

A Transversal Quality Model for the Evaluation of Remote Laboratories

Viviana Lucía Gasull¹  and Carlos Salgado ² 

¹Departamento de Informática, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales,

Universidad Nacional de San Luis

²Departamento de Informática, Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales,

Universidad Nacional de San Luis

viviana.gasull@gmail.com

Abstract. Remote laboratories have become a fundamental technological resource in engineering education, enabling interaction with real physical systems through digital platforms. However, their hybrid nature—which combines software, hardware, communication infrastructure, and pedagogical contexts—poses significant challenges for quality evaluation.

This work proposes a cross-cutting quality model for remote laboratories. The design adopts the perspective of Educational Cyber-Physical Systems (CPES), considering that these environments integrate real physical equipment, software platforms, communication infrastructure, and learning processes.

The model architecture is structured into three complementary levels: a structural level, which identifies the component subsystems; a transversal level, which defines the quality dimensions or layers; and an integration level, which articulates metrics, data sources, and continuous evaluation processes.

As an initial validation phase, the model is applied to a remote kinematics laboratory, with special emphasis on the dimensions of quality in use and pedagogical quality. The study establishes metrics and data collection instruments, analyzing both objective interaction records and users' perceptions. The results demonstrate that the proposed approach enables a systematic assessment of user experience and learning impact, highlighting the interdependence among technical performance, usability, and pedagogical effectiveness. These findings validate the applicability of the model as a comprehensive framework for the evaluation and continuous improvement of remote laboratories.

Keywords: remote laboratories, quality model, educational cyber-physical systems.

Un modelo transversal de calidad para la evaluación de laboratorios remotos.

Resumen. Los laboratorios remotos se han consolidado como un recurso tecnológico fundamental en la formación de ingenieros, facilitando la interacción con sistemas físicos reales mediante plataformas digitales. No obstante, su

naturaleza híbrida —la cual converge software, hardware, infraestructura de comunicaciones y contextos pedagógicos— impone desafíos significativos para la evaluación de su calidad.

El presente trabajo propone un modelo de calidad transversal para laboratorios remotos. Para su diseño se adopta la perspectiva de los Sistemas Cyberfísicos Educativos (CPES), entendiendo que estos entornos integran equipamiento físico real, plataformas software, infraestructura de comunicación y procesos de aprendizaje.

La arquitectura del modelo se estructura en tres niveles complementarios: un nivel estructural, que identifica los subsistemas componentes; un nivel transversal, que define las dimensiones o capas de calidad; y un nivel de integración, que articula métricas, fuentes de datos y procesos de evaluación continua.

Como fase inicial de validación, el modelo se aplica a un laboratorio remoto de cinemática, con especial énfasis en las dimensiones de calidad en el uso y calidad pedagógica. El estudio establece métricas e instrumentos de recolección de datos, analizando tanto registros objetivos de interacción como las percepciones de los usuarios.

Los resultados demuestran que el enfoque propuesto permite una valoración sistemática de la experiencia de usuario y del impacto en el aprendizaje, evidenciando la interdependencia existente entre el desempeño técnico, la usabilidad y la efectividad pedagógica. Estos hallazgos validan la aplicabilidad del modelo como un marco integral para la evaluación y la mejora continua de los laboratorios remotos.

Palabras clave: laboratorios remotos, modelo de calidad, sistemas ciberfísicos.

1 Introducción:

En los últimos años, la transformación digital ha generado cambios significativos en los procesos de enseñanza y aprendizaje en ingeniería, promoviendo la incorporación de entornos tecnológicos que amplían las posibilidades de acceso a experiencias prácticas. En este contexto, los laboratorios remotos han emergido como una alternativa que permite a los estudiantes interactuar con equipos físicos reales a través de plataformas digitales, superando las limitaciones espaciales y temporales de los laboratorios tradicionales.

Diversos autores han definido el concepto de laboratorio remoto desde perspectivas complementarias. Ma y Nickerson (2006) los describen como entornos en los cuales los estudiantes controlan y observan experimentos reales mediante computadoras conectadas en red, destacando como característica distintiva la utilización de equipamiento físico real en lugar de simulaciones. En una visión más reciente, Villalobos y Romero Alonso (2023) consideran que los laboratorios remotos son entornos teleoperados que permiten la realización de experimentos reales mediante sensores y actuadores accesibles a través de Internet. Esta definición incorpora explícitamente los componentes tecnológicos que posibilitan la interacción remota con el equipamiento físico.

A partir de estas contribuciones, en el marco de esta investigación se entiende por laboratorio remoto a un entorno que posibilita la ejecución de experimentos reales mediante el control a distancia de dispositivos físicos, integrando componentes de

software, hardware e infraestructura de comunicación en un único sistema. Esta característica los diferencia tanto de los laboratorios presenciales como de los entornos virtuales basados exclusivamente en simulación, al combinar la fidelidad del entorno físico con la flexibilidad de acceso digital (García-Zubía & Alves, 2011).

