al.* (2018). Gracias a ello, los apartados siguientes explican mediante diagramas como los usuarios finales utilizan el modelo (en los procesos de enseñanza y aprendizaje respectivamente), y también como el modelo funciona internamente dentro de un simulador háptico.

4.3.1. Proceso de enseñanza

El proceso de enseñanza del conocimiento experto se representa en el diagrama BPMN de la Figura 4.2. Su objetivo es representar la transferencia de conocimiento experto, modelando y validando este a través de una unidad de aprendizaje utilizable mediante simuladores hápticos. Este proceso comienza con una entrevista semiestructurada entre el experto y el ingeniero siguiendo la metodología descrita en el Apartado 4.2.2.

En dicha entrevista, el experto describe con sus propias palabras la totalidad de la tarea de aprendizaje; descripción sobre la que posteriormente el ingeniero extrae datos característicos (conocimiento experto). A continuación, el ingeniero procesa esos datos para:

1. Convertirlos en información apta para instanciar un modelo de la tarea de aprendizaje (es decir, en una unidad de aprendizaje).
2. Almacenar esa información dentro de una base de conocimiento que a su vez contiene elementos de otras unidades de aprendizaje modeladas con anterioridad (estados físicos de los elementos anatómicos, acciones de los instrumentos quirúrgicos y métricas).

Es importante destacar la utilidad que tiene esta base de conocimiento para el ingeniero, ya que este puede ahorrar tiempo de desarrollo en la creación de nuevos simuladores al reutilizar cualquier elemento modelado previamente.

Continuando con el flujo de trabajo del proceso, el ingeniero instancia un nuevo

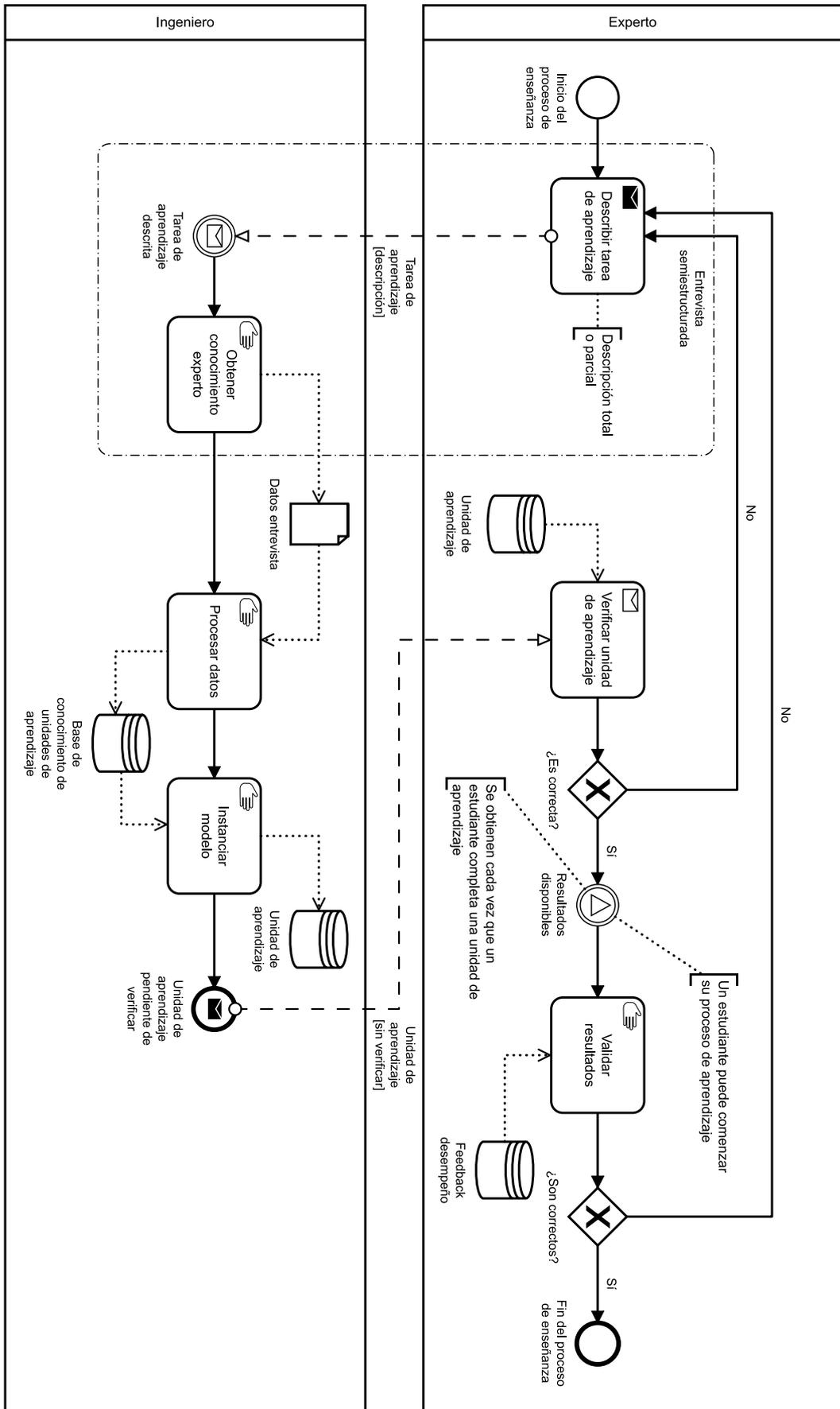


Figura 4.2 – Diagrama BPMN sobre el proceso de enseñanza del conocimiento experto

modelo de la tarea descrita a través de la base de conocimiento; dando lugar así a una primera versión de la unidad de aprendizaje. Sin embargo, el experto debe comprobar que la unidad se ajusta a su descripción antes de que un estudiante puede practicar con ella. En caso de no ser correcta, el experto deberá volver a entrevistarse con el ingeniero para corregir aquellos aspectos erróneos y este, a su vez, deberá volver a procesar los nuevos datos a fin de modificar la instancia inicial del modelo.

Finalmente, una vez que la unidad está disponible, el experto esperará a que uno o varios estudiantes utilicen el simulador háptico para disponer de resultados experimentales sobre el desempeño de estos. De este modo, y en base a los resultados obtenidos, el experto bien puede dar por válida la unidad de aprendizaje o bien puede refinar algún elemento particular de esta; en cuyo caso se volvería a repetir la modificación de la tarea de aprendizaje como ya se ha explicado anteriormente.

4.3.2. Proceso de aprendizaje

La Figura 4.3 muestra el diagrama BPMN que representa el proceso de aprendizaje del conocimiento experto por parte de un estudiante. Su objetivo es representar la adquisición del conocimiento experto a través de un simulador; es decir, de las estrategias mentales y destrezas técnicas necesarias para completar una unidad de aprendizaje. Este proceso, que sigue la esencia de la práctica deliberada, arranca cuando al menos existe una unidad de aprendizaje disponible.

Para aplicar la práctica deliberada, el estudiante comienza seleccionando voluntariamente una unidad de aprendizaje e iniciando una sesión a través del simulador háptico. Durante cada sesión de aprendizaje, el estudiante interacciona con el simulador a través de una o dos interfaces hápticas (en función de la unidad que esté practicando). Por su parte, el simulador supervisa y registra todas las interacciones con el propósito de evaluarlas posteriormente (en función de las métricas del desempeño). Finalmente, y al concluir la sesión de aprendizaje, el simulador háptico muestra al estudiante el feedback fruto de sus resultados. Así, y en función de estos, el estudiante bien puede dar por concluido el proceso de aprendizaje o bien puede repetir nuevamente el proceso tantas veces como considere necesario.

4.3.3. Proceso de ejecución de una unidad de aprendizaje

El diagrama BPMN de la Figura 4.4 presenta el proceso de ejecución de una unidad de aprendizaje, cuyo objetivo es precisamente describir el flujo de trabajo del framework dentro de un simulador háptico—pues es este el que representa el modelo en la práctica. El proceso comienza cuando un estudiante inicia una sesión de aprendizaje; momento en el que el simulador carga los datos correspondientes a la unidad seleccionada y avisa al framework de que esta última ha sido cargada. A continuación cada participante ejecuta dos procesos en paralelo: por un lado el simulador háptico lleva a cabo la propia simulación y por el otro el framework realiza la supervisión de la tarea de aprendizaje.

Con respecto al proceso de ejecutar la simulación, el simulador háptico realiza dos tareas en paralelo: (1) actualizar el estado de la propia simulación; y (2) procesar la interacción háptica. Estas dos tareas se ejecutan en bucle hasta que el framework indique que la unidad de aprendizaje ha terminado. Un aspecto a destacar de este bucle es que, con respecto a la tarea de procesar la interacción háptica, esta crea unos datos que sirven de entrada al framework. Estos datos son generados por el estudiante a través del uso de una o dos interfaces hápticas (en función de la unidad de aprendizaje seleccionada). Concretamente, los datos hacen referencia a la actividad derivada de la acción de un instrumento quirúrgico sobre un elemento anatómico.

Al mismo tiempo que el simulador háptico ejecuta la simulación, el framework ejecuta

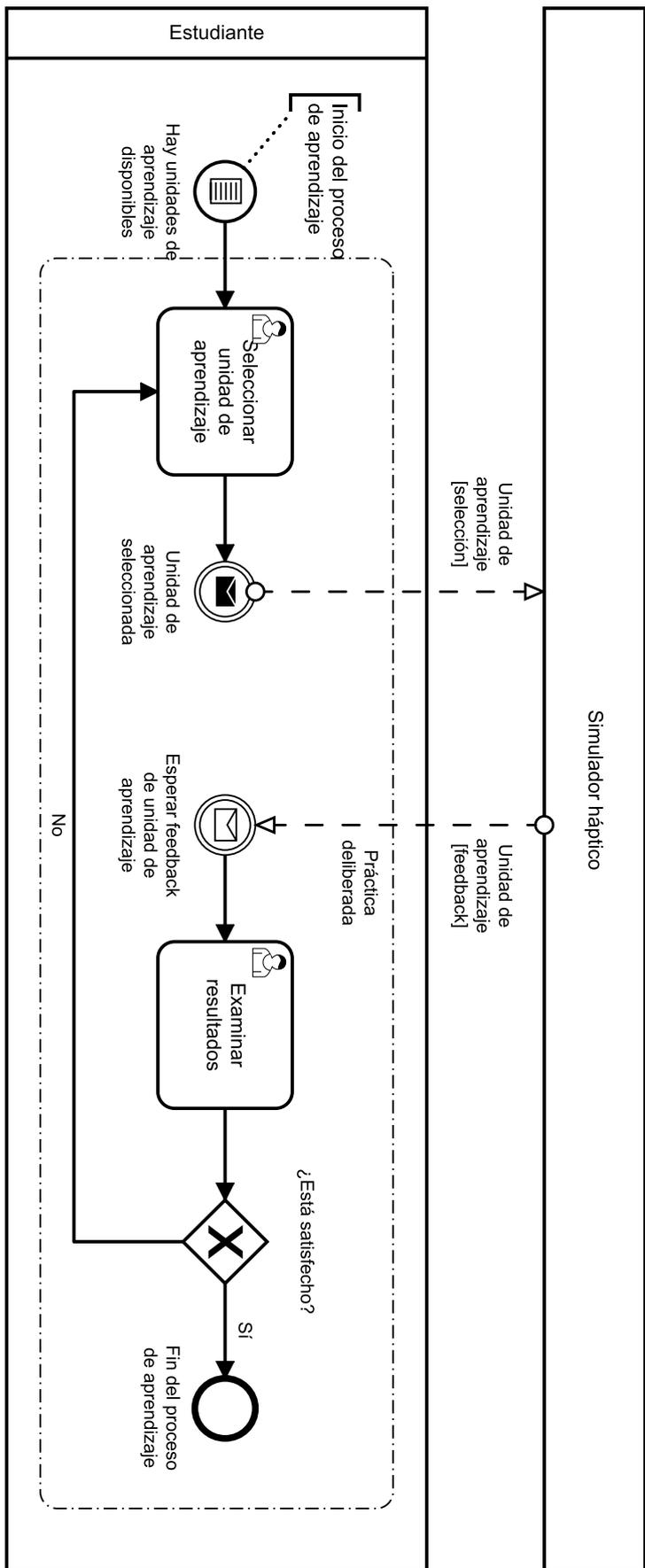


Figura 4.3 – Diagrama BPMN sobre el proceso de aprendizaje de conocimiento experto

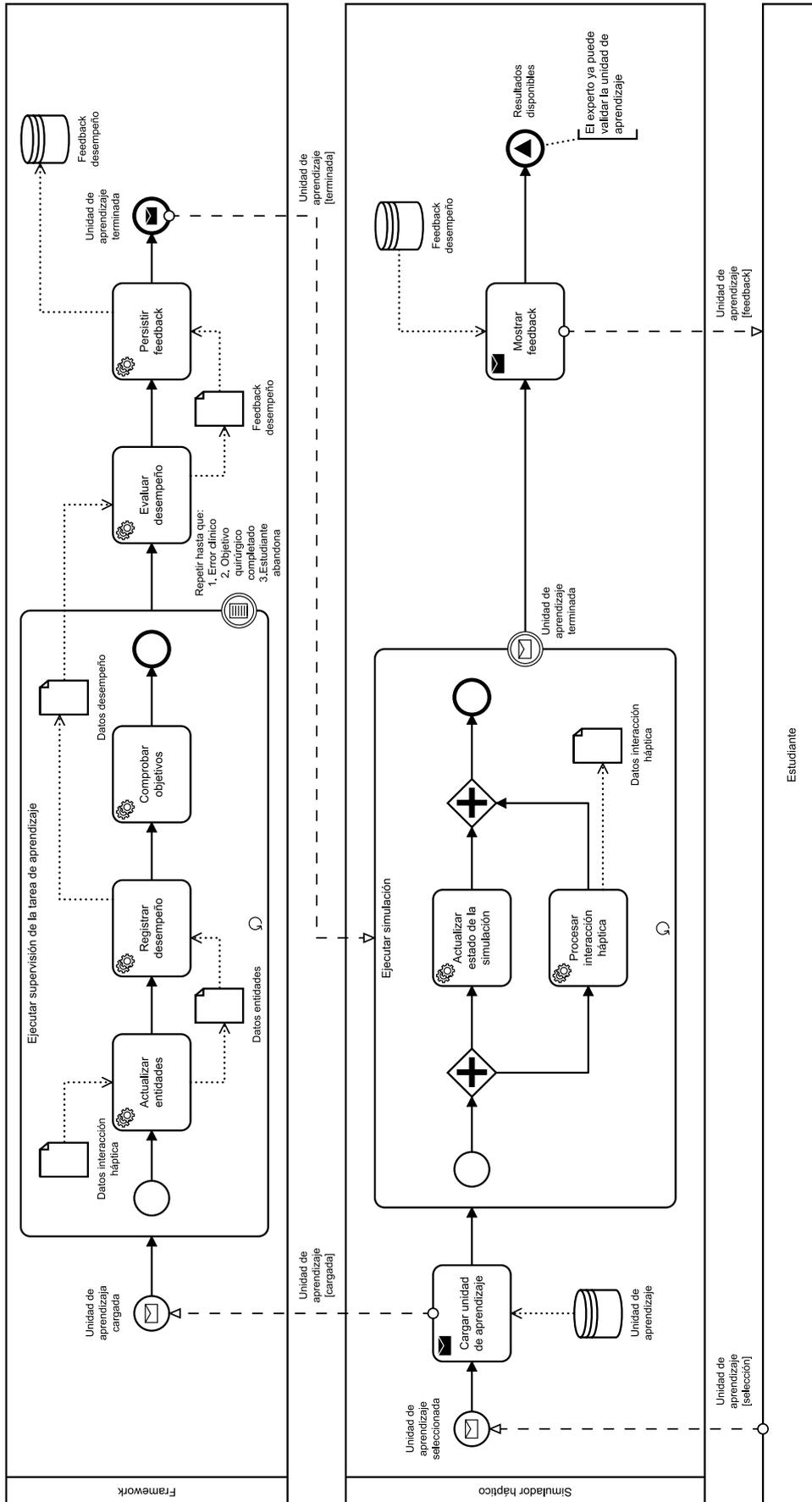


Figura 4.4 – Diagrama BPMN sobre el proceso de ejecución de una unidad de aprendizaje

propriadamente la supervisión de la tarea de aprendizaje utilizando los datos de la interacción háptica (que previamente fueron procesados por el simulador háptico). La supervisión de la tarea está definida por un bucle compuesto de tres tareas secuenciales:

1. Actualizar las entidades pertenecientes a la unidad de aprendizaje y con respecto a los datos de la interacción háptica.
2. Registrar, en términos de las métricas, el desempeño del usuario a partir de los datos que caracterizan a dichas entidades.
3. Comprobar si se han cumplido o no los objetivos de la tarea de aprendizaje.

Este bucle de supervisión se ejecuta continuamente hasta que se da una de las siguientes condiciones por parte del estudiante:

1. Ha cometido un error clínico.
2. Ha completado el objetivo quirúrgico de la tarea, o dicho de otra manera, ha completado todos los pasos o subobjetivos quirúrgicos de la tarea.
3. Ha decidido forzar la finalización de la unidad de aprendizaje.

Independientemente de la razón de finalización, y tras la supervisión de la tarea, el framework evalúa el desempeño a partir de los datos que ha ido registrando para convertirlos en feedback. Finalmente, el framework persiste dicho feedback y avisa al simulador háptico de que la unidad de aprendizaje ha terminado; concluyendo así su papel dentro del proceso.

Por su parte, cuando el simulador háptico recibe el mensaje de que la unidad de aprendizaje ha terminado, termina la ejecución de la simulación y luego muestra los resultados (feedback) al estudiante. Con ello, el simulador háptico ya dispone de resultados tanto para dar por finalizada la sesión de aprendizaje del estudiante como para que el experto pueda validar la propia unidad de aprendizaje. El hecho de que los resultados estén disponibles implica que el papel del simulador háptico en el proceso ha finalizado.

Capítulo 5

Formalización del modelo

El capítulo anterior aplicó la metodología SPMOD para proponer un modelo capaz de representar el conocimiento experto; explicando tanto sus características internas como su flujo de trabajo. Sin embargo, su representación quedó simplemente planteada. Este capítulo retoma ese aspecto, describiendo la formalización del modelo mediante el lenguaje UML y obteniendo como resultado un framework denominado *LEarning Expert Knowledge by Haptic Simulation* (LEEKHS). Este framework permite, en la práctica, implementar el proceso de enseñanza-aprendizaje de conocimiento experto en cualquier tipo de simulador háptico.

5.1. Introducción

LEarning Expert Knowledge by Haptic Simulation (LEEKHS) es un framework para la transferencia de conocimiento experto a través del uso de simuladores hápticos. Su principal objetivo es dar la capacidad a estos últimos de hacer las funciones que desempeñaría un experto en un entorno real: supervisar el desarrollo de una tarea de aprendizaje y evaluar el cumplimiento de los objetivos de esta. Para lograr esto, el framework actúa como una capa intermedia entre un simulador háptico y el modelo de conocimiento experto presentado en el Capítulo 4.

Su diseño está caracterizado por ser genérico, modular y extensible. Para hacer esto posible, el framework combina la programación genérica, diversos patrones de diseño de Gamma *et al.* (1995) y el paradigma Entidad Componente Sistema. De estas tres técnicas, es necesario hacer especial hincapié en la última ya que todos los elementos del framework se han diseñado en torno a ella. Por consiguiente y dada su relevancia, antes de comenzar a explicar los detalles del framework es necesario presentar brevemente dicho patrón para comprender mejor la como LEEKHS está diseñado.

5.1.1. Paradigma Entidad-Componente-Sistema

Un simulador virtual, y en especial uno háptico, puede verse como un sistema de tiempo real con una gran dependencia en su componente de interacción. En otras palabras, son sistemas que, al permitir la interacción de un usuario con su tecnología hardware y software, deben estar diseñados para soportar el intercambio de una gran cantidad de datos dentro de un período de tiempo limitado.

Desde el punto de vista del software, este tipo de sistemas suele estar compuesto por un conjunto de módulos o subsistemas específicos encargados de controlar prácticamente cualquier aspecto relativo a la ejecución del simulador: capa de abstracción del hardware, control de la lógica de la simulación, control de la parte gráfica, etc (Wiebusch y Latoschik, 2015; Raffailac y Huot, 2019). Debido a la naturaleza dinámica de un simulador,

idealmente el diseño software de sus módulos o subsistemas debe estar orientado a trabajar específicamente y de forma dinámica con los datos. No obstante, y parafraseando a Wiebusch y Latoschik, la arquitectura software de este tipo de sistemas suele estar caracterizada—entre otros muchos factores—por un fuerte acoplamiento entre sus elementos; haciéndoles especialmente sensibles ante cualquier cambio o refactorización del código. Es más, esos mismos autores señalan como culpable del problema a una de las limitaciones propias del paradigma de la orientación a objetos al trabajar con un gran volumen de datos, la herencia estática, que obliga a duplicar código a la hora de añadir nuevos elementos relacionados.

En el ámbito del diseño y programación de videojuegos este problema también está presente, y una forma de abordarlo son los sistemas de componentes basados en un paradigma orientado a los datos (Rabin, 2010; Nystrom, 2014). A diferencia de la orientación objetos tradicional, esta alternativa consiste en organizar un sistema basado en “componentes” independientes que, a través del mecanismo de agregación, permiten crear comportamientos complejos de forma dinámica. Los componentes son simplemente formas de encapsular los datos y su función es representar una relación de composición entre estos y una “entidad”; entendiendo esta última como un elemento que no encapsula datos propios ni tampoco define comportamientos sino que simplemente agrupa componentes. Así, mientras que en el paradigma orientado a objetos favorece la reutilización del código a través de la herencia, la organización en forma de componentes lo favorece utilizando la composición; evitando así el acoplamiento en casos que requieran trabajar con datos de forma dinámica.

Aunque esta técnica para diseñar software no está formalmente definida, varios autores de la literatura académica hacen referencia a un patrón equivalente basado en el principio de “composición sobre herencia” y denominado Entidad-Componente-Sistema o ECS (Wiebusch y Latoschik, 2015; Raffailac y Huot, 2019). Generalmente, este patrón suele implementarse utilizando el paradigma tradicional de orientación a objetos pero organizando su diseño entorno a tres elementos:

1. *Entidad*. Representa de forma genérica cualquier tipo de objeto perteneciente al entorno de un simulador virtual. Al ser una representación genérica, una entidad no posee ni hereda datos o comportamientos, sino que actúa como contenedor dinámico de *componentes*.
2. *Componente*. Representa un contenedor de datos que hace referencia a un aspecto o característica concretos de una entidad; careciendo de cualquier lógica o comportamiento sobre sus propios datos.
3. *Sistema*. Define el comportamiento encargado de modificar los datos de los componentes.

Por otro lado, cabe señalar que este patrón de arquitectura software proviene del ámbito de los videojuegos, hecho que Wiebusch y Latoschik; Raffailac y Huot utilizan para ilustrar su funcionamiento. De este modo, por poner un ejemplo análogo al que utilizan dichos autores, un simulador virtual diseñado con este patrón permitiría representar la fuerza de la gravedad dentro de una escena en tres partes:

1. Un componente de tipo “gravedad” definido a partir de las magnitudes de masa y posición.
2. Una entidad que representa a un objeto dentro del simulador y que al tener un componente de gravedad permite reaccionar ante la presencia de la fuerza de la gravedad.

3. Un sistema que implementa la ley de gravitación universal y que aplica a todas aquellas entidades que tengan asociadas un componente de tipo gravedad para modificar sus datos.

Trasladando esta idea a un simulador háptico, también es posible representar cualquier aspecto de la interacción háptica desde una perspectiva de ECS. Sirva de ejemplo un componente que represente la superficie material de un objeto a través de sus coeficientes de fricción, y un sistema que modifique dichos componentes para que cuando un usuario interactúe sobre entidades que contengan dichos componentes; el usuario pueda sentir que su superficie es lisa o rugosa.

5.2. Modelo conceptual de LEEKHS

La Figura 5.1 muestra el modelo conceptual detrás de LEEKHS, constituido por tres subsistemas: mecánica de la interacción háptica, evaluación del desempeño y supervisión de la tarea de aprendizaje. Cada subsistema desempeña un papel concreto dentro de un proceso latente encargado de transformar—de forma gradual—los datos de un simulador háptico en datos de una unidad de aprendizaje; siguiendo el proceso explicado en el Apartado 4.3.3. De este modo, cuando un estudiante utiliza un sistema háptico, en realidad está ejecutando una unidad de aprendizaje diseñada por un experto.

El primer subsistema de LEEKHS corresponde a la mecánica de la interacción háptica, cuyo papel es establecer un canal de comunicación entre el simulador háptico y el modelo de conocimiento experto (unidad de aprendizaje) para poder transformar los datos del primero en datos del segundo. Con “mecánica”, el sistema se refiere al proceso de retroalimentación de un sistema háptico (ver Apartado 2.3.1), el cual está definido por un conjunto de elementos y reglas que rigen el proceso de tocar e interactuar físicamente los objetos que hay dentro de un entorno simulado o escena virtual. En esencia, tales elementos son en realidad los movimientos y las fuerzas que transmite el hardware háptico y las reglas son simplemente aquellas operaciones encargadas de comprobar cuando el hardware háptico está en contacto o no con un objeto del entorno simulado.

El segundo subsistema, evaluación del desempeño, tiene una doble función: (1) por un lado transforma y registra los datos de la interacción háptica en términos de métricas del desempeño; y (2) por el otro se encarga de evaluar estos últimos una vez haya terminado el desarrollo de la tarea de aprendizaje.

El tercer y último subsistema es el más abstracto de todos, al ser el encargado de supervisar toda la tarea de aprendizaje. Para desempeñar esta función, el subsistema: (1) determina el inicio y finalización de la unidad de aprendizaje; (2) comprueba el cumplimiento de los objetivos de aprendizaje (a partir de los datos del subsistema de la interacción háptica); y (3) controla la ejecución de los otros dos subsistemas.

Por otro lado, cabe señalar que el framework representa los datos del conocimiento experto según se describieron en el Apartado 4.2.1; es decir, como una unidad de aprendizaje formada por cuatro tipos de datos definidos por el experto. El primero son las entidades, que hacen referencia a los elementos participantes en una tarea de aprendizaje—instrumentos quirúrgicos y elementos anatómicos—. El segundo tipo son las relaciones o mecanismos para enlazar las entidades—estados y acciones. El tercer tipo son los objetivos o resultados del aprendizaje definidos sobre las entidades (y más concretamente sobre los elementos anatómicos). El cuarto y último tipo son las métricas del desempeño para medir el grado de cumplimiento de los objetivos anteriores. De cara a formalizar estos datos, y con el fin de hacer que el framework pueda ser generalizable más allá del ámbito de la cirugía, cabe destacar que para el diseño de LEEKHS se han interpretado las entidades como una abstracción de lo que representan. De este modo, en lugar de instrumentos

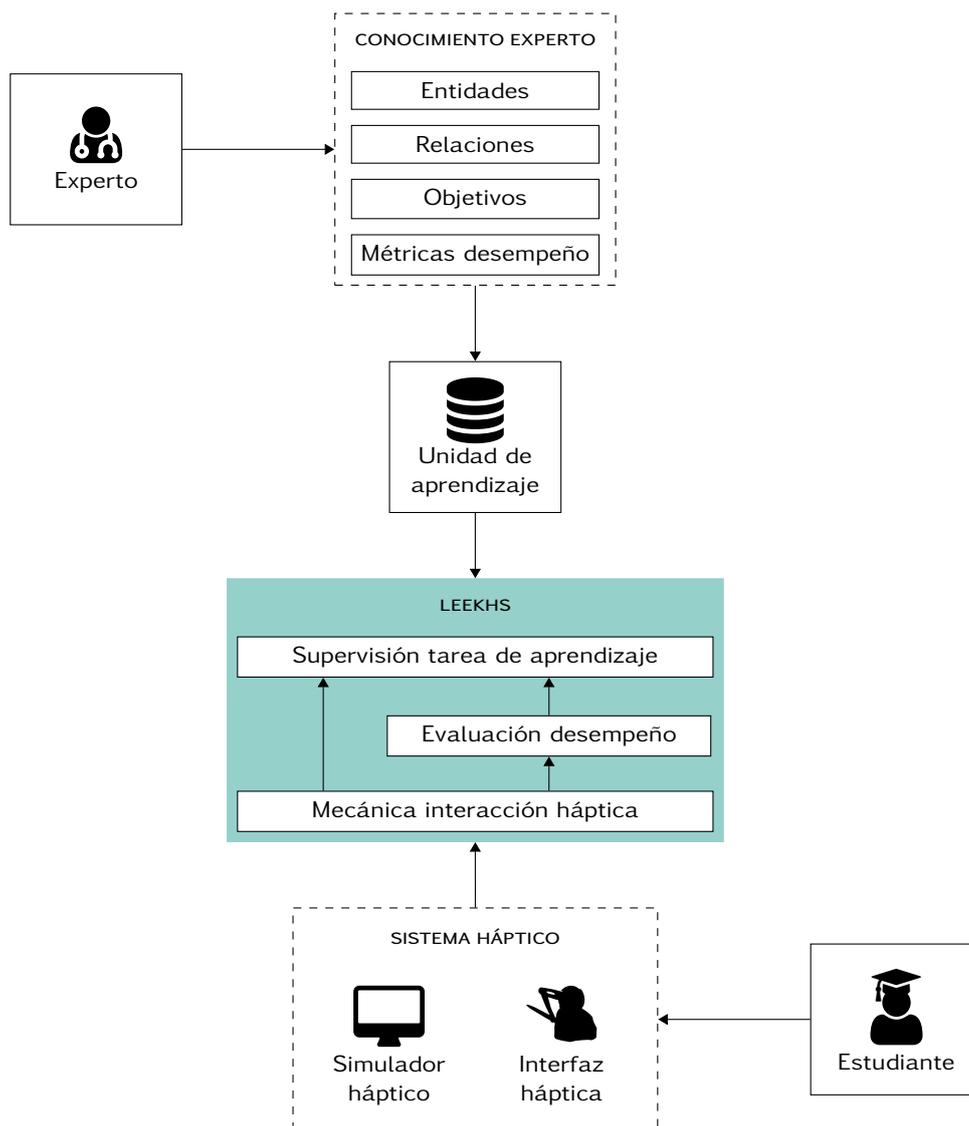


Figura 5.1 – Modelo conceptual de LEEKHS

quirúrgicos el framework trabaja con herramientas de interacción háptica; y en lugar de elementos anatómicos el framework trabaja con objetos “tocables”.

5.3. Arquitectura software de LEEKHS

El diseño de la arquitectura software de LEEKHS ha tenido en cuenta las necesidades de un simulador háptico y está caracterizado principalmente por ser modular y por aplicar el patrón ECS. Teniendo esto en cuenta, la Figura 5.2 muestra los cinco módulos o subsistemas que definen la funcionalidad de LEEKHS—junto con sus respectivas dependencias. Cada uno de los módulos tiene un rol específico asociado, pero no todos están involucrados en el proceso de transformación de los datos de un simulador en datos de la unidad de aprendizaje. De este modo, el framework distingue dos clases de módulos: los de bajo nivel (util y ecs), y los de alto nivel (mechanics, assessment y learnenv).

Dicho esto, lo que resta de capítulo describe individualmente cada uno de los módulos de LEEKHS; indicando tanto su propósito como su estructura. A mayores, cabe destacar que en el Apéndice A se han incluido el resto de detalles técnicos relativos a estos módulos;

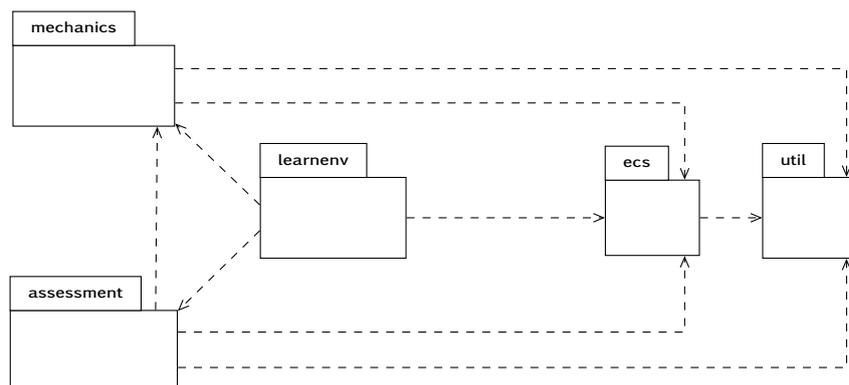


Figura 5.2 – Diagrama de paquetes del framework

concretamente los diagramas de colaboración entre participantes y algunos detalles de implementación a tener en cuenta.

5.3.1. Módulos de bajo nivel

Este tipo de módulos no representan ningún aspecto del proceso de enseñanza-aprendizaje del conocimiento experto, pero sirven como cimientos para poder definir la estructura de los módulos de alto nivel.

Utilidades (util)

Agrupar diferentes estructuras de datos genéricas para que otros módulos puedan definir algunos aspectos de sus respectivos participantes. Su diagrama de clases está reflejado en la Figura 5.3 y cuenta con tres participantes:

- **TypeRegistry.** Describe un registro de instancias de una familia de clases. En otras palabras, define una colección heterogénea de objetos perteneciente a una misma jerarquía. La colección está pensada para que solo pueda almacenar una única instancia de cada tipo concreto de dicha jerarquía. Para ello gestiona un registro o mapa asociativo donde cada par clave-valor contiene:
 1. Un identificador que representa unívocamente el tipo de clase concreta a almacenar (utilizado como clave).
 2. La propia instancia de esa clase concreta pero almacenada con el tipo de la superclase (utilizada como valor).

En relación a los valores del registro, es necesario recalcar la importancia del polimorfismo para que la clase pueda funcionar como un contenedor heterogéneo. Por esta razón, la clase ofrece un conjunto de operaciones parametrizadas que permiten gestionar el registro utilizando explícitamente los tipos concretos con los que trabajar.

- **BaseCollection.** Define una interfaz vacía que actúa como raíz para una familia de clases que encapsulan colecciones de objetos de un mismo tipo. En particular, cada clase que implemente la interfaz debe estar parametrizada y utilizar una colección de datos concreta como por ejemplo un par, una lista, un mapa, etc.

En el contexto del modelo esta clase se combina con la clase `TypeRegistry` para que, a través del polimorfismo, esta última pueda almacenar en su registro colecciones de objetos de un mismo tipo (ya que por definición solo puede almacenar una única instancia de cada tipo concreto).

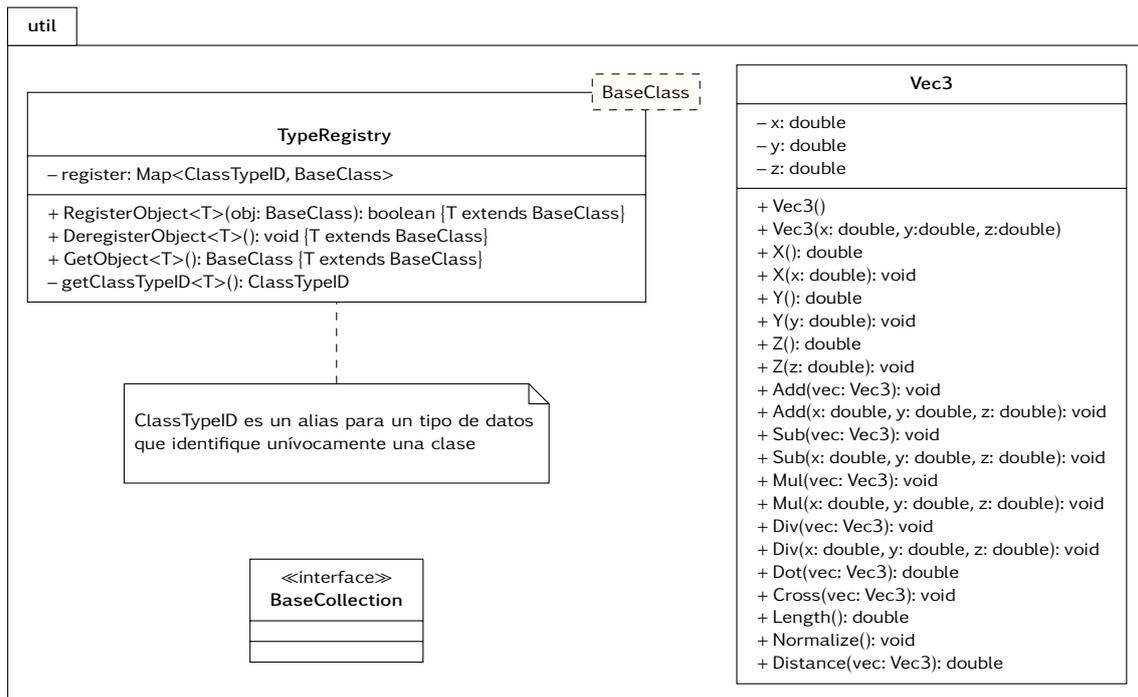


Figura 5.3 – Diagrama de clases del módulo de utilidades

- **Vec3.** Representa un vector tridimensional junto con sus operaciones básicas. En el ámbito del modelo funciona como una estructura de datos atómica para representar información relativa a la interacción háptica dentro de un escenario virtual (concretamente posiciones y fuerzas).

Entidad-Componente-Sistema (ecs)

Define la estructura básica del patrón de arquitectura software ecs para que el resto de módulos puedan describir aspectos del proceso de enseñanza-aprendizaje con un simulador háptico en términos de entidades, componentes y sistemas. La Figura 5.4 presenta su diagrama de clases, cuya estructura la definen seis participantes:

- **Entity.** Describe una entidad—en el sentido del patrón ecs—, mediante dos atributos:
 1. Un identificador numérico que representa de forma genérica y unívoca un elemento existente dentro de una escena virtual del simulador háptico.
 2. Un registro de los componentes que están asociados a dicho elemento.

Con respecto al identificador, comentar que la propia clase tiene la responsabilidad de generar y almacenar un valor único para cada instancia. En cuanto al registro, cabe notar que este utiliza la clase `TypeRegistry` del módulo de utilidades para garantizar que cada instancia de la clase solo tiene asociado un objeto de cada tipo de componente concreto. Otro aspecto a recalcar y relacionado con el registro es que el módulo centraliza la gestión de los componentes en la clase `SimulationContext`. En consecuencia, el papel del registro no es gestionar componentes sino simplemente conocer cuales están asociados a la entidad.