Desde una perspectiva educativa, los laboratorios remotos se alinean con enfoques constructivistas y de aprendizaje experiencial, favoreciendo la comprensión de conceptos, el desarrollo de habilidades experimentales y la autonomía en el aprendizaje (Ma & Nickerson, 2006; Feisel & Rosa, 2005).

No obstante, su implementación plantea desafíos relevantes en términos de calidad. Su naturaleza híbrida implica la integración de múltiples componentes tecnológicos —plataformas software, dispositivos físicos y redes de comunicación— cuya interacción debe ser coherente, confiable y transparente para el usuario, en un contexto donde la experiencia de uso y el impacto en el aprendizaje resultan dimensiones críticas.

En este sentido, los enfoques tradicionales de evaluación resultan insuficientes para abordar la complejidad de estos entornos. Por un lado, la calidad en uso (ISO 9241-11, 2018) constituye un punto de partida relevante, pero no contempla aspectos propios de la interacción con dispositivos físicos o las condiciones de comunicación. Por otro, los modelos de calidad de software de la familia SQuaRE (ISO/IEC 25000; ISO/IEC 25022, 2016) incorporan dimensiones como confiabilidad y eficiencia, pero no abordan explícitamente la naturaleza ciberfísica de estos sistemas ni su integración con procesos educativos.

En paralelo, el concepto de sistemas ciberfísicos (Por su sigla en inglés CPS) permite comprender estos entornos como sistemas en los que procesos computacionales y físicos se encuentran estrechamente acoplados (Lee, 2008), donde la calidad emerge de su interacción en condiciones dinámicas. En el ámbito educativo, esta complejidad se amplifica al incorporar dimensiones como la motivación, el compromiso y la percepción de apoyo pedagógico, que influyen directamente en la experiencia de aprendizaje (Spector, 2014; Laurillard, 2012).

Frente a este escenario, surge la necesidad de modelos de evaluación y aseguramiento de la calidad que permitan abordar los laboratorios remotos desde una perspectiva integral. En respuesta a esta problemática, el presente trabajo propone un modelo transversal de calidad que articula subsistemas tecnológicos, capas de calidad y mecanismos de evaluación, proporcionando un marco conceptual para el análisis y la mejora continua de estos entornos. Si bien existen modelos consolidados para evaluar aspectos específicos de sistemas complejos, tales como la calidad de software, la calidad en uso, la accesibilidad o la efectividad pedagógica, estos enfoques suelen aplicarse de manera independiente. En el caso de los laboratorios remotos, cuya naturaleza integra componentes físicos, computacionales, comunicacionales y educativos, la evaluación aislada de cada dimensión dificulta comprender las relaciones e impactos cruzados entre los distintos subsistemas. En consecuencia, se identifica la necesidad de un marco integrador que permita articular dichas perspectivas dentro de un proceso de evaluación común.

En este contexto, el modelo propuesto no pretende sustituir los enfoques existentes ni redefinir sus métricas, sino proporcionar una estructura común que permita integrarlos y aplicarlos de manera coordinada sobre los distintos subsistemas que conforman un laboratorio remoto. Desde esta perspectiva, la contribución principal

radica en la articulación de diferentes dimensiones de calidad dentro de un marco transversal de evaluación.

2 Modelo propuesto

2.1 Definición general

El modelo propuesto considera al laboratorio remoto como un entorno integrado que puede analizarse desde la perspectiva de los Sistemas Ciberfísicos Educativos. Desde esta visión, la calidad no reside únicamente en sus componentes individuales, sino en las relaciones que se establecen entre los subsistemas físicos, computacionales, comunicacionales y educativos que lo conforman.

Desde la perspectiva de la ingeniería de software, la arquitectura de sistemas complejos se organiza mediante la separación en componentes y la definición de capas que permiten abordar atributos de calidad de manera estructurada (Bass, Clements & Kazman, 2012). En este sentido, el modelo adopta un enfoque en el cual los subsistemas representan la estructura del sistema, mientras que las capas de calidad atraviesan dichos componentes, permitiendo analizar propiedades emergentes.

2.2 Análisis de enfoques de evaluación existentes

La literatura ofrece diversos enfoques para evaluar aspectos particulares de sistemas complejos, incluyendo modelos de calidad de software, calidad en uso, pautas de accesibilidad para el Contenido web(WCAG), sistemas ciberfísicos y entornos educativos. Sin embargo, estos enfoques suelen centrarse en dimensiones específicas del problema. La Tabla 1 resume el alcance de los principales marcos considerados en este trabajo.

Tabla 1: Cobertura de dimensiones en enfoques existentes

Enfoque	Software	Hardware	Comunica- ción	UX	Pedago- gía	Integra- ción
ISO/IEC 25010	✓	✗	Parcial	Parcial	✗	✗
ISO 9241-11	✗	✗	✗	✓	✗	✗
WCAG	✗	✗	✗	✓	✗	✗
Modelos pedagógicos	✗	✗	✗	Parcial	✓	✗
CPS	✓	✓	✓	✗	✗	Parcial
Modelo propuesto	✓	✓	✓	✓	✓	✓

2.3 Estructura del modelo

El modelo se organiza en tres niveles conceptuales:

Nivel estructural: Subsistemas

El modelo propuesto se organiza, en primer lugar, a partir de un nivel estructural que identifica los componentes fundamentales que conforman un laboratorio remoto: plataforma software, dispositivo físico, infraestructura de comunicación e interfaz de usuario

Este nivel tiene como objetivo delimitar el alcance del sistema bajo evaluación, reconociendo su naturaleza heterogénea e integrada.

Desde esta perspectiva, el laboratorio remoto es concebido como un sistema compuesto por múltiples subsistemas interdependientes que articulan tecnologías de distinta naturaleza. En particular, se distinguen cuatro subsistemas principales: la plataforma software, el dispositivo físico, la infraestructura de comunicación y la interfaz de usuario. Cada uno de estos subsistemas cumple un rol específico dentro del funcionamiento global del laboratorio y presenta requerimientos particulares en términos de calidad.

La definición de este nivel estructural permite establecer una base sobre la cual aplicar las distintas capas de calidad, facilitando el análisis sistemático del comportamiento del sistema y la identificación de posibles fuentes de fallas o limitaciones. Asimismo, constituye un punto de partida necesario para abordar la evaluación desde una perspectiva integral, evitando enfoques parciales centrados en un único componente.

Nivel transversal: Capas de calidad

Sobre el nivel estructural se define un segundo nivel, de carácter transversal, que introduce las dimensiones de calidad que atraviesan de manera integral todos los subsistemas del laboratorio remoto. Estas capas atraviesan todos los subsistemas: Calidad técnica, Calidad ciberfísica, Calidad en uso, Calidad pedagógica, Accesibilidad, Cumplimiento normativo.

Este nivel constituye el núcleo conceptual del modelo, ya que permite analizar la calidad del sistema desde múltiples perspectivas complementarias.

A diferencia de los enfoques tradicionales, que tienden a evaluar la calidad de manera fragmentada, el modelo propuesto adopta una visión transversal en la cual cada capa de calidad se aplica simultáneamente sobre los distintos subsistemas. De este modo, es posible capturar no solo el desempeño individual de cada componente, sino también las interacciones y dependencias que emergen entre ellos.

Las capas de calidad incluyen dimensiones técnicas, ciberfísicas, de uso, pedagógicas, de accesibilidad y de cumplimiento normativo, integrando aportes de la ingeniería de software, los sistemas ciberfísicos y las ciencias de la educación. Esta estructura permite abordar la complejidad inherente a los laboratorios remotos, considerando tanto su funcionamiento tecnológico como su impacto en la experiencia y el aprendizaje de los usuarios.

Nivel de integración: evaluación y mejora continua

El tercer nivel del modelo corresponde al nivel de integración, cuyo propósito es articular las distintas capas de calidad con los subsistemas definidos, mediante un enfoque sistemático de evaluación basado en evidencia. Este nivel incluye: Métricas (cuantitativas), Instrumentos (encuestas, logs, tests), Componentes afectados, Fase del uso (antes, durante, después).

Este nivel introduce los mecanismos que permiten operacionalizar el modelo y transformarlo en una herramienta efectiva para el análisis y la mejora de los laboratorios remotos.

En este sentido, el modelo incorpora un enfoque de trazabilidad que vincula cada dimensión de calidad con métricas específicas, fuentes de datos e instrumentos de recolección, tales como registros de interacción, encuestas a usuarios y pruebas técnicas. Esta integración de información cuantitativa y cualitativa permite obtener una visión completa del comportamiento del sistema, contrastando datos objetivos con la percepción de los usuarios.

Asimismo, el nivel de integración se apoya en un ciclo de evaluación continua que contempla la definición de indicadores, la recolección y análisis de datos, y la retroalimentación hacia el sistema para su mejora progresiva. De este modo, el modelo no solo permite evaluar la calidad en un momento dado, sino también acompañar la evolución del laboratorio remoto a lo largo del tiempo, promoviendo procesos sostenidos de mejora tanto a nivel técnico como pedagógico.

2.4 Modelo transversal de calidad para laboratorios remotos.

El modelo representa al laboratorio remoto como un sistema ciberfísico compuesto por cuatro subsistemas principales: plataforma software, dispositivo físico, infraestructura de comunicación e interfaz de usuario (ver Fig. 1). Sobre estos subsistemas se definen capas de calidad que los atraviesan transversalmente, incluyendo calidad técnica, calidad ciberfísica, calidad en uso y calidad pedagógica, junto con dimensiones de accesibilidad y cumplimiento normativo. El modelo se complementa con un eje de evaluación basado en métricas y fuentes de datos heterogéneas, integradas mediante un enfoque de trazabilidad, y un ciclo de mejora continua que permite la evolución progresiva del sistema.