- **Component.** Clase base para definir un componente en el sentido del patrón ecs. Todo componente está caracterizado porque:

- Cada instancia pertenece a una única entidad.
- Cada especialización actúa como un simple contenedor de datos para describir un solo aspecto o faceta de una entidad.
- Cada especialización define una operación para copiar todos sus datos a otro componente del mismo tipo.

Siguiendo el patrón `ecs`, es importante recalcar que todo componente concreto carece de cualquier tipo de comportamiento y/o lógica sobre sus datos; ya que esto es una tarea delegada a un sistema específico (ver `System`).

- `System`. Representa un sistema en el sentido del patrón `ecs`, especificando una interfaz donde implementar la lógica o el comportamiento que procese y/o modifique los datos de uno o varios tipos de componentes. Es más, el diseño del módulo refleja que dicho procesamiento solo aplica a aquellos componentes pertenecientes a un contexto dado (ver `SimulationContext`).
- `SimulationContext`. Representa un contexto particular del simulador háptico que engloba total o parcialmente al conjunto de elementos existentes dentro de una escena virtual. De este modo un contexto es, en términos del patrón `ecs`, una colección de entidades y también una colección de componentes asociados a dichas entidades. Esta clase juega un papel fundamental dentro del modelo ya que tiene dos funciones:
 1. Gestionar una colección de entidades activas dentro de una escena virtual.
 2. Gestionar un repositorio donde almacenar todos los componentes instanciados y asociados a tales entidades (ver `ComponentRepository`).
- `ComponentRepository`. Representa un almacén de componentes. Su única función es gestionar un registro que almacena colecciones de componentes organizadas por cada tipo concreto. Para garantizar esto precisamente (almacenar una sola colección de componentes por cada tipo), el registro utiliza la clase `TypeRegistry` del módulo de utilidades en combinación con la clase `ComponentCollection`.
- `ComponentCollection`. Define una colección de componentes de un tipo concreto a través de un array parametrizado.

5.3.2. Módulos de alto nivel

Este tipo de módulos sirven para representar las distintas fases de transformación de los datos de un simulador háptico en datos de una unidad de aprendizaje.

Mecánica de la interacción háptica (mechanics)

Define una capa de abstracción por encima de un simulador háptico para representar ciertos datos del conjunto de reglas que rigen el proceso de la interacción háptica. En particular, dicha capa tiene las siguientes responsabilidades:

- Representar la interacción háptica desde el punto de vista de sus elementos participantes: una herramienta que interactúa dentro de una escena virtual y un objeto que responde a las acciones de esta primera.
- Establecer un mecanismo de comunicación entre el modelo y el simulador para obtener de este último, y en cualquier instante de tiempo, los datos con los que representar en el modelo los elementos involucrados en el proceso de interacción háptica.
- Supervisar el proceso de interacción háptica en el simulador, notificando cada vez

que dos elementos del simulador tengan o dejen de tener contacto directo, y también actualizando en consecuencia su representación interna dentro del modelo.

El hecho de representar dichas responsabilidades hace que la estructura del módulo sea extensa. En consecuencia, para presentar estos detalles se van a agrupar los participantes del módulo en varios diagramas atendiendo a su funcionalidad. De este modo, en primer lugar están los participantes representados en el diagrama de clases de la Figura 5.5, que están involucrados en el proceso de interacción háptica:

- **ForceFeedbackComponent**. Componente asociado exclusivamente a entidades cuya finalidad sea, bien representar la mano con la que usuario manipula el dispositivo háptico, bien representar el propio dispositivo háptico. Desde el punto de vista del patrón `ecs` representa la capacidad de una entidad para controlar físicamente un dispositivo háptico o de realimentación de fuerzas (ver `HapticInterfaceAdapter`).
- **HapticInterfaceAdapter**. Declara una interfaz para definir algunos datos procedentes de un dispositivo háptico. Concretamente, aquellos que describen la interacción háptica entre este y un objeto virtual de una escena del simulador. Estos datos son:
 - La posición del efector final en la escena.
 - La fuerza de contacto ejercida por el dispositivo.
 - El estado físico del botón principal del dispositivo (en el caso de disponer de uno).
 - El avatar o proxy utilizado para representar al efector final dentro de la escena.
 - La situación del proxy desde el punto de vista del contacto con otros objetos virtuales de la escena.
 - En el caso de haber contacto, el propio objeto de la escena con el que ha colisionado el proxy.

Cabe señalar que toda esta información procede de un objeto ajeno al modelo; el cual reside en el simulador y representa un dispositivo háptico conectado. Por consiguiente, el objetivo de esta interfaz es “envolver” la funcionalidad de dicho objeto externo para que otras clases del modelo puedan utilizar sus datos. Esta finalidad corresponde con la intención del patrón de diseño `Adapter` descrito por Gamma *et al.* (1995), el cual permite comunicar dos clases que a priori son incompatibles entre sí.

- **ToolComponent**. Componente asociado exclusivamente a entidades que representen herramientas utilizadas con las manos y que sirven para interaccionar hápticamente dentro de una escena virtual. Desde el punto de vista del patrón `ecs` representa la capacidad de una entidad para interaccionar hápticamente con otras. Los datos que describen tal capacidad son:
 - Tipo de herramienta (`ToolType` en el diagrama).
 - Conjunto finito de acciones físicas que la herramienta puede realizar, vistas desde la perspectiva de la interacción háptica (`PhysicalAction` en el diagrama).
 - Estado interno de la herramienta en un instante de tiempo (ver `ToolState`).

Con respecto al tipo de herramienta, el modelo diferencia tres (ver Tabla 5.1):

1. *Stylus* (STYLUS). Describe la interacción a través de una herramienta cuya forma se asemeja a la de un cilindro con punta (por ejemplo un dedo, un bisturí o una

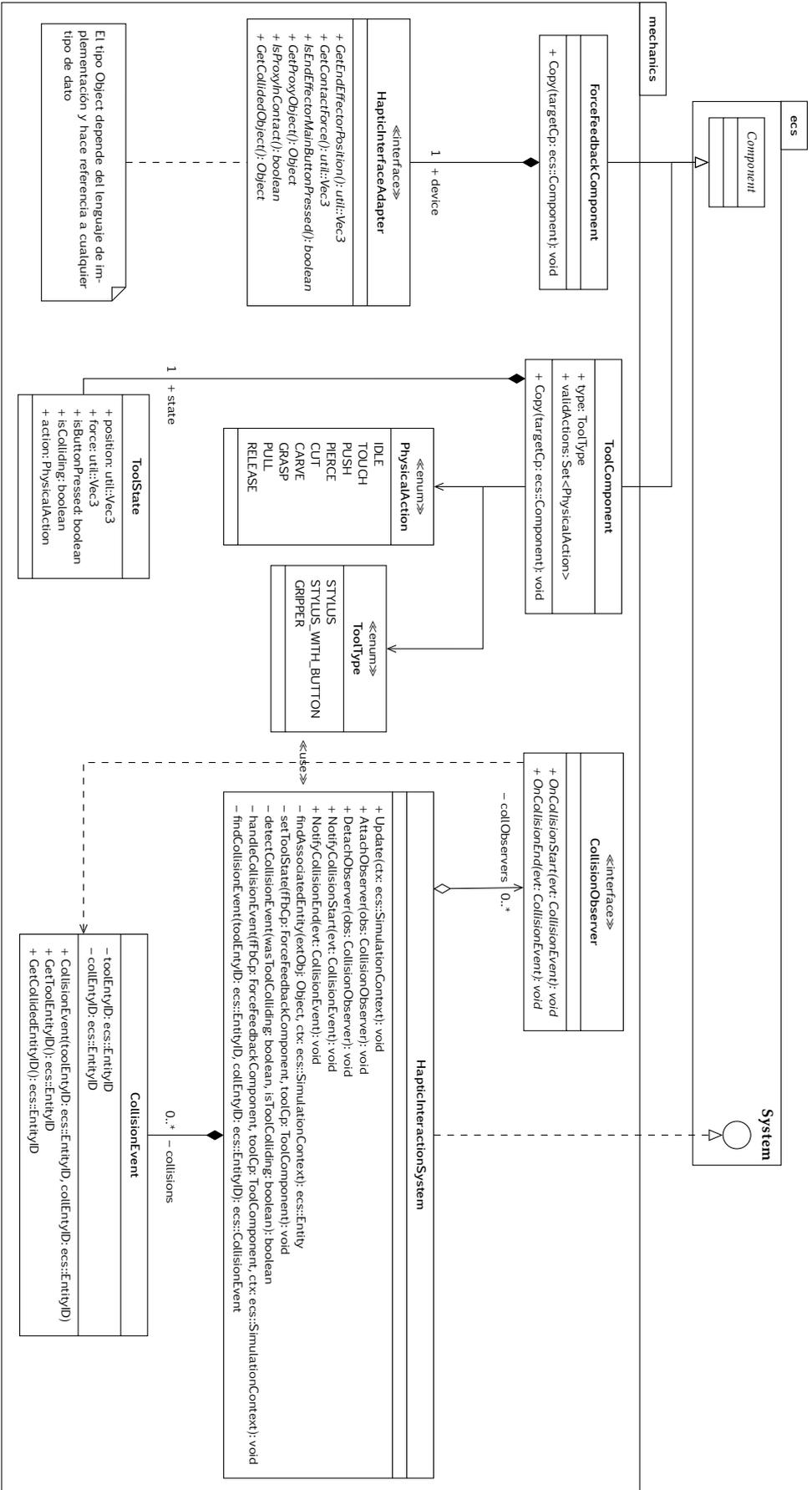


Figura 5.5 – Diagrama de clases del módulo de mecánica de la interacción háptica (parte 1): sistema, componentes y clases involucradas en el proceso de interacción háptica

Tabla 5.1 – Tipos de herramientas de interacción háptica y sus características

Herramienta	ToolType	Forma de interacción	Ejemplos	Posibles acciones
Stylus	STYLUS	Un punto de contacto	Dedo, bisturí, aguja	Mover, tocar, empujar, perforar, cortar
Stylus con botón	STYLUS_WITH_BUTTON	Un punto de contacto (+ efecto háptico)	Sonda de ultrasonidos, taladro quirúrgico	Tallar, (+ las de un stylus)
Pinza	GRIPPER	Dos puntos de contacto	Pinza, tijeras	Coger, tirar, soltar, (+ las de un stylus)

aguja). Por su naturaleza, esta herramienta interacciona hápticamente con otro objeto virtual mediante un único punto de contacto, lo que significa que posee un conjunto limitado de movimientos. Así, cuando la herramienta no está en contacto con otro objeto puede o bien permanecer quieta o bien tener libre movimiento dentro de una escena virtual; mientras que al entrar en contacto con un objeto puede empujarlo, perforarlo o cortarlo.

2. *Stylus con botón* (STYLUS_WITH_BUTTON). Similar al tipo anterior pero con el añadido de que la herramienta tiene un botón que permite describir una acción o efecto háptico adicional durante la interacción (como es el caso de una sonda ultrasónica o de un taladro quirúrgico). Además de las acciones propias de un stylus, este tipo de herramienta permite tallar partes de la superficie de un objeto virtual al estar en contacto con este.
3. *Pinza* (GRIPPER). Describe la interacción a través de una herramienta de tipo pinza con la que agarrar un objeto o una parte de la superficie de este. A diferencia de los dos tipos anteriores, el hecho de poder agarrar implica que la interacción con otros objetos virtuales queda representada mediante dos puntos de contacto (uno por cada extremo de la pinza). Así pues, además de las acciones físicas de un stylus normal, este tipo de herramienta puede coger y soltar un objeto virtual o incluso agarrarlo para tirar de él.

En cuanto a las acciones físicas de las herramientas, la Tabla 5.2 resume los tipos y descripción—desde el punto de vista de la interacción háptica—, contemplados por el modelo. Esta información de las acciones está basada en el concepto de acción quirúrgica propuesto en los trabajos de MacKenzie *et al.* (2001) y Rosen *et al.* (2001). No obstante, cabe decir que es obvio que el conjunto finito de acciones que una herramienta puede realizar depende de su tipo. Así, por ejemplo, un bisturí está definido en términos del modelo como una herramienta de tipo STYLUS con el conjunto de acciones {IDLE, TOUCH, PIERCE, CUT} y una aguja como una herramienta de tipo STYLUS con el conjunto de acciones {IDLE, TOUCH, PIERCE}.

- ToolState. Describe, en un instante de tiempo concreto, el estado interno de una herramienta a partir de los siguientes datos:
 - La posición dentro de una escena virtual del punto de interacción de la herramienta.
 - La fuerza de contacto ejercida.
 - El estado físico del “botón principal” en caso de tenerlo. Este dato solo es válido cuando la herramienta es de tipo STYLUS_WITH_BUTTON (para indicar si está

Tabla 5.2 – Tipos de acciones físicas y sus descripciones desde el punto de vista de la interacción háptica

Acción	PhysicalAction	Descripción
Inactiva/mover	IDLE	Ausencia de todo tipo de contacto con otros objetos virtuales. Abarca tanto el hecho de permanecer inmóvil como el de tener libre movimiento dentro del espacio de la escena virtual y sin estar en contacto alguno con otros objetos
Tocar o palpar	TOUCH	Estar en contacto estático con un objeto virtual: bien por el hecho de permanecer inmóvil tocando con su superficie, bien por partir de un estado previo en el que no había contacto
Empujar	PUSH	Partiendo de un contacto estático con un objeto virtual, hacer fuerza sobre él en la misma dirección en la que el usuario mueve la herramienta
Perforar	PIERCE	Partiendo de un contacto estático con un objeto virtual, hacer fuerza hasta atravesar su superficie en un punto concreto (sin que el objeto se mueva físicamente de su posición)
Cortar	CUT	Separar la superficie de un objeto virtual en dos: bien por el simple hecho de entrar en contacto con él (por ejemplo con unas tijeras), bien por existir un contacto dinámico con él fruto del movimiento sobre la superficie de este (por ejemplo con un bisturí)
Tallar	CARVE	Partiendo de un contacto estático con un objeto virtual, hacer fuerza para erosionar, cortar o pulir un trozo de su superficie y/o volumen (sin que el objeto se mueva físicamente)
Coger o agarrar	GRASP	Coger un objeto virtual en su totalidad y moverlo libremente por la escena
Tirar	PULL	Partiendo de un estado en el que un objeto virtual está siendo agarrado, hacer fuerza sobre este en la dirección opuesta a la que el usuario mueve la herramienta
Soltar	RELEASE	Liberar un objeto que previamente estaba cogido

pulsado o no) o de tipo GRIPPER (para indicar si la pinza está abierta o cerrada).

- El estado de contacto de la herramienta con respecto a otro objeto virtual de la escena.
 - La acción física que está realizando en ese momento.
- `CollisionObserver`. Declara una interfaz para notificar a otros participantes de la existencia de un contacto o colisión entre una herramienta y otro objeto de la escena (ver `CollisionEvent`): ya sea porque acaba de suceder o porque acaba de terminar. La finalidad de esta clase coincide con la del patrón `Observer` descrito por Gamma *et al.* (1995), en la que un objeto dispone de un mecanismo para notificar a otros de un cambio interno sin preocuparse de saber quienes son tales objetos.
 - `CollisionEvent`. Describe un contacto o colisión entre dos objetos de una escena virtual: el que lo provoca y el que lo recibe. Desde el punto de vista del modelo, el objeto que origina la colisión siempre va a ser una herramienta (entidad que tiene asociado un `ToolComponent`), mientras que el objeto que la recibe puede ser cualquier objeto virtual de la escena siempre que la entidad que lo represente esté registrada dentro del mismo contexto que la propia herramienta (ver `SimulationContext` del módulo ECS).
 - `HapticInteractionSystem`. Describe la lógica de la interacción háptica de las herramientas que están siendo utilizadas por un usuario en un momento dado. En términos del patrón ECS, esto significa actualizar los datos de aquellos `ToolComponent` “en uso”. Esto último puede entenderse como que una entidad con un `Force-`

FeedbackComponent hace referencia a otra entidad que tiene un ToolComponent; o, dicho de otra manera, que en ese instante una mano sostiene una herramienta con la que interaccionar dentro de una escena.

Adicionalmente, implementa la interfaz CollisionObserver por lo que es responsable de notificar a otros participantes del modelo de la existencia de cualquier evento de colisión surgido entre dos entidades registradas en un mismo contexto. En relación a esto, la clase también guarda una colección de este tipo de eventos para así poder notificar apropiadamente a los participantes interesados sobre cuando un evento ha finalizado.

Por otra parte, cabe recordar que los datos para describir el proceso de la interacción háptica proceden de objetos ajenos al modelo (ver HapticInterfaceAdapter). Por esta razón, la clase también ofrece una operación que permite buscar dentro de un SimulationContext dado a aquellas entidades asociadas con objetos externos.

Por otra parte, el diagrama de clases de la Figura 5.6 muestra el resto de participantes del módulo involucrados en el proceso de respuesta a la interacción háptica, cuyas descripciones se detallan individualmente a continuación:

- VirtualObjectComponent. Componente asociado a cualquier tipo de entidad que represente un objeto virtual de un simulador (sea herramienta u otro tipo de elemento), siempre que ese objeto exista en una escena de este y que además tenga una apariencia visual y háptica dentro de ella. Desde el punto de vista del patrón ECS representa la capacidad de una entidad para controlar un objeto virtual de una escena (ver SceneObjectAdapter).
- SceneObjectAdapter. Declara una interfaz para definir algunos datos procedentes de un objeto virtual perteneciente a una escena del simulador háptico. Concretamente, aquellos necesarios para determinar su estado físico dentro de la propia escena en términos de posición y de geometría. Estos son:
 - La posición inicial y actual del objeto.
 - La integridad actual de la forma geométrica del objeto (medida como un porcentaje de 0 a 100).

Cabe señalar que el atributo de la integridad hace referencia a si la forma geométrica presenta cambios con respecto a su forma original al inicio de la simulación. Así:

- Una integridad del 0% indica que el objeto ha sido destruido (no tiene forma geométrica).
- Una integridad mayor que 0% y menor que 100% indica que la estructura geométrica del objeto ha sido modificada.
- Un 100% de integridad indica que la forma geométrica está intacta o que la forma geométrica ha sufrido “reparaciones” tras haber sido modificada.

No obstante, es necesario tener en cuenta que la forma geométrica de un objeto virtual puede representarse de varias maneras (por ejemplo como una malla poligonal o como un objeto volumétrico). Por ello, para calcular la integridad es necesario tener en cuenta el número de elementos que componen la forma geométrica (vértices en el caso de una malla y vóxeles en el caso de un volumen).

Por otra parte, y de forma similar a lo que sucede con HapticInterfaceAdapter, la finalidad de esta interfaz es la del patrón Adapter: “envolver” la funcionalidad de un objeto ajeno al modelo para poder utilizar sus datos dentro de este último.

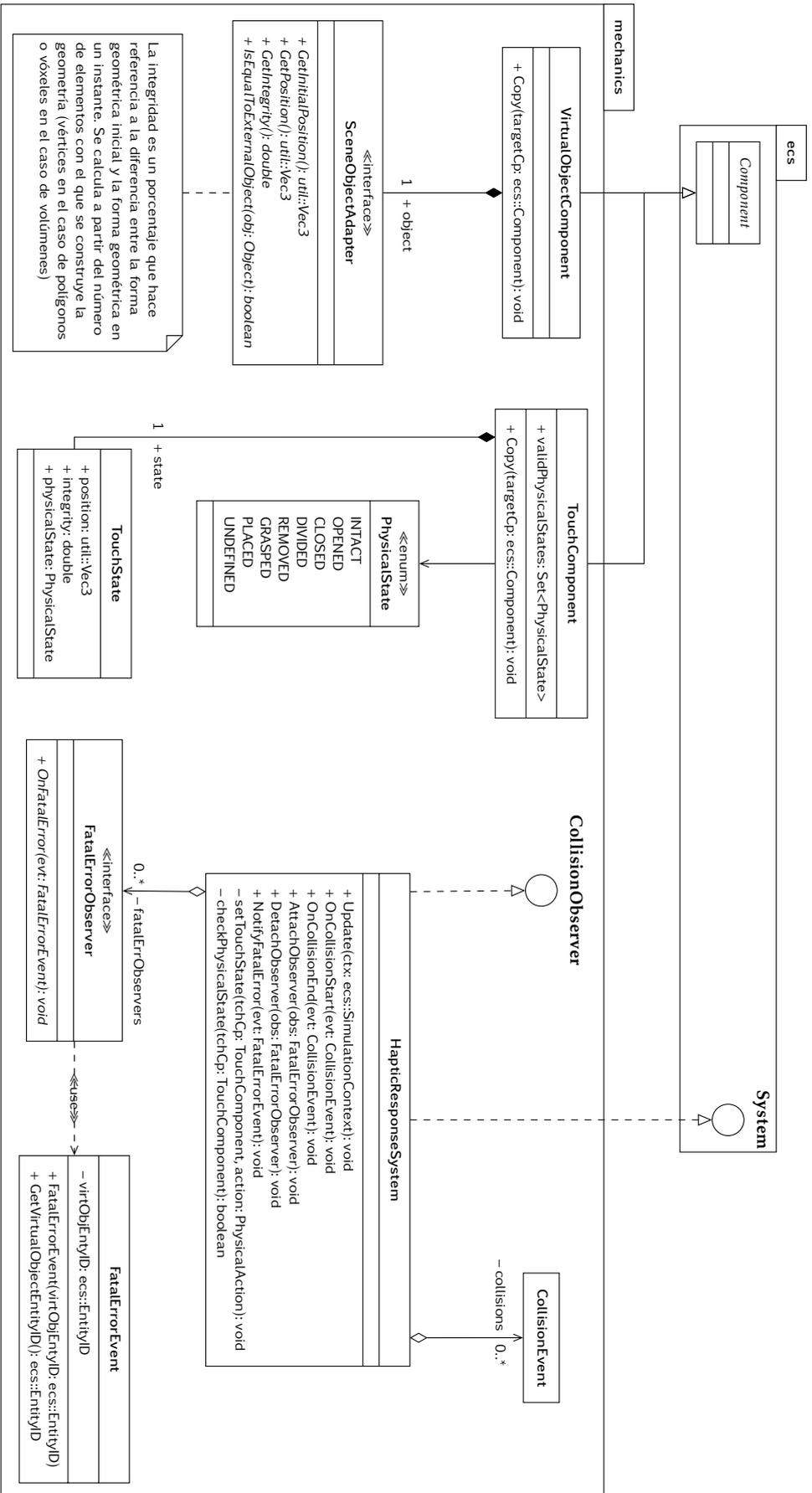


Figura 5.6 – Diagrama de clases del módulo de mecánica de la interacción háptica (parte 2): sistema, componentes y clases involucradas en el proceso de respuesta a una interacción háptica

En relación a esto, también define una operación adicional para comprobar si la referencia del objeto que envuelve la propia interfaz es la misma que una dada. Este mecanismo es utilizado en el modelo para comprobar si un objeto externo está asociado o no a una entidad de un contexto dado (ver `HapticInputSystem`).

- `TouchComponent`. Componente asociado a entidades que representen objetos virtuales “tocables” a través de una herramienta y que además, mientras permanecen en contacto con esta última, reaccionan físicamente ante las posibles acciones derivadas del contacto. En el contexto del patrón ECS representa la capacidad de una entidad de tener un estado físico modificable cada vez que recibe una acción de una herramienta; en otras palabras, de responder a una interacción háptica. Los datos utilizados para describir tal capacidad son:
 - Conjunto finito de estados físicos por los que puede pasar un objeto mientras esté presente dentro de una escena virtual (`PhysicalState` en el diagrama).
 - Estado interno del objeto virtual en un instante de tiempo (ver `TouchState`).

La Tabla 5.3 resume los tipos de estados internos contemplados por el modelo. Este conjunto está derivado de las acciones físicas contempladas por un `ToolComponent` y, al igual que pasaba con ese componente, es obvio que el conjunto finito de estados físicos de un objeto depende del elemento del simulador al que represente. Es más, es importante recalcar que algunos estados pueden describirse de forma semejante (como es el caso de `OPENED` y `CLOSED` que se definen por su porcentaje de integridad). Para evitar este tipo de ambigüedades el modelo impone la restricción de definir este tipo de estados como exclusivos (o se incluye uno o se incluye el otro). Así, a modo de ejemplo, un conjunto de estados válidos para un objeto puede ser `{INTACT, OPENED, CLOSED}` ó `{INTACT, DIVIDED, CLOSED}` pero nunca `{INTACT, OPENED, DIVIDED, CLOSED}`.

- `TouchState`. Describe, en un instante de tiempo concreto, el estado interno de un objeto virtual tocable. Dicha descripción contempla los siguientes datos:
 - Posición física dentro de una escena.
 - Porcentaje de la integridad de su forma geométrica.
 - Estado físico en el que está en ese momento.
- `FatalErrorObserver`. Declara una interfaz para notificar a otros participantes de la existencia de un error fatal por parte de un objeto virtual tocable (ver `FatalErrorEvent`). Análogamente a lo que sucede con `CollisionObserver`, la finalidad de esta interfaz es la misma que la del patrón `Observer`.
- `FatalErrorEvent`. Describe un error fatal o irreparable para un objeto virtual tocable. Este tipo de error puede suceder en cualquier instante durante el transcurso de una simulación. La causa es que un objeto virtual—que tiene la capacidad de responder hápticamente—, ha llegado a un estado físico no contemplado dentro de su conjunto de estados válidos.
- `HapticResponseSystem`. Describe la lógica de la respuesta háptica de los objetos virtuales tocables y “activos” en un momento dado; entendiendo como activo el hecho de que un objeto virtual esté en contacto directo con una herramienta de interacción háptica. En términos del patrón ECS esto significa actualizar los datos de aquellos `TouchComponent` involucrados en algún evento de colisión activo y provocado por un `ToolComponent`.

Tabla 5.3 – Tipos de estados físicos y sus descripciones desde el punto de vista de la interacción háptica

Estado	PhysicalState	Descripción
Intacto	INTACT	Situación inicial y previa a cualquier acción física. En este estado la integridad es del 100%
Abierto	OPENED	Situación en la que un objeto tiene uno o varios agujeros en su forma geométrica con respecto a su situación inicial. En este estado la integridad es inferior al 100%
Cerrado	CLOSED	Partiendo de un estado abierto previo, situación que resulta de cerrar o tapar los agujeros que tenía la forma geométrica de un objeto. En este estado la integridad vuelve a ser del 100%
Dividido o fragmentado	DIVIDED	Situación en la que una parte de la forma geométrica de un objeto está separada o fragmentada con respecto a su situación inicial. En este estado la integridad es inferior al 100%
Eliminado	REMOVED	Situación en la que un objeto virtual: bien carece de forma geométrica porque ha sido eliminada por completo, bien no existe propiamente porque ha sido retirado de la escena. En términos de integridad significa un valor del 0%
Cogido	GRASPED	Situación en la que un objeto virtual está siendo cogido por una herramienta de tipo pinza
Colocado	PLACED	Situación en la que un objeto ha sido desplazado físicamente de su posición original
Sin definir	UNDEF INED	Situación inesperada que indica que un objeto ha llegado a un estado no contemplado dentro de su conjunto de estados válidos por culpa de la acción física de una herramienta

Para determinar si existen colisiones activas, la clase actúa como observador ante este tipo de eventos (implementando la interfaz `CollisionObserver`) y también como almacén de estos (guardando la referencia al evento cada vez que recibe la correspondiente notificación de inicio y quitándola cada vez que recibe la correspondiente notificación de finalización).

Además, implementa la interfaz `FatalErrorObserver` por lo que también es responsable de notificar a otros participantes del modelo ante la existencia de eventos de error fatal causados por la respuesta háptica de un objeto virtual tocable ante una acción física inesperada.

Evaluación del desempeño (assessment)

Registra el desempeño de un usuario con el simulador háptico y también evalúa su rendimiento desde el punto de vista de la interacción háptica. Para ser más específicos, las responsabilidades del módulo son:

- Representar el desempeño de un usuario como un conjunto de métricas relativas a aspectos de destrezas manuales y medidas sobre los elementos involucrados en la interacción háptica.
- Registrar dichas métricas cada vez que el usuario interactúe hápticamente dentro de la escena virtual.
- Evaluar los datos registrados en dichas métricas para así poder cuantificar el rendimiento asociado al desempeño del usuario.

Al igual que sucede con el módulo `mechanics`, el hecho de representar las responsabilidades anteriormente mencionadas hace que la estructura del módulo sea extensa. Por esta razón también se van a presentar a continuación los detalles estructurales del módulo agrupando los participantes según su funcionalidad. Por consiguiente, en primer

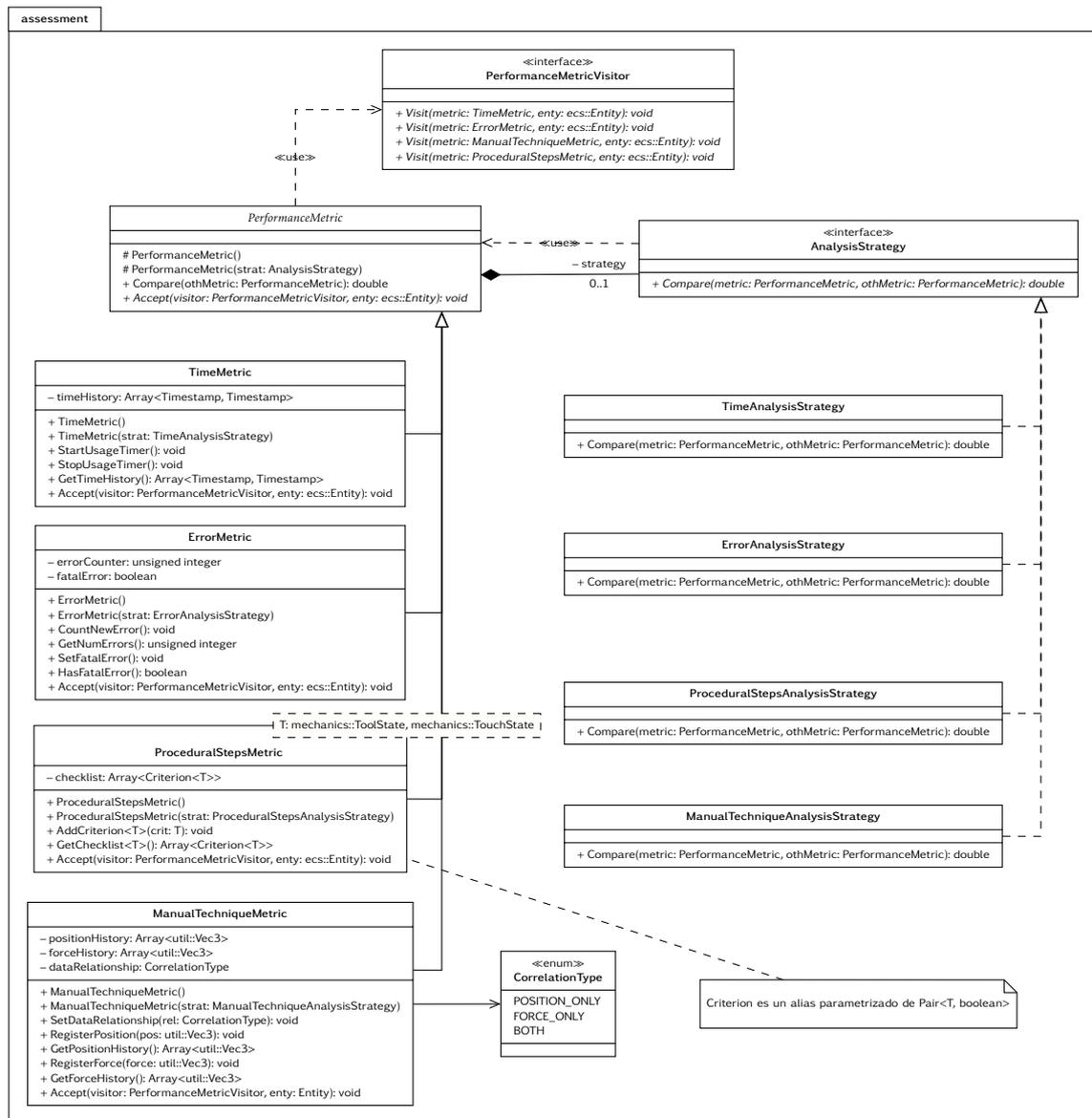


Figura 5.7 – Diagrama de clases del módulo de evaluación del desempeño (parte 1): patrón Visitor, métricas de rendimiento y estrategias para su análisis

lugar están los participantes representados en el diagrama de clases de la Figura 5.7, cuya finalidad es representar las métricas para medir el rendimiento o desempeño del usuario:

- **PerformanceMetric**. Clase base para definir una métrica de desempeño sobre un elemento concreto del simulador háptico (ya sea una herramienta o un objeto virtual tocable). Toda métrica está caracterizada porque:
 - Cada instancia puede tener una de las dos funciones siguientes:
 1. Registrar el desempeño del usuario. La métrica refleja el historial de cambios en el estado interno del elemento durante su paso por la escena virtual; cambios que por otra parte han sido provocados por el usuario.
 2. Servir como estándar para evaluar otra métrica del mismo tipo. La métrica

ya tiene preestablecidos unos datos, y estos representan idealmente los cambios de estado interno del elemento durante su paso por la escena virtual; datos que por otra parte han sido determinados por un experto.

- Cada instancia tiene una operación para comparar los datos que almacena con respecto a los de otra métrica. No obstante, cabe señalar que como cada métrica puede tener funciones distintas, esta responsabilidad está delegada en una estrategia de análisis (ver `AnalysisStrategy`). De este modo, una métrica tendrá una estrategia de comparación exclusivamente cuando su función sea la de servir como estándar.
- Como cada métrica puede tener una función diferente, cada especialización define una operación en la que delegar a otro objeto la responsabilidad de modificar o utilizar cualquiera de sus datos (ver `PerformanceMetricVisitor`). Concretamente, bien la operación de registrar datos o bien la de evaluarlos.

Por último, comentar que el módulo define inicialmente cuatro tipos de métricas (ver `TimeMetric`, `ErrorMetric`, `ProceduralStepsMetric` y `ManualTechniqueMetric`); donde cada una describe un aspecto concreto de la destreza técnica de un usuario (ver Apartado 4.2.1).

- `TimeMetric`. Describe una métrica de tiempo como un histórico que representa la interacción continua de un elemento. Cada entrada del histórico contiene un par de marcas temporales para representar la franja durante la cual el usuario ha estado interactuando hápticamente y sin interrupción con el elemento asociado a la métrica. Así, el primer valor representa el instante de inicio y el segundo el instante de finalización.
- `ErrorMetric`. Describe una métrica de error utilizando tanto un contador de errores como un flag para determinar la existencia de un error fatal. Cada error registrado en el contador representa una acción sobre el elemento asociado a la métrica que, a pesar de no ser fatal para el desarrollo de una tarea de aprendizaje, no está “contemplada” dentro de sus valores válidos (por ejemplo, si una herramienta ha tocado un objeto virtual que no está registrado en su mismo contexto).
- `ProceduralStepsMetric`. Describe una métrica de pasos procedurales mediante una lista de verificación donde cada criterio representa un posible estado interno por el que el elemento debe pasar durante la escena virtual. De este modo, cada criterio está descrito como un par que almacena: (1) el estado interno objetivo del elemento; y (2) un flag que indica si este ha pasado por dicho estado. No obstante, dado que el modelo distingue dos tipos de elementos—herramientas y objetos virtuales tocables—, la clase está parametrizada para indicar el tipo concreto de elemento al que los criterios hacen referencia.
- `ManualTechniqueMetric`. Describe una métrica de técnica manual a través de unos históricos de posiciones y/o de fuerzas. Cada entrada de estos históricos almacena un valor registrado en un instante de tiempo determinado. Además, la métrica ofrece la posibilidad de configurar el tipo de dato que quiere describir (`CorrelationType` en el diagrama): solo posiciones, solo fuerzas o ambos datos. En el caso de que la métrica registre ambos datos, cada uno de los valores registrados en ambos históricos está correlacionado; es decir, que la posición y la fuerza se han almacenado en el mismo instante de tiempo.
- `AnalysisStrategy`. Declara una interfaz para analizar dos métricas de una misma categoría mediante un algoritmo que devuelve una puntuación entre 0 y 100.

Concretamente, dada una cuyos datos almacenan un estándar y otra cuyos datos reflejan el desempeño del usuario, el algoritmo compara ambas utilizando algún tipo de técnica de análisis de datos y calcula en consecuencia una nota en función de su similitud. La finalidad de esta interfaz coincide con la intención del patrón Strategy (Gamma *et al.*, 1995), que es la de definir una familia de algoritmos para realizar una tarea específica. Dicho esto, por cada categoría de métrica existe una estrategia concreta que permite su evaluación.

- `TimeAnalysisStrategy`. Define un algoritmo por defecto para comparar dos métricas de tiempo, asignando la máxima puntuación únicamente cuando los datos de ambas son iguales.
- `ErrorAnalysisStrategy`. Define un algoritmo por defecto para comparar dos métricas de error, asignando la máxima puntuación únicamente cuando los datos de ambas son iguales.

`ProceduralStepsAnalysisStrategy`. Define un algoritmo por defecto para comprobar dos métricas de pasos procedurales, asignando la máxima puntuación únicamente cuando los datos de ambas son iguales.

`ManualTechniqueAnalysisStrategy` Define un algoritmo por defecto para comparar dos métricas de técnica manual, asignando la máxima puntuación únicamente cuando los datos de ambas son iguales.

- `PerformanceMetricVisitor`. Declara una interfaz para realizar una operación de forma externa sobre los datos de una métrica dependiendo de la función que esta tenga. Dado que existen diferentes especializaciones de métricas cada una con datos distintos, la interfaz define tantas operaciones como tipos haya. Esta particularidad en el diseño coincide con uno de los propósitos del patrón Visitor presentado por Gamma *et al.* (1995), que permite separar las operaciones concretas de una familia de clases y añadir nuevas operaciones sin tener que modificar la estructura de estas. Concretamente, este patrón habilita un mecanismo conocido como *double dispatch* (Ingalls, 1986) que permite resolver aquellas situaciones en las que el comportamiento resultante de un objeto concreto (al recibir una operación Visitor) depende tanto de su tipo como del tipo de parámetro asociado a la propia operación. En el caso de esta interfaz, permite a una métrica específica llamar a la correspondiente operación de la interfaz Visitor a través de su método `Accept`, pasándole como argumento su propia referencia.