Este nivel constituye el núcleo conceptual del modelo, ya que permite analizar la calidad del sistema desde múltiples perspectivas complementarias.

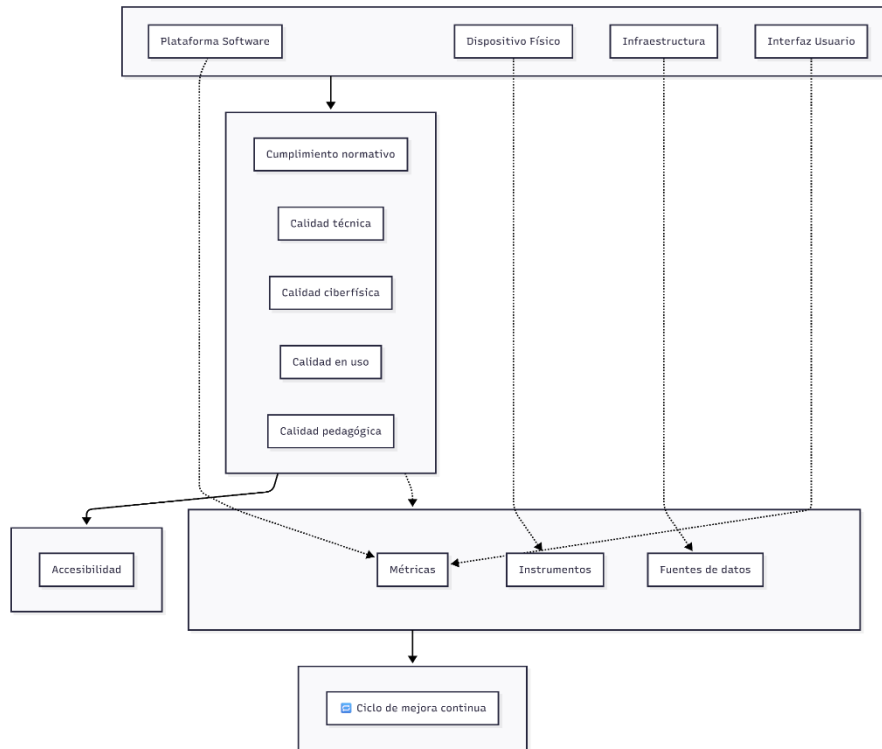


Fig. 1 Modelo transversal de calidad para laboratorios remotos.

Capas de calidad del modelo

El modelo propuesto se fundamenta en un enfoque transversal de la calidad, donde las propiedades relevantes se analizan como dimensiones que integran los subsistemas del laboratorio remoto, articulando aspectos técnicos, experienciales y pedagógicos en un marco unificado. A diferencia de los enfoques tradicionales centrados solo en software, el modelo reconoce la naturaleza ciberfísica de estos laboratorios y define capas que abarcan la interacción tecnológica, la experiencia del usuario y el valor educativo. A continuación, se describen.

Calidad técnica: La capa de calidad técnica aborda las propiedades internas y externas del sistema desde la perspectiva de la ingeniería de software y de sistemas. Su objetivo es garantizar que los componentes tecnológicos —tanto software como infraestructura— operen de manera confiable, eficiente y segura.

Esta capa comprende atributos tales como la confiabilidad, la disponibilidad, el rendimiento, la seguridad y la escalabilidad del sistema. Asimismo, contempla la correcta implementación de requisitos no funcionales y la validación del comportamiento del sistema bajo distintas condiciones de uso, incluyendo escenarios de carga y estrés.

La calidad técnica constituye una condición necesaria para el correcto funcionamiento del laboratorio remoto, ya que las deficiencias en este nivel impactan directamente en la continuidad de las prácticas y en la experiencia del usuario.

Calidad ciberfísica: La calidad ciberfísica representa una dimensión central del modelo y responde a la necesidad de evaluar la integración entre los componentes físicos y digitales del laboratorio remoto. A diferencia de los sistemas puramente software, los laboratorios remotos dependen de la interacción coordinada entre dispositivos físicos, plataformas de control y redes de comunicación.

Esta capa considera aspectos como la sincronización entre el sistema físico y su representación digital, la latencia en la transmisión de datos y video, la fidelidad de las mediciones y la consistencia entre las acciones del usuario y las respuestas del sistema. Asimismo, incluye la capacidad del sistema para mantener un comportamiento estable frente a fallas parciales en alguno de sus componentes, lo que se vincula con el concepto de resiliencia ciberfísica.

La incorporación de esta capa permite abordar problemáticas específicas de los entornos remotos, tales como desincronizaciones, pérdidas de información o inconsistencias en la ejecución de los experimentos, que no pueden ser explicadas únicamente desde la calidad del software.

Calidad en uso: La capa de calidad en uso se centra en la interacción del usuario con el sistema y en la medida en que este le permite alcanzar sus objetivos de manera efectiva, eficiente y satisfactoria. Esta dimensión se fundamenta en estándares internacionales de calidad en uso, que definen el grado en que un producto puede ser utilizado por usuarios específicos en contextos determinados.