En segundo lugar, los participantes representados en el diagrama de clases de la Figura 5.8 son responsables del registro del desempeño. Concretamente, estos son:

- `TrackingComponent`. Componente asociado a cualquier tipo de entidad que represente un objeto virtual de un simulador y sobre el que sea necesario registrar datos acerca de sus cambios de estado interno. En términos del patrón ECS representa la capacidad de una entidad de poder registrar datos sobre los cambios de estado interno por los que un elemento de la escena virtual pasa mientras permanece activo. Tales datos están descritos en términos de métricas y, de este modo, cada componente podrá tener como máximo una de cada tipo. Para garantizar esto, la clase guarda un registro utilizando un `TypeRegistry` parametrizado a `PerformanceMetric`.
- `TrackingSystem`. Describe la lógica para registrar datos acerca del desempeño del usuario. Concretamente, de registrar los datos de las correspondientes métricas de cualquier entidad “activa” en un momento dado; entendiendo esto último desde dos puntos de vista: (1) que la entidad represente un dispositivo háptico; o (2) que la

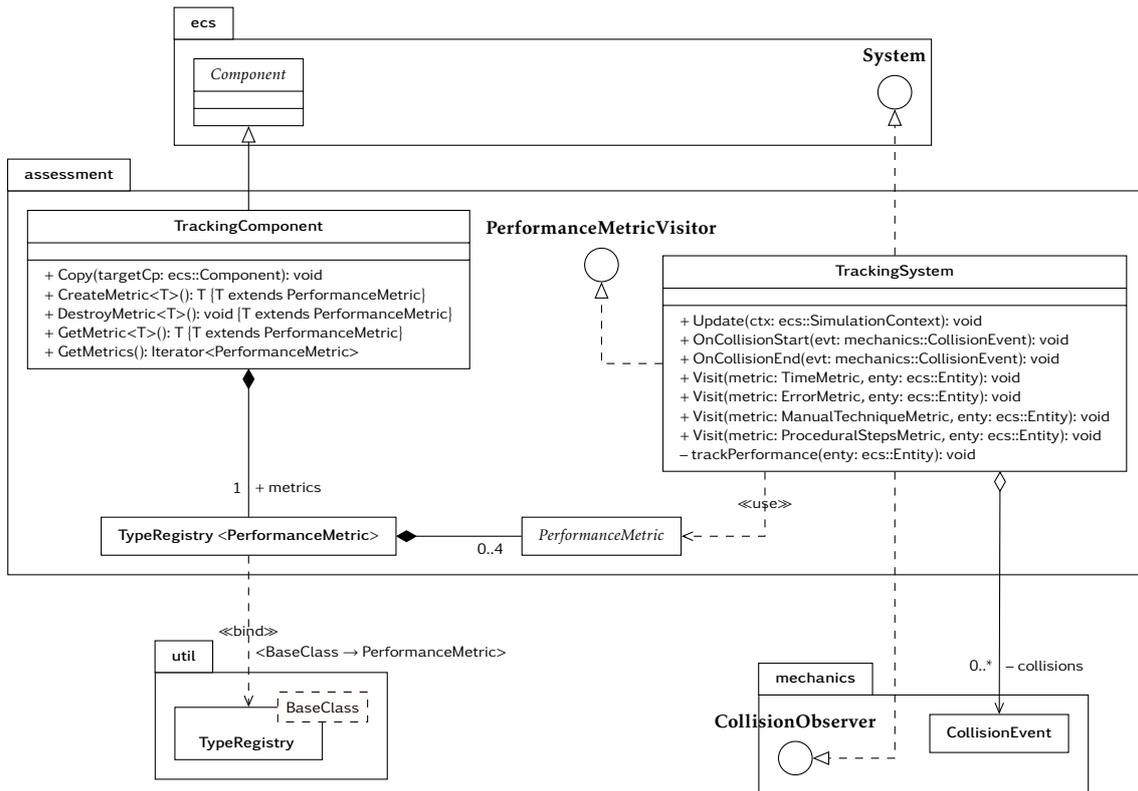


Figura 5.8 – Diagrama de clases del módulo de evaluación del desempeño (parte 2): componente y sistema para el registro del desempeño

entidad esté involucrada en un proceso de interacción háptica (colisión). De este modo, todo lo anterior significa, en términos del patrón ECS, actualizar las `PerformanceMetric` asociadas a los `TrackingComponent` de todas las entidades activas en un contexto dado.

Cabe señalar que para tener constancia de cuales son las entidades involucradas en una colisión, la clase actúa como observador ante este tipo de eventos (implementando la interfaz `CollisionObserver` del módulo de la mecánica de la interacción háptica). A su vez, también guarda las correspondientes referencias para saber cuando debe parar de registrar datos.

Por último, y en relación a la propia operación de registrar datos, la clase también implementa la interfaz `PerformanceMetricVisitor` para poder registrar datos según el tipo de métrica que corresponda.

En último lugar, los participantes del diagrama de clases de la Figura 5.9 representan la evaluación del desempeño como tal. Estos participantes son:

- **AssessmentComponent.** Componente asociado a cualquier tipo de entidad que represente un objeto virtual de un simulador del que sea necesario evaluar datos sobre sus cambios de estado interno previamente registrados. Desde el punto de vista del patrón ECS, representa la capacidad de una entidad de asociar una nota o puntuación numérica a todos los datos registrados sobre los cambios de estado interno por los que ha pasado mientras ha permanecido activo durante la escena virtual. Los datos para describir esta capacidad son:

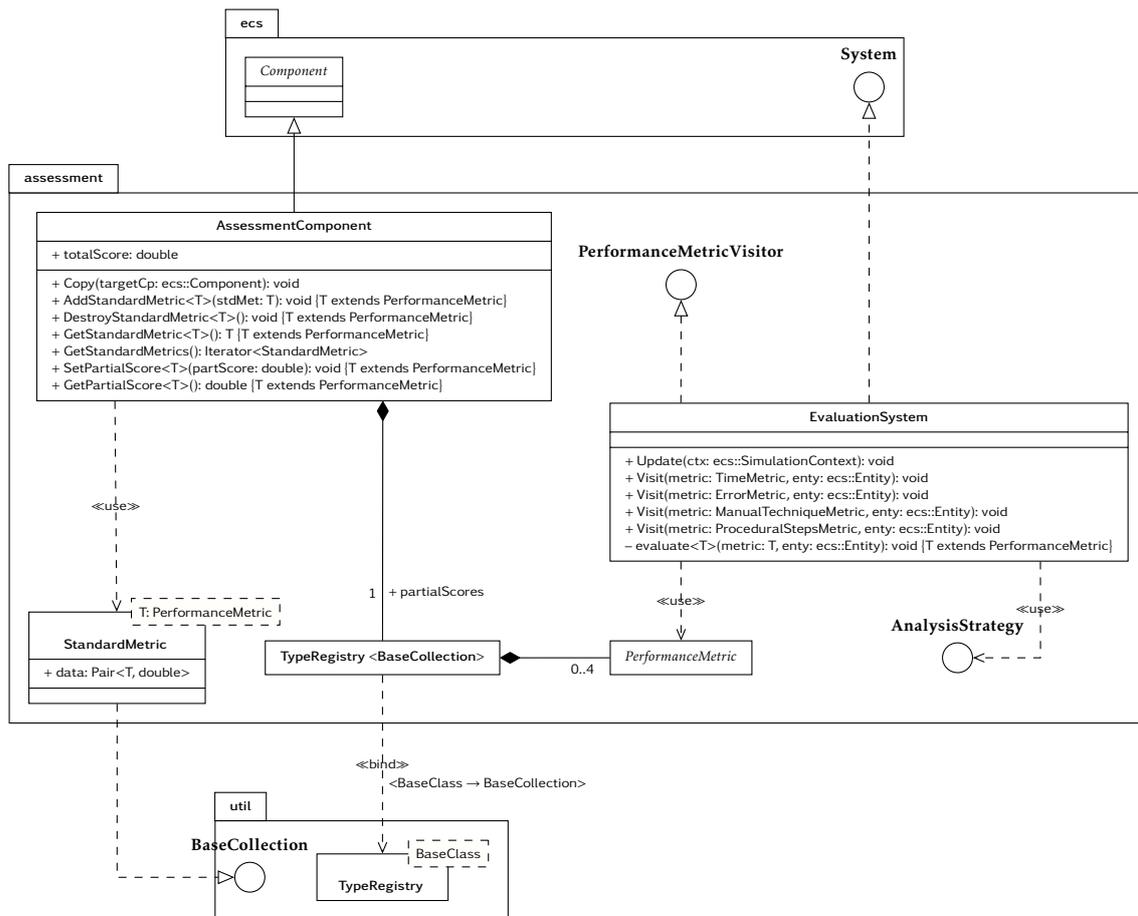


Figura 5.9 – Diagrama de clases del módulo de evaluación del desempeño (parte 3): componente y sistema para la evaluación del desempeño

- Conjunto de métricas cuyos datos sirven de estándar para evaluar los datos de las métricas ya registradas (ver `StandardMetric`). Al mismo tiempo, junto a cada métrica estándar también existe una puntuación parcial asociada cuya función es calificar el desempeño del usuario sobre cada aspecto particular del objeto virtual. Obviamente para poder calcular dicha puntuación, el conjunto de métricas estándar debe incluir exactamente los mismos tipos que el conjunto de métricas con los datos registrados.
- Puntuación total asignada que resulta de sumar todas las puntuaciones parciales obtenidas en el conjunto de métricas estándar.

Cabe señalar que al igual que sucede con `TrackingComponent`, la clase utiliza `TypeRegistry` para tener un registro con el que garantizar la existencia de una única instancia por cada tipo de métrica. No obstante, el registro está parametrizado para `BaseCollection` ya que sucede algo similar al caso de `ComponentCollection` en el módulo de Entidad-Componente-Sistema (ver Apartado 5.3.1). En este caso cada entrada del registro debe almacenar como “colección” un par compuesto por la instancia de un tipo de métrica y su puntuación parcial asociada.

- `StandardMetric`. Define una métrica estándar a través de un par parametrizado de valores. Concretamente:

1. Una métrica que tiene datos preestablecidos y cuya función es evaluar otra del mismo tipo.
 2. Una puntuación que representa el resultado de evaluar la métrica anterior con otra.
- `EvaluationSystem`. Describe la lógica de evaluar datos acerca del desempeño registrado sobre los diferentes elementos de un simulador tras la ejecución de este. Desde el punto de vista del patrón ECS implica calcular, para todas las entidades en un contexto dado, las puntuaciones de cada `PerformanceMetric` asociado a un `AssessmentComponent` a partir de los datos registrados en un `TrackingComponent`. Cabe mencionar que para llevar a cabo la propia evaluación de cada tipo de métrica específico, la clase implementa la interfaz `PerformanceMetricVisitor`.

Entorno de aprendizaje

Define el conjunto de características que permiten supervisar la tarea de aprendizaje sobre un simulador háptico. Esto es, en la práctica, representar las características del conocimiento experto que hacen posible su transmisión y adquisición a través de un simulador háptico. Tiene las siguientes responsabilidades:

- Controlar la supervisión de la tarea de aprendizaje, indicando su inicio y su fin.
- Comprobar el cumplimiento de los objetivos de aprendizaje definidos para una tarea.
- Orquestrar la ejecución de todos los sistemas definidos en los anteriores módulos de alto nivel.

Una vez más, y de forma análoga a los otros dos módulos de alto nivel, representar las responsabilidades antes citadas hace que la estructura del módulo sea amplia. Por ello, a continuación se presentan los detalles estructurales del módulo por partes según la función de los participantes. Por un lado están los participantes del diagrama de clases de la Figura 5.10, encargados de la comprobación de los objetivos de una tarea de aprendizaje:

- `ObjectiveComponent`. Componente asociado a cualquier tipo de entidad que represente un objeto virtual tocable sobre el que es necesario fijar un determinado objetivo a cumplir durante su existencia en una escena. En términos del patrón ECS representa la capacidad de una entidad de tener un objetivo a alcanzar. Este objetivo está definido utilizando los siguientes datos:
 - Estado interno al que el objeto tocable debe llegar durante el transcurso de la escena virtual.
 - Flag que determina el cumplimiento del objetivo.
- `StepCompletedObserver`. Declara una interfaz para notificar a otros participantes del cumplimiento de un paso dentro de una tarea de aprendizaje (ver `StepCompletedEvent`). De igual modo a lo que sucede con `CollisionObserver` y `FatalErrorObserver` del módulo de mecánica de la interacción háptica, la finalidad de esta interfaz es la misma que la del patrón `Observer`.
- `StepCompletedEvent`. Representa el hecho de haber completado exitosamente un paso concreto de una tarea de aprendizaje. Este evento sucede cuando el usuario ha completado todos los objetivos asociados a un paso concreto o, dicho de otro modo, al marcar como completados todos los `ObjectiveComponent` asociados a las entidades participantes dentro de un paso.

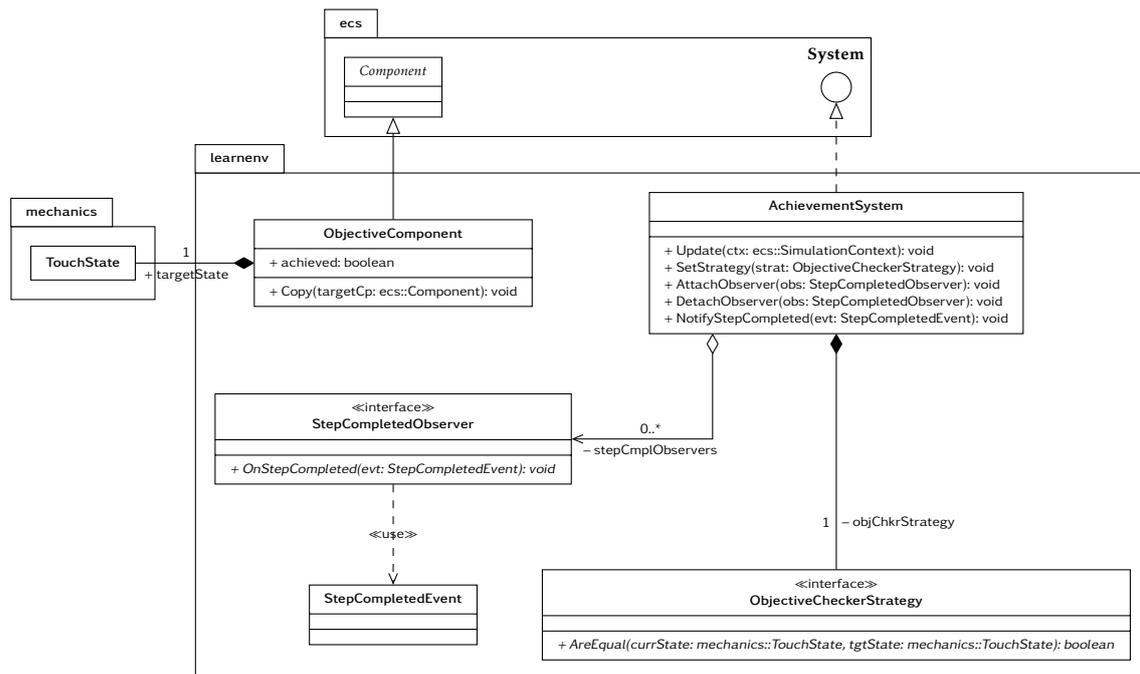


Figura 5.10 – Diagrama de clases del módulo entorno de aprendizaje (parte 1): componente y sistema para comprobar los objetivos de una tarea de aprendizaje

- **AchievementSystem.** Describe la lógica para comprobar el cumplimiento de todos los objetivos de un paso de una tarea de aprendizaje por parte de todas aquellas entidades pertenecientes a un contexto dado. Desde la perspectiva del `ecs` esto significa actualizar todos los `ObjectiveComponent` de un contexto particular para comprobar en un instante específico si todos sus objetivos han sido alcanzados. No obstante, cabe señalar que para comprobar que un objeto virtual tocable ha alcanzado su estado objetivo, la clase delega esta responsabilidad a una estrategia concreta encargada de determinar la similitud entre dos estados internos (ver `ObjectiveCheckerStrategy`).

Por otra parte, también implementa la interfaz `StepCompletedObserver` por lo que es responsable de notificar a otros participantes del modelo tan pronto como el usuario haya completado todos los objetivos de un paso de una tarea de aprendizaje.

- **ObjectiveCheckerStrategy.** Declara una interfaz para comprobar si dos estados internos de objetos tocables son iguales. Con este objetivo, el algoritmo utiliza los datos de ambos estados para comparar si son iguales teniendo en cuenta un pequeño margen de error. La finalidad de esta interfaz es la misma que la del patrón `Strategy` de Gamma *et al.* (1995), definir una familia de algoritmos intercambiables en tiempo de ejecución para una tarea específica.

Por otro lado, el diagrama de clases de la Figura 5.11 representa los participantes del módulo responsables de definir la unidad de aprendizaje (conocimiento experto):

- **LearningUnit.** Define una unidad de aprendizaje para representar todos los datos del conocimiento experto a transmitir. Una unidad de aprendizaje está caracterizada a través de dos elementos:
 - Colección de pasos ordenados de forma secuencial que describen el desarrollo

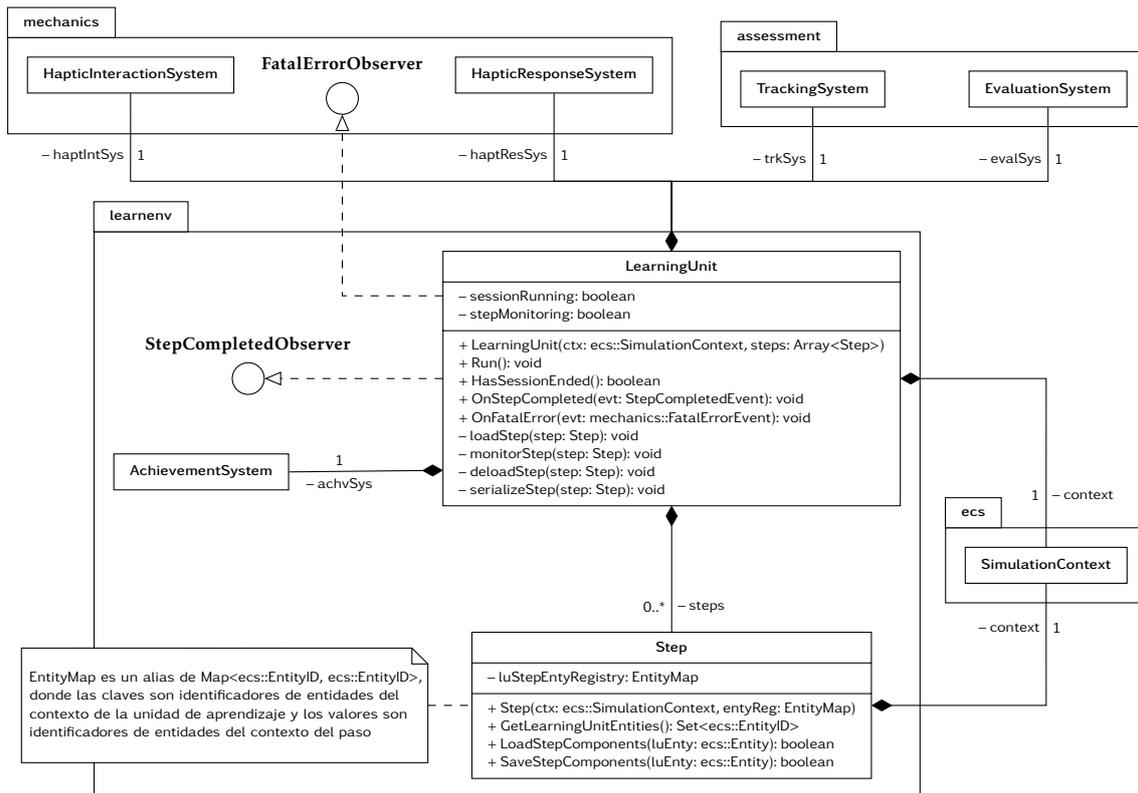


Figura 5.11 – Diagrama de clases del módulo entorno de aprendizaje (parte 2): unidad de aprendizaje

de la propia tarea de aprendizaje (ver Step).

- Contexto del simulador háptico en el que están representados todos aquellos elementos de este que contribuyen al desarrollo de la tarea de aprendizaje (ver SimulationContext).

Dentro del modelo, la principal función de una unidad es ejecutar una sesión de aprendizaje; entendiendo esto como el flujo de trabajo por el que desarrollar una tarea de aprendizaje. Para ello, la unidad de aprendizaje está compuesta de todos y cada uno de los sistemas presentados en el modelo, lo que le permite realizar las siguientes funciones:

- Controlar el flujo de trabajo de la tarea desde su inicio hasta su finalización, pasando por todos los pasos que la componen (gracias a AchievementSystem).
- Supervisar el desempeño del usuario con el simulador (utilizando HapticInteractionSystem y HapticResponseSystem).
- Registrar apropiadamente el desempeño en términos de métricas (utilizando TrackingSystem).
- Evaluar todo el desempeño registrado una vez que el flujo de trabajo de la tarea haya concluido (utilizando EvaluationSystem).

Con respecto al control del flujo de trabajo, la clase actúa como observador ante dos tipos de eventos que influyen en su desarrollo:

1. Eventos del tipo error fatal para saber cuando el usuario ha cometido un fallo que imposibilita finalizar con éxito la tarea de aprendizaje (ver `FatalErrorEvent`). Para ello implementa la interfaz `FatalErrorObserver` del módulo de mecánica de la interacción háptica.
 2. Eventos del tipo paso completado para conocer el instante exacto en el que el usuario ha cumplido con todos los objetivos establecidos para el paso en el que está en un momento dado, y así poder continuar con el desarrollo de la tarea bien al siguiente paso o bien a su conclusión (ver `StepCompletedEvent`). Para esta finalidad implementa la interfaz `StepCompletedObserver`.
- **Step.** Describe un paso de una tarea de aprendizaje como un conjunto de pequeños objetivos asociados a elementos existentes en el simulador háptico. Cada paso está caracterizado por los siguientes elementos:
 - Contexto del simulador háptico en el que únicamente están representadas aquellas entidades con un objetivo particular dentro del paso.
 - Registro asociativo que relaciona las entidades del contexto de la unidad de aprendizaje con las entidades del contexto del paso.

En relación al contexto, cabe destacar que este es independiente del que gestiona una tarea de aprendizaje. Sin embargo, aunque los dos contextos almacenan físicamente entidades diferentes, lo cierto es que en ambos casos las entidades hacen referencia a los mismos elementos del simulador háptico. La razón de esta separación es ofrecer a las entidades del contexto de la tarea de aprendizaje la capacidad de asociar diferentes componentes según el paso en el que estén presentes. Para ser más específicos, la finalidad del contexto del paso es almacenar—para cada entidad participante—, los siguientes tres componentes:

1. `ObjectiveComponent`. Marca el objetivo a cumplir dentro del paso, es decir, el estado interno al que la entidad debe llegar durante el transcurso del paso.
2. `TrackingComponent`. Registra, durante el transcurso del paso, todos los estados internos por los que la entidad ha pasado.
3. `AssessmentComponent`. Evalúa todos los datos registrados y establece una nota con la que cuantificar el desempeño.

Con respecto al registro asociativo, su finalidad es simplemente la de conocer que entidades de la tarea de aprendizaje se corresponden con que entidades del paso. De esta manera, y a través de las operaciones `LoadStepComponents` y `SaveStepComponents`, es posible intercambiar (cargar y guardar respectivamente) los componentes entre contextos.

Capítulo 6

Evaluación del modelo

En los capítulos anteriores de este trabajo de investigación se ha expuesto, de una forma sistemática, todo el proceso de creación del modelo de enseñanza-aprendizaje para la transferencia de conocimiento experto con simuladores hápticos. El resultado final ha sido LEEKHS, un framework capaz de representar dicho conocimiento sobre cualquier tipo de simulador háptico. Ahora bien, para asegurarse de que esta contribución teórica puede tener una aplicación directa en el mundo real cabe preguntarse: ¿hasta qué punto el modelo propuesto cumple en la práctica con los objetivos planteados? En este capítulo se presentan los resultados de una experiencia piloto en la que LEEKHS fue evaluado por parte de un grupo de expertos docentes.

6.1. Introducción

Para evaluar la viabilidad del framework LEEKHS, y por tanto el modelo de conocimiento experto propuesto en esta tesis, es necesario llevar a cabo un experimento piloto que involucre a un grupo de expertos en el ámbito de la docencia; ya que estos son, en parte, uno de los potenciales usuarios finales del mismo. El hecho de enfocar esta experiencia como una investigación piloto permitirá obtener unos datos preliminares para determinar el grado de cumplimiento del framework con respecto a los objetivos para los que fue creado. Así pues, la pregunta de investigación latente al experimento es:

RQ1 ¿Cuál es el grado de aceptación a la hora de utilizar un simulador háptico con LEEKHS por parte de un pequeño grupo de expertos de un ámbito educativo?

Para responder a esta pregunta se plantean los siguientes objetivos:

- A partir del diseño propuesto en el Capítulo 5, desarrollar un prototipo funcional del framework a fin de ponerlo en marcha en un entorno real.
- Verificar que dicho prototipo refleja los procesos de enseñanza y aprendizaje descritos en el Capítulo 4.
- Evaluar su aceptación ante un público especializado.

6.2. Metodología

El experimento piloto se diseñó siguiendo las recomendaciones propuestas por Van Nortwick *et al.* (2010) (basadas en una revisión de la literatura de estudios relacionados con la evaluación de simuladores quirúrgicos) y algunos de los principios sugeridos por A. G. Gallagher, E. M. Ritter y R. M. Satava (2003) (referidos al proceso de evaluación dentro del ámbito de la educación quirúrgica).



Figura 6.1 – Asistentes del VetDoc 2017 participando en el experimento de evaluación sobre LEEKHS. Fuente: elaboración propia

6.2.1. Participantes

El experimento se realizó en el marco de VetDoc, un congreso sobre docencia en Veterinaria celebrado los días 6 y 7 de julio de 2017 en León, España (Universidad de León, 2017). A pesar de que el congreso no estaba relacionado directamente con la disciplina de la medicina humana, para la finalidad del experimento fue suficiente ya que, salvando las distancias, la medicina veterinaria comparte muchos aspectos con la humana. Además, el hecho de tener una temática educativa propició una oportunidad idónea para evaluar LEEKHS ante un público especializado (docentes del ámbito universitario).

Dado que el experimento tuvo lugar en el contexto de un congreso académico, la población estaba compuesta por personas relacionadas con la educación en Veterinaria (docentes). Esto supuso una ventaja para el experimento ya que todos los participantes tendrían un determinado número de años de experiencia como docentes; razón por la que se les consideró como “expertos” para el modelo. No obstante, es necesario mencionar que la Veterinaria abarca diversas áreas de conocimiento por lo que hubo que contemplar la posible participación de expertos pertenecientes a áreas no relacionadas directamente con la cirugía.

Todos los participantes se reclutaron de forma voluntaria durante el transcurso del congreso, y más concretamente en las sesiones de descanso o de presentación de pósteres. Para ello se acomodó un lugar dentro del recinto del congreso y se preguntó a cada asistente si deseaba tomar parte de forma anónima en un experimento sobre simulación háptica aplicada a la educación (ver Figura 6.1). Antes de participar, primero se informó individualmente a cada persona interesada tanto del objetivo del experimento como de las características y funcionamiento de LEEKHS. A continuación, se realizó una demostración sobre la tecnología háptica para que los participantes pudieran familiarizarse con el entorno de simulación del experimento. Tras la demostración comenzó el experimento como tal.

6.2.2. Actividades

Para validar el framework, el experimento constó de dos actividades: un cuestionario para recoger datos de los participantes y un simulador háptico para demostrar a estos últimos las capacidades de LEEKHS. La decisión de utilizar estas dos actividades estuvo condicionada por una serie de restricciones temporales y materiales derivadas del hecho de realizar el experimento en el marco de un congreso:

- La participación debía ser voluntaria y anónima.
- La ventana de tiempo para realizar el experimento estaba reducida a los dos días de celebración del congreso y más en concreto a ciertas franjas horarias (sesiones de descanso y presentación de pósteres). Por esta razón se fijó un límite máximo de 15 minutos para que cada participante completará el experimento.
- Al disponer de solo dos interfaces hápticas, el desarrollo del propio experimento estaba sujeto a un máximo de dos personas simultáneamente.
- El simulador háptico con LEEKHS debería incluir un par de tareas de aprendizaje a modo de ejemplo. Dichas tareas deberían ser lo más sencillas posibles para que cada participante captara la idea y las posibilidades del framework.

Cuestionario

Los datos del experimento se recogieron a través de un cuestionario diseñado específicamente para el congreso (ver Apéndice B).

Por un lado, el cuestionario recoge diversos datos demográficos para tener una idea del perfil del participante en el experimento. Concretamente recoge: sexo, formación académica, años de experiencia como docente, área de conocimiento a la que pertenece, conocimiento previo de la existencia de tecnología háptica, utilización previa de simuladores hápticos e importancia que da al sentido del tacto en Veterinaria.

Por otro lado, el cuestionario también recoge datos sobre el uso y aceptación del framework propuesto en esta tesis. Con respecto a esta parte cabe mencionar que, como se verá en el Apartado 6.2.2, se desarrolló un simulador háptico específico para el congreso que integraba el propio LEEKHS y que además incluía dos tareas de aprendizaje diseñadas por un experto. Dicho esto, es importante señalar que este simulador se utilizó como medio para que los participantes pudieran opinar sobre la aceptación de LEEKHS. Así pues, gracias al framework, el cuestionario recoge dos métricas de desempeño—nota y tiempo—, para cada una de las tareas de aprendizaje del simulador háptico. Cabe señalar que estas dos métricas no se recogen con fines de evaluación, sino por el simple hecho de observar que el framework puede obtener y calcular datos relativos al desempeño.

En cuanto a la aceptación del framework como tal, el cuestionario recogió cinco aspectos relacionados con el experimento: grado de utilidad de la primera tarea de aprendizaje ejecutada en el simulador (ítem 1), grado de utilidad de la segunda tarea de aprendizaje ejecutada en el simulador (ítem 2), grado de consideración de la simulación háptica como una ventaja en la docencia (ítem 3), grado de disposición a implementar los simuladores hápticos en docencia (ítem 4) y finalmente grado de satisfacción global con el experimento (ítem 5).

A mayores y de forma opcional, el cuestionario también incluye tres aspectos de opinión personal sobre la tecnología háptica (ventajas, inconvenientes y posibles aplicaciones). No obstante, estos no se tienen en cuenta para la evaluación del modelo de esta tesis ya que son aspectos de respuesta abierta y no están relacionados directamente con su propósito.

Simulador háptico

De forma paralela al diseño del cuestionario también se desarrolló específicamente para el congreso un prototipo de simulador háptico que integraba LEEKHS y dos tareas de aprendizaje simples a modo de ejemplo práctico. Este simulador sirve como mecanismo para validar el framework ya que, por un lado, permite a los participantes valorar su aceptación y también permite obtener los datos de desempeño de estos.

En relación a las dos tareas de aprendizaje, estas se diseñaron en base al criterio de un experto y utilizando la taxonomía de niveles de formación de R. Satava, Cuschieri y Hamdorf (2003). Dentro de dicha taxonomía las tareas están diseñadas para un nivel 0 o de entrenamiento previo a un programa de formación quirúrgica. Su objetivo es adquirir dos aspectos relacionados con las destrezas psicomotoras básicas: la precisión a la hora de utilizar un instrumento y la traslación de objetos utilizando un instrumento.

- *Tarea de precisión.* Su finalidad es adquirir la capacidad de interactuar hápticamente y de forma certera bajo unas restricciones de movimiento. La Figura 6.2 muestra la escena desarrollada, compuesta por dos objetos fragmentables en forma de cubo—uno rojo y otro verde—, y una única herramienta háptica capaz de tallarlos. Sobre esta escena un experto determinó que la tarea tendría un único paso con el objetivo de eliminar cierta cantidad de la estructura del cubo verde evitando tocar el cubo rojo. Además de esto, el experto también determinó que los cubos debían tener una densidad volumétrica alta (para dificultar el hecho de tallarlos con una interfaz háptica) y que el objetivo se cumple en el momento en que la estructura del cubo verde alcanza una integridad de al menos el 75%. A partir de estos requisitos la escena representa el conocimiento experto mediante LEEKHS de la siguiente manera:
 - Los cubos son objetos tocables definidos por el conjunto de estados físicos {Intacto, Fragmentado, Eliminado}.
 - La herramienta háptica es de tipo “stylus con botón” y solamente puede ejercer las acciones físicas de {Mover, Tallar}.
 - Ambos cubos tienen asociados la métrica de “paso procedural” para registrar la integridad de cada uno y así medir la precisión del usuario.
 - Adicionalmente, el cubo rojo tiene asociada la métrica de “error” para registrar los datos correspondientes a cuando el usuario toque este elemento.
 - El objetivo está definido sobre el cubo verde. Concretamente a través de un estado físico de “fragmentado” y con una integridad de al menos el 75%.
- *Tarea de traslación.* Su finalidad es obtener la capacidad de ubicar y posicionar objetos dentro de un espacio tridimensional. La Figura 6.3 muestra la escena desarrollada, compuesta por tres objetos—esfera, cubo y cilindro—, tres marcas que indican las respectivas posiciones objetivo de cada objeto y una sola herramienta háptica capaz de empujarlos por la escena. Sobre dicha escena el experto determinó que la tarea tendría un único paso con el objetivo de posicionar cada uno de los objetos virtuales dentro de sus respectivas marcas. A mayores, el experto también determinó que cada objeto debería tener diferentes pesos a fin de dificultar su movimiento por la escena (obligando así al participante a ejercer más o menos fuerza mediante una interfaz háptica). A partir de estos requisitos la escena representa el conocimiento experto mediante LEEKHS de la siguiente manera:
 - Los tres objetos son tocables y están definidos por el mismo conjunto de estados físicos {Intacto, Colocado}.

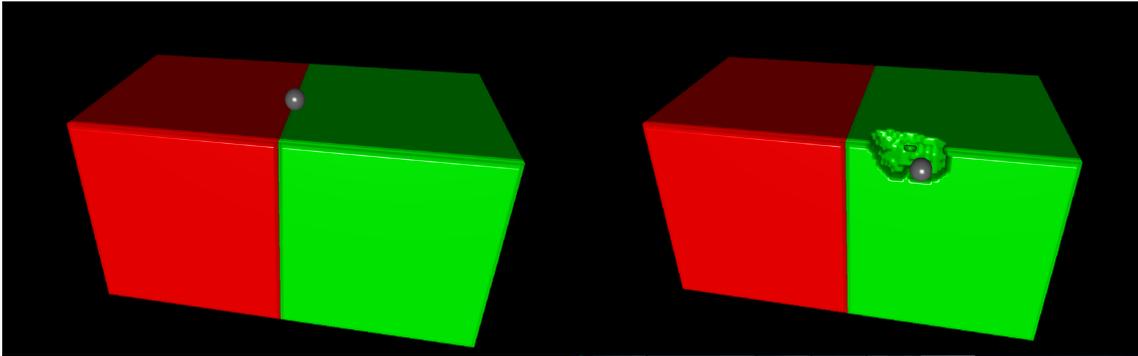


Figura 6.2 – Capturas de la tarea de precisión integrada en el simulador háptico para evaluar el framework

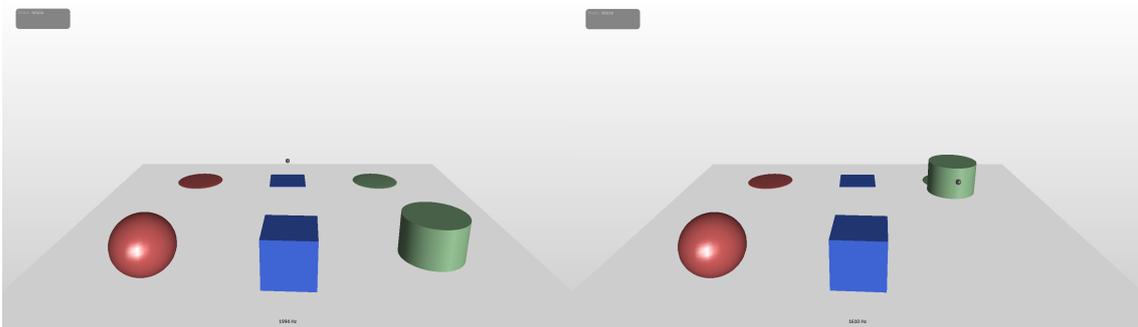


Figura 6.3 – Capturas de la tarea de traslación integrada en el simulador háptico para evaluar el framework

- La herramienta háptica es de tipo “stylus” y solamente puede ejercer las acciones físicas de {Mover, Empujar}.
- Los tres objetos tienen asociados la métrica de “técnica manual” para registrar la posición de cada uno y así medir la distancia a los objetivos marcados en la escena al finalizar la tarea.
- El objetivo está definido sobre los tres objetos y consiste en que todos lleguen al estado físico de “Colocado”, con cada objeto posicionado dentro de su correspondiente marca.

6.2.3. Instrumento de evaluación

Para evaluar el framework y determinar si un público especializado estaría dispuesto a utilizarlo, el experimento consistió en desarrollar dos actividades en un período de tiempo máximo de 15 minutos. Por un lado ejecutar un par de tareas de aprendizaje mediante un sistema de simulación háptica (5 minutos como máximo para cada una) y por el otro completar de forma anónima un cuestionario en papel.

Desarrollo del experimento

Cada participante recibió una copia en papel del cuestionario detallado en el Apartado 6.2.2, el cual debería completar tras ejecutar las dos tareas de aprendizaje propuestas para el experimento. Dado que el proceso era anónimo, se asignó a cada participante un número identificativo para tener una correspondencia entre los datos del cuestionario y los datos del desempeño registrados por LEEKHS en cada una de las tareas del simulador

háptico. La finalidad de esto era verificar a posteriori que los datos registrados en el simulador háptico correspondían con los anotados en papel.

Por otra parte, cabe mencionar que el sistema de simulación háptica estaba compuesto por dos ordenadores portátiles con especificaciones hardware análogas (procesador de cuatro núcleos, 8 Gb de memoria RAM y tarjeta gráfica dedicada); dos interfaces hápticas comerciales pero de apariencia similar (Geomagic Touch y Geomagic Touch x); y el prototipo de simulador háptico descrito en el Apartado 6.2.2. Desde el punto de vista software, el simulador implementaba un prototipo de LEEKHS escrito en el lenguaje de programación C++. Al mismo tiempo, se utilizó la biblioteca Chai3d (Conti *et al.*, 2003) tanto para crear las dos escenas virtuales (correspondientes a cada tarea de aprendizaje) como para controlar las interfaces hápticas. Con estas características, durante el desarrollo del experimento el sistema ejecutó las pruebas con fluidez y sin problemas de rendimiento; manteniendo una ejecución estable tanto en la parte gráfica como en la parte háptica.

Fiabilidad y validez del experimento

Los mecanismos de fiabilidad y validez del experimento se establecieron en base a los principios utilizados en el contexto de la educación y formación quirúrgica (A. G. Gallagher, E. M. Ritter y R. M. Satava, 2003).

Para estimar la fiabilidad de los resultados del experimento se optó por medir la consistencia interna de la variable “aceptación de LEEKHS” (items 1 al 5 del cuestionario), ya que recoge la opinión de los expertos sobre el propio framework tras haberlo utilizado. Gracias a la consistencia interna, es posible comprobar que todos los items que componen una variable producen resultados similares dentro del mismo.

De igual modo, para estimar la validez del experimento también se optó por medir la misma variable. En este caso se evaluó la validez de contenido, que sirve para determinar si los resultados de todos los items de una variable (su contenido) hacen referencia a esta y no a otra. La razón de elegir este tipo de validez para evaluar el framework es precisamente porque es una medida subjetiva, ya que depende por completo de la opinión de un experto.

Mecanismos de puntuación

Dado que el experimento incluía dos tipos actividades distintos, fue necesario establecer sendos mecanismos de puntuación.

Con respecto a la actividad del cuestionario, los datos demográficos no tenían puntuación, pero sí que lo tuvieron los items que componen la variable de “aceptación de LEEKHS” (items del 1 al 5). Todos estos items contienen preguntas de tipo escala Likert (Likert, 1932), pues sus respuestas hacen referencia al grado de acuerdo o desacuerdo del participante. En particular, para las respuestas se optó por utilizar una escala Likert de 5 valores; siendo 1=*totalmente en desacuerdo*, 2=*en desacuerdo*, 3=*no sabe o no contesta*, 4=*de acuerdo* y 5=*totalmente de acuerdo*. Además, cabe mencionar que para este experimento las respuestas 1 y 2 pueden interpretarse como una opinión en contra de la intención de la pregunta, mientras que las respuestas 4 y 5 se interpretan como una opinión a favor de la intención de la pregunta. Evidentemente, las respuestas del tipo 3 son neutrales e indican que el participante no pudo o no quiso opinar.

En lo que respecta al simulador háptico, las puntuaciones vienen definidas de forma automática por LEEKHS en base a los objetivos que tenga una tarea de aprendizaje. De este modo, el desempeño se evalúa mediante una nota de 0 a 10:

- En el caso de la “tarea de precisión” se asigna un 10 siempre y cuando se consiga que la integridad del cubo verde sea igual o inferior al 75% al terminar la tarea. Para este caso en particular, el hecho de tallar parte del cubo rojo penaliza en la nota

(restando un 0.01 en función del porcentaje de integridad que tenga el cubo rojo al finalizar la tarea).

- En el caso de la “tarea traslación” se asigna un 10 siempre y cuando todos los objetos estén colocados dentro de su marca correspondiente. Esto es, que la distancia entre la posición final del objeto y el centro de la marca sea aproximadamente 0 (con un margen de error de ± 0.05).

Por último, también cabe señalar que el experimento no tuvo en cuenta el tiempo empleado en realizar la tarea a la hora de puntuar la nota.

Análisis de los datos

Los datos del experimento se analizaron utilizando el software estadístico *JASP* en su versión 0.13.1 (JASP Team, 2020). Para ello, primero se recopilaron de forma manual todos los datos procedentes de los cuestionarios dentro de una hoja de cálculo y luego se exportaron al formato csv (compatible con *JASP*). Todos estos datos pueden consultarse en el Apéndice B.

Al tratarse de un experimento piloto, todos los datos obtenidos del experimento se analizaron utilizando estadística descriptiva a fin de tener una idea general tanto del perfil del usuario del framework como de su aceptación. Concretamente:

- Para variables nominales se estudió la frecuencia y el porcentaje.
- Para variables ordinales se estudió la frecuencia, porcentaje, mediana, percentil 25 (Q_1), percentil 75 (Q_3), y rango intercuartílico (IQR).
- Para variables de intervalos se estudió la media y la desviación estándar.

Para analizar la consistencia interna de la variable “aceptación de *LEEKHS*”, se utilizó como indicador el coeficiente Alfa de Cronbach (α) que suele ser el más utilizado en la literatura para este tipo de fiabilidad. Este coeficiente acepta valores en el rango 0-1 y, generalmente, se considera como aceptable siempre y cuando sea igual o superior a 0.70 (Taber, 2018).

Por su parte, la validez de contenido de esa misma variable se analizó utilizando como indicador el índice de validez de contenido (cvi) según las propuestas de Lawshe (1975) y Polit y Beck (2006). En realidad, este indicador se divide en dos: el cvi a nivel de ítem (i-cvi), y el cvi a nivel de escala (s-cvi). Así pues, el i-cvi hace referencia a la proporción de expertos que opinan que un ítem es importante frente a que no lo sea; mientras que el s-cvi hace referencia a la proporción media del conjunto de todos los ítems de una variable considerados como importantes. Dado que los ítems de la variable a medir utilizan una escala Likert de 5 valores, para calcular este indicador se interpretó la opinión de un experto como “importante” si puntuaba un ítem como un 4 o un 5 y “no importante” si puntuaba dicho ítem como un 1 o un 2. Para aquellos casos en los que el experto no se posicionó (puntuaba el ítem con un 3), no se tuvo en cuenta al experto a la hora de calcular el indicador correspondiente. Dicho esto, al tratarse de proporciones estos indicadores aceptan valores en el rango 0-1 y, aplicando el criterio de Polit y Beck (2006), se considera un resultado como aceptable siempre y cuando cada i-cvi sea igual o superior a 0.80 y el s-cvi sea igual o superior a 0.90. En el caso particular de que un i-cvi sea inferior a 0.80, esto significa que el ítem implicado bien necesita ser revisado o bien eliminado de la variable.

6.2.4. Variables a medir

Dado que el experimento se diseñó para evaluar la viabilidad del framework, la única variable a medir es la propia denominada “aceptación de *LEEKHS*”. Esta variable está

compuesta por cinco ítems que hacen referencia a la opinión del participante con respecto a diversos aspectos relacionados con el posterior uso del framework: la utilidad de la tarea de precisión (ítem 1), la utilidad de la tarea de traslación (ítem 2), la consideración de la simulación háptica como una ventaja (ítem 3), la disposición del participante a utilizarlos en la práctica (ítem 4) y la satisfacción global del experimento (ítem 5).

Cabe recordar que el experimento se diseñó para celebrarse en un congreso de docencia veterinaria en el que los expertos participantes podían pertenecer tanto a áreas de conocimiento relacionadas con la cirugía como a otras que no tienen nada que ver. Por ello, es importante tener en cuenta este aspecto a la hora de analizar los datos obtenidos para esta variable. Esto es de especial relevancia en el ítem 4, ya que al hacer referencia a la disposición de incluir simuladores en su docencia, se espera que los participantes que no sean de áreas de cirugía respondan negativamente.

6.3. Resultados

La Figura 6.4 resume la información demográfica del experimento, en el que participaron un total de 31 individuos ($N=31$): 17 mujeres y 14 hombres. De dicho total, 22 eran doctores y 9 únicamente graduados universitarios. Además, había 9 personas con “menos de 10 años” de experiencia, 5 con “entre 11 y 20”, 11 con “entre 21 y 30” y 6 con “más de 31” años. En relación al área de conocimiento, 15 individuos pertenecían al área de cirugía (o una relacionada) y 16 a otras. Por otra parte, de los 31 participantes 28 no conocían la tecnología háptica y, de los 3 que sí, solo 1 había utilizado simuladores hápticos con anterioridad al experimento. Finalmente, todos los participantes consideraron que el sentido del tacto es importante dentro de la Veterinaria.

En lo que respecta a la ejecución del simulador háptico (ver Figura 6.5), los 31 participantes completaron la tarea de precisión con una nota media de 7.755 ± 2.345 ; aunque hubo un individuo que obtuvo una nota de 0.13. El tiempo medio en realizar dicha tarea fue de 126.419 ± 32.234 segundos; a excepción de dos individuos que tardaron 198 y 227 segundos respectivamente. Por otro lado, los participantes completaron la tarea de traslación con una nota media de 7.739 ± 0.918 . En este caso el tiempo medio en completar la tarea fue de 168.677 ± 72.292 segundos.

En lo referente a la aceptación de LEEKHS (ver Figura 6.6), las respuestas fueron las siguientes: para el ítem 1 (“la tarea de precisión es útil para adquirir destrezas”) la mediana estaba en 5 (“mucho”) con un rango intercuartílico de 1 (IQR: 4, 5); para el ítem 2 (“la tarea de traslación es útil para adquirir destrezas”) la mediana estaba en 5 (“mucho”) con un rango intercuartílico de 1 (IQR: 4, 5); para el ítem 3 (“la inclusión de simuladores supone una ventaja”) la mediana estaba en 4 (“bastante”) con un rango intercuartílico de 1 (IQR: 4, 5); para el ítem 4 (“disposición a utilizar simuladores hápticos en docencia”) la mediana estaba en 4 (“es probable”) con un rango intercuartílico de 2 (IQR: 2, 4); y para el ítem 5 (“opinión sobre la experiencia en conjunto”) la mediana estaba en 4 (“interesante”) con un rango intercuartílico de 1.5 (IQR: 3.5, 5).

Ahora bien, en relación a la consistencia interna de la propia variable de aceptación (ver Tabla 6.1), el nivel de fiabilidad fue aceptable (5 ítems; $\alpha = 0.732$), siendo la respuesta media de los participantes de 4.142 ± 0.357 (“en acuerdo”). De igual modo, teniendo en cuenta el posible sesgo de los participantes con respecto al ítem 4, al eliminar dicho ítem de la variable se mantiene un nivel de fiabilidad aceptable (4 ítems; $\alpha = 0.714$), siendo ahora la respuesta media de 4.274 ± 0.230 (“en acuerdo”).

En cuanto a la validez del contenido de la misma variable (ver Tabla 6.2), el r -cvi fue aceptable para todos los ítems a excepción del 4 y el s -cvi quedó en el margen de la aceptabilidad con un valor de 0.899. No obstante, y al igual que en la fiabilidad, si se tiene

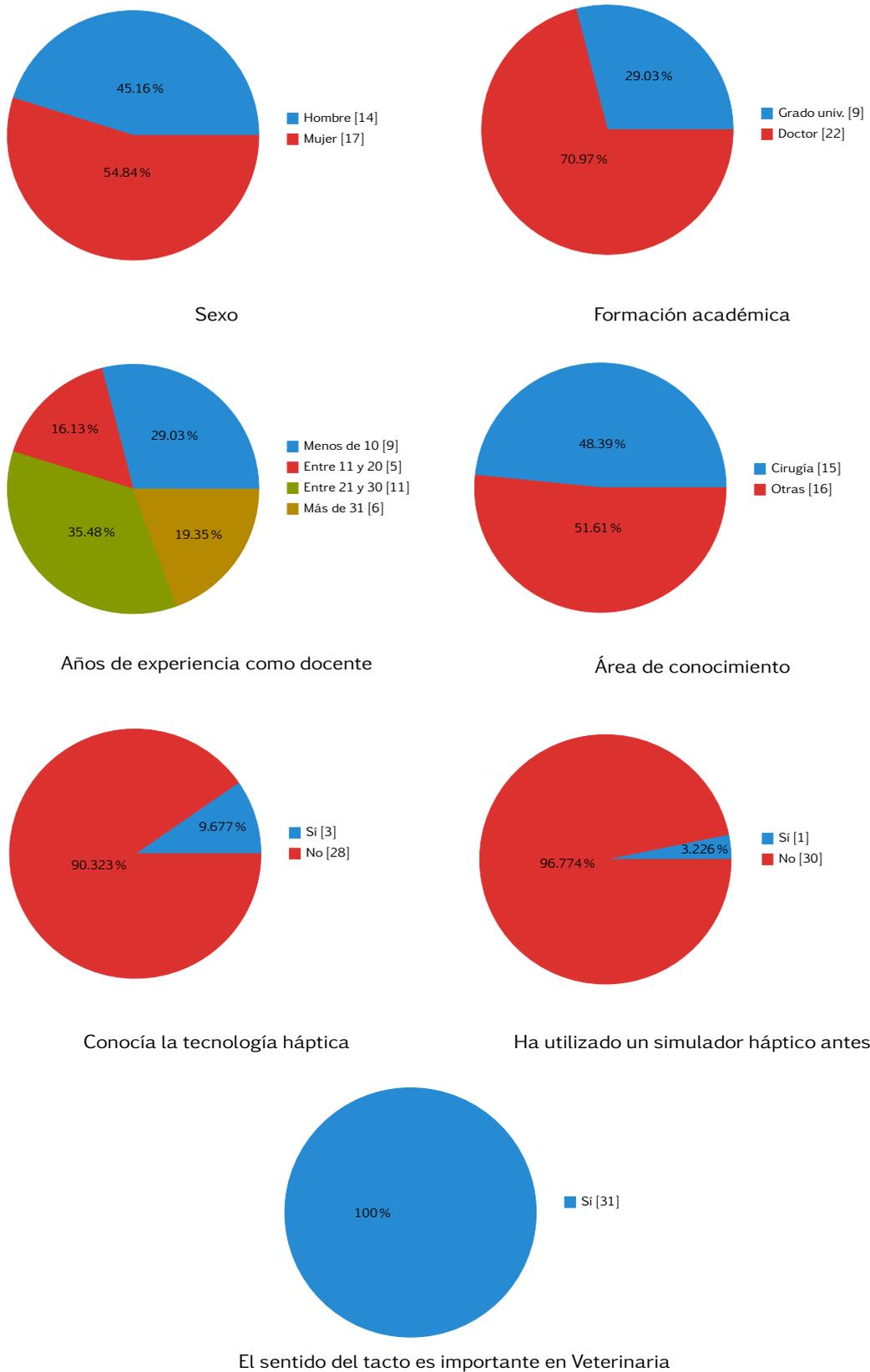


Figura 6.4 – Resultados demográficos del experimento para una población de $N=31$. En cada leyenda, el número entre corchetes corresponde a la cantidad de participantes que respondieron a la opción correspondiente

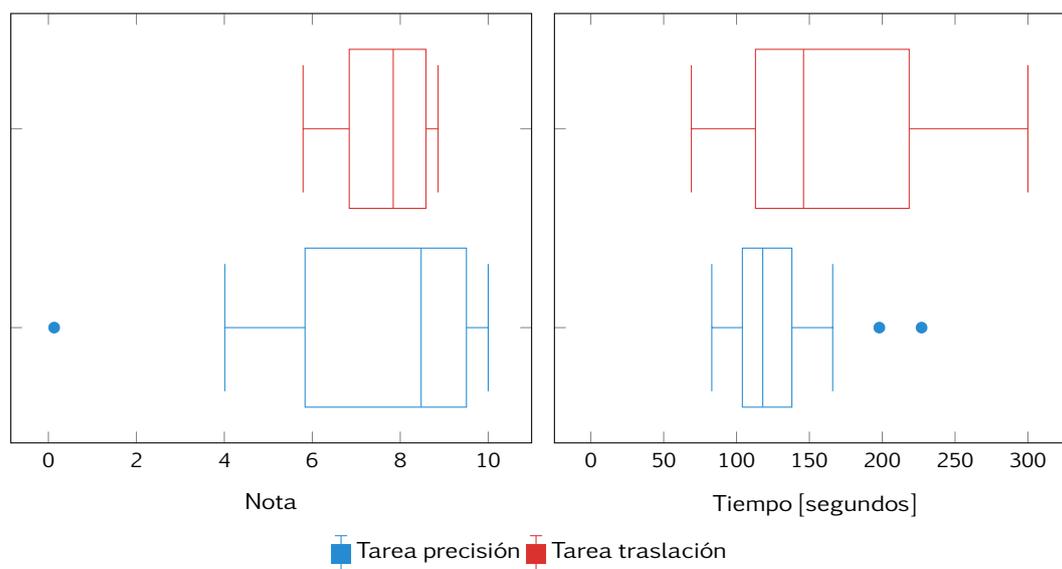


Figura 6.5 – Resultados del desempeño de los participantes en las dos tareas de aprendizaje propuestas con el simulador háptico y para una población de $N=31$

Tabla 6.1 – Estadísticos descriptivos sobre la fiabilidad de la variable “aceptación de LEEKHS” para una población de $N=31$

Número de ítems de la variable	Media \pm Desv. Est.	Correlación media entre los ítems	Fiabilidad (α de Cronbach)
5	4.142 \pm 0.357	0.385	0.732
4*	4.274 \pm 0.230	0.406	0.714

* Quitando el ítem 4

en cuenta el posible sesgo de los participantes con respecto a dicho ítem y se elimina del cómputo de este indicador, el s-cvi sale aceptable con un valor de 0.946.

6.4. Discusión

A grandes rasgos, los resultados obtenidos del experimento piloto pueden ser considerados como aceptables dentro del marco en el que se desarrolló el experimento. Con respecto a la parte demográfica, es posible afirmar que los participantes eran docentes con experiencia: aproximadamente tres cuartas partes de los participantes eran doctores (70.97%) y 22 de los 31 tenían más de 10 años de experiencia (70.97%). En lo referente al área de conocimiento, la proporción entre los participantes fue homogénea (48.39% de cirugía frente a 51.61% de otras). Otro aspecto a destacar es que la mayoría de los participantes desconocían la existencia de tecnología háptica (90.32%) y, entre los que la conocían, tan solo 1 de los 31 expertos había probado los hápticos con anterioridad. A pesar de ello, todos los participantes (100%) consideraron que el sentido del tacto era importante dentro de la disciplina.

Con respecto a los resultados de las tareas de aprendizaje realizadas en el simulador, los expertos puntuaron mejor en promedio en la tarea de traslación que en la de precisión. No obstante, los tiempos promedio entre tareas fueron todo lo contrario: los expertos tardaron más en realizar la tarea de traslación que la de precisión.

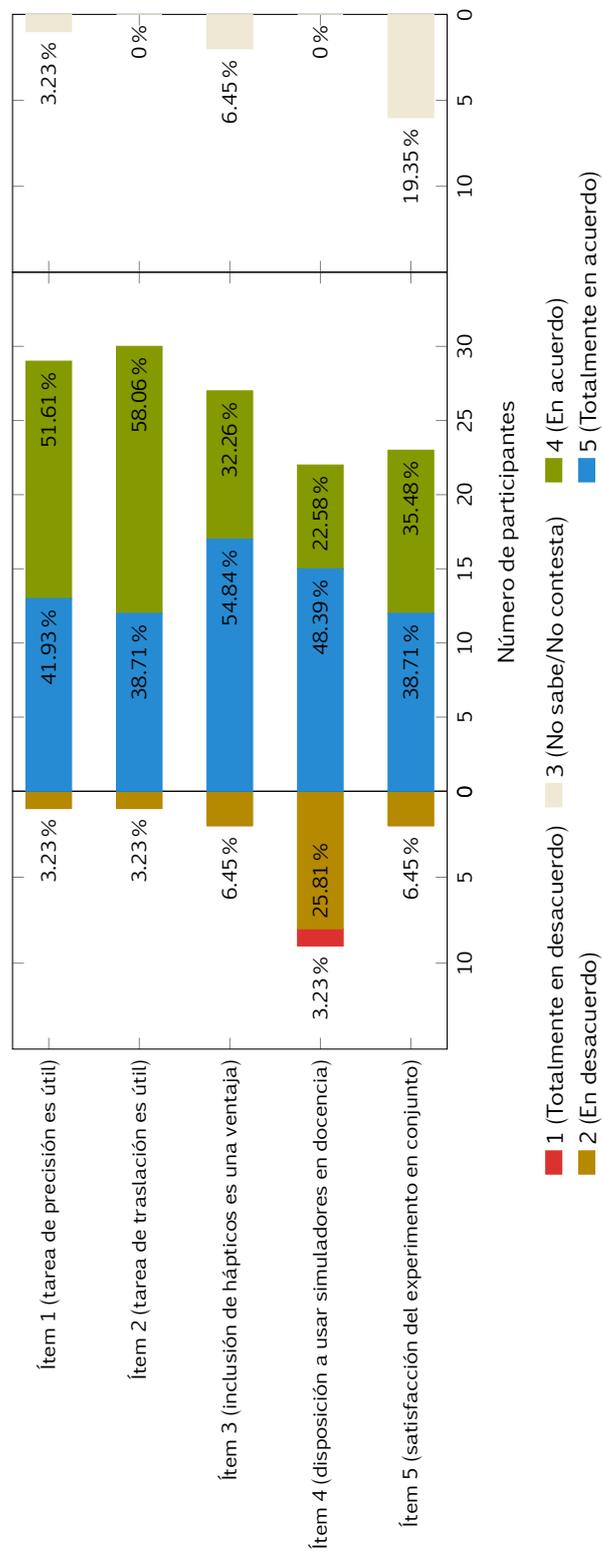


Figura 6.6 – Opiniones de los participantes sobre la aceptación de LBEKHS para una población de $N=31$

Tabla 6.2 – Validez del contenido de la variable “aceptación de LEEKHS” para una población de $N=31$

Aceptación LEEKHS	Totales de respuestas					Número de expertos		r-cvi
	1	2	3	4	5	A favor	Con opinión	
Ítem 1	0	1	1	13	16	29	30	0.967
Ítem 2	0	1	0	12	18	30	31	0.968
Ítem 3	0	2	2	17	10	27	29	0.931
Ítem 4*	1	8	0	15	7	22	31	0.71
Ítem 5	0	2	6	12	11	23	25	0.92
s-cvi (ítems 1-5)								0.899
s-cvi* (ítems 1-3,5)								0.946

* Quitando el ítem 4

6.4.1. RQ1: ¿Cuál es el grado de aceptación del framework?

A partir de los resultados obtenidos del experimento es posible afirmar que la mayoría de participantes aceptaron el framework; ya que respondieron de forma positiva a los ítems relacionados con la variable de aceptación. En el caso de la fiabilidad, el hecho de haber obtenido un $\alpha = 0.732$ para los 5 ítems (o un $\alpha = 0.714$ si se elimina el ítem 4), es un indicativo para verificar la fiabilidad de esta aceptación por parte de los expertos. En el caso de la validez del contenido, los resultados de cada ítem individual son aceptables ($r\text{-cvi} \geq 0.9$) a excepción del ítem 4 ($r\text{-cvi} < 0.9$). En particular, los ítems 1 y 2 son los más relacionados con la utilidad del framework y son los que más $r\text{-cvi}$ obtuvieron (0.967 y 0.968 respectivamente); resultado que puede interpretarse como que los expertos aceptaron la utilidad de cada tarea de aprendizaje y por tanto del framework. Continuando con el análisis de la validez del contenido, los 5 ítems dan un s-cvi casi en el margen de la aceptabilidad ($0.899 < 0.90$), pero eliminando el ítem 4 del cómputo del indicador, este da un valor dentro del umbral ($0.946 > 0.90$). Estos datos indican que, como se podía intuir desde el diseño, es posible que algunos expertos hayan respondido al ítem 4 según la aplicación directa a su área de conocimiento; por lo que para intentar deducir estas opiniones es necesario analizar dicho ítem en detalle.

El ítem 4 hace referencia a la disposición de utilizar simuladores hápticos en docencia y, a pesar de que hubo 22 (70.77%) participantes a favor de ello, 9 (29.04%) estaban en contra. Partiendo del hecho de que la mitad de participantes pertenecían a un área de conocimiento diferente al de la cirugía, una posible explicación a ello es que las respuestas negativas se deban a participantes no relacionados con el área. Al analizar la distribución de respuestas a este ítem en función de dicho aspecto (ver Figura 6.7), es posible observar que 5 expertos cuya área es la cirugía y 4 de otras áreas de conocimiento estuvieron en contra. A la vista de estos datos, en el caso de los expertos de otras áreas su decisión puede significar que no necesitan este tipo de herramientas dentro de su docencia y en el otro caso puede significar que las tareas de aprendizaje no han sido las adecuadas.

Por último, un aspecto significativo en las respuestas de los expertos a la aceptación del framework es que hubo 6 participantes que respondieron con un “no lo sé” al ítem 5 (grado de satisfacción del experimento en conjunto). A simple vista, la respuesta a esto puede ser análoga a la de la validez del contenido del ítem 4 (los expertos no encontraron la utilidad necesaria al framework) o también a que no disponían de datos suficientes para llegar a tomar una decisión sobre la utilidad del mismo. Nuevamente, para intentar comprender estos datos es necesario analizar las respuestas de los expertos a dicho ítem. Si se comparan las respuestas de los 6 participantes frente a lo que respondieron en los

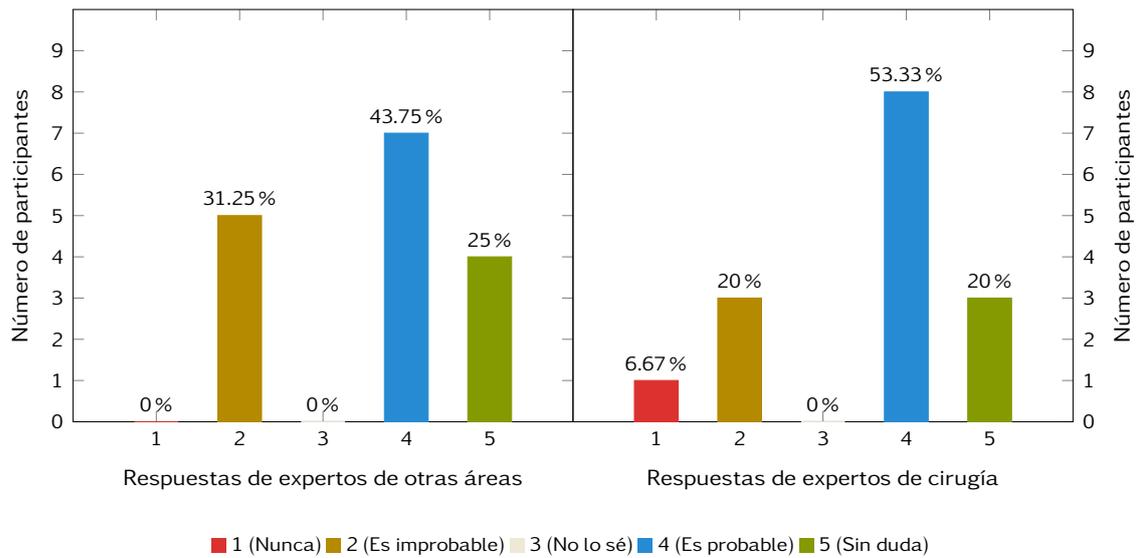


Figura 6.7 – Comparación de las opiniones de los participantes al ítem 4 según su área de conocimiento (para una muestra de $n=9$)

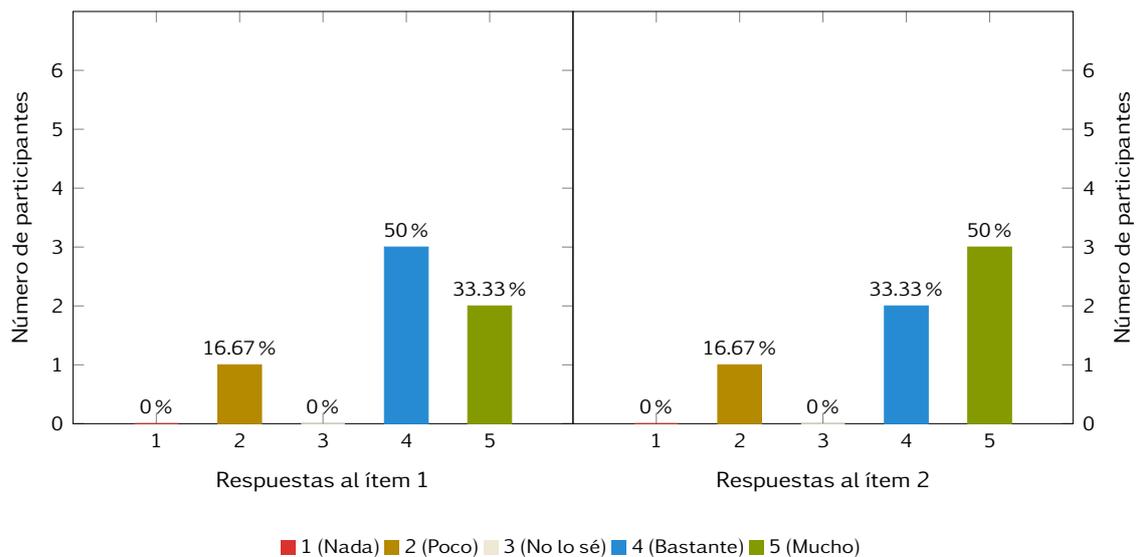


Figura 6.8 – Comparación de las opiniones de los ítems 1 y 2 por parte de los participantes que respondieron al ítem 5 con “no lo sé” (para una muestra de $n=6$)

ítems 1 y 2 (ver Figura 6.8), es posible ver que en ambos casos las respuestas de este grupo de 6 fueron positivas a excepción de 1 persona que encontró “poco” útil cada tarea de aprendizaje. Por lo tanto, una posible explicación a esta situación es que si bien los participantes valoraron positivamente cada elemento del experimento, a la hora de evaluarlo desde un punto de vista más abstracto no pudieron posicionarse.

6.4.2. Limitaciones del experimento

A pesar de que los resultados del experimento son positivos, es necesario comentar que estos no están exentos de amenazas tanto a su fiabilidad como a su validez.

En primer lugar, es necesario remarcar que al tratarse de un experimento piloto los datos obtenidos son preliminares. A esto hay que sumarle que su diseño estuvo condicionado por el hecho de realizarse dentro del marco de un congreso con un tiempo muy ajustado. Esto se tradujo en que si bien el público era idóneo (expertos en docencia), lo cierto es que prácticamente la mitad de los participantes no estaban relacionados directamente con el público objetivo para evaluar el simulador (expertos en cirugía) y esto condicionó en parte los resultados obtenidos. Además, dado que el objetivo era estimar la aceptación del framework, el cuestionario solo contaba con una única variable referente a dicho aspecto y compuesta por 5 ítems. Dicho esto, todos los aspectos anteriores implican la necesidad de mejorar el diseño del experimento a fin de realizar uno nuevo pero a mayor escala.

Otro aspecto a comentar está relacionado con la metodología utilizada para analizar los resultados obtenidos. Al tratarse de un estudio piloto se optó por utilizar la estadística descriptiva como mecanismo de análisis de los datos, la cual sirve para obtener una idea aproximada de estos pero no para conocer su comportamiento. Para dar más rigor al experimento, sería necesario incluir un análisis utilizando estadística inferencial.

6.5. Conclusiones

El principal objetivo de esta tesis es proponer un modelo capaz de representar el conocimiento experto en términos de un simulador háptico. Partiendo de la premisa de que tal conocimiento puede ser representado como una tarea de aprendizaje y una metodología de evaluación, en el Capítulo 4 se presentó el proceso de creación de un modelo para tal fin y en el Capítulo 5 la formalización de este como un framework integrable en simuladores hápticos: LEEKHS. Sin embargo, para verificar que tanto el modelo propuesto como el framework que lo implementa son correctos, antes es necesario llevar a cabo un estudio que evalúe su aceptación por parte de un público especializado e interesado.

Así pues, la evaluación del framework se planteó como un experimento piloto con el objetivo de estimar su aceptación por parte de un conjunto de expertos docentes. Este experimento se realizó dentro de un congreso sobre docencia en Veterinaria y consistió en realizar dos actividades: por un lado completar de forma anónima un cuestionario en papel y por el otro ejecutar un par de tareas de aprendizaje mediante un sistema de simulación háptica que integraba el propio framework LEEKHS. A partir de estas tareas se obtuvieron una serie de datos: demográficos, del desempeño en las tareas de aprendizaje y de la aceptación del propio LEEKHS. Para analizar los datos extraídos se aplicó estadística descriptiva y, en particular, se analizó la fiabilidad y validez de la aceptación del framework por parte de los participantes.

En el estudio participaron un total de 31 expertos, tanto de áreas de conocimiento relacionadas con la cirugía como de otras (aproximadamente la mitad de cada uno). La amplia mayoría de participantes desconocía la existencia de tecnología háptica y solo una persona había utilizado un simulador háptico con anterioridad. A pesar de ello, la mayor parte de los expertos consideraron que el tacto tenía importancia dentro de su campo y más de la mitad mostró una postura favorable al uso de este tipo de simuladores. Así mismo, LEEKHS fue capaz de analizar el desempeño de los expertos y de calcular una nota acorde al rendimiento. Finalmente, en lo que respecta a la propia aceptación del framework es posible afirmar que los expertos valoraron positivamente el experimento; tanto desde el punto de vista de la fiabilidad como del de la validez de su contenido.

Capítulo 7

Conclusiones

Este trabajo de investigación, titulado “Modelo de Enseñanza-Aprendizaje para la Transferencia de Conocimiento Experto a través de Simuladores Hápticos”, se ha centrado en el tema de representar el conocimiento experto a través de simuladores hápticos. Este tipo de conocimiento es difícil de articular y por eso muchas disciplinas recurren a metodologías educativas basadas en la observación y la práctica. Para abordar este problema, el trabajo se centró en estudiar el rol del conocimiento experto en el campo de la cirugía debido a su estrecha relación con el sentido del tacto y al uso de simuladores hápticos como herramientas educativas.

El Capítulo 1 planteó el trabajo de investigación justificando su necesidad dentro del ámbito de la educación médica basada en simuladores: el uso y aplicación de simuladores hápticos todavía es ambiguo y no existe un estándar capaz de representar apropiadamente el conocimiento experto. La tesis propuso cubrir este hueco planteando un modelo capaz de representar el conocimiento experto en dicho ámbito y que además pudiera formalizarse en un framework integrable en cualquier tipo de simulador háptico; inicialmente en los de cirugía pero también generalizable a otras disciplinas.

El Capítulo 2 explicó el contexto en el que está encuadrada esta tesis analizando la literatura académica de diversas disciplinas. En primer lugar identificó que un experto es aquel individuo que tiene pericia gracias al conocimiento que ha ido adquiriendo con la experiencia. Luego determinó los mecanismos de transferencia y adquisición de dicho “conocimiento experto” analizando, por separado, los procesos de enseñanza y aprendizaje para el caso particular de la cirugía. En el caso del proceso de aprendizaje se vio que la adquisición de este tipo de conocimiento se realiza a través de la “práctica deliberada”; una metodología que, a grandes rasgos, consiste en practicar una tarea concreta bajo la supervisión de un experto y con unos objetivos determinados. En el caso de la enseñanza se vio que los simuladores se utilizan como medio para transferir este tipo de conocimiento; aunque de todo el abanico existente de simuladores el capítulo hizo hincapié en los hápticos. Estos simuladores son un subtipo de los virtuales y se caracterizan por utilizar una tecnología específica para simular el sentido del tacto (tanto en entornos artificiales como en entornos teleoperados); teniendo una ventaja única con respecto al resto de simuladores gracias al reclamo del tacto dentro de un entorno de aprendizaje versátil y seguro para el estudiante. Dicho esto, el problema de modelar el conocimiento experto en un simulador háptico se redujo a definir dos aspectos: una tarea de aprendizaje y una metodología para evaluar su desempeño.

El Capítulo 3 revisó la literatura académica relativa al modelado del conocimiento experto en el ámbito de la cirugía. Tras una revisión preliminar que identificó dos metodologías, el capítulo analizó sistemáticamente la literatura de una de ellas, la del *Surgical*

Process Modelling (SPMOD). Este análisis determinó que el SPMOD: (1) es una metodología relativamente reciente; (2) su principal área de aplicación son los sistemas de cirugía asistida por ordenador, donde tiene diversas funciones entre las que está el entrenamiento o evaluación del desempeño de cirujanos; (3) ofrece un proceso sistemático para crear un modelo basado en cinco componentes y que abarca desde la definición de sus datos hasta su generalización; y (4) también contempla una metodología para su evaluación. A partir de estas evidencias, el capítulo concluyó estudiando la manera de adaptar el proceso de creación de un modelo con esta metodología al propósito de esta tesis; es decir, a la creación de un modelo de conocimiento experto para simuladores hápticos.

El Capítulo 4 propuso un modelo para representar el conocimiento experto con el único objetivo de ser transferible mediante simuladores hápticos. Aplicando la adaptación del SPMOD descrita en el capítulo anterior, se describieron los componentes del modelo partiendo de la hipótesis discutida al final del Capítulo 2: el conocimiento experto puede definirse mediante una tarea de aprendizaje y una metodología que evalúe su desempeño. Así, la tarea de aprendizaje se definió como una serie de objetivos repartidos en tres niveles de granularidad y en términos de estados físicos a los que tienen que llegar un conjunto de elementos anatómicos a través de acciones manuales provocadas por la interacción háptica con herramientas. A la par que los objetivos, también se contemplaron cuatro categorías de métricas para poder evaluar el desempeño sobre dichos objetivos. Continuando con el proceso de creación del modelo, se fijaron las entrevistas semiestructuradas como mecanismo de adquisición de datos, se optó por utilizar el lenguaje UML para formalizarlo y se decidió utilizar la instanciación de modelo como metodología para procesar los datos y convertirlos en el modelo final. A mayores, el capítulo también utilizó el lenguaje de modelado BPMN para ilustrar los procesos de enseñanza y aprendizaje relativos al uso del modelo propuesto.

El Capítulo 5 describió la formalización UML del modelo a la que se denominó *LEarning Expert Knowledge by Haptic Simulation* (LEEKHS). Concretamente detalló toda la arquitectura software necesaria para crear un modelo a partir de las características propuestas en el capítulo anterior. Al considerar un simulador háptico como un sistema que se ejecuta en tiempo real, el framework se diseñó siguiendo un patrón de arquitectura software orientado a los datos (Entidad-Componente-Sistema) y consta de tres partes: (1) mecánica de la interacción háptica (para definir los elementos involucrados en la tarea de aprendizaje y comunicarlos con un simulador háptico existente); (2) evaluación del desempeño (para definir las métricas encargadas de evaluar el desempeño sobre los elementos); y (3) entorno de aprendizaje (para controlar el cumplimiento de los objetivos y la ejecución de la propia tarea de aprendizaje).