En el contexto de los laboratorios remotos, la calidad en uso adquiere una relevancia particular, ya que los estudiantes deben no solo interactuar con la interfaz, sino también comprender y controlar un experimento real a distancia. En este sentido, la facilidad de uso, la claridad de la interfaz, la comprensión de las instrucciones y la capacidad de completar las prácticas sin dificultades constituyen elementos clave.

Asimismo, esta capa incluye la percepción de seguridad durante la interacción, evitando situaciones de frustración o pérdida de información que puedan afectar la experiencia del usuario.

Calidad pedagógica: La calidad pedagógica incorpora la dimensión educativa del laboratorio remoto, reconociendo que su valor no radica únicamente en su funcionamiento técnico, sino en su capacidad para favorecer el aprendizaje significativo.

Esta capa contempla aspectos como el potencial de aprendizaje del sistema, el nivel de motivación y compromiso que genera en los estudiantes, la percepción de apoyo pedagógico y la capacidad del entorno para facilitar la comprensión de conceptos teóricos a través de la experimentación.

Asimismo, incluye la fidelidad percibida del laboratorio remoto respecto a la experiencia presencial, entendida como el grado en que los estudiantes consideran que la interacción remota reproduce, en términos funcionales y cognitivos, las características de un laboratorio tradicional.

La incorporación de esta capa permite integrar criterios propios del ámbito educativo en el proceso de evaluación, superando enfoques centrados exclusivamente en la tecnología.

Accesibilidad: La capa de accesibilidad aborda la capacidad del sistema para ser utilizado por una diversidad de usuarios en distintos contextos de acceso. Esto incluye

tanto aspectos técnicos, como la compatibilidad con diferentes dispositivos y condiciones de conectividad, como aspectos relacionados con la inclusión y la equidad en el acceso al aprendizaje.

En el contexto de los laboratorios remotos, la accesibilidad no se limita a la adaptación para personas con discapacidades, sino que se extiende a la consideración de entornos heterogéneos, donde los estudiantes pueden acceder desde distintos dispositivos, ubicaciones geográficas y niveles de calidad de conexión.

De este modo, la accesibilidad se configura como una dimensión clave para garantizar el carácter democratizador de los laboratorios remotos.

Cumplimiento normativo: La capa de cumplimiento normativo se enfoca en la verificación de que los componentes físicos del laboratorio remoto cumplen con los estándares y regulaciones vigentes en materia de seguridad, compatibilidad y funcionamiento.

Dado que estos sistemas involucran dispositivos físicos operados a distancia, resulta fundamental asegurar que su diseño y operación se ajusten a normativas técnicas que garanticen la seguridad eléctrica, la integridad del equipamiento y la confiabilidad de las mediciones.

Esta capa permite incorporar criterios formales de validación que fortalecen la confiabilidad del sistema y su adopción en entornos institucionales.

Integración de las capas de calidad: Las capas de calidad definidas no deben interpretarse como dimensiones independientes, sino como elementos interrelacionados que, en conjunto, determinan la calidad global del laboratorio remoto. En particular, se observa que las deficiencias en las capas técnicas o ciberfísicas impactan directamente en la calidad en uso y, en consecuencia, en la calidad pedagógica.

Por este motivo, el modelo adopta un enfoque transversal, en el cual cada capa se aplica de manera simultánea sobre los distintos subsistemas del laboratorio, permitiendo una evaluación integral y coherente con la complejidad del sistema.

En la Tabla 2 se presenta una síntesis del modelo transversal de calidad para Laboratorios remotos.

Tabla 2. Modelo Transversal de Calidad

Capa de calidad	Plataforma software	Dispositivo físico	Infraestructura de comunicación	Interfaz de usuario	Tipo de evaluación / evidencia
Calidad técnica	Rendimiento del sistema, gestión de sesiones, procesamiento de datos	Funcionamiento del hardware, estabilidad operativa	Latencia, disponibilidad de red, transmisión de datos	Tiempo de respuesta de la interfaz	Pruebas de carga, logs del sistema, tests de rendimiento
Calidad ciberfísica	Control del experimento	Precisión de sensores,	Sincronización en tiempo real,	Corresponde a acción-respuesta,	Análisis de trazas, monitoreo

	, sincronización lógica	respuesta de actuadores	estabilidad de transmisión	consistencia visual	en tiempo real, pruebas integradas HW-SW
Calidad en uso	Facilidad de acceso, navegación	Facilidad de operación remota	Continuidad de la interacción	Usabilidad, claridad de la interfaz, comprensión de instrucciones	Encuestas (Likert), test de usabilidad, observación de usuarios
Calidad pedagógica	Soporte a objetivos de aprendizaje, generación de datos	Representatividad del fenómeno físico	Fluidez de la experiencia experimental	Motivación, engagement, comprensión conceptual	Encuestas, evaluación de desempeño, análisis de resultados de aprendizaje
Accesibilidad	Compatibilidad con dispositivos y navegadores	Disponibilidad del dispositivo	Adaptación a distintas condiciones de conectividad	Accesibilidad de la interfaz, facilidad de uso en distintos contextos	Pruebas de acceso, análisis de dispositivos, validadores de accesibilidad
Cumplimiento normativo	—	Seguridad eléctrica, normativa técnica (IEC)	—	—	Certificaciones, verificación normativa, inspecciones técnicas

3 Aplicación del modelo: Caso de estudio el Laboratorio Remoto de Cinemática

Con el objetivo de avanzar en la validación del modelo propuesto, se llevó a cabo una primera aplicación focalizada en las capas de calidad en uso y calidad pedagógica, utilizando como caso de estudio el Laboratorio remoto de cinemática de la Facultad de Ingeniería y Cs. Agropecuarias de la Universidad Nacional de San Luis.

El laboratorio analizado permite a los estudiantes interactuar con un sistema físico real a través de una plataforma web, integrando la visualización de datos experimentales, el control remoto del dispositivo y la representación gráfica de variables físicas. Este entorno constituye un escenario adecuado para la aplicación del modelo, en tanto combina componentes software, hardware e interacción de usuario en un contexto educativo real.

3.1 Instanciación de las capas de calidad

En esta primera etapa de validación, se procedió a la instanciación de las capas de calidad en uso y calidad pedagógica mediante la definición de dimensiones, métricas e instrumentos de recolección de datos, en concordancia con el nivel de integración del modelo.

Para ello, se definió un esquema de evaluación basado en la articulación entre dimensiones, métricas, tipos de datos e instrumentos de recolección, el cual se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3: Operacionalización de las capas de calidad en uso y calidad pedagógica

Capa de calidad	Dimensión	Métrica / Indicador	Tipo de dato	Instrumento	Momento de recolección
Calidad en uso	Efectividad	% de prácticas completadas (%PC); cumplimiento de objetivos	Cuantitativo	Encuesta + evaluación de resultados	Después
Calidad en uso	Eficiencia	Tiempo de resolución; número de intentos (#IntRep)	Cuantitativo	Logs / encuesta	Durante / después
Calidad en uso	Satisfacción	Nivel de satisfacción (Likert 1–5); recomendación	Cuantitativo	Encuesta	Después
Calidad en uso	Libertad de riesgo	% de estudiantes con problemas (%ERP); incidentes críticos	Cuantitativo + cualitativo	Encuesta + registro de incidencias	Durante / después
Calidad en uso	Cobertura del contexto	% de acceso por dispositivo (%EEX); entorno y conectividad (%ECP)	Cuantitativo	Encuesta	Durante
Calidad pedagógica	Potencial de aprendizaje	% de estudiantes que comprenden la interfaz e instrucciones (%EVI, %ECI)	Cuantitativo	Encuesta	Durante / después
Calidad pedagógica	Motivación / Engagement	Nivel de motivación (Likert); % de estudiantes motivados (%EM)	Cuantitativo	Encuesta	Durante / después
Calidad pedagógica	Fidelidad al entorno real	% de percepción de semejanza (%EER); ventajas/desventajas	Cuantitativo + cualitativo	Encuesta	Después

Calidad pedagógica	Apoyo pedagógico percibido	% de estudiantes que reportan mejora conceptual (%CCC); necesidad de recursos (%ESRE)	Cuantitativo o + cualitativo	Encuesta	Después
--------------------	----------------------------	---	------------------------------	----------	---------

3.2 Resultados y análisis

Los resultados obtenidos permiten analizar el comportamiento del laboratorio remoto desde las dimensiones definidas en el modelo, integrando evidencia objetiva y percepción de los usuarios.

Calidad de uso:

En relación con la capa de calidad en uso, se observa un desempeño positivo del sistema, destacándose niveles elevados de efectividad y satisfacción. La mayoría de los estudiantes logró completar las prácticas y manifestó una valoración favorable de la experiencia, lo que sugiere una adecuada usabilidad del entorno.

En términos de eficiencia, se identificó una relación entre el tiempo de resolución y la cantidad de intentos necesarios para completar la práctica. Como se observa en la Figura 2, se observa una relación entre mayor tiempo y mayor cantidad de intentos: quienes resolvieron entre 8 y 10 minutos requirieron principalmente 2 o 3 intentos, mientras que quienes tardaron menos de 5 minutos lo hicieron en un solo intento. Como desvíos, se registró un caso de resolución lenta con un único intento y los casos de “Me faltó tiempo”, que también se asociaron a un solo intento, sugiriendo influencia del límite temporal.