Finalmente, el Capítulo 6 presentó un experimento piloto realizado para evaluar la aceptación de LEEKHS por parte de un público potencialmente interesado en su aplicación. El experimento se celebró en el marco de VetDoc 2017 (un congreso de docencia en Veterinaria) y consistió en realizar dos actividades: por un lado ejecutar dos tareas de aprendizaje implementadas en un simulador háptico que contenía un prototipo del framework LEEKHS y por el otro rellenar un cuestionario para valorar su aceptación. En el experimento participaron un total de 31 expertos pertenecientes tanto a áreas de conocimientos relacionadas con la cirugía como a otras, y de los que la amplia mayoría no conocía la existencia de tecnología háptica. Sin embargo, los resultados obtenidos reflejaron la aceptación del framework por parte de la mayoría de participantes; con unos niveles de fiabilidad y validez adecuados.

7.1. Cumplimiento de los objetivos

El objetivo principal de esta tesis ha sido cubrir la aparente necesidad de un mecanismo para representar las funciones de un experto dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje en un entorno simulado, concretamente de uno que utiliza simuladores hápticos. Para alcanzar este objetivo se ha propuesto un modelo que representa la esencia del conocimiento experto en términos de una tarea de aprendizaje: definiendo tanto su estructura (elementos involucrados y objetivos a cumplir) como su forma de evaluación (métricas de desempeño asignadas sobre los elementos que tienen objetivos). Conforme a esta definición, el objetivo se cumplió definiendo *LEEKHS*, un framework que refleja dicha esencia y que además puede integrarse en cualquier tipo de simulador háptico. La idea inicial era integrar el framework en simuladores del ámbito de la cirugía pero debido a la naturaleza del problema a resolver, el diseño se generalizó para cualquier otra disciplina.

No obstante, para materializar la finalidad principal del trabajo se planteó una metodología basada en completar una serie de objetivos específicos:

1. El primer objetivo fue definir aquellas características necesarias para representar tanto la transferencia del conocimiento experto como su adquisición a través de simuladores hápticos. Esto se consiguió revisando la literatura académica de la educación médica y analizando como funcionan en dicho ámbito los procesos de enseñanza-aprendizaje. **El resultado fue que el conocimiento experto puede reflejarse definiendo una tarea de aprendizaje y una metodología para evaluar el desempeño.**
2. El segundo objetivo consistió en identificar una metodología apropiada para crear un modelo del conocimiento experto a partir de los dos requisitos identificados en el punto anterior. Esto se logró revisando la literatura académica relativa al modelado de conocimiento experto en el ámbito de la cirugía. **Como resultado se identificó el *Surgical Process Modelling*, una metodología relativamente reciente enfocada a crear modelos del flujo de trabajo de una cirugía.** A pesar de no estar directamente relacionada con el propósito de este trabajo, se optó por utilizar dicha metodología porque permite crear un modelo de forma sistemática.
3. El tercer objetivo era crear un modelo para reflejar el conocimiento experto a partir de la metodología identificada en el punto anterior. **El modelo resultante se caracterizó por describir el conocimiento experto en dos partes: (1) una tarea de aprendizaje definida por un conjunto de objetivos repartidos en tres niveles de granularidad, asignados a diferentes elementos participantes en la propia tarea que pasan por diferentes estados, los cuales son alcanzables a través de unas determinadas acciones; y (2) una metodología de evaluación consistente en asignar un conjunto de diferentes métricas a aquellos elementos participantes en la tarea que tienen asignados unos objetivos concretos.** A mayores, también se definieron los procesos de enseñanza y aprendizaje con el modelo para comprender mejor su funcionamiento.
4. El cuarto objetivo fue formalizar dicho modelo utilizando un lenguaje de modelado de sistemas software. **Utilizando el lenguaje UML, el resultado final fue el framework *LEEKHS*.** Este framework recoge la esencia del modelo propuesto en el apartado anterior y además generaliza sus requisitos para que pueda aplicarse no solo a simuladores hápticos de cirugía, sino a los de cualquier otra disciplina cuyo proceso de enseñanza-aprendizaje pueda expresarse en términos de una tarea de aprendizaje.

5. El quinto y último objetivo fue validar el propio LEEKHS—y en consecuencia el modelo propuesto—, por parte de un público especializado. Para ello se llevó a cabo un experimento piloto en el marco de un congreso sobre docencia en Veterinaria (VetDoc 2017). El diseño del experimento incluyó dos actividades a realizar por parte de los asistentes; utilizar un simulador háptico que integraba LEEKHS y completar un cuestionario. Mientras que el simulador háptico implementaba un prototipo de LEEKHS y dos tareas de aprendizaje a modo de demostración, el cuestionario servía como herramienta para evaluar la aceptación del propio framework. **En el experimento participaron 31 expertos y su resultado fue satisfactorio, ya que la mayoría de participantes valoraron positivamente su funcionamiento.**

7.2. Aportaciones

El desarrollo de esta tesis ha dado lugar a una serie de contribuciones relativas tanto al ámbito científico como al académico.

7.2.1. Artículos de investigación

Desde el punto de vista científico, se han publicado 10 artículos de investigación repartidos en revistas y congresos de ámbito nacional e internacional. El listado completo de publicaciones se presenta a continuación, ordenado por temática e indicando en negrita (y donde corresponde) aquellas que han sido más significativas:

- El modelo propuesto para representar el conocimiento experto mediante simuladores hápticos (ver Capítulo 4), surgió tras realizar múltiples iteraciones mediante una estrecha comunicación con docentes del ámbito de la Veterinaria. Como resultado se publicaron los siguientes artículos:
 1. «Computer Surgery 3D Simulations for a New Teaching-Learning Model» (Esteban, Fernández, Matellán *et al.*, 2011).
 2. «Haptic Expert Simulators for Surgery» (Esteban, Fernández, Matellán *et al.*, 2013).
 3. «Learning Systems through Haptic Simulators - a Domain Expertise Approach» (Esteban, Fernández, Conde y Matellán, 2015). **ISI JCR 2015 Q3 (engineering, multidisciplinary).**
- El diseño final de LEEKHS (ver Capítulo 5), también resultó de un proceso iterativo de refinamiento; ya que inicialmente se llamó *Simulators for Haptic Use in Learning Environments* (SHULE) y estaba centrado exclusivamente en el ámbito de la cirugía. Las publicaciones que certifican dicha evolución han sido:
 4. «Design of a Haptic Simulator Framework for Modelling Surgical Learning Systems» (Esteban, Fernández, Conde y Matellán, 2013).
 5. «Implementation of a Haptic Simulation Environment for Surgical Learning Systems» (Esteban, Fernández, Conde y Lera, 2014).
 6. «Playing with SHULE: Surgical Haptic Learning Environment» (Esteban, Fernández, Conde y García-Peñalvo, 2014).
 7. «HCore: A Game Engine Independent OO Architecture for Fast Development of Haptic Simulators for Teaching/Learning» (J. de Pedro *et al.*, 2016).
 8. «Design Patterns Combination for Agile Development of Teaching/Learning Haptic Simulators» (Fernández, Esteban, Rodríguez-Lera *et al.*, 2016). **ISI JCR 2016 Q4 (engineering, multidisciplinary).**

9. «Improving Motivation in a Haptic Teaching/Learning Framework» (Fernández, Esteban, Conde *et al.*, 2016) ISI JCR 2016 Q4 (**engineering, multidisciplinary**).
- Por último, para poder llevar a cabo el experimento en el congreso VetDoc 2017 (ver Capítulo 6), se envió un póster presentando el modelo propuesto en la tesis:
10. «Simulación háptica: una alternativa al modelo del aprendizaje» (Fernández, Esteban, Rodríguez-Sedano *et al.*, 2017).

7.2.2. Trabajos académicos

Desde la perspectiva académica, se han codirigido 3 trabajos finales de grado y 1 de máster dentro de la Universidad de León:

- El diseño, desarrollo e implementación del prototipo de LEEKHS ha sido posible gracias a los siguientes trabajos finales de grado:
 1. «Implementación de un simulador virtual para la evaluación de la interacción háptica» (Inyesto, 2017).
 2. «Fábrica háptica abstracta: implementación de una fábrica de simuladores virtuales para la evaluación de la interacción háptica» (A. de Pedro, 2018).
 3. «Generación automática de simuladores hápticos para el entrenamiento guiado de tareas secuenciales» (Hernández, 2018).
- Por otra parte, también se codirigió un trabajo final de máster cuya temática surge como consecuencia de la presente tesis:
 4. «El estado de la cuestión en la interacción en entornos virtuales: una revisión sistemática» (Gutiérrez, 2018).

7.3. Trabajos y futura línea de investigación

El trabajo desarrollado en esta tesis ha dejado pendiente de analizar algunos aspectos a tener en cuenta para su futuro:

- *Desarrollo de algoritmos para la evaluación de métricas del desempeño.* La evaluación objetiva de las destrezas manuales no es trivial, de hecho es toda una rama de conocimiento de la que, en esta tesis, se hizo una pequeña introducción en el Apartado 2.3.2. El framework representa este tipo de aptitudes a través de métricas (ver Apartado 5.3.2), planteando su evaluación como estrategias o algoritmos para compararlas según su tipo; idealmente, para comparar la registrada para el experto y la registrada para el estudiante. En relación al desarrollo de este tipo de estrategias, un trabajo futuro consistiría en implementar diferentes algoritmos que comparasen los datos asociados a cada tipo de métrica. Especialmente para las de tipo “tiempo” y “técnicas manuales”, pues sus datos están medidos en determinados momentos y ordenados cronológicamente. Con esa finalidad, podrían utilizarse cualquier tipo de análisis de series temporales, desde estadística descriptiva hasta modelos del lenguaje estadístico (ver el trabajo Reiley *et al.* (2011) para más detalle).
- *Desarrollo de estrategias para la comprobación del cumplimiento de objetivos en una tarea de aprendizaje.* De forma análoga al punto anterior, el framework comprueba la realización de los objetivos de una tarea a través de estrategias o algoritmos (ver Apartado 5.3.2). Actualmente los objetivos están definidos como estados físicos a los que tienen que llegar diferentes objetos virtuales de la tarea, comparando para tal fin los datos correspondientes. En relación a ello, otro posible trabajo surge a la hora de desarrollar los algoritmos que comparen el cumplimiento de los objetivos

utilizando algún mecanismo que permita dar o no un margen de error. La idea de todo esto es ofrecer al experto diferentes niveles de dificultad personalizables a la hora de cumplir los objetivos de una tarea de aprendizaje.

- *Creación de una base de conocimiento experto de referencia.* El framework presentado en el Capítulo 5 permite expresar el conocimiento experto en términos de un simulador háptico. Al principio de este trabajo se ha visto cómo ese tipo de conocimiento es propio y único de cada individuo. Sin embargo, hasta el momento su transferencia requería la presencia del experto a la hora de supervisar el proceso de aprendizaje. En relación a esto, un posible trabajo futuro reside en la creación de una base de conocimiento inspirada en el modelo de esta tesis, a fin de poder persistir las heurísticas de los expertos de cara a su divulgación. Tras ser verificada, dicha base de conocimiento podría utilizarse como referencia en algún área para, idealmente, dar la posibilidad de prescindir de la presencia del experto.
- *El conocimiento experto como “objeto de aprendizaje” en sistemas de gestión del aprendizaje.* La educación basada en simulación es una potente herramienta para complementar la formación de los estudiantes. Gracias al framework planteado, cualquier simulador háptico puede convertirse en un entorno de aprendizaje. En el Apartado 4.3 se mostraron los flujos de trabajo de los procesos de enseñanza-aprendizaje asociados al modelo propuesto en esta tesis. Estos procesos reflejan cómo el framework gira alrededor de la unidad de aprendizaje y del feedback que esta genera tras su uso en un simulador háptico. Otro trabajo futuro consistiría en encapsular como objetos de aprendizaje, tanto la unidad de aprendizaje como el feedback obtenido tras cada sesión con el simulador. De este modo, dichos objetos podrían ser integrados en algún sistema de gestión del aprendizaje; no solo para que los docentes pudieran distribuir las unidades, sino también para el envío automático y transparente del feedback generado tras cada sesión de los estudiantes con el simulador. La finalidad última de ello es obtener una mejor respuesta de los estudiantes incentivando la práctica deliberada. Esta idea se planteó en detalle en las publicaciones Esteban, Fernández, Conde y García-Peñalvo (2014) y Fernández, Esteban, Conde *et al.* (2016).
- *Realización de experimentos que validen el proceso completo de enseñanza-aprendizaje con el modelo.* El Capítulo 6 presentó los resultados preliminares de aceptación del modelo. No obstante esta validación fue parcial, ya que su finalidad era evaluar el framework desde el punto de vista de los docentes. Para conocer realmente el alcance y la utilidad del framework, como trabajo futuro se plantea la realización de experimentos a mayor escala que incluyan todo el proceso de enseñanza y aprendizaje descrito en el Apartado 4.3: desde el diseño de la tarea de aprendizaje con el experto hasta la verificación de la unidad de aprendizaje. Además de recoger la opinión del experto, sería de gran utilidad también recoger la opinión de los estudiantes.

Del mismo modo, este trabajo ha sentado las bases para comenzar una nueva línea de investigación en el ámbito de la simulación háptica y la educación. Los simuladores hápticos pueden ser entornos de aprendizaje inmersivos de forma análoga, por ejemplo, a los simuladores de vuelo. Al igual que estos últimos recrean físicamente y en su totalidad la estructura de una cabina de vuelo o pilotaje, los simuladores hápticos pueden combinarse con el uso de gafas de realidad virtual para obtener una experiencia de aprendizaje integral e inmersiva; permitiendo al usuario no solo realizar tareas de aprendizaje concretas, sino un procedimiento de principio a fin. Generalmente, este tipo de dispositivos hápticos suelen considerarse como “de escritorio”, al tener todos sus mecanismos anclados a una

base. Esta restricción limita el espacio de trabajo en el que puede utilizarse el dispositivo, lo que podría suponer un problema en algunas situaciones a la hora de crear simuladores que requieran una mayor libertad de movimiento dentro del entorno virtual. Por esta razón, se hace necesario un mecanismo de interacción que permita dar al estudiante la libertad de movimiento en el uso de dispositivos hápticos. Este aspecto, unido al modelo de conocimiento experto y al framework LEEKHS planteados en este trabajo, haría que la incorporación de simuladores hápticos en planes de estudios de cirugía o de otras ramas desempeñara un papel aún más relevante del que tiene ahora.

Bibliografía

- [1] Rajesh Aggarwal *et al.* «Training and Simulation for Patient Safety». En: *Quality and Safety in Health Care* 19 (Suppl 2 8 de ene. de 2010), págs. i34-i43. ISSN: 1475-3898, 1475-3901. DOI: 10.1136/qshc.2009.038562.
- [2] Patrick Ainley y Helen Rainbird. *Apprenticeship: Towards a New Paradigm of Learning*. 1.^a ed. London: Routledge, 1999. 222 págs. ISBN: 978-1-135-37030-5. DOI: 10.4324/9781315042091.
- [3] Medhat Alaker, Greg R. Wynn y Tan Arulampalam. «Virtual Reality Training in Laparoscopic Surgery: A Systematic Review & Meta-Analysis». En: *International Journal of Surgery* 29 (mayo de 2016), págs. 85-94. ISSN: 1743-9191. DOI: 10.1016/j.ijso.2016.03.034.
- [4] Maryam Alavi y Dorothy E. Leidner. «Knowledge Management and Knowledge Management Systems: Conceptual Foundations and Research Issues». En: *MIS Quarterly* 25.1 (mar. de 2001), págs. 107-136. ISSN: 02767783. DOI: 10.2307/3250961.
- [5] Benjamin Samuel Bloom. *Taxonomy of Educational Objectives: The Classification of Educational Goals. Handbook i: Cognitive Domain*. 1st. New York: Longman, Greens, 1956. 207 págs. ISBN: 978-0-582-32386-5. URL: psycnet.apa.org/record/2003-00041-000.
- [6] Esther M. Bonrath *et al.* «Defining Technical Errors in Laparoscopic Surgery: A Systematic Review». En: *Surgical Endoscopy* 27.8 (ago. de 2013), págs. 2678-2691. ISSN: 0930-2794, 1432-2218. DOI: 10.1007/s00464-013-2827-5.
- [7] Paul Bradley. «The History of Simulation in Medical Education and Possible Future Directions». En: *Medical Education* 40.3 (mar. de 2006), págs. 254-262. ISSN: 0308-0110, 1365-2923. DOI: 10.1111/j.1365-2929.2006.02394.x.
- [8] John Bransford *et al.* «Chapter 2. How Experts Differ from Novices». En: *How People Learn. Brain, Mind, Experience, and School*. 8.^a ed. Washington, DC: National Academy Press, 2003, págs. 31-50. ISBN: 0-309-07036-8. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/66628066>.
- [9] Grigori C. Burdea. «Haptic Feedback for Virtual Reality». En: *Proceedings of International Workshop on Virtual Prototyping*. International Workshop on Virtual Prototyping. 87-96, mayo de 1999.
- [10] Caroline G.L Cao *et al.* «Hierarchical Decomposition of Laparoscopic Procedures». En: *Ebook: Medicine Meets Virtual Reality*. Medicine Meets Virtual Reality. Vol. 62. Studies in Health Technology and Informatics. IOS Press, ene. de 1999, págs. 83-89. ISBN: 978-90-5199-445-2. DOI: 10.3233/978-1-60750-906-6-83.
- [11] Michelene T. H. Chi, Robert Glaser y Marshall J. Farr, eds. *The Nature of Expertise*. 1.^a ed. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 1988. 434 págs. ISBN: 978-0-89859-711-0. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781317760283>.

- [12] Timothy R. Coles, Dwight Meglan y Nigel W. John. «The Role of Haptics in Medical Training Simulators: A Survey of the State of the Art». En: *IEEE Transactions on Haptics* 4.1 (ene. de 2011), págs. 51-66. ISSN: 1939-1412. DOI: 10.1109/TOH.2010.19.
- [13] Allan Collins, John Seely Brown y Ann Holum. «Cognitive Apprenticeship: Making Thinking Visible». En: *American Educator* 15.3 (1991), págs. 38-46. ISSN: 0148-432X. URL: <https://eric.ed.gov/?id=EJ440511>.
- [14] F. Conti *et al.* «The Chai Libraries». En: *Proceedings of Eurohaptics 20030*. Eurohaptics 2003. Dublin, Ireland, 2003, págs. 496-500. URL: <https://www-cs.stanford.edu/~dmorris/publications/chai.eurohaptics.2003.abstract.pdf>.
- [15] David A. Cook *et al.* «Comparative Effectiveness of Instructional Design Features in Simulation-Based Education: Systematic Review and Meta-Analysis». En: *Medical Teacher* 35.1 (ene. de 2013), e867-e898. ISSN: 0142-159X, 1466-187X. DOI: 10.3109/0142159X.2012.714886.
- [16] Alba de Pedro. «Fábrica háptica abstracta: implementación de una fábrica de simuladores virtuales para la evaluación de la interacción háptica». Trabajo Final de Grado. León, Spain: Universidad de León, jul. de 2018. 97 págs.
- [17] Javier de Pedro *et al.* «HCore: A Game Engine Independent OO Architecture for Fast Development of Haptic Simulators for Teaching/Learning». En: *Proceedings of the 2016 Fourth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (TEEM)*. 2016 Fourth International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (TEEM). Salamanca, Spain: ACM Press, 2016, págs. 1011-1018. ISBN: 978-1-4503-4747-1. DOI: 10.1145/3012430.3012640.
- [18] Hubert L. Dreyfus, Stuart E. Dreyfus y Tom Athanasiou. «Chapter 1. Five Steps from Novice to Expert». En: *Mind Over Machine: The Power of Human Intuition and Expertise in the Era of Computer*. 1.^a ed. New York, NY: The Free Press, 1986, págs. 16-51. ISBN: 0-7432-0551-0. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/12554464>.
- [19] Marcy P. Driscoll. «Chapter 10. Gagné's Theory of Instruction». En: *Psychology of Learning for Instruction*. 1.^a ed. Needham Heights, MA: Allyn & Bacon, A Division of Paramount Publishing, Inc., 1994, págs. 341-372. ISBN: 0-205-13928-0. URL: <https://eric.ed.gov/?id=ED369772>.
- [20] Marlon Dumas *et al.* *Fundamentals of Business Process Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN: 978-3-662-56508-7 978-3-662-56509-4. DOI: 10.1007/978-3-662-56509-4.
- [21] B. Dunkin *et al.* «Surgical Simulation: A Current Review». En: *Surgical Endoscopy* 21.3 (21 de feb. de 2007), págs. 357-366. ISSN: 0930-2794, 1432-2218. DOI: 10.1007/s00464-006-9072-0.
- [22] Abdulmotaleb El Saddik. «The Potential of Haptics Technologies». En: *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 10.1 (feb. de 2007), págs. 10-17. DOI: 10.1109/MIM.2007.339540.
- [23] Ronald M. Epstein y Edward M. Hundert. «Defining and Assessing Professional Competence». En: *JAMA* 287.2 (1 de sep. de 2002), pág. 226. ISSN: 0098-7484. DOI: 10.1001/jama.287.2.226.
- [24] K. Anders Ericsson. «Deliberate Practice and the Acquisition and Maintenance of Expert Performance in Medicine and Related Domains». En: *Academic Medicine* 79 (Supplement oct. de 2004), S70-S81. ISSN: 1040-2446. DOI: 10.1097/00001888-200410001-00022.

- [25] K. Anders Ericsson, Ralf Th. Krampe y Clemens Tesch-Römer. «The Role of Deliberate Practice in the Acquisition of Expert Performance». En: *Psychological Review* 100.3 (1993), págs. 363-406. DOI: 10.1037/0033-295X.100.3.363.
- [26] Gonzalo Esteban, Camino Fernández, Miguel Ángel Conde y Francisco J. García-Peñalvo. «Playing with SHULE: Surgical Haptic Learning Environment». En: *Proceedings of the 2014 Second International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (TEEM)*. 2014 Second International Conference on Technological Ecosystems for Enhancing Multiculturality (TEEM). Salamanca, Spain: ACM Press, oct. de 2014, págs. 247-253. ISBN: 978-1-4503-2896-8. DOI: 10.1145/2669711.2669907.
- [27] Gonzalo Esteban, Camino Fernández, Miguel Ángel Conde y Francisco Javier Rodríguez Lera. «Implementation of a Haptic Simulation Environment for Surgical Learning Systems». En: *Proceedings of the 2014 International Symposium on Computers in Education (SIIE)*. 2014 International Symposium on Computers in Education (SIIE). Logroño, La Rioja, Spain: IEEE, nov. de 2014, págs. 81-86. ISBN: 978-1-4799-4428-6. DOI: 10.1109/SIIE.2014.7017709.
- [28] Gonzalo Esteban, Camino Fernández, Miguel Ángel Conde y Vicente Matellán. «Design of a Haptic Simulator Framework for Modelling Surgical Learning Systems». En: *Proceedings of the 2013 First International Conference on Technological Ecosystem for Enhancing Multiculturality (TEEM)*. 2013 First International Conference on Technological Ecosystem for Enhancing Multiculturality (TEEM). Salamanca, Spain: ACM Press, 2013, págs. 87-94. ISBN: 978-1-4503-2345-1. DOI: 10.1145/2536536.2536551.
- [29] Gonzalo Esteban, Camino Fernández, Miguel Ángel Conde y Vicente Matellán. «Learning Systems through Haptic Simulators - a Domain Expertise Approach». En: *International Journal of Engineering Education* 31.3 (2015), págs. 726-735. ISSN: 0949-149X. URL: <https://www.ijee.ie/contents/c310315.html>.
- [30] Gonzalo Esteban, Camino Fernández, Vicente Matellán *et al.* «Computer Surgery 3D Simulations for a New Teaching-Learning Model». En: *Proceedings of the 2011 IEEE 1st International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*. 2011 IEEE 1st International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH). Braga, Portugal: IEEE, nov. de 2011, págs. 111-114. ISBN: 978-1-4673-0433-7. DOI: 10.1109/SeGAH.2011.6165445.
- [31] Gonzalo Esteban, Camino Fernández, Vicente Matellán *et al.* «Haptic Expert Simulators for Surgery». En: *British Journal of Surgery*. Abstracts of the 18th Congress of the Spanish Society for Surgical Investigations, León, October 2012 100.1 (4 de mar. de 2013), págs. 11-12. DOI: 10.1002/bjs.9089.
- [32] Eric Farmer *et al.* *Handbook of Simulator-Based Training*. 1.^a ed. London: Routledge, 3 de feb. de 2017. 384 págs. ISBN: 978-1-315-25367-1. DOI: 10.4324/9781315253671.
- [33] Trudi Farrington-Darby y John R. Wilson. «The Nature of Expertise: A Review». En: *Applied Ergonomics* 37.1 (ene. de 2006), págs. 17-32. ISSN: 00036870. DOI: 10.1016/j.apergo.2005.09.001.
- [34] Edward A. Feigenbaum y Pamela McCorduck. *The Fifth Generation: Artificial Intelligence and Japan's Computer Challenge to the World*. 1.^a ed. Reading, MA: Addison-Wesley, 1983. 275 págs. ISBN: 0-201-11519-0. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/1078839310>.
- [35] Camino Fernández, Gonzalo Esteban, Miguel Ángel Conde *et al.* «Improving Motivation in a Haptic Teaching/Learning Framework». En: *International Journal*

- of Engineering Education* 32 (1B 2016), págs. 553-562. ISSN: 0949-149X. URL: <https://www.ijee.ie/contents/c320116B.html>.
- [36] Camino Fernández, Gonzalo Esteban, Francisco Javier Rodríguez-Lera *et al.* «Design Patterns Combination for Agile Development of Teaching/Learning Haptic Simulators». En: *International Journal of Engineering Education* 32 (2B 2016), págs. 1036-1052. ISSN: 0949-149X. URL: <https://www.ijee.ie/contents/c320216B.html>.
- [37] Camino Fernández, Gonzalo Esteban, Francisco Jesús Rodríguez-Sedano *et al.* «Simulación háptica: una alternativa al modelo del aprendiz». En: *Proceedings of the 2017 IV Congreso de Docencia Veterinaria (VetDoc)*. 2017 IV Congreso de Docencia Veterinaria (VetDoc). Vol. 2. León, Spain, jul. de 2017, págs. 92-93. URL: <http://www.vetdoc.es/index.php?journal=vetdoc&page=issue&op=view&path%5B%5D=3>.
- [38] Paul Morris Fitts y Michael I. Posner. *Human Performance*. Basic Concepts in Psychology Series. Belmont, California: Brooks/Cole, 1967. 162 págs. URL: https://openlibrary.org/books/OL5535006M/Human_performance.
- [39] Martin Fowler. *Uml Distilled. A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language*. 3.^a ed. Boston: Addison-Wesley Professional, 2004. 175 págs. ISBN: 0-321-19368-7. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/960075255>.
- [40] Robert M. Gagné. «Domains of Learning». En: *Interchange* 3.1 (mar. de 1972), págs. 1-8. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02145939>.
- [41] Robert M. Gagné *et al.* «Chapter 1. Introduction to Instructional Design». En: *Principles of Instructional Design*. 5.^a ed. Belmont, California: Wadsworth, A division of Thomson Learning Inc., 2004, págs. 1-17. ISBN: 0-534-58284-2. URL: <https://psycnet.apa.org/record/1974-33131-000>.
- [42] A. G. Gallagher, E. M. Ritter y R. M. Satava. «Fundamental Principles of Validation, and Reliability: Rigorous Science for the Assessment of Surgical Education and Training». En: *Surgical Endoscopy* 17.10 (1 de oct. de 2003), págs. 1525-1529. ISSN: 0930-2794, 1432-2218. DOI: 10.1007/s00464-003-0035-4.
- [43] Anthony G. Gallagher y E. Matthew Ritter. «Virtual Reality: Objective Assessment, Education, and Training». En: *Emerging Technologies in Surgery*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, págs. 27-33. ISBN: 978-3-540-39599-7 978-3-540-39600-0. DOI: 10.1007/978-3-540-39600-0_5.
- [44] Erich Gamma *et al.*, eds. *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. 37.^a ed. Addison-Wesley Professional Computing Series. Reading, Mass: Addison-Wesley, 1995. 395 págs. ISBN: 978-0-201-63361-0.
- [45] Maryam Gholinejad, Arjo J. Loeve y Jenny Dankelman. «Surgical Process Modelling Strategies: Which Method to Choose for Determining Workflow?» En: *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies* 28.2 (27 de mar. de 2019), págs. 91-104. ISSN: 1364-5706, 1365-2931. DOI: 10.1080/13645706.2019.1591457.
- [46] Joseph C. Giarratano y Gary D. Riley. «Chapter 1. Introduction to Expert Systems». En: *Expert Systems: Principles and Programming*. 3.^a ed. Boston, MA: PWS Publishing, 1998, págs. 1-56. ISBN: 0-534-95053-1. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/37651743>.
- [47] Paul J. Gorman, Andreas H. Meier y Thomas M. Krummel. «Simulation and Virtual Reality in Surgical Education: Real or Unreal?» En: *Archives of Surgery* 134.11 (11 de ene. de 1999), pág. 1203. ISSN: 0004-0010. DOI: 10.1001/archsurg.134.11.1203.

- [48] K. Gurusamy *et al.* «Systematic Review of Randomized Controlled Trials on the Effectiveness of Virtual Reality Training for Laparoscopic Surgery». En: *British Journal of Surgery* 95.9 (sep. de 2008), págs. 1088-1097. ISSN: 0007-1323, 1365-2168. DOI: 10.1002/bjs.6344.
- [49] Alexis Gutiérrez. «El estado de la cuestión en la interacción en entornos virtuales: una revisión sistemática». Trabajo Final de Máster. León, Spain: Universidad de León, feb. de 2018. 71 págs.
- [50] Latif Al-Hakim, Tanaphon Maiping y Nick Sevdalis. «Applying Hierarchical Task Analysis to Improving the Patient Positioning for Direct Lateral Interbody Fusion in Spinal Surgery». En: *Applied Ergonomics* 45.4 (jul. de 2014), págs. 955-966. ISSN: 0003-6870. DOI: 10.1016/j.apergo.2013.11.013.
- [51] William Stuart Halsted. «The Training of a Surgeon». En: *JAMA* XLIII.21 (19 de nov. de 1904), págs. 1553-1554. DOI: 10.1001/jama.1904.02500210043006.
- [52] Stanley J. Hamstra *et al.* «Reconsidering Fidelity in Simulation-Based Training:» en: *Academic Medicine* 89.3 (mar. de 2014), págs. 387-392. ISSN: 1040-2446. DOI: 10.1097/ACM.000000000000130.
- [53] Vincent Hayward *et al.* «Haptic Interfaces and Devices». En: *Sensor Review* 24.1 (mar. de 2004), págs. 16-29. ISSN: 0260-2288. DOI: 10.1108/02602280410515770.
- [54] Eva Hernández. «Generación automática de simuladores hápticos para el entrenamiento guiado de tareas secuenciales». Trabajo Final de Grado. León, Spain: Universidad de León, jul. de 2018. 89 págs.
- [55] Robert R. Hoffman *et al.* «Eliciting Knowledge from Experts: A Methodological Analysis». En: *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 62.2 (mayo de 1995), págs. 129-158. DOI: 10.1006/obhd.1995.1039.
- [56] Daniel H. H. Ingalls. «A Simple Technique for Handling Multiple Polymorphism». En: *Conference Proceedings on Object-Oriented Programming Systems, Languages and Applications - OOPLSA '86*. Conference Proceedings. Portland, Oregon, United States: ACM Press, 1986, págs. 347-349. ISBN: 978-0-89791-204-4. DOI: 10.1145/28697.28732.
- [57] Laura Inyesto. «Implementación de un simulador virtual para la evaluación de la interacción háptica». Trabajo Final de Grado. León, Spain: Universidad de León, jun. de 2017. 77 págs.
- [58] P. Jannin *et al.* «Model of Surgical Procedures for Multimodal Image-Guided Neurosurgery». En: *Computer Aided Surgery* 8.2 (ene. de 2003), págs. 98-106. ISSN: 1092-9088, 1097-0150. DOI: 10.3109/10929080309146044.
- [59] Pierre Jannin, Christophe Grova y Calvin R. Maurer. «Model for Defining and Reporting Reference-Based Validation Protocols in Medical Image Processing». En: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 1.2 (ago. de 2006), págs. 63-73. ISSN: 1861-6410, 1861-6429. DOI: 10.1007/s11548-006-0044-6.
- [60] Pierre Jannin y Xavier Morandi. «Surgical Models for Computer-Assisted Neurosurgery». En: *NeuroImage* 37.3 (sep. de 2007), págs. 783-791. ISSN: 1053-8119. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2007.05.034.
- [61] Pierre Jannin, Mélanie Raimbault *et al.* «Design of a Neurosurgical Procedure Model for Multimodal Image-Guided Surgery». En: *International Congress Series* 1230 (jun. de 2001), págs. 102-106. ISSN: 0531-5131. DOI: 10.1016/S0531-5131(01)00025-5.
- [62] JASP Team. *Jasp (Version 0.13.1) [Computer Software]*. 2020. URL: <https://jasp-stats.org/>.

- [63] Ken Jones. «Chapter 1. What's a Simulation?» En: *Simulations: A Handbook for Teachers and Trainers*. 3.^a ed. London; East Brunswick, N.J.: Routledge, 2013, págs. 9-40. ISBN: 978-1-134-98469-5. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/960836946>; %20https://books.google.es/books?id=wAS9jvBZHwgC.
- [64] Barry Kirwan. «Human Error Identification in Human Reliability Assessment. Part 2: Detailed Comparison of Techniques». En: *Applied Ergonomics* 23.6 (dic. de 1992), págs. 371-381. ISSN: 00036870. DOI: 10.1016/0003-6870(92)90368-6.
- [65] Barbara Ann Kitchenham, David Budgen y Pearl Brereton. *Evidence-Based Software Engineering and Systematic Reviews*. Chapman & Hall/CRC Innovations in Software Engineering and Software Development. Boca Raton: CRC Press, 2016. 399 págs. ISBN: 978-1-4822-2865-6. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/967651084>.
- [66] Roger Kneebone. «Simulation in Surgical Training: Educational Issues and Practical Implications». En: *Medical Education* 37.3 (mar. de 2003), págs. 267-277. ISSN: 0308-0110, 1365-2923. DOI: 10.1046/j.1365-2923.2003.01440.x.
- [67] Linda T. Kohn, Janet Corrigan y Molla S. Donaldson, eds. *To Err Is Human: Building a Safer Health System*. Washington, DC: National Academy Press, 2000. 287 págs. ISBN: 978-0-585-21273-9 978-0-309-06837-6. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/940858582>.
- [68] David A. Kolb. «Chapter 2. the Process of Experiential Learning». En: *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. 2nd edition. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2015, págs. 31-64. ISBN: 978-0-13-389240-6. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/938489251>.
- [69] George Kovacs. «Procedural Skills in Medicine: Linking Theory to Practice». En: *The Journal of Emergency Medicine* 15.3 (1997), págs. 387-391. ISSN: 0736-4679/97. DOI: 10.1016/S0736-4679(97)00019-X.
- [70] Kevin Kunkler. «The Role of Medical Simulation: An Overview». En: *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* 2.3 (sep. de 2006), págs. 203-210. ISSN: 1478-5951, 1478-596X. DOI: 10.1002/rccs.101.
- [71] Florent Lalys y Pierre Jannin. «Surgical Process Modelling: A Review». En: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 9.3 (mayo de 2014), págs. 495-511. ISSN: 1861-6410, 1861-6429. DOI: 10.1007/s11548-013-0940-5.
- [72] Christian Rifbjerg Larsen *et al.* «The Efficacy of Virtual Reality Simulation Training in Laparoscopy: A Systematic Review of Randomized Trials: Virtual Reality Simulation: A Review». En: *Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica* 91.9 (sep. de 2012), págs. 1015-1028. ISSN: 0001-6349. DOI: 10.1111/j.1600-0412.2012.01482.x.
- [73] Jean Lave y Etienne Wenger. *Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation*. 18.^a ed. New York: Cambridge University Press, 1991. 138 págs. ISBN: 978-0-521-42374-8. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/1002827032>.
- [74] C. H. Lawshe. «A Quantitative Approach to Content Validity». En: *Personnel Psychology* 28.4 (dic. de 1975), págs. 563-575. ISSN: 0031-5826, 1744-6570. DOI: 10.1111/j.1744-6570.1975.tb01393.x.
- [75] Susan J. Lederman y Roberta L. Klatzky. «Hand Movements: A Window into Haptic Object Recognition». En: *Cognitive Psychology* 19.3 (jul. de 1987), págs. 342-368. ISSN: 00100285. DOI: 10.1016/0010-0285(87)90008-9.
- [76] Rensis Likert. «A Technique for the Measurement of Attitudes». En: *Archives of psychology* 22.140 (1932), págs. 1-55. URL: <https://psycnet.apa.org/record/1933-01885-001>.

- [77] Alan Liu *et al.* «A Survey of Surgical Simulation: Applications, Technology, and Education». En: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 12.6 (dic. de 2003), págs. 599-614. ISSN: 1054-7460, 1531-3263. DOI: 10.1162/105474603322955905.
- [78] Christine L. MacKenzie *et al.* «Hierarchical Decomposition of Laparoscopic Surgery: A Human Factors Approach to Investigating the Operating Room Environment». En: *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies* 10.3 (2001), págs. 121-127. ISSN: 1364-5706, 1365-2931. DOI: 10.1080/136457001753192222.
- [79] N. J. Maran y R. J. Glavin. «Low- to High-Fidelity Simulation - a Continuum of Medical Education?» En: *Medical Education* 37.s1 (nov. de 2003), págs. 22-28. ISSN: 0308-0110, 1365-2923. DOI: 10.1046/j.1365-2923.37.s1.9.x.
- [80] Thomas H. Massie y J. Kenneth Salisbury. «The PHANToM Haptic Interface: A Device for Probing Virtual Objects». En: *Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*. Vol. 55. 1994, págs. 295-300.
- [81] William C. McGaghie, S. Barry Issenberg, Elaine R. Cohen *et al.* «Does Simulation-Based Medical Education with Deliberate Practice Yield Better Results than Traditional Clinical Education? A Meta-Analytic Comparative Review of the Evidence». En: *Academic Medicine* 86.6 (jun. de 2011), págs. 706-711. ISSN: 1040-2446. DOI: 10.1097/ACM.0b013e318217e119.
- [82] William C. McGaghie, S. Barry Issenberg, Emil R. Petrusa *et al.* «A Critical Review of Simulation-Based Medical Education Research: 2003–2009». En: *Medical Education* 44.1 (ene. de 2010), págs. 50-63. ISSN: 0308-0110, 1365-2923. DOI: 10.1111/j.1365-2923.2009.03547.x.
- [83] George E. Miller. «The Assessment of Clinical Skills/Competence/Performance». En: *Academic Medicine* 65.9 (sep. de 1990), S63-S67. DOI: 10.1097/00001888-199009000-00045.
- [84] Chetan S. Modi, Guy Morris y Ronan Mukherjee. «Computer-Simulation Training for Knee and Shoulder Arthroscopic Surgery». En: *Arthroscopy: The Journal of Arthroscopic & Related Surgery* 26.6 (jun. de 2010), págs. 832-840. ISSN: 0749-8063. DOI: 10.1016/j.arthro.2009.12.033.
- [85] David Moher *et al.* «Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement». En: *PLoS Medicine* 6.7 (21 de jul. de 2009), e1000097. ISSN: 1549-1676. DOI: 10.1371/journal.pmed.1000097.
- [86] Krishna Moorthy *et al.* «Objective Assessment of Technical Skills in Surgery». En: *BMJ* 327.7422 (2003), págs. 1032-1037. ISSN: 09598138. DOI: 10.1136/bmj.327.7422.1032.
- [87] J. Munchenberg *et al.* «Operation Planning of Robot Supported Surgical Interventions». En: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000)*. 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2000). Vol. 1. Takamatsu, Japan: IEEE, nov. de 2000, págs. 547-552. ISBN: 978-0-7803-6348-9. DOI: 10.1109/IROS.2000.894661.
- [88] Juliane Neumann *et al.* *Technical Report: Surgical Workflow and Process Modeling*. Technical 1.1. Innovation Center Computer Assisted Surgery (ICCAS): Universität Leipzig, 2015, pág. 51. URL: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3280.0725>.
- [89] Thomas Neumuth. «Surgical Process Modeling». En: *Innovative Surgical Sciences* 2.3 (20 de mayo de 2017), págs. 123-137. ISSN: 2364-7485. DOI: 10.1515/iss-2017-0005.