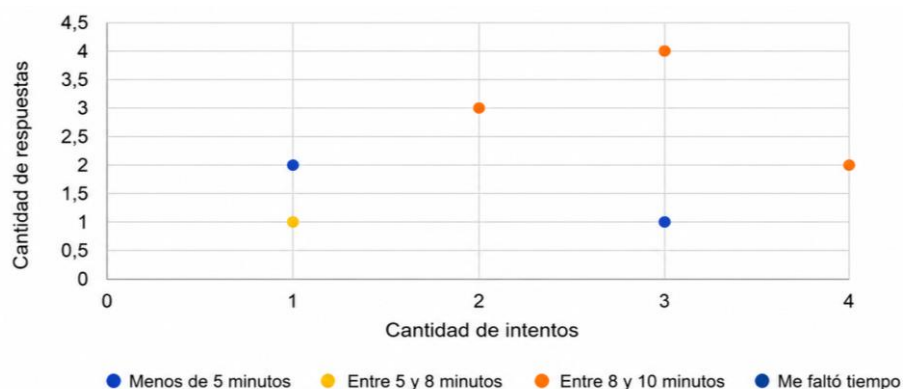


Fig. 2. Relación entre número de intentos y tiempo de resolución como indicador de eficiencia en el laboratorio remoto

No obstante, se detectaron dificultades técnicas en un porcentaje significativo de los casos, asociadas a problemas de funcionamiento y estabilidad. Estas situaciones impactan en la dimensión de libertad de riesgo y evidencian la necesidad de fortalecer

la calidad técnica del sistema, reforzando la interdependencia entre las distintas capas del modelo.

Calidad pedagógica:

Desde la perspectiva de la calidad pedagógica, los resultados evidencian un alto potencial de aprendizaje y niveles positivos de motivación, lo que refuerza el valor del laboratorio remoto como herramienta educativa.

Como se muestra en la Figura 3, la mayoría de los estudiantes reportó niveles medios a altos de motivación y satisfacción durante la experiencia, lo que indica un grado significativo de compromiso con la actividad.

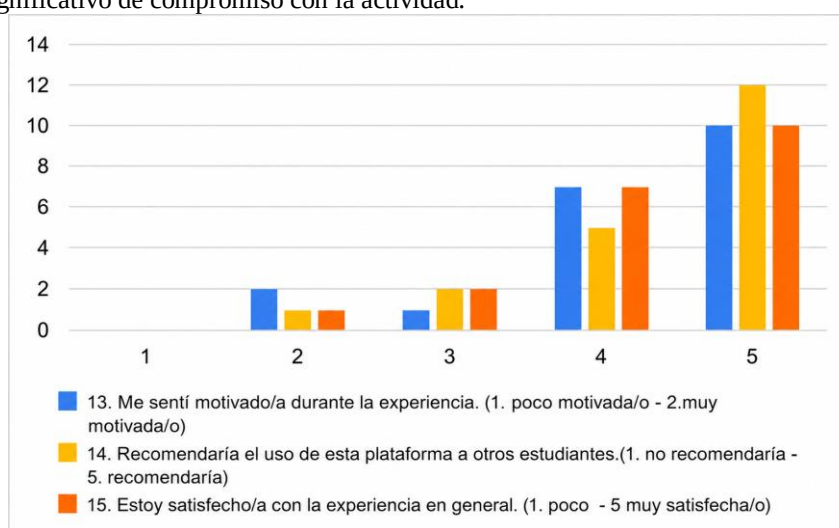


Fig. 3 Distribución de respuestas en dimensiones de motivación, satisfacción y recomendación

Asimismo, se identificó la necesidad de incorporar recursos de apoyo adicionales, tales como tutoriales o guías interactivas, con el fin de mejorar la percepción de acompañamiento pedagógico y facilitar la comprensión de las actividades.

En cuanto a la fidelidad al entorno real, las percepciones de los estudiantes resultaron heterogéneas. Si bien el entorno remoto ofrece ventajas en términos de accesibilidad y flexibilidad, persisten diferencias respecto a la experiencia presencial que deben ser consideradas en el diseño del sistema.

3.3 Instrumentos y recolección de datos:

La recolección de datos se realizó mediante un enfoque mixto, combinando instrumentos cuantitativos y cualitativos. En particular, se diseñó un cuestionario estructurado que permitió relevar la percepción de los estudiantes respecto de las distintas dimensiones de calidad, utilizando escalas tipo Likert y preguntas abiertas.

Este instrumento fue complementado con el análisis de variables objetivas, tales como el tiempo de resolución de las prácticas y la cantidad de intentos requeridos.

Asimismo, se definió una matriz de trazabilidad que vincula de manera explícita cada dimensión de calidad con las métricas e ítems del instrumento, garantizando la coherencia entre los objetivos de evaluación y los datos recolectados. Este enfoque permite integrar evidencia subjetiva (percepción de los usuarios) con datos objetivos derivados del uso del sistema. La definición detallada de las métricas y la construcción del instrumento, incluyendo la matriz de trazabilidad completa, se presenta en un trabajo previo, donde se analiza en profundidad la experiencia de uso en este laboratorio remoto (Gasull, 2025)

3.4 Síntesis de los resultados

Estos resultados evidencian la capacidad del modelo para operacionalizar las dimensiones de calidad en un entorno real

Los resultados obtenidos evidencian un desempeño globalmente positivo del laboratorio remoto, tanto en términos de calidad en uso como de calidad pedagógica. En particular, se destacan niveles elevados de efectividad y satisfacción, junto con una relación consistente entre el tiempo de resolución y la cantidad de intentos, lo que permite caracterizar la eficiencia del sistema a partir de evidencia empírica.