- [90] Thomas Neumuth, Pierre Jannin *et al.* «Validation of Knowledge Acquisition for Surgical Process Models». En: *Journal of the American Medical Informatics Association* 16.1 (ene. de 2009), págs. 72-80. ISSN: 1067-5027, 1527-974X. DOI: 10.1197/jamia.M2748.
- [91] Thomas Neumuth, C. Trantakis *et al.* «Supporting the Analysis of Intervention Courses with Surgical Process Models on the Example of 14 Microsurgical Lumbar Discectomies». En: *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery* 2 (2007), S436-S438.
- [92] Ikujiro Nonaka. «A Dynamic Theory of Organizational Knowledge Creation». En: *Organization Science* 5.1 (feb. de 1994), págs. 14-37. ISSN: 1047-7039. DOI: 10.1287/orsc.5.1.14.
- [93] Robert Nystrom. *Game Programming Patterns*. s.l.: genever benning, 2014. 345 págs. ISBN: 978-0-9905829-0-8.
- [94] V. N. Palter y T. P. Grantcharov. «Simulation in Surgical Education». En: *Canadian Medical Association Journal* 182.11 (8 de oct. de 2010), págs. 1191-1196. ISSN: 0820-3946, 1488-2329. DOI: 10.1503/cmaj.091743.
- [95] John Patrick. *Training: Research and Practice*. London, San Diego: Academic Press, 5 de dic. de 1992. 561 págs. ISBN: 978-0-12-546660-8. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/26459731>.
- [96] David Pinzon, Simon Byrns y Bin Zheng. «Prevailing Trends in Haptic Feedback Simulation for Minimally Invasive Surgery». En: *Surgical Innovation* 23.4 (ago. de 2016), págs. 415-421. ISSN: 1553-3506, 1553-3514. DOI: 10.1177/1553350616628680.
- [97] Michael Polanyi. *The Tacit Dimension*. 1.^a ed. Garden City, NY: Doubleday & Company, 1966. 108 págs. ISBN: 978-0-226-67298-4. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/718091>.
- [98] Denise F. Polit y Cheryl Tatano Beck. «The Content Validity Index: Are You Sure You Know What's Being Reported? Critique and Recommendations». En: *Research in Nursing & Health* 29.5 (oct. de 2006), págs. 489-497. ISSN: 0160-6891, 1098-240X. DOI: 10.1002/nur.20147.
- [99] Daniel D Pratt. «Chapter 10 - Analyzing Perspectives: Identifying Commitments and Belief Structures». En: *Five Perspectives on Teaching in Adult and Higher Education*. 1.^a ed. Malabar, Florida: Krieger Publishing Company, 1998, págs. 219-257. ISBN: 978-0-89464-937-0. URL: <https://eric.ed.gov/?id=ED461013>.
- [100] Steve Rabin, ed. *Introduction to Game Development*. 2nd ed. Game Development Series. Boston, MA: Course Technology Cengage Learning, 2010. 980 págs. ISBN: 978-1-58450-679-9.
- [101] Thibault Raffailac y Stéphane Huot. «Polyphony: Programming Interfaces and Interactions with the Entity-Component-System Model». En: *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction* 3 (EICS 13 de jun. de 2019), págs. 1-22. ISSN: 2573-0142, 2573-0142. DOI: 10.1145/3331150.
- [102] Carol E. Reiley *et al.* «Review of Methods for Objective Surgical Skill Evaluation». En: *Surgical Endoscopy* 25.2 (feb. de 2011), págs. 356-366. ISSN: 0930-2794, 1432-2218. DOI: 10.1007/s00464-010-1190-z.
- [103] Richard K. Reznick. «Teaching and Testing Technical Skills». En: *The American Journal of Surgery* 165.3 (mar. de 1993), págs. 358-361. ISSN: 00029610. DOI: 10.1016/S0002-9610(05)80843-8.

- [104] Richard K. Reznick y Helen Macrae. «Teaching Surgical Skills: Changes in the Wind». En: *The New England Journal of Medicine* 355.25 (dic. de 2006), págs. 2664-2669. DOI: 10.1056/NEJMra054785.
- [105] Guiseppe Riva. «Applications of Virtual Environments in Medicine». En: *Methods of Information in Medicine* 42.5 (2003), págs. 524-534. ISSN: 0026-1270, 2511-705X. DOI: 10.1055/s-0038-1634379.
- [106] Colin Robson y Kieran McCartan. «Chapter 12. Interviews and Focus Groups». En: *Real World Research*. 4.^a ed. John Wiley & Sons Ltd, 2016, págs. 284-306. ISBN: 978-1-118-74523-6. URL: <http://www.worldcat.org/oclc/943283739>.
- [107] J. Rosen *et al.* «Markov Modeling of Minimally Invasive Surgery Based on Tool/Tissue Interaction and Force/Torque Signatures for Evaluating Surgical Skills». En: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 48.5 (mayo de 2001), págs. 579-591. ISSN: 00189294. DOI: 10.1109/10.918597.
- [108] Sudip K. Sarker *et al.* «Constructing Hierarchical Task Analysis in Surgery». En: *Surgical Endoscopy* 22.1 (ene. de 2008), págs. 107-111. ISSN: 0930-2794, 1432-2218. DOI: 10.1007/s00464-007-9380-z.
- [109] R.M. Satava, A. Cuschieri y J. Hamdorf. «Metrics for Objective Assessment». En: *Surgical Endoscopy* 17.2 (2 de ene. de 2003), págs. 220-226. ISSN: 0930-2794, 1432-2218. DOI: 10.1007/s00464-002-8869-8.
- [110] Richard M. Satava. «Surgical Education and Surgical Simulation». En: *World Journal of Surgery* 25.11 (11 de ene. de 2001), págs. 1484-1489. ISSN: 0364-2313, 1432-2323. DOI: 10.1007/s00268-001-0134-0.
- [111] Richard M. Satava, Anthony G. Gallagher y Carlos A. Pellegrini. «Surgical Competence and Surgical Proficiency: Definitions, Taxonomy, and Metrics». En: *Journal of the American College of Surgeons* 196.6 (jun. de 2003), págs. 933-937. ISSN: 1072-7515. DOI: 10.1016/S1072-7515(03)00237-0.
- [112] Connie C. Schmitz *et al.* «Development and Verification of a Taxonomy of Assessment Metrics for Surgical Technical Skills:» en: *Academic Medicine* 89.1 (ene. de 2014), págs. 153-161. ISSN: 1040-2446. DOI: 10.1097/ACM.0000000000000056.
- [113] Mandayam A. Srinivasan y Cagatay Basdogan. «Haptics in Virtual Environments: Taxonomy, Research Status, and Challenges». En: *Computers & Graphics* 21.4 (jul. de 1997), págs. 393-404. ISSN: 0097-8493. DOI: 10.1016/S0097-8493(97)00030-7.
- [114] Neville A. Stanton. «Hierarchical Task Analysis: Developments, Applications, and Extensions». En: *Applied Ergonomics* 37.1 (ene. de 2006), págs. 55-79. ISSN: 0003-6870. DOI: 10.1016/j.apergo.2005.06.003.
- [115] Leanne M. Sutherland *et al.* «Surgical Simulation: A Systematic Review». En: *Annals of Surgery* 243.3 (mar. de 2006), págs. 291-300. ISSN: 0003-4932. DOI: 10.1097/01.sla.0000200839.93965.26.
- [116] Keith S. Taber. «The Use of Cronbach's Alpha When Developing and Reporting Research Instruments in Science Education». En: *Research in Science Education* 48.6 (dic. de 2018), págs. 1273-1296. ISSN: 0157-244X, 1573-1898. DOI: 10.1007/s11165-016-9602-2.
- [117] Mohsen Tavakol, Mohammad Ali Mohagheghi y Reg Dennick. «Assessing the Skills of Surgical Residents Using Simulation». En: *Journal of Surgical Education* 65.2 (mar. de 2008), págs. 77-83. ISSN: 19317204. DOI: 10.1016/j.jsurg.2007.11.003.
- [118] Universidad de León. *VetDoc - IV Congreso de Docencia Veterinaria*. 2017. URL: <http://www.vetdoc.unileon.es/resumenes.html>.

- [119] Olivier A. J. van der Meijden y Marlies P. Schijven. «The Value of Haptic Feedback in Conventional and Robot-Assisted Minimal Invasive Surgery and Virtual Reality Training: A Current Review». En: *Surgical Endoscopy* 23.6 (jun. de 2009), págs. 1180-1190. ISSN: 0930-2794, 1432-2218. DOI: 10.1007/s00464-008-0298-x.
- [120] Sara S. Van Nortwick *et al.* «Methodologies for Establishing Validity in Surgical Simulation Studies». En: *Surgery* 147.5 (mayo de 2010), págs. 622-630. ISSN: 00396060. DOI: 10.1016/j.surg.2009.10.068.
- [121] P. D. van Hove *et al.* «Objective Assessment of Technical Surgical Skills». En: *British Journal of Surgery* 97.7 (6 de feb. de 2010), págs. 987-988. ISSN: 00071323. DOI: 10.1002/bjs.7118.
- [122] Dennis Wiebusch y Marc Erich Latoschik. «Decoupling the Entity-Component-System Pattern Using Semantic Traits for Reusable Realtime Interactive Systems». En: *2015 IEEE 8th Workshop on Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems (SEARIS)*. 2015 IEEE 8th Workshop on Software Engineering and Architectures for Realtime Interactive Systems (SEARIS). Arles, France: IEEE, 24 de mar. de 2015, págs. 25-32. ISBN: 978-1-4673-6881-0. DOI: 10.1109/SEARIS.2015.7854098.
- [123] Benjamin Zendejas *et al.* «State of the Evidence on Simulation-Based Training for Laparoscopic Surgery: A Systematic Review». En: *Annals of Surgery* 257.4 (abr. de 2013), págs. 586-593. ISSN: 0003-4932. DOI: 10.1097/SLA.0b013e318288c40b.
- [124] Amitai Ziv *et al.* «Simulation-Based Medical Education: An Ethical Imperative». En: *Academic Medicine* 78.8 (ago. de 2003), págs. 783-788. ISSN: 1559-2332. DOI: 10.1097/01.SIH.0000242724.08501.63.

Apéndice A

Detalles adicionales sobre el diseño del framework LEEKHS

Este apéndice presenta una serie de detalles adicionales sobre el diseño software del framework LEEKHS descrito en el Capítulo 5. Concretamente, ilustra los diagramas de secuencia necesarios para entender la colaboración entre los diferentes participantes de cada módulo y sugiere algunos detalles a tener cuenta a la hora de su implementación.

A.1. Utilidades (util)

Ver diagrama de clases de la Figura 5.3 del Capítulo 5.

A.1.1. Colaboraciones entre participantes

- *Añadir un objeto al registro de instancias de clases* (ver Figura A.1). El método `RegisterObject` de `TypeRegistry` es el encargado de implementar esta funcionalidad. Consiste en añadir un objeto de un tipo concreto al registro, siempre y cuando este último no contenga otro del mismo tipo.
- *Quitar un objeto del registro de instancias de clases* (ver Figura A.2). El método `DeregisterObject` de `TypeRegistry` es responsable de esta funcionalidad. Consiste en quitar del registro un objeto de un tipo concreto, siempre y cuando dicho tipo esté registrado.
- *Obtener un objeto del registro de instancias de clases* (ver Figura A.3). El método `GetObject` de `TypeRegistry` implementa esta acción. Consiste en obtener un objeto del registro, siempre y cuando su tipo ya esté registrado (si no lo está devuelve un objeto nulo).

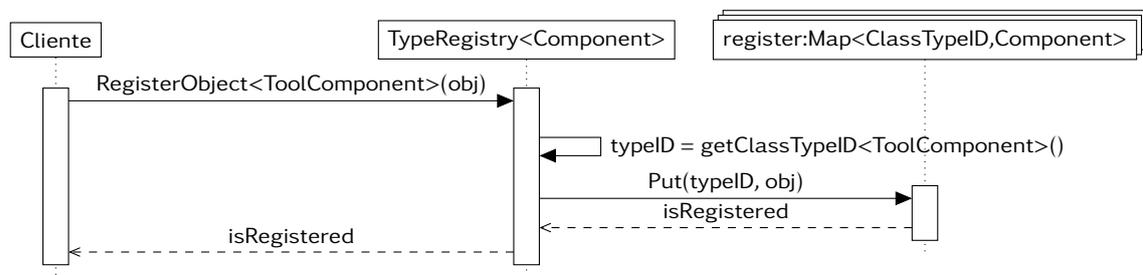


Figura A.1 – Diagrama de secuencia para añadir un objeto al registro de instancias de clases: ejemplo de un `TypeRegistry` parametrizado para la jerarquía de `Component`

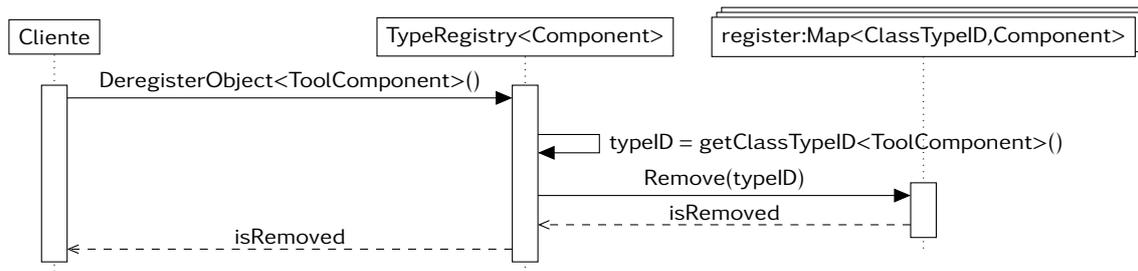


Figura A.2 – Diagrama de secuencia para quitar un objeto del registro de instancias de clases: ejemplo de un `TypeRegistry` parametrizado para la jerarquía de `Component`

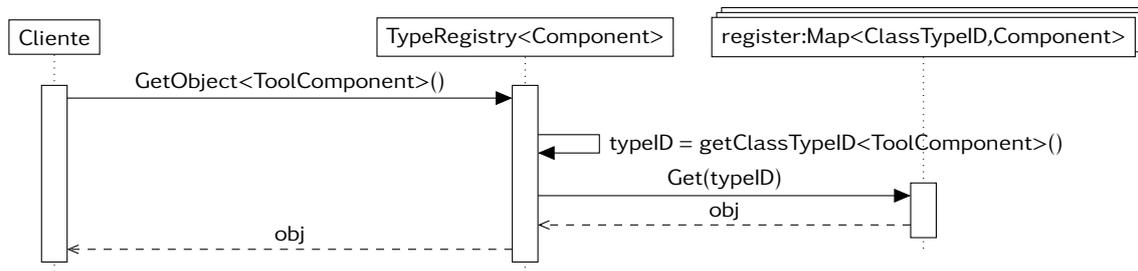


Figura A.3 – Diagrama de secuencia para obtener un objeto del registro de instancias de clases: ejemplo de un `TypeRegistry` parametrizado para la jerarquía de `Component`

A.1.2. Detalles de implementación

- *Mecanismo para asignar un identificador a cada objeto del registro.* La clave para que un `TypeRegistry` pueda gestionar una colección heterogénea de objetos es tener un mecanismo que genere un identificador único por cada tipo de clase registrado. Para reflejar esta funcionalidad, la clase define el método parametrizado `getClassTypeID`. Sin embargo, la propia implementación de este mecanismo es algo que se deja en manos del desarrollador puesto que depende mayormente del lenguaje de programación con el que codificar el modelo.
- *Representación de un vector tridimensional y sus operaciones.* En el diseño del módulo se propone la clase `Vec3` como una representación atómica para describir datos relativos a la interacción háptica y/o al escenario virtual. No obstante, en la práctica tales datos conllevan realizar operaciones matemáticas costosas. Por ello, y a fin de evitar su implementación, es posible delegar en una biblioteca externa las responsabilidades tanto de representar un vector tridimensional como de realizar cualquier tipo de cálculo matemático.

A.2. Entidad-Componente-Sistema (ecs)

Ver diagrama de clases de la Figura 5.4 del Capítulo 5.

A.2.1. Colaboraciones entre participantes

- *Crear una entidad dentro de un contexto* (ver Figura A.4). El método `CreateEntity` de `SimulationContext` implementa esta acción. Consiste en crear un objeto entidad y añadirlo a la colección de entidades dentro del contexto. Al terminar, el método devuelve la referencia a la entidad recién creada.

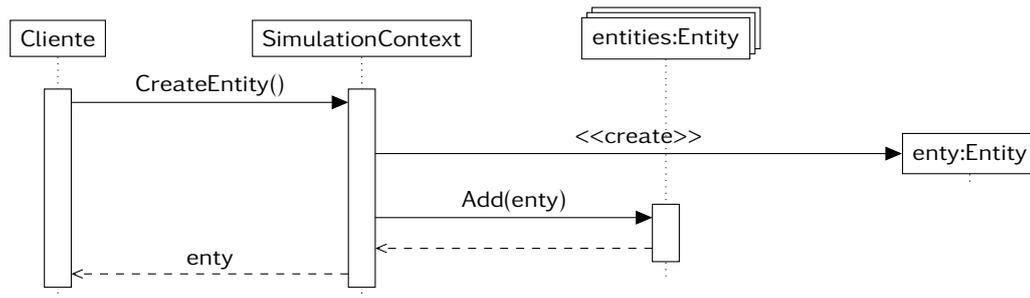


Figura A.4 – Diagrama de secuencia para crear una entidad dentro de un contexto

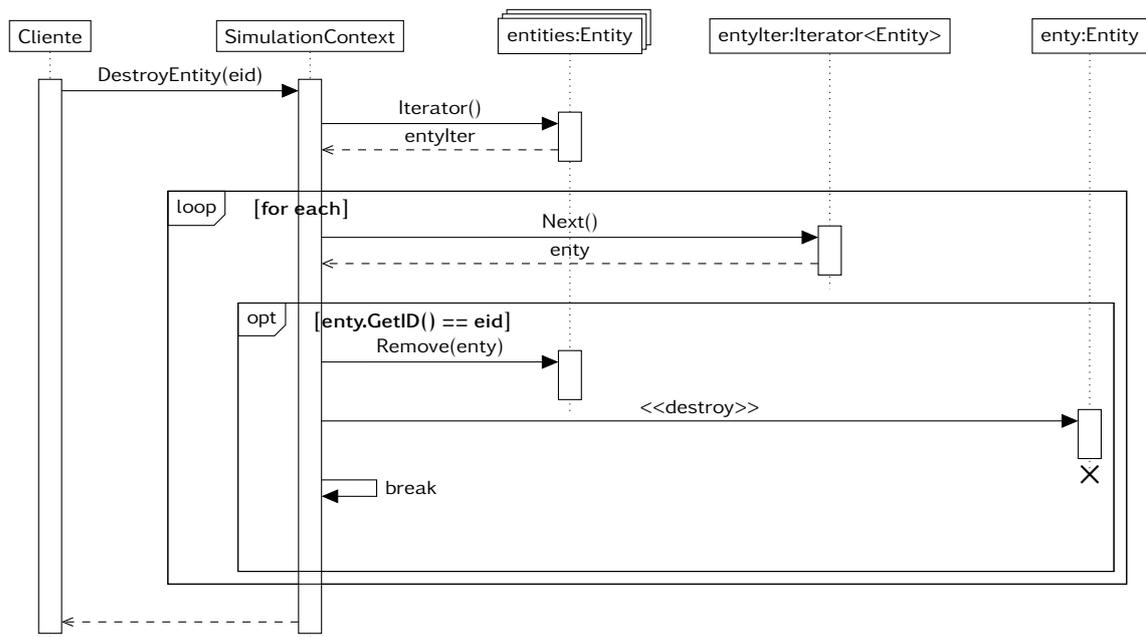


Figura A.5 – Diagrama de secuencia para quitar una entidad perteneciente a un contexto

- *Quitar una entidad perteneciente a un contexto* (ver Figura A.5). El método `DestroyEntity` de `SimulationContext` describe esta funcionalidad. Consiste en que, dado el identificador de una entidad, buscarla dentro de la colección de entidades activas del contexto y eliminarla en caso de que exista.
- *Obtener todos los componentes de un tipo específico dentro de un contexto* (ver Figura A.6). El método `GetComponent` de `SimulationContext` es responsable de esta acción. Consiste en buscar la colección de objetos de un tipo de componente específico dentro del repositorio de componentes del contexto. En caso de que el contexto no haya registrado aún el tipo de componente solicitado, el método devuelve un objeto colección nulo.
- *Crear un componente específico asociado a una entidad perteneciente a un contexto* (ver Figura A.7). El método `AddComponent` de `SimulationContext` es el encargado de llevar a cabo esta acción. Consiste en ejecutar los siguientes pasos:
 1. A partir de un identificador de entidad dado, buscar la entidad dentro del contexto. En caso de no existir devolver un objeto nulo.

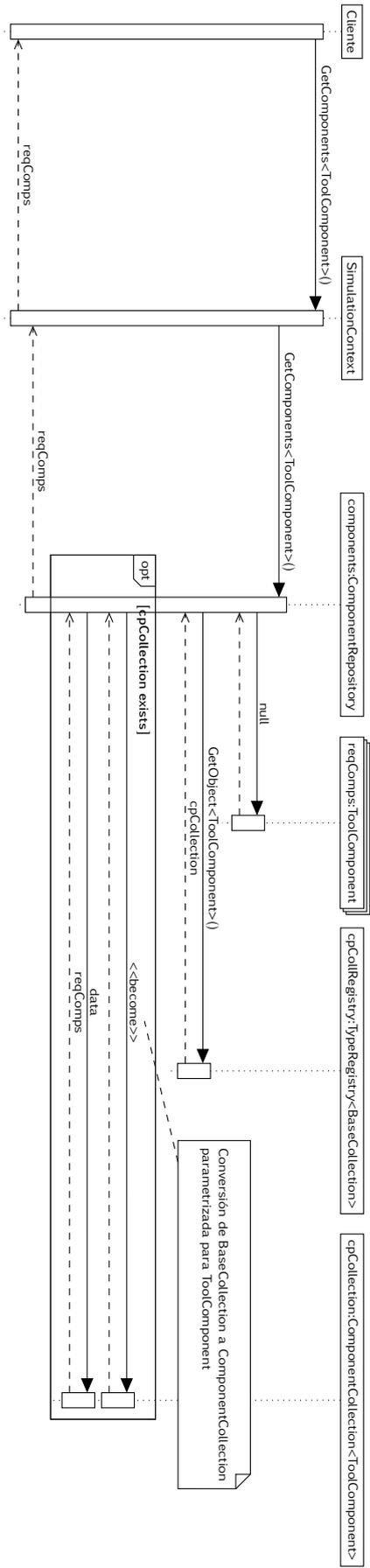


Figura A.6 – Diagrama de secuencia para obtener todos los componentes de un tipo específico dentro de un contexto: ejemplo parametrizado para un ToolComponent

2. Comprobar si dicha entidad ya tiene asociado un componente del tipo especificado. Si ya lo tiene, devolver la referencia a dicho componente.
 3. En caso de no tenerlo, crear una instancia de dicho componente y registrarla dentro del repositorio (utilizando el método `CreateComponent` de `ComponentRepository`). Cabe señalar que para este paso en particular, si el repositorio no contiene una colección de componentes del tipo especificado, es el propio repositorio el encargado de crear una nueva colección para almacenar objetos de ese tipo.
 4. Finalmente, asociar el componente recién creado a la entidad dada y devolver su referencia.
- *Quitar un componente específico asociado a una entidad perteneciente a un contexto* (ver Figura A.8). El método `DestroyComponent` de `SimulationContext` implementa esta acción. Consiste en ejecutar los siguientes pasos:
 1. Dado un identificador de entidad, buscar su respectiva entidad en el contexto.
 2. En caso de estar registrada, comprobar si la entidad tiene asociado un componente del tipo especificado.
 3. En caso de tenerlo, primero quitar de la entidad dicha asociación, luego quitar el propio componente del registro y finalmente destruir su instancia.

A.2.2. Detalles de implementación

- *Utilizar estructuras de datos adecuadas para almacenar entidades y componentes.* El patrón ECS está orientado a trabajar con una gran cantidad de datos que pueden crearse o destruirse durante la ejecución de un simulador. Este tipo de acciones repercuten en la memoria del simulador en forma de número de accesos; pudiendo suponer un problema a la hora de trabajar con una cantidad elevada de entidades y/o componentes. Además, si a esto se suma el hecho de que ejecutar un simulador virtual (y especialmente uno háptico) implica interactuar con el usuario en tiempo real, su rendimiento puede verse gravemente afectado (Wiebusch y Latoschik, 2015). Por esta razón, es de vital importancia para el modelo implementar colecciones de objetos que optimicen los accesos a memoria de alguna manera. Esto afecta especialmente a la implementación de `SimulationContext`, `ComponentCollection` e incluso al `TypeRegistry`.

Una solución sencilla a este problema es utilizar estructuras de datos que almacenen sus elementos de forma contigua en memoria (como por ejemplo vectores, arrays o mapas hash). Adicionalmente, también ayuda el hecho de reservar un espacio fijo de memoria cada vez que se creen este tipo de colecciones de objetos.

- *Los atributos de cualquier componente concreto deben ser públicos.* Para facilitar la tarea de instanciar componentes y que los sistemas puedan modificar rápidamente sus datos, es requisito indispensable para el modelo que todos los atributos de cualquier componente concreto sean públicos. Esto también ayuda a mitigar (en parte) el problema mencionado en el detalle de implementación anterior, al no sobrecargar la pila de llamadas del simulador.

A.3. Mecánica de la interacción háptica (mechanics)

Ver diagramas de clases de las Figuras 5.5 y 5.6 del Capítulo 5.

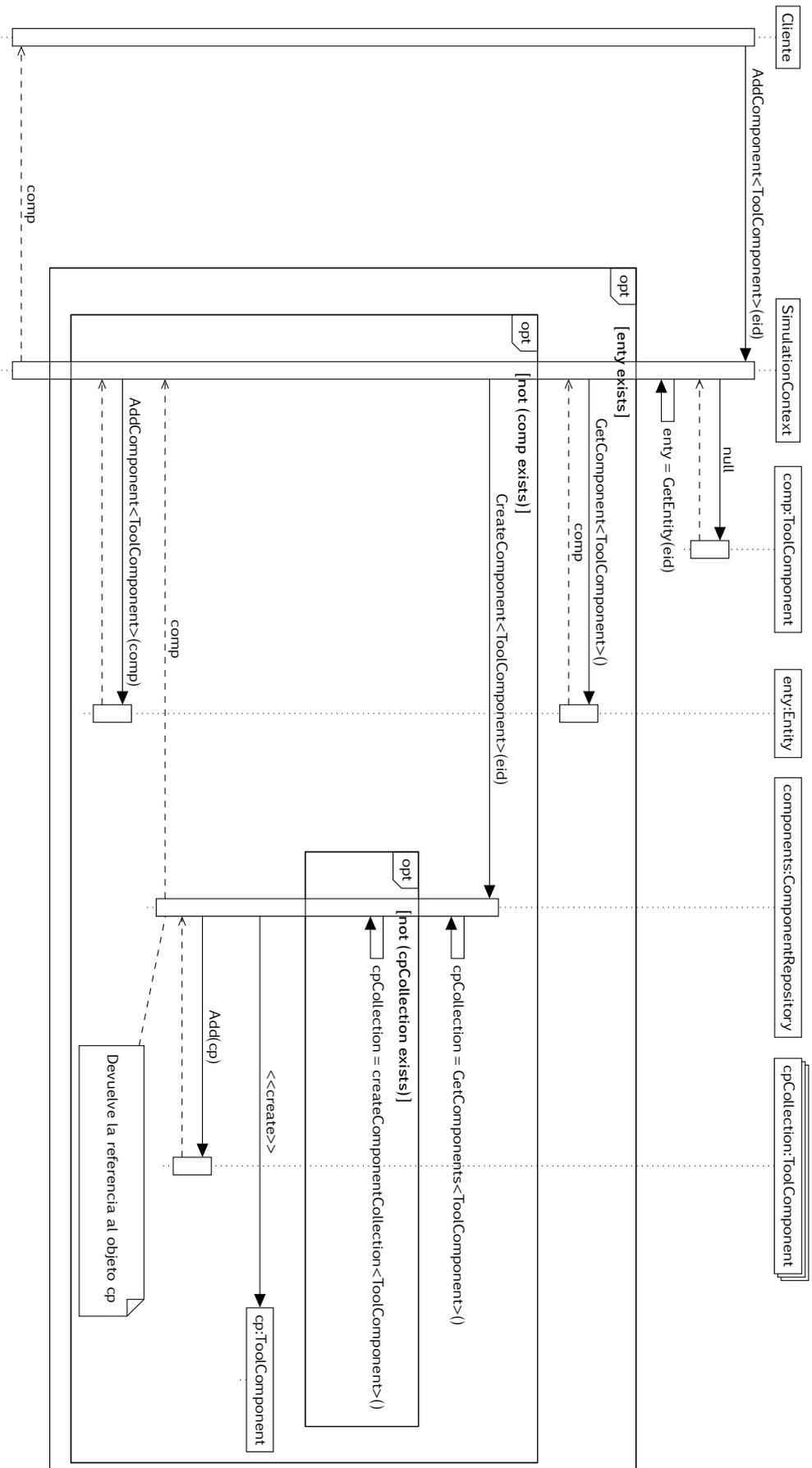


Figura A.7 – Diagrama de secuencia para crear un componente específico asociado a una entidad perteneciente a un contexto: ejemplo parametrizado para un ToolComponent

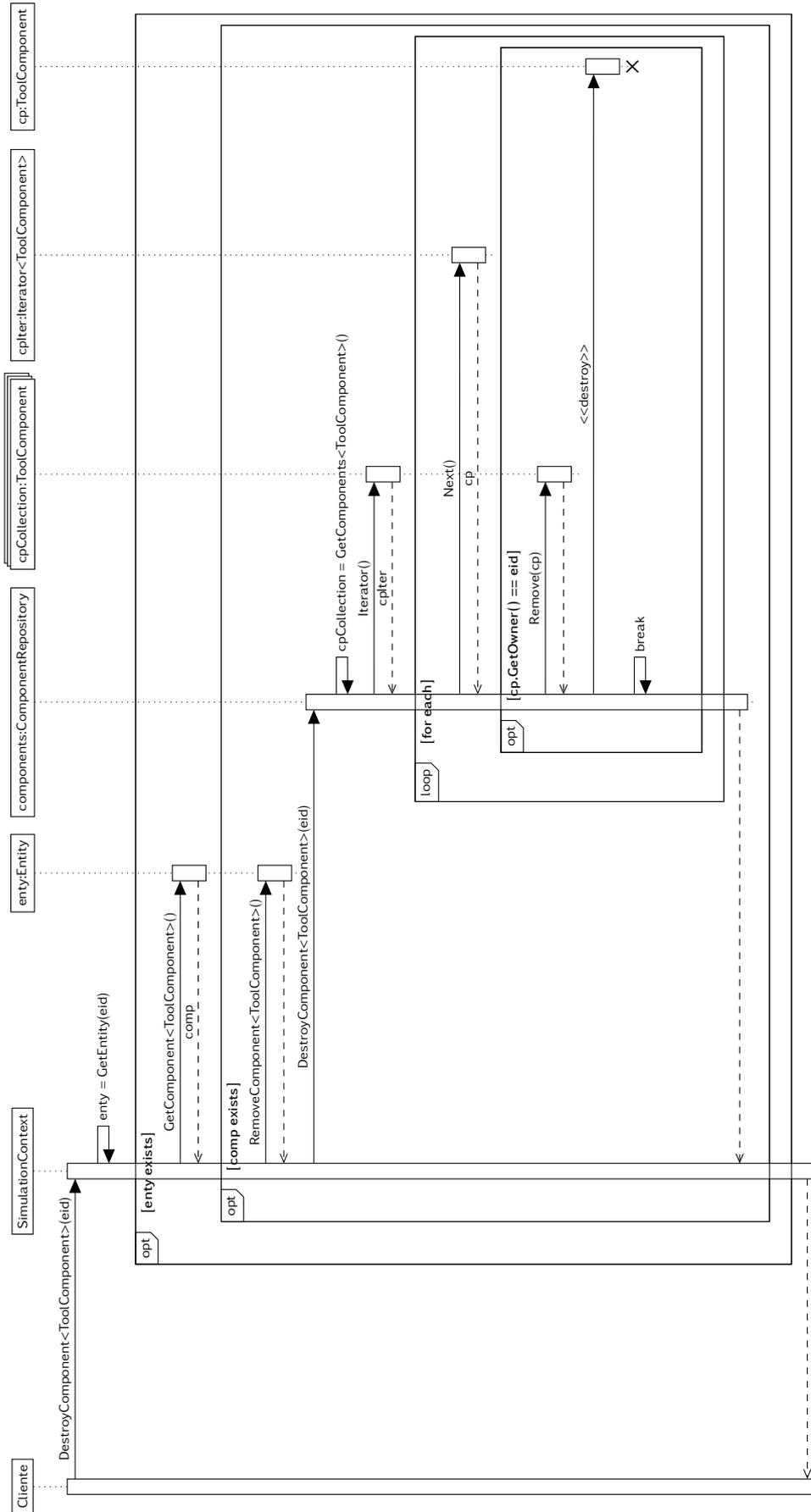


Figura A.8 – Diagrama de secuencia para quitar un componente específico asociado a una entidad perteneciente a un contexto: ejemplo parametrizado para un ToolComponent

A.3.1. Colaboraciones entre participantes

- *Proceso de interacción háptica* (ver Figura A.9). El método `Update` de `HapticInteractionSystem` implementa este proceso. Consiste en actualizar el estado interno de las herramientas de interacción háptica utilizadas por el usuario, para luego detectar y notificar a otros participantes acerca de cualquier evento de colisión relacionado con las mismas. Concretamente, estas dos funciones las realiza ejecutando los siguientes pasos (para todos los dispositivos hápticos conectados a la escena virtual y cuyas respectivas entidades pertenecen a un contexto dado):
 1. Obtener el proxy del dispositivo háptico dentro de la escena y buscar a que entidad está asociado dentro del contexto. Cabe señalar que esta entidad a buscar se corresponde con la herramienta que está utilizando el usuario en ese momento.
 2. En caso de que la herramienta no esté registrada en el contexto, descartar el proceso de interacción para dicho dispositivo.
 3. En caso de estarlo, obtener el componente que gestiona la interacción háptica de la herramienta y actualizar su estado interno.
 4. Finalmente, detectar si existe la necesidad de gestionar un evento de colisión para dicha herramienta; bien por su inicio o bien por su finalización.
- *Buscar una entidad asociada a un objeto ajeno al modelo dentro de un contexto* (ver Figura A.10). El método `findAssociatedEntity` de `HapticInteractionSystem` realiza este proceso. A partir de la referencia a un objeto ajeno al modelo y un contexto en el que buscar, consiste en coger todos los objetos virtuales registrados en el contexto y comprobar para cada uno si el objeto de la escena al que encapsula coincide con el objeto externo dado. En caso de no encontrar coincidencia alguna, el método devuelve un objeto de entidad nulo.
- *Notificación de eventos de colisión detectados* (ver Figura A.11). El método `handleCollisionEvent` de `HapticInteractionSystem` es responsable de realizar esta acción. A grandes rasgos, consiste en notificar a los participantes interesados cuando un evento de colisión ha comenzado o cuando ha terminado. Para ello—y partiendo de un dispositivo háptico, una herramienta y un contexto—, realiza los siguientes pasos:
 1. Obtener, a través del dispositivo háptico, el objeto con el que la herramienta ha colisionado dentro de la escena y buscar a que entidad está asociado dentro del contexto.
 2. En caso de que el objeto no esté registrado en el contexto, descartar el evento.
 3. En caso de estarlo, comprobar si el evento ya está dentro de la colección de eventos registrados por `HapticInteractionSystem` y:
 - Si el evento ya estaba registrado quiere decir que la colisión ha terminado y por tanto hay que quitar su referencia, notificar a los participantes de este hecho y destruir la propia colisión.
 - Si el evento no estaba registrado significa que la colisión ha comenzado y por tanto hay que crear un nuevo objeto de evento (`CollisionEvent`), añadirlo a colección y finalmente notificar a los participantes de esta situación.
- *Respuestas ante una notificación de un evento de tipo colisión* (ver Figuras A.12 y A.13). Los métodos `OnCollisionStart` y `OnCollisionEnd` de `HapticResponseSystem` son