No obstante, la presencia de dificultades técnicas en una proporción relevante de los casos pone de manifiesto la incidencia de la calidad técnica sobre la experiencia de uso, afectando especialmente la dimensión de libertad de riesgo.

Desde la perspectiva pedagógica, se observa un alto potencial de aprendizaje y niveles positivos de motivación, aunque se identifican oportunidades de mejora vinculadas a la incorporación de recursos de apoyo y al fortalecimiento de la fidelidad percibida respecto al entorno presencial.

En conjunto, estos resultados refuerzan la interdependencia entre las capas de calidad definidas en el modelo, evidenciando que la experiencia de aprendizaje en entornos de laboratorio remoto emerge de la articulación entre aspectos técnicos, de uso y pedagógicos.

Conclusiones

En este trabajo se presentó un modelo transversal para la evaluación y aseguramiento de la calidad en laboratorios remotos, concebidos como sistemas ciberfísicos educativos. A diferencia de los enfoques tradicionales centrados en dimensiones aisladas, la propuesta integra perspectivas técnicas, ciberfísicas, de uso y pedagógicas en un marco unificado para abordar la complejidad de estos entornos.

El modelo se estructura en tres niveles complementarios —estructural, transversal y de integración— que permiten identificar subsistemas, articular métricas, fuentes de datos y procesos de evaluación continua, y analizar la relación entre desempeño técnico, experiencia de usuario y resultados de aprendizaje.

La aplicación del modelo en un laboratorio remoto de cinemática permitió una validación inicial, especialmente en las dimensiones de calidad en uso y calidad pedagógica. Los resultados evidencian que el uso de métricas e instrumentos

específicos posibilita evaluar de manera sistemática la interacción de los estudiantes con el sistema y su impacto en el aprendizaje.

Entre los principales hallazgos se destaca la interdependencia entre las capas de calidad: la calidad en uso —expresada mediante efectividad, eficiencia y satisfacción— influye directamente en la motivación y el potencial de aprendizaje, mientras que las limitaciones técnicas afectan tanto la experiencia de uso como la percepción del valor pedagógico del entorno.

Asimismo, el enfoque de trazabilidad entre dimensiones, métricas e instrumentos constituye un aporte para la implementación práctica del modelo, facilitando la recolección y el análisis de evidencia cuantitativa y cualitativa.

Como trabajo futuro, se propone avanzar en la definición de indicadores para las capas de calidad técnica y ciberfísica, y ampliar la validación empírica en distintos escenarios de laboratorio remoto para consolidar su aplicabilidad y contribuir al desarrollo de entornos educativos más robustos, accesibles y efectivos.

Referencias

- Ma, J., & Nickerson, J. V. (2006). Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review. *ACM Computing Surveys*, 38(3), 1–24. <https://doi.org/10.1145/1132960.1132961>
- Villalobos, Á., & Romero Alonso, R. (2023). Laboratorios remotos en educación superior: Una revisión bibliográfica sistematizada. *Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología*, (35). <https://doi.org/10.24215/18509959.35.e7>
- Feisel, L. D., & Rosa, A. J. (2005). The role of the laboratory in undergraduate engineering education. *Journal of Engineering Education*, 94(1), 121–130.
- ISO. (2018). ISO 9241-11: Ergonomics of human-system interaction — Part 11: Usability.
- ISO/IEC. (2016). ISO/IEC 25022: Systems and software quality requirements and evaluation (SQuaRE) — Measurement of quality in use.
- Laurillard, D. (2012). *Teaching as a design science*. Routledge.
- Lee, E. A. (2008). Cyber physical systems: Design challenges. *IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing*.
- García-Zubía, J., & Alves, G. R. (Eds.). (2011). *Using Remote Labs in Education: Two Little Case Studies: Split and Chile*. Universidad de Deusto.
- Ma, J., & Nickerson, J. V. (2006). Hands-on, simulated, and remote laboratories: A comparative literature review. *ACM Computing Surveys*, 38(3).
- Spector, J. M. (2014). *Conceptualizing the emerging field of smart learning environments*.
- Bass, L., Clements, P., & Kazman, R. (2012). *Software architecture in practice* (3rd ed.). Addison-Wesley.
- Gasull, V. (2025, 6–7 de noviembre). Análisis de usabilidad y su impacto en la formación de ingenieros: El caso del laboratorio remoto de cinemática [Presentación de ponencia]. XIII Congreso Nacional de Ingeniería Informática / Sistemas de Información (CoNaIISI), Córdoba, Argentina.