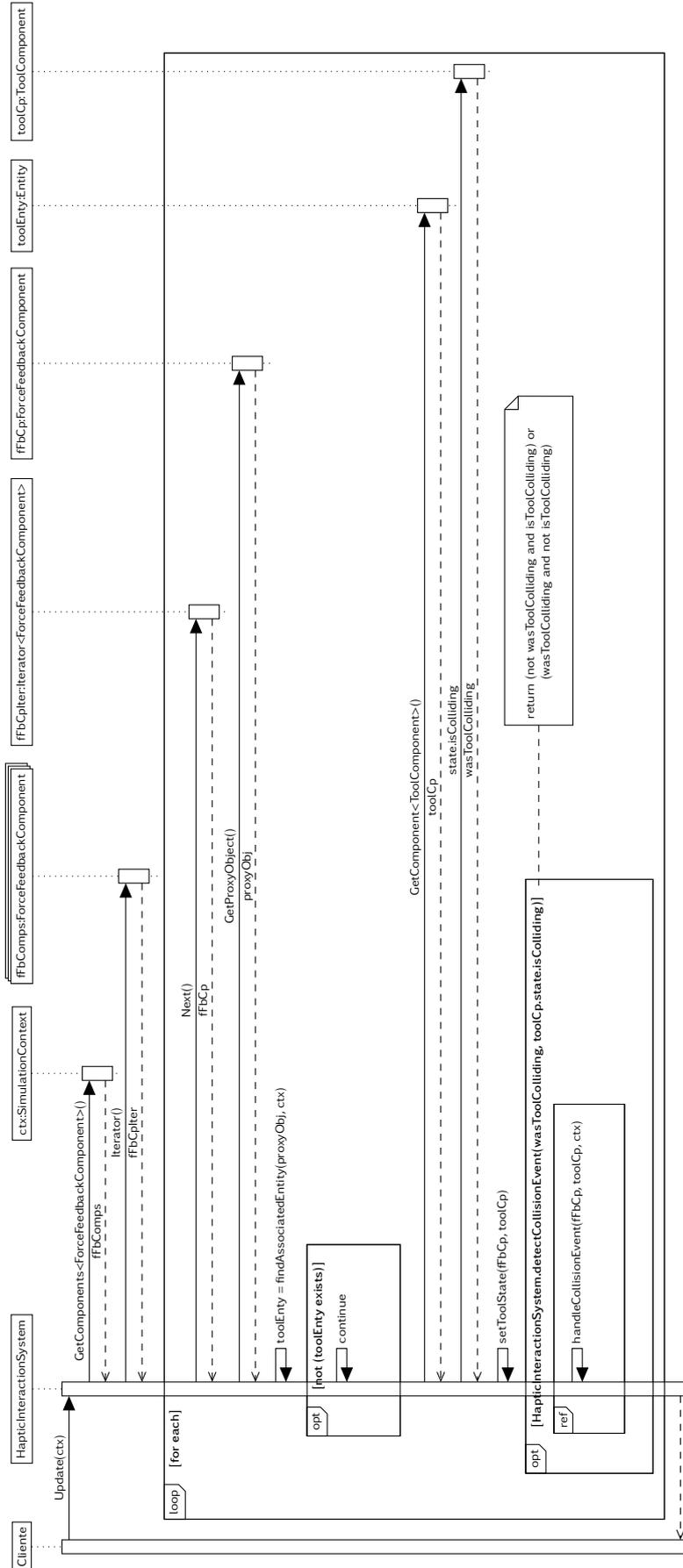


Figura A.9 – Diagrama de secuencia para describir el proceso de interacción háptica

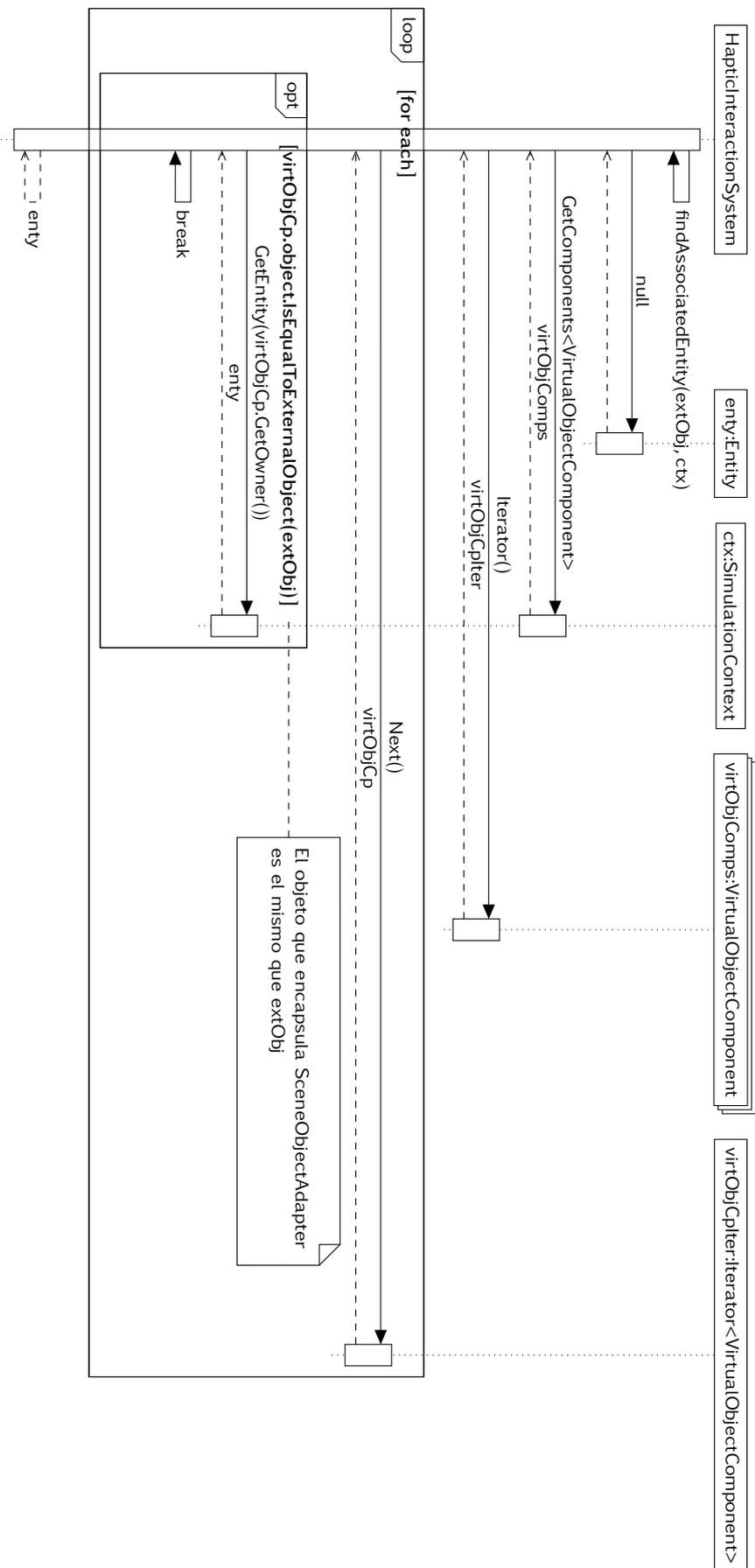


Figura A.10 – Diagrama de secuencia para buscar una entidad asociada a un objeto ajeno al modelo dentro de un contexto

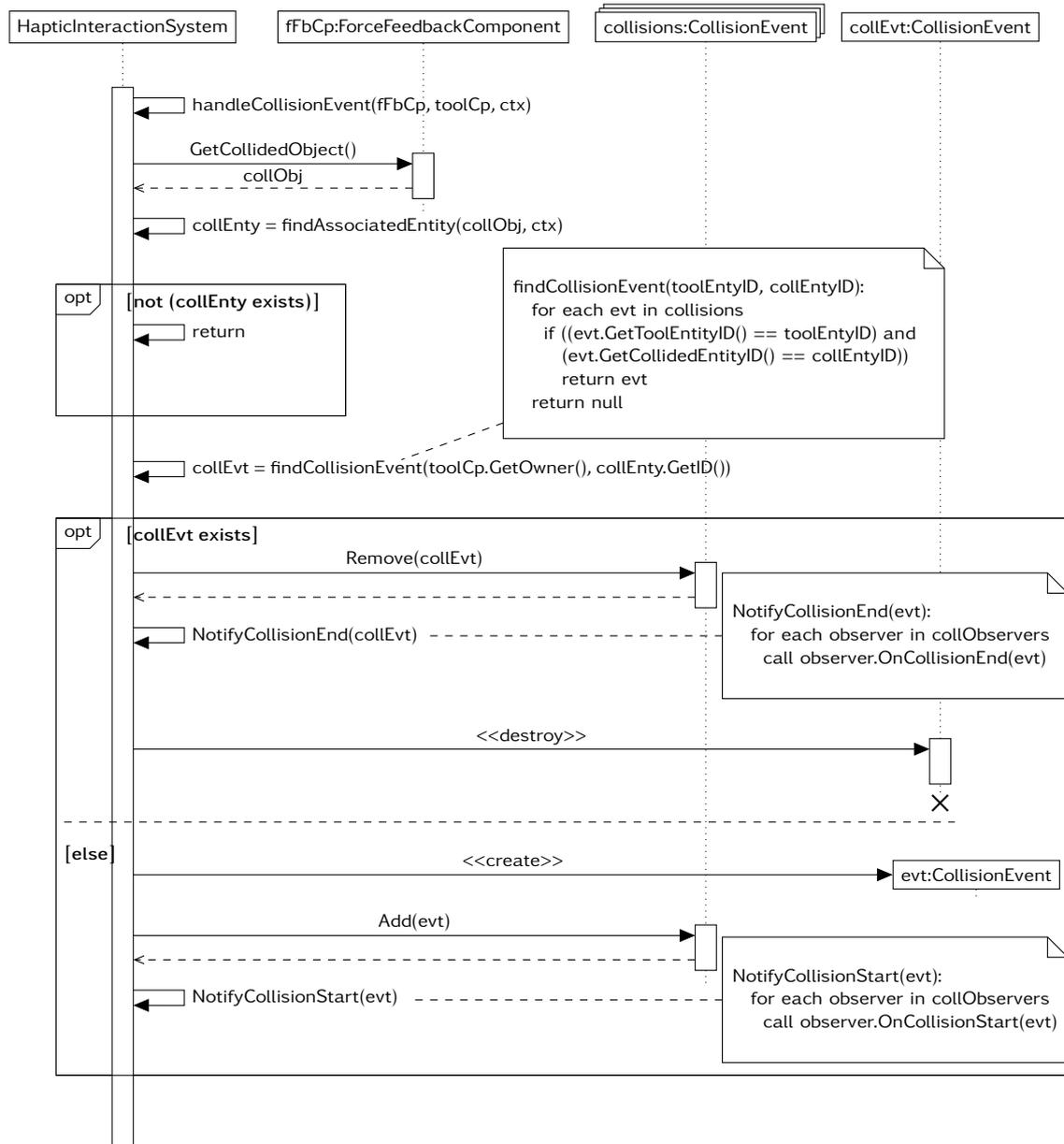


Figura A.11 – Diagrama de secuencia para gestionar las notificaciones de un evento de colisión detectado durante el proceso de interacción háptica

responsables de responder a eventos de tipo colisión. Respectivamente:

- OnCollisionStart guarda una referencia al evento de colisión que acaba de ser detectado (dentro de la colección gestionada por el sistema).
 - OnCollisionEnd quita la referencia del evento de colisión que acaba de terminar (de la colección gestionada por el sistema).
- *Proceso de respuesta háptica* (ver Figura A.14). El método Update de HapticResponseSystem lleva a cabo este proceso. Básicamente consiste en: primero actualizar el estado interno de aquellos objetos virtuales que están en contacto directo con herra-

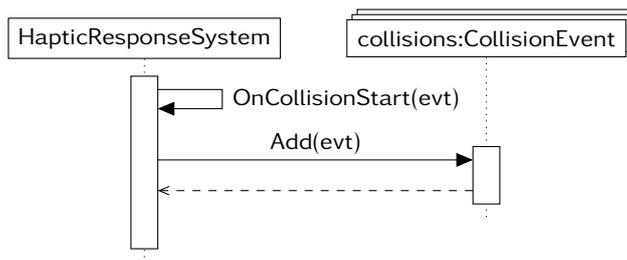


Figura A.12 – Diagrama de secuencia para responder ante una notificación del inicio de una colisión

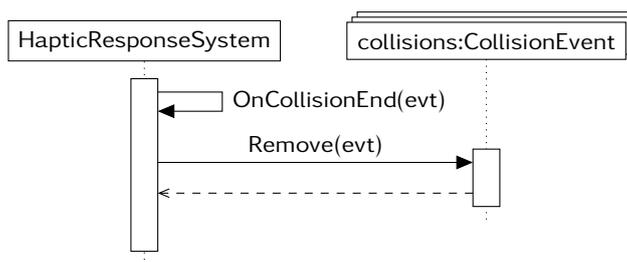


Figura A.13 – Diagrama de secuencia para responder ante una notificación del fin de una colisión

mientas gestionadas por el usuario, para luego verificar si tales cambios de estado son válidos. Si algún cambio no es válido significa que el objeto correspondiente ha entrado en un estado no contemplado por el modelo y, por tanto, ha ocurrido un error fatal. En consecuencia es necesario: (1) crear un evento que refleje esta situación, (2) notificar de su existencia a los participantes interesados, y (3) terminar inmediatamente la ejecución del proceso.

A.3.2. Detalles de implementación

- *Patrón Adapter y objetos ajenos al modelo.* `HapticInterfaceAdapter` y `SceneObjectAdapter` son dos interfaces presentadas en el Apartado 5.3.2 cuya única finalidad es “adaptar” un objeto ajeno al modelo para poder obtener datos con los que representar el proceso de interacción háptica. Un aspecto vital a la hora de acoplar el modelo a un simulador háptico es precisamente la implementación de estas dos interfaces. Es más, a la hora de implementarlas es necesario tener en cuenta la arquitectura software del simulador háptico implicado, ya que tales implementaciones dependen exclusivamente de encapsular las clases adecuadas. Concretamente, en el caso de `HapticInterfaceAdapter` es necesario encapsular una clase que represente un dispositivo háptico, y en el caso de `SceneObjectAdapter` aquella que represente un objeto virtual de una escena.

Dicho esto, la Figura A.15 recoge un ejemplo concreto de implementación para la librería de simulación háptica `Chai3d` (Conti *et al.*, 2003). Por un lado, la gestión de una interfaz háptica la realiza `Chai3dHapticInterface` encapsulando un objeto de tipo `cGenericTool` (que es el encargado de tal tarea en `Chai3d`). Por otro lado, la gestión de los objetos virtuales la realiza la clase abstracta `Chai3dSceneObject` encapsulando un objeto de tipo `cGenericObject` (utilizado por `Chai3d` para representar objetos dentro de una escena virtual). Sin embargo, la descripción de un objeto de la escena por parte de `cGenericObject` no incluye información sobre su forma

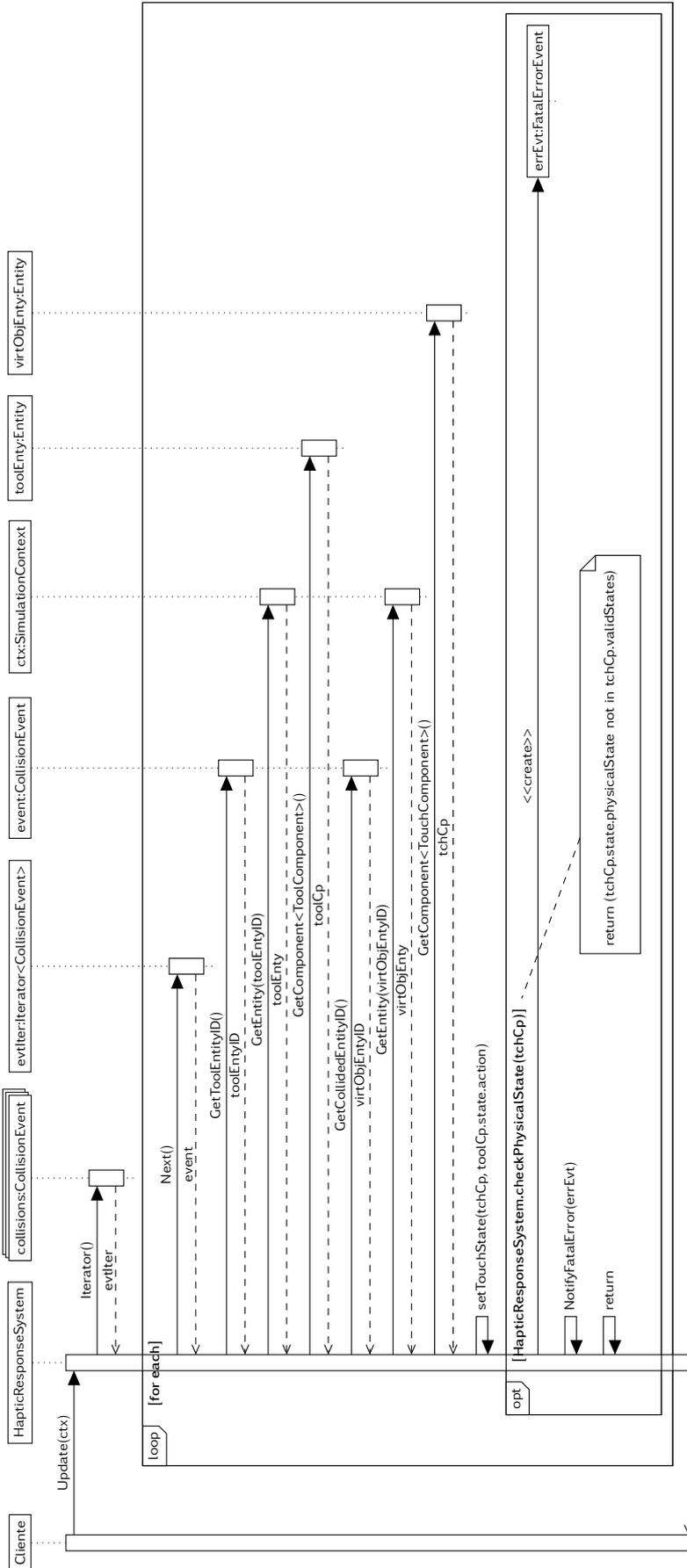


Figura A.14 – Diagrama de secuencia para describir el proceso de respuesta háptica

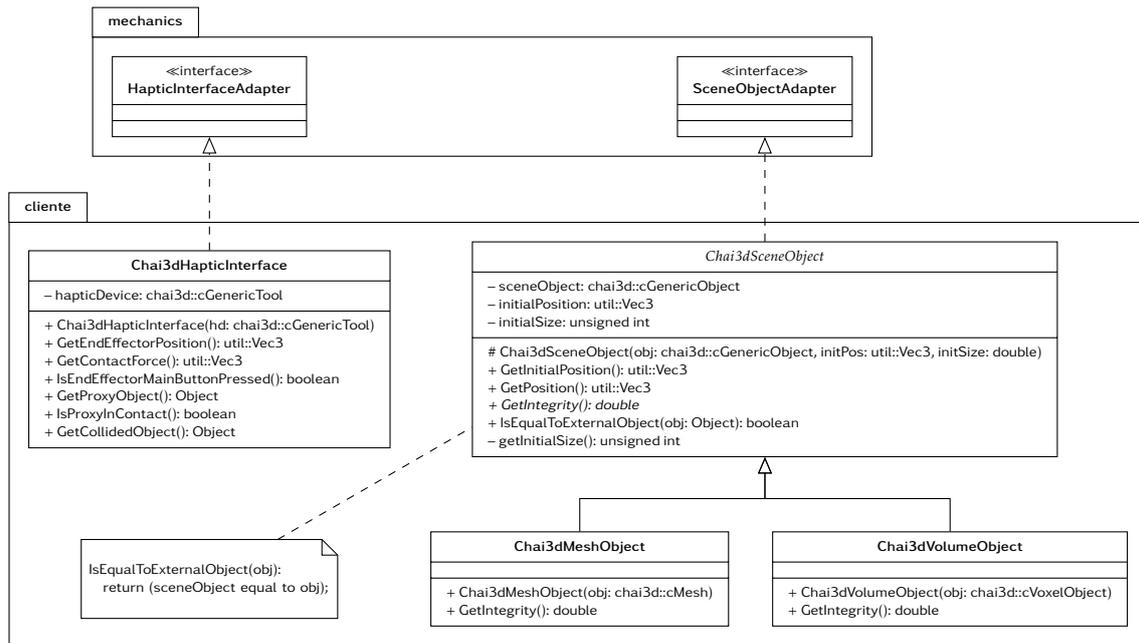


Figura A.15 – Diagrama de clases que ejemplifica la implementación del patrón Adapter en el módulo de las mecánicas de la interacción háptica: caso particular para la librería de simulación háptica Chai3d (Conti *et al.*, 2003)

Tabla A.1 – Tipos de entidades y posibles componentes asociados a cada una

Entidad	ForceFeedbackComp.	ToolComponent	VirtualObjectComp.	TouchComponent
Mano	✓	×	×	×
Herramienta	×	✓	×	×
Objeto tocable	×	×	✓	✓

✓: Sí; ×: No;

geométrica; lo que supone un impedimento para calcular la integridad del objeto. Por esta razón, el ejemplo plantea dos especializaciones para gestionar el tipo de forma geométrica según sea una malla poligonal o un volumen: *Chai3dMeshObject* y *Chai3dVolumeObject* respectivamente.

- *Creación de las entidades participantes en el modelo.* Existen tres tipos de entidades diferentes representadas en el modelo:
 1. Las manos del usuario o los dispositivos hápticos vinculados al simulador.
 2. Los objetos virtuales que actúan como herramientas.
 3. Los propios objetos virtuales que reaccionan ante las acciones de herramientas.

Desde la perspectiva del modelo cada una de estas entidades están caracterizadas por tener componentes distintos (ver Tabla A.1). Por esta razón, a la hora de implementar el modelo es necesario disponer de algún mecanismo encargado de construir adecuadamente cada una de ellas.

Una posible solución a esta situación es utilizar patrones de diseño y más concretamente el patrón Builder de Gamma *et al.* (1995); cuya intención es separar la

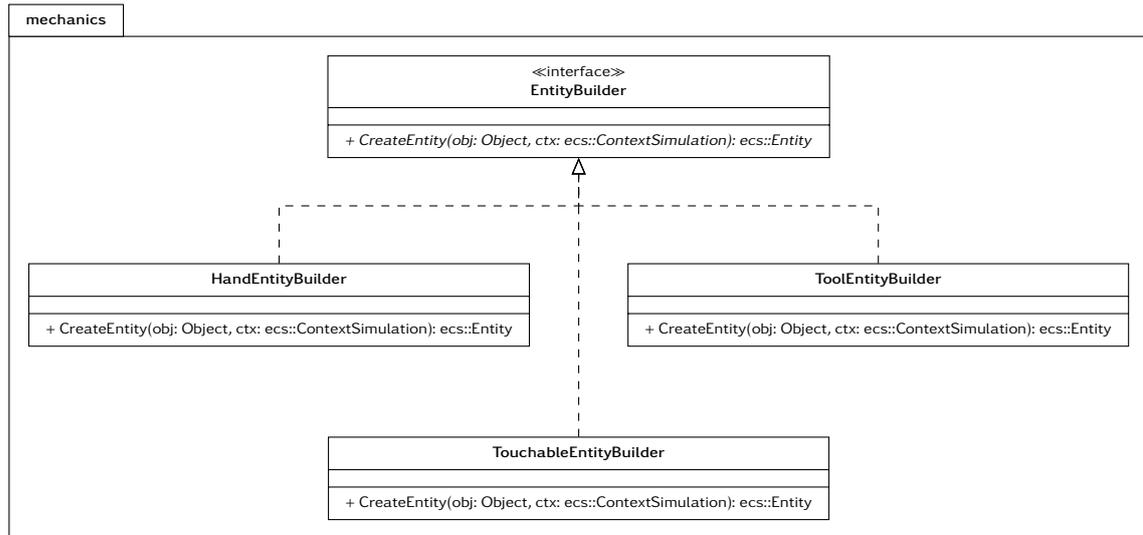


Figura A.16 – Diagrama de clases para crear las entidades participantes en el modelo

construcción de un objeto complejo de su representación. El diagrama de clases de la Figura A.16 contiene un ejemplo de aplicación de este patrón, donde la interfaz `EntityBuilder` es la encargada de definir la creación de una entidad a partir de dos elementos: por un lado el objeto ajeno al modelo que representa un elemento del simulador y por otro el contexto donde almacenar la entidad como tal y sus componentes asociados. El resto de clases que del diagrama implementan dicha interfaz (`HandEntityBuilder`, `ToolEntityBuilder` y `TouchableEntityBuilder`) y cada una tiene la responsabilidad de crear un tipo concreto de entidad junto a sus respectivos componentes y según lo indicado en la Tabla A.1.

A.4. Evaluación del desempeño (assessment)

Ver diagramas de clases de las Figuras 5.7 a 5.9 del Capítulo 5.

A.4.1. Colaboraciones entre participantes

- *Proceso de registro de los datos de desempeño en las entidades activas en un contexto dado* (ver Figura A.17). El método `Update` de `TrackingSystem` implementa este proceso. Consiste en registrar—como métricas de rendimiento—el estado interno de todas las entidades activas en un contexto dado: primero de aquellas que representan las manos o los dispositivos hápticos vinculados al simulador y luego de aquellas que representan herramientas y objetos virtuales implicados en procesos activos de interacción háptica (colisiones).
- *Registrar las métricas de rendimiento de una entidad concreta* (ver Figura A.18). El método `trackPerformance` de `TrackingSystem` describe esta acción. Dada una entidad, comprueba si esta tiene asociada un componente para registrar sus datos. En caso de tenerlo, obtener su lista de métricas de rendimiento y registrar los datos de cada una según su tipo. En caso de no tenerlo descartar el proceso de registro.

Cabe destacar que la llamada al método `Accept` de la métrica activa el mecanismo de `double-dispatch` que permite ejecutar como tal la operación de registrar los datos; ya que es esta quien a su vez llama al método `Visit` correspondiente en función de su tipo.

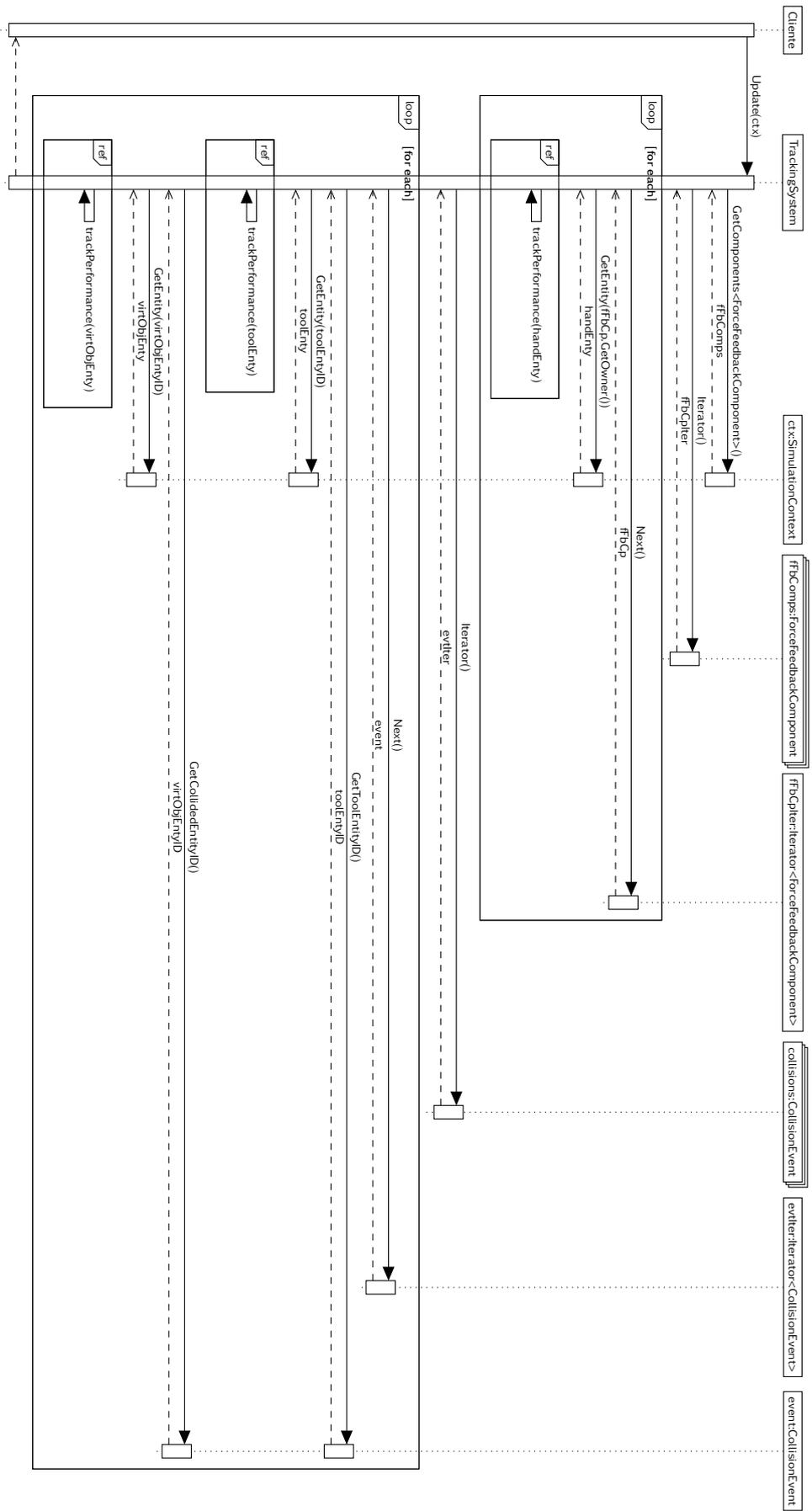


Figura A.17 – Diagrama de secuencia para el proceso de registro de los datos de desempeño en las entidades activas en un contexto dado

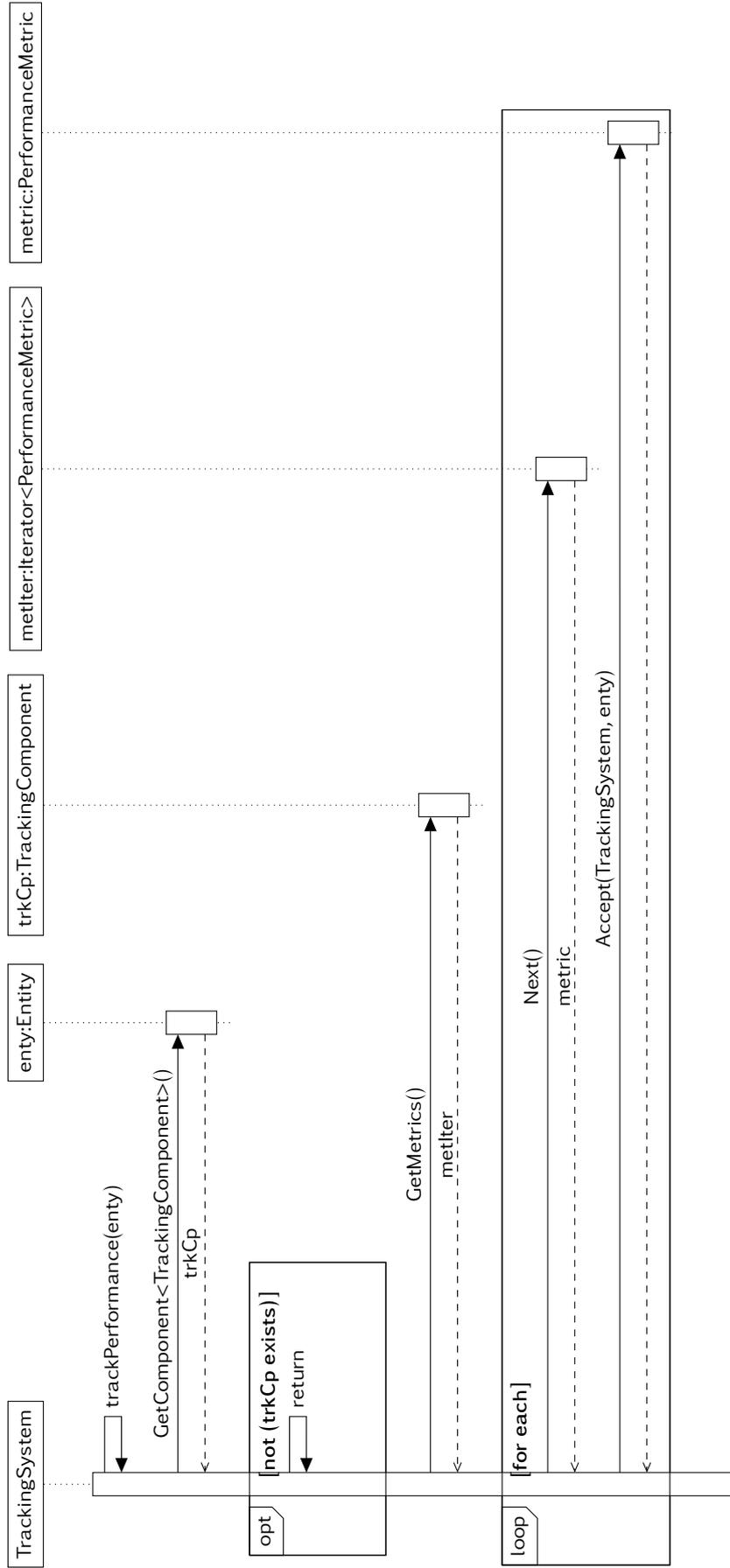


Figura A.18 – Diagrama de secuencia para registrar los datos de desempeño de una entidad concreta

- *Respuestas ante una notificación de un evento de tipo colisión por parte del sistema de registro.* Los métodos `OnCollisionStart` y `OnCollisionEnd` de `TrackingSystem` son responsables de responder a eventos de tipo colisión. De hecho, las respuestas son análogas a las de un `HapticResponseSystem` del módulo de mecánica de la interacción háptica (ver Figuras A.12 y A.13) cambiando el sistema que las gestiona. Concretamente:
 - `OnCollisionStart` guarda una referencia al evento de colisión que acaba de ser detectado dentro de la colección gestionada por el sistema.
 - `OnCollisionEnd` quita la referencia del evento de colisión que acaba de terminar de la colección gestionada por el sistema.

- *Proceso de evaluación de las métricas registradas en todas las entidades de un contexto dado* (ver Figura A.19). El método `Update` de `EvaluationSystem` es responsable de esta funcionalidad. Consiste en evaluar todas aquellas entidades que tengan datos registrados sobre el desempeño del usuario. Concretamente, el método calcula y actualiza las puntuaciones correspondientes (parciales y totales) de cada una de las métricas de rendimiento asociadas a dichas entidades.

Al igual que pasaba con el proceso de registro, cabe señalar que esta operación de evaluar es posible gracias al mecanismo de `double-dispatch`, el cual se activa a través del método `Accept` de la métrica para luego ser esta quien llame al método `Visit` correspondiente en función de su tipo.

- *Evaluar una métrica específica* (ver Figura A.20). Cualquiera de los métodos `Visit` de `PerformanceMetric` son responsables de realizar esta operación. Todos ejecutan la operación de la misma forma utilizando el mecanismo de `double-dispatch`, para delegar en el método parametrizado `evaluate` de `PerformanceMetric` utilizando el tipo correspondiente. Este método obtiene el componente de evaluación de la entidad dada para `A` partir de aquí, el método consiste en ejecutar las siguientes instrucciones:

1. Obtener el componente de evaluación para poder tener acceso a la métrica estándar.
2. Comparar la métrica estándar con la métrica registrada (pasada como argumento) a fin de obtener la correspondiente puntuación parcial que define el desempeño del usuario. Cabe recalcar que para realizar la comparación, la métrica estándar delega en la estrategia de análisis de métricas que tenga asignada.
3. Finalmente, actualizar el componente de evaluación: primero guardando la puntuación parcial y luego acumulándola en la puntuación total del componente.

A.5. Entorno de aprendizaje (learnenv)

Ver diagramas de clases de las Figuras 5.10 y 5.11 del Capítulo 5.

A.5.1. Colaboraciones entre participantes

- *Ejecutar una sesión de aprendizaje* (ver Figura A.21). El método `Run` de `LearningUnit` implementa esta acción. Controla y monitoriza de forma paralela a la ejecución del simulador háptico, el flujo de trabajo del usuario mientras este desarrolla la secuencia de pasos que componen la tarea de aprendizaje. Una vez concluida la tarea (bien porque el usuario ha completado satisfactoriamente todos los pasos o porque

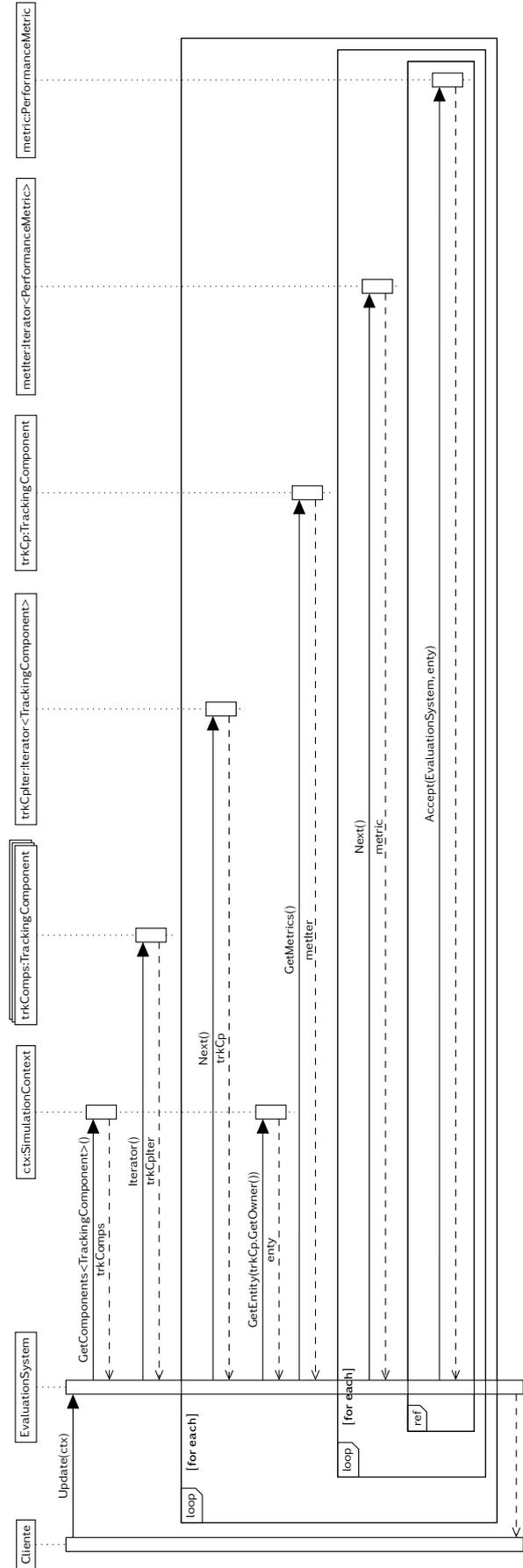


Figura A.19 – Diagrama de secuencia sobre el proceso de evaluación de las métricas registradas en todas las entidades de un contexto dado

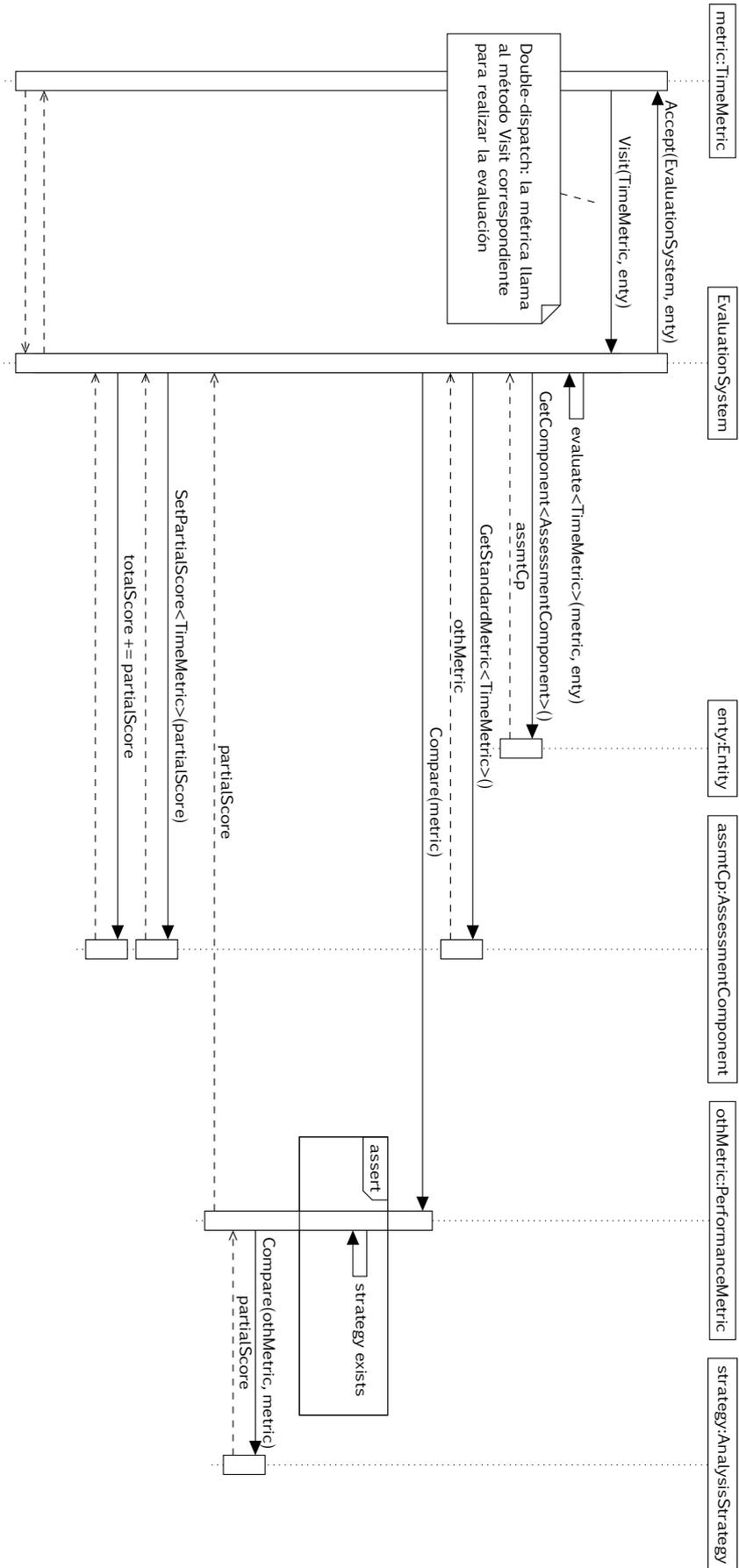


Figura A.20 – Diagrama de secuencia para evaluar una métrica específica: ejemplo parametrizado para TimeMetric

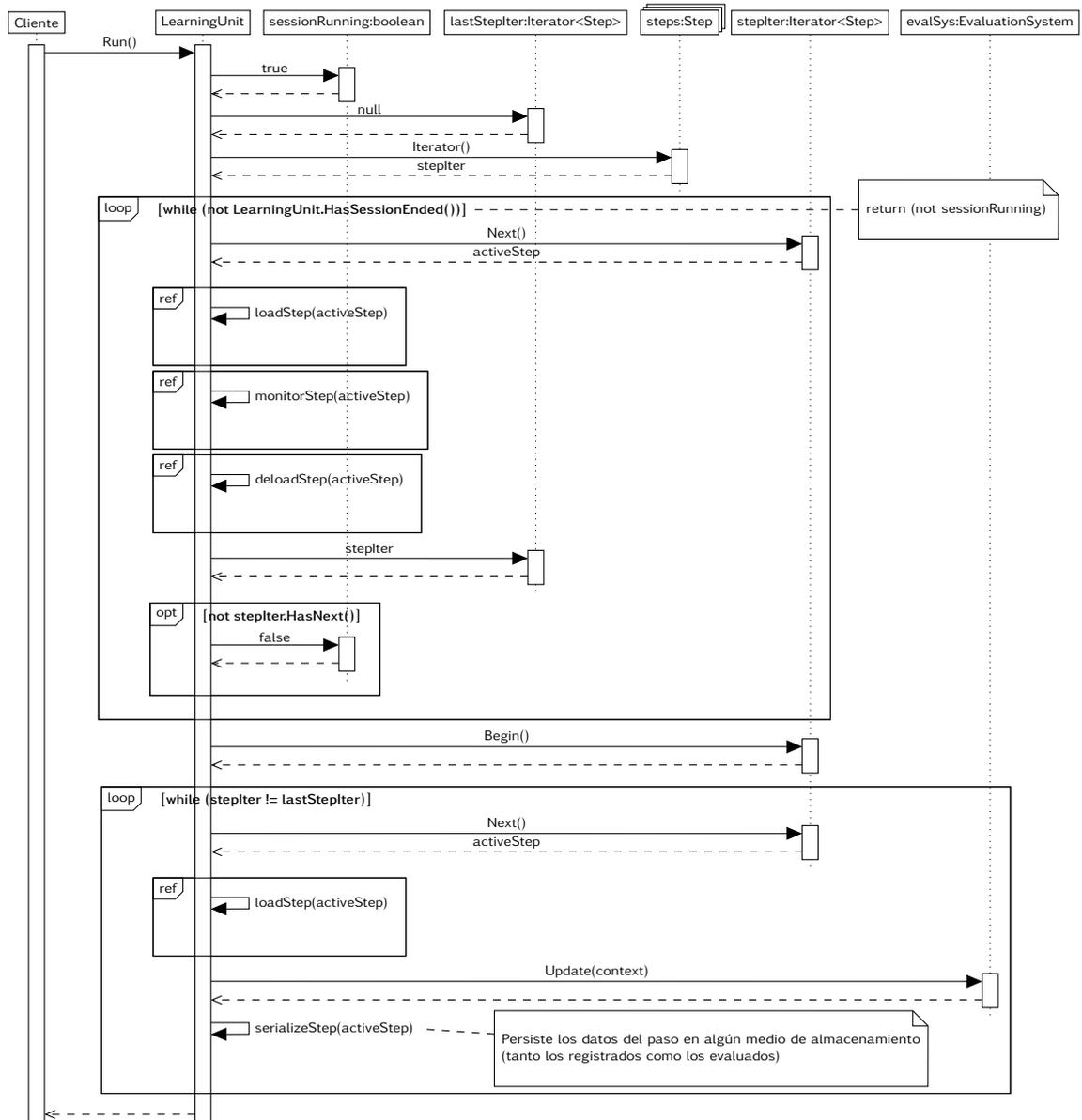


Figura A.21 – Diagrama de secuencia sobre el proceso de ejecutar una sesión de aprendizaje

ha cometido un error fatal en algún momento) evalúa el desempeño registrado y persiste todos los datos resultantes (los del registro y los de la evaluación).

- *Respuesta ante una notificación de un evento de tipo error fatal* (ver Figura A.22). El método `OnFatalError` de `LearningUnit` describe esta acción. Consiste en desactivar tanto la monitorización del paso actual como la ejecución de la propia sesión de aprendizaje al recibir una notificación de que ha sucedido un evento de tipo error fatal.
- *Cargar los datos de un paso en las entidades del contexto de la unidad de aprendizaje* (ver Figura A.23). El método `loadStep` de `LearningUnit` es responsable de esta función. Dado un paso de la tarea de aprendizaje, Consiste en asociar a cada en-

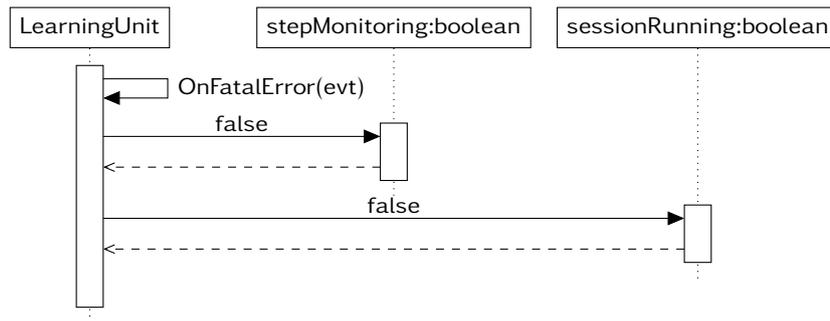


Figura A.22 – Diagrama de secuencia para responder ante una notificación de error fatal

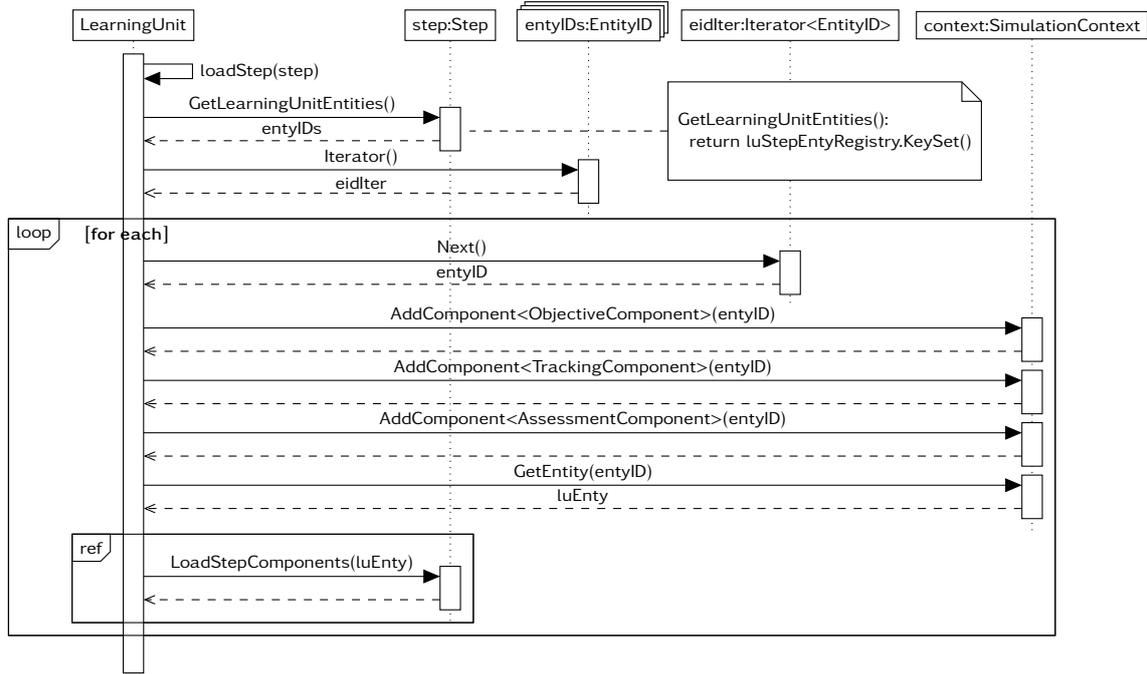


Figura A.23 – Diagrama de secuencia para cargar los datos de un paso en las entidades del contexto de la unidad de aprendizaje

tividad perteneciente al contexto de la unidad de aprendizaje y vinculada al paso, tres componentes (*ObjectiveComponent*, *TrackingComponent* y *AssessmentComponent*), en los que cargar los correspondientes datos almacenados dentro del contexto del propio paso.

- *Cargar en una entidad sus datos almacenados en el contexto de un paso* (ver Figura A.24). El método *LoadStepComponents* de *Step* implementa esta acción. Dada una entidad perteneciente al contexto de la unidad de aprendizaje y a la que previamente se le han asociado los tres componentes característicos a un paso (*ObjectiveComponent*, *TrackingComponent* y *AssessmentComponent*), consiste en buscar la entidad vinculada a esta dentro del contexto del paso y copiar los datos de tales componentes.
- *Monitorizar el desarrollo de un paso* (ver Figura A.25). El método *MonitorStep* de *LearningUnit* describe este proceso. Consiste en controlar el flujo de trabajo de un paso mientras este permanece activo, es decir, mientras el usuario no complete los

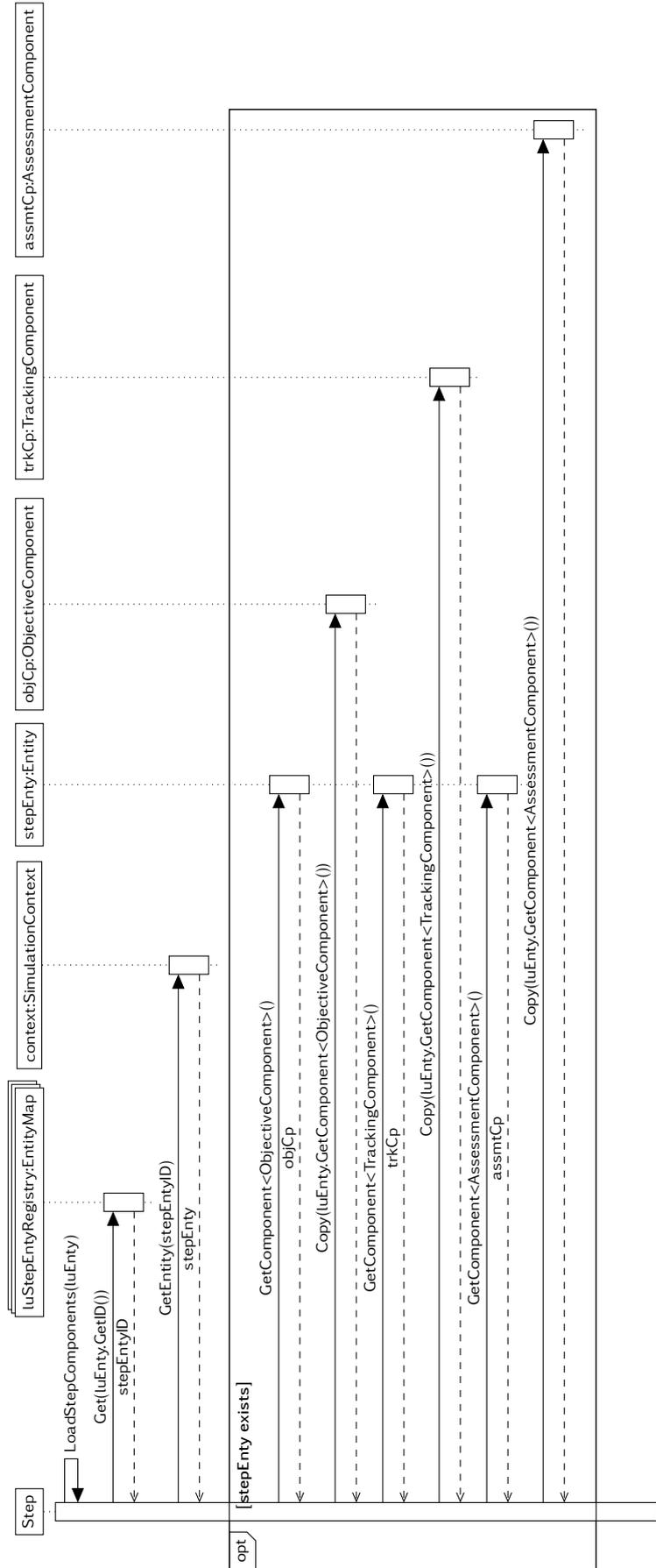


Figura A.24 – Diagrama de secuencia para cargar en una entidad sus datos almacenados en el contexto de un paso

objetivos establecidos o no cometa un error fatal. Durante el desarrollo del paso el método también es responsable de realizar tres funciones:

1. Actualizar el estado interno de los distintos elementos representados en el modelo a partir de los datos obtenidos de la interacción háptica entre el usuario y el simulador.
 2. Registrar esos datos en términos de métricas de rendimiento.
 3. Comprobar si el hecho de actualizar los datos anteriores ha conseguido que se cumplan todos los objetivos establecidos para el paso.
- *Comprobar el cumplimiento de todos los objetivos de un paso dado* (ver Figura A.26). El método `Update` de `AchievementSystem` implementa esta acción. Su función es notificar a los observadores interesados de que un paso ha sido completado satisfactoriamente; evento que sucede si todos los objetivos de un contexto dado y asociados a entidades han sido alcanzados. Cabe señalar que, en el instante de comprobación, si una entidad no ha cumplido su objetivo el método descarta continuar el proceso de comprobación.
 - *Respuesta ante una notificación de un evento de tipo paso completado* (ver Figura A.27). El método `OnStepCompleted` de `LearningUnit` controla esta acción que, ante un evento de tipo paso completado, desactiva la monitorización del paso actual.
 - *Descargar los datos de un paso dentro de su contexto* (ver Figura A.28). El método `loadStep` de `LearningUnit` es responsable de esta función. Dado un paso de la unidad de aprendizaje, consiste en almacenar—dentro del contexto del propio paso— los datos de los tres componentes asociados a cada una de las entidades participantes en este (`ObjectiveComponent`, `TrackingComponent` y `AssessmentComponent`). Tras descargar los datos, también es responsable de quitar a cada entidad involucrada en el paso los tres componentes asociados a su inicio.
 - *Guardar los datos de una entidad en el contexto de un paso* (ver Figura A.29). El método `SaveStepComponents` de `Step` implementa esta acción. Dada una entidad perteneciente al contexto de la unidad de aprendizaje, consiste en buscar la entidad vinculada a esta dentro del contexto del paso para luego copiar en ella los datos almacenados en la primera (la del contexto de la unidad de aprendizaje).

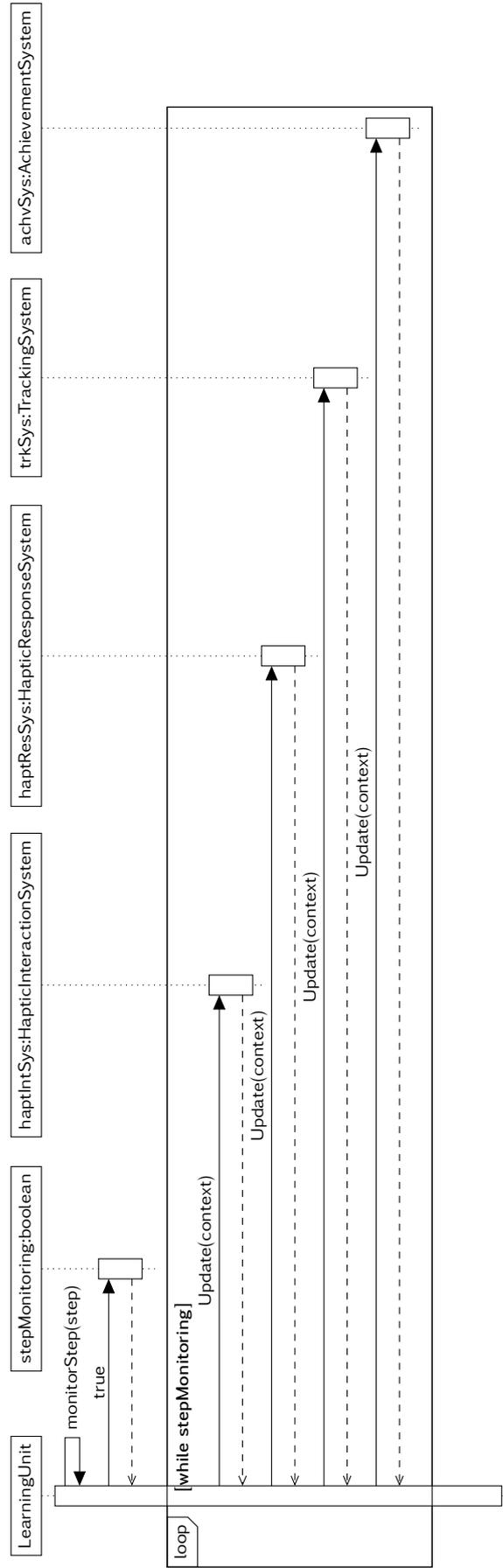


Figura A.25 – Diagrama de secuencia para monitorizar el desarrollo de un paso

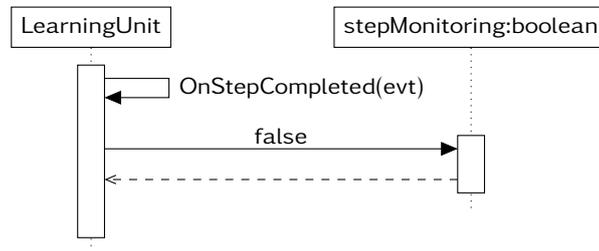


Figura A.27 – Diagrama de secuencia para responder ante una notificación de paso completado

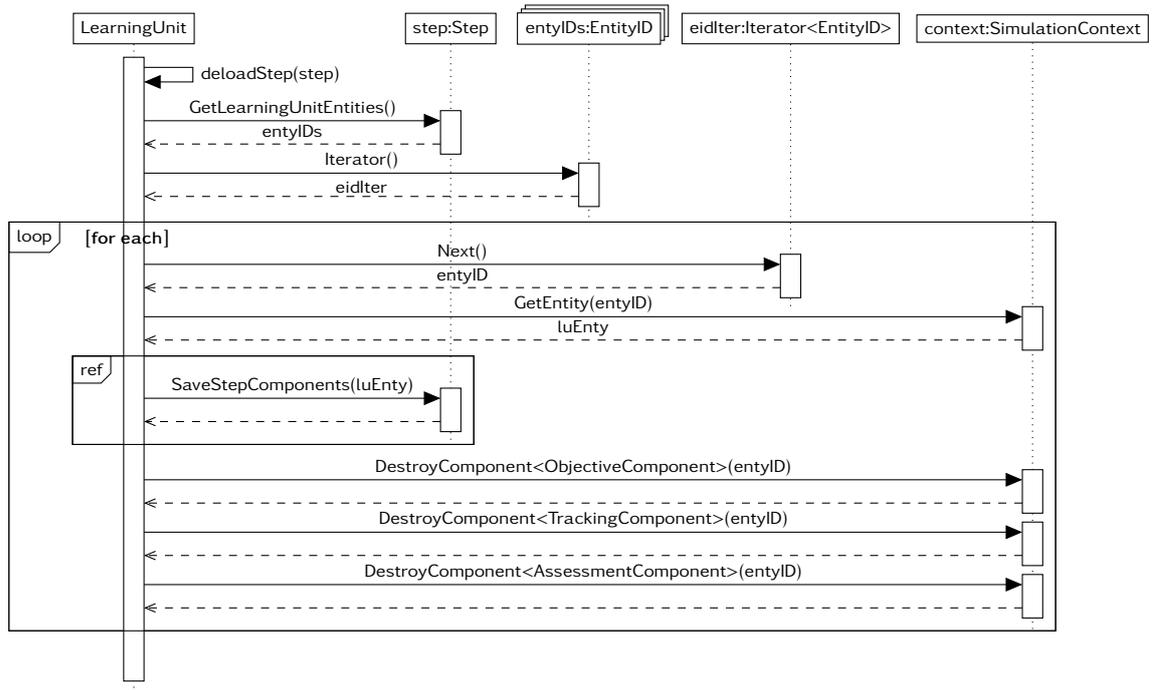


Figura A.28 – Diagrama de secuencia para descargar los datos de un paso dentro de su contexto

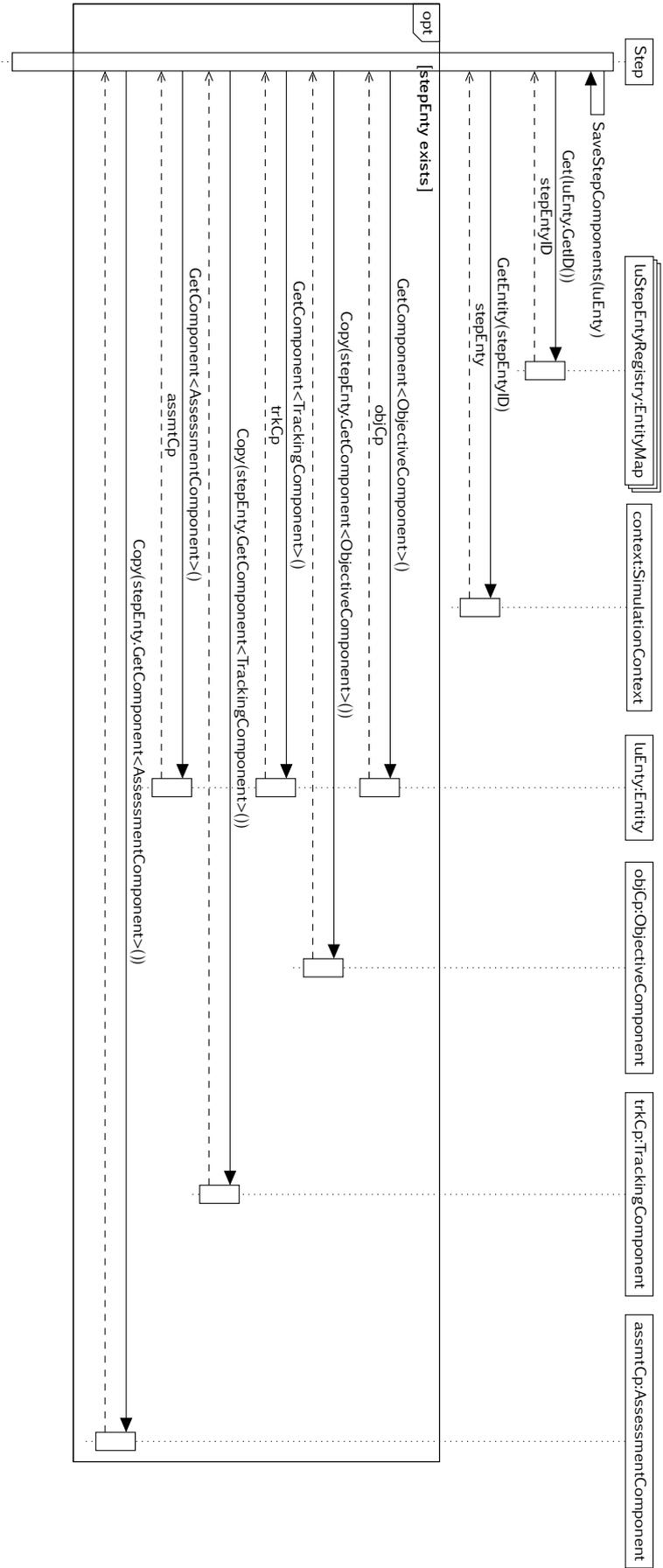


Figura A.29 – Diagrama de secuencia para guardar los datos de una entidad en el contexto de un paso

Apéndice B

Datos sobre la evaluación del modelo

Este apéndice presenta los datos utilizados en la evaluación del modelo detallada en el Capítulo 6.

B.1. Cuestionario

INICIO DEL CUESTIONARIO

ID: Fecha:

Evaluación LEEKHS

iv Congreso de Docencia Veterinaria (VetDoc 2017)

Importante:

- Complete los campos del formulario señalados con un marcando con una \times la opción que considere oportuna o que esté más cercana a su opinión.
- Los campos “ID”, “Fecha” y “Resultados de las tareas de aprendizaje” deben ser completados únicamente por la persona que supervise el experimento.

Datos demográficos

Sexo:
 Hombre Mujer

Formación académica:
 Grado universitario Doctor

Años de experiencia como docente (aproximadamente):
 Menos de 10 Entre 11 y 20 Entre 21 y 30 Más de 31

¿Su área de conocimiento es o está relacionada con la cirugía? Sí No

¿Conocía la existencia de tecnología háptica antes del experimento? Sí No

En caso afirmativo, ¿llegó a utilizar un simulador háptico como el que ha visto? Sí No

¿Considera que el sentido del tacto es importante dentro de la Veterinaria? Sí No

Resultados de las tareas de aprendizaje

Tarea	Nota	Tiempo
Precisión (tallar cubos)		
Traslación (mover figuras)		

Aceptación de LEEKHS

- ¿Cree que practicar con la tarea “de precisión” ayudaría a un estudiante a la hora de adquirir las destrezas técnicas básicas necesarias para poder comenzar a formarse en procedimientos quirúrgicos más complejos?
 1 (Nada) 2 (Poco) 3 (No lo sé) 4 (Bastante) 5 (Mucho)
- ¿Cree que practicar con la tarea “de traslación” ayudaría a un estudiante a la hora de adquirir las destrezas técnicas básicas necesarias para poder comenzar a formarse en procedimientos quirúrgicos más complejos?
 1 (Nada) 2 (Poco) 3 (No lo sé) 4 (Bastante) 5 (Mucho)
- ¿Cree que la inclusión complementaria del simulador que acaba de probar supondría una ventaja con respecto a la formación actual que conoce?
 1 (Ninguna) 2 (Poca) 3 (No lo sé) 4 (Bastante) 5 (Mucha)
- ¿Estaría dispuesto a utilizar simuladores hápticos como parte de su docencia?
 1 (Nunca) 2 (Es improbable) 3 (No lo sé) 4 (Es probable) 5 (Sin duda)
- ¿Cuál es su opinión acerca de la experiencia en su conjunto?
 1 (No me gustó) 2 (Indiferente) 3 (No lo sé) 4 (Interesante) 5 (Me gustó)

Feedback sobre tecnología háptica

Este apartado es opcional, por lo que solo deberá contestar con sus propias palabras aquellas preguntas que considere oportunas.

¿Qué ventajas encuentra al uso de este tipo de tecnología?

¿Qué inconvenientes encuentra al uso de este tipo de tecnología?

Indique el principal campo de su interés para la aplicación de la tecnología háptica:

FIN DEL CUESTIONARIO

Tabla B.1 – Datos demográficos de los participantes

ID	Sexo	Formación	Años de experiencia	Área de conocimiento	Conocía la tecnología	Ha utilizado simuladores	Importancia del tacto
1	hombre	doctor	entre 21 y 30	si	si	si	si
2	mujer	grado univ.	menos de 10	si	no	no	si
3	mujer	grado univ.	menos de 10	si	no	no	si
4	mujer	doctor	menos de 10	si	no	no	si
5	hombre	doctor	entre 21 y 30	no	no	no	si
6	mujer	doctor	entre 21 y 30	si	no	no	si
7	hombre	doctor	entre 21 y 30	no	no	no	si
8	hombre	grado univ.	más de 31	si	si	no	si
9	hombre	doctor	entre 21 y 30	no	no	no	si
10	mujer	doctor	entre 21 y 30	no	no	no	si
11	mujer	doctor	entre 21 y 30	no	no	no	si
12	hombre	doctor	entre 21 y 30	si	no	no	si
13	mujer	grado univ.	menos de 10	no	no	no	si
14	mujer	grado univ.	entre 11 y 20	no	no	no	si
15	hombre	doctor	entre 11 y 20	si	no	no	si
16	hombre	doctor	entre 11 y 20	no	no	no	si
17	mujer	doctor	entre 11 y 20	si	no	no	si
18	mujer	doctor	entre 11 y 20	no	no	no	si
19	mujer	doctor	entre 21 y 30	si	no	no	si
20	mujer	doctor	más de 31	no	no	no	si
21	mujer	doctor	entre 21 y 30	no	no	no	si
22	mujer	doctor	más de 31	no	no	no	si
23	hombre	doctor	más de 31	si	no	no	si
24	hombre	doctor	más de 31	si	no	no	si
25	mujer	doctor	menos de 10	no	no	no	si
26	hombre	grado univ.	menos de 10	no	no	no	si
27	hombre	grado univ.	menos de 10	no	no	no	si
28	hombre	grado univ.	menos de 10	no	no	no	si
29	mujer	grado univ.	menos de 10	si	no	no	si
30	mujer	doctor	más de 31	si	no	no	si
31	hombre	doctor	entre 21 y 30	si	si	no	si

B.2. Datos de los participantes

Ver Tablas B.1 y B.2.

B.3. Estadísticos utilizados

Ver Tablas B.3 a B.5.

Tabla B.2 – Datos de los participantes relativos a los resultados de las tareas de aprendizaje y a la variable de aceptación del framework

ID	Tarea precisión		Tarea traslación		Aceptación de LEEKHS				
	Nota	Tiempo	Nota	Tiempo	Ítem 1	Ítem 2	Ítem 3	Ítem 4	Ítem 5
1	8.54	88	6.25	113	5	5	5	5	5
2	10	128	7.69	124	5	5	4	4	5
3	5.11	166	8.19	300	5	4	4	4	5
4	4.95	227	8.75	300	4	4	4	2	4
5	6.20	109	8.53	120	4	4	4	4	4
6	8.48	136	7.11	193	5	5	5	5	2
7	10	121	5.79	12	5	5	4	2	3
8	8.70	136	8.19	206	4	5	4	5	4
9	4.55	132	8.13	222	4	4	4	5	5
10	10	136	6.57	158	4	4	2	2	2
11	8.44	120	6.35	69	4	4	4	2	4
12	6.99	116	6.38	129	4	4	4	2	4
13	9.75	108	6.47	113	5	5	5	4	5
14	10	198	7.31	126	4	5	3	2	3
15	8.47	110	7.73	98	5	5	4	4	4
16	10	99	8.06	224	3	4	5	5	4
17	4.01	143	8.72	172	4	4	4	1	3
18	10	112	8.84	158	4	4	3	4	3
19	9.92	110	6.53	121	5	5	5	4	5
20	4.93	130	8.46	158	5	5	4	4	4
21	9.25	83	8.75	300	4	5	5	5	5
22	7.34	164	8.71	164	5	5	5	4	4
23	7.03	116	7.77	109	5	5	4	4	3
24	8.11	141	8.72	134	5	5	4	4	4
25	0.13	164	7.91	237	4	4	4	4	4
26	8.77	140	8.09	70	5	5	4	4	4
27	5.47	93	7.69	285	5	5	5	2	5
28	9.24	84	8.64	96	5	5	5	5	5
29	8.69	95	7.2	300	2	2	4	2	3
30	8.07	100	7.53	88	5	5	5	4	5
31	9.26	114	8.86	215	4	4	2	4	5

Para "Aceptación de LEEKHS": 1 = Totalmente en desacuerdo; 2 = En desacuerdo;
3 = No sabe/No contesta; 4 = En acuerdo; 5 = Totalmente en acuerdo

Tabla B.3 – Estadísticos sobre los datos demográficos

Dato	Valor	Frecuencia	Porcentaje
Sexo	Hombre	14	45.161
	Mujer	17	54.839
Formación académica	Grado	9	29.032
	Doctor	22	70.968
Años de experiencia	Menos de 10	9	29.032
	Entre 11 y 20	5	16.129
	Entre 21 y 30	11	35.484
	Más de 31	6	19.355
Área de conocimiento	Cirugía	15	48.387
	Otros	16	51.613
Conoce la tecnología	Sí	3	9.677
	No	28	90.323
Utilizó simuladores	Sí	1	3.226
	No	30	96.774
Importancia del tacto	Sí	31	100.0
	No	0	0.0

Dato	Mediana	Percentil 25 (Q ₁)	Percentil 75 (Q ₃)	Rango intercuartílico (IQR)
Formación académica	2	1	2	1
Años de experiencia	3	1	3	2

Tabla B.4 – Estadísticos sobre los resultados de las tareas de aprendizaje

	Tarea precisión		Tarea traslación	
	Nota	Tiempo (seg.)	Nota	Tiempo (seg.)
Media	7.755	126.419	7.739	168.677
Desv. estándar	2.345	32.234	0.918	72.292
Mediana	8.480	120	7.910	158
Mínimo	0.130	83	5.790	69
Máximo	10	227	8.860	300
Percentil 25 (Q ₁)	6.595	108.5	7.155	116.5
Percentil 50 (Q ₂)	8.480	120	7.91	158
Percentil 75 (Q ₃)	9.505	138	8.585	218.5
Rango intercuartílico (IQR)	2.910	29.5	1.43	102

Tabla B.5 – Estadísticos sobre los items de la variable “aceptación de LEEKHS”

Dato	Valor	Frecuencia	Porcentaje
Ítem 1	1 (Nada)	0	0.0
	2 (Poco)	1	3.226
	3 (No lo sé)	1	3.226
	4 (Bastante)	13	41.935
	5 (Mucho)	16	51.613
Ítem 2	1 (Nada)	0	0.0
	2 (Poco)	1	3.226
	3 (No lo sé)	0	0.0
	4 (Bastante)	12	38.710
	5 (Mucho)	18	58.065
Ítem 3	1 (Ninguna)	0	0.0
	2 (Poca)	2	6.452
	3 (No lo sé)	2	6.452
	4 (Bastante)	17	54.839
	5 (Mucha)	10	32.258
Ítem 4	1 (Nunca)	1	3.226
	2 (Es improbable)	8	25.806
	3 (No lo sé)	0	0.0
	4 (Es probable)	15	48.387
	5 (Sin duda)	7	22.581
Ítem 5	1 (No me gustó)	0	0.0
	2 (Indiferente)	2	6.452
	3 (No lo sé)	6	19.355
	4 (Interesante)	12	38.710
	5 (Me gustó)	11	35.484

Dato	Mediana	Percentil 25 (Q ₁)	Percentil 75 (Q ₃)	Rango intercuartílico (IQR)
Ítem 1	5	4	5	1
Ítem 2	5	4	5	1
Ítem 3	4	4	5	1
Ítem 4	4	2	4	2
Ítem 5	4	3.5	5	1.5