

# Diseño de Aplicaciones E-Learning Adaptativas: Superando Limitaciones Mediante Arquitecturas Modulares y Escalables

Alejandro Sartorio<sup>1,2[0000-0002-0735-1810]</sup>, Soledad Ayala<sup>1,2[0000-0002-9669-4531]</sup>, and Alejandro Hernandez<sup>2[0000-0002-2335-1407]</sup>

<sup>1</sup> Universidad Abierta Interamericana, Facultad de Tecnología Informática, Argentina

<sup>2</sup> Centro de Altos Estudios en Tecnología Informática, Argentina

{alejandro.sartorio, soledad.ayala, alejandro.hernandez}@uai.edu.ar

**Abstract.** Los Sistemas de Aprendizaje Adaptativo (SAA) constituyen un enfoque eficaz para la implementación de procesos de adaptación en plataformas e-learning, al facilitar la personalización del proceso educativo según las características, el desempeño y el contexto del estudiante. Sin embargo, numerosas implementaciones actuales presentan restricciones de diseño, tecnológicas y operativas que comprometen propiedades fundamentales de los SAA, tales como la personalización del contenido educativo, la evaluación adaptativa continua, la retroalimentación inmediata y contextualizada, la modularidad y escalabilidad técnica, la colaboración adaptativa mediante agrupamiento inteligente, y la gestión ética y segura de la información. Estas propiedades son caracterizadas conceptualmente en este trabajo con el propósito de sustentar el análisis de los desafíos tecnológicos involucrados.

El artículo desarrolla una caracterización representativa de estas restricciones, con el fin de visibilizar problemáticas recurrentes en el diseño e implementación de entornos adaptativos. A partir de este diagnóstico, se definen requerimientos tecnológicos clave y se propone una solución arquitectónica basada en principios de modularidad, separación de responsabilidades y diseño orientado a eventos. La propuesta se materializa en una infraestructura distribuida sustentada en una arquitectura de microservicios, que permite la incorporación de componentes especializados para funcionalidades adaptativas. Esta aproximación constituye una alternativa técnica y de diseño adecuada para el desarrollo y evolución de entornos e-learning personalizados del estilo SAA.

**Keywords:** Sistemas de Aprendizaje Adaptativo, Microservicios, Arquitectura de Software, E-learning, Personalización Educativa

**Design of Adaptive E-Learning Applications:  
Overcoming Limitations Through  
Modular and Scalable Architectures**

**Abstract.** Adaptive Learning Systems (ALS) represent an effective approach for implementing adaptation processes in e-learning platforms, enabling the personalization of the educational experience based on the learner's characteristics, performance, and context. However, many current implementations face design, technological, and operational constraints that compromise key ALS properties, such as personalized content delivery, continuous adaptive assessment, immediate and contextualized feedback, technical modularity and scalability, adaptive collaboration through intelligent grouping, and ethical and secure information management. These properties are conceptually characterized in this work to support the analysis of the underlying technological challenges. This article presents a representative diagnosis of these constraints, aiming to highlight recurrent challenges in the design and implementation of adaptive environments. Based on this diagnosis, key technological requirements are defined, and an architectural solution is proposed, grounded in principles of modularity, separation of concerns, and event-driven design. The proposal materializes in a distributed infrastructure supported by a microservices-based architecture that enables the integration of specialized components for adaptive functionalities. This approach provides a suitable technical and design alternative for the development and evolution of personalized e-learning environments in the ALS paradigm.

**Keywords:** Adaptive Learning Systems, Microservices, Software Architecture, E-learning, Educational Personalization

## 1 Introducción

La educación en línea, impulsada por tecnologías digitales, ha evolucionado significativamente en las últimas décadas. No obstante, los entornos tradicionales de aprendizaje virtual, basados principalmente en sistemas monolíticos, enfrentan limitaciones sustanciales en términos de personalización, adaptabilidad, escalabilidad y eficiencia pedagógica. En este contexto, los Sistemas de Aprendizaje Adaptativo (Learning Adaptive Systems, LAS) [1] proponen una solución centrada en el estudiante, ajustando contenidos, evaluaciones y trayectorias formativas en función de sus características individuales, tales como estilos cognitivos, conocimientos previos y ritmo de aprendizaje.

Sin embargo, la implementación de las propiedades del LAS en plataformas e-learning enfrenta desafíos técnicos, metodológicos y de diseño. Entre las propiedades del LAS que se buscan abordar destacan la falta de **personalización** del contenido educativo, ejemplificada por plataformas que presentan el mismo material a todos los estudiantes sin considerar diferencias individuales [2]; la dificultad para diseñar **evaluaciones adaptativas**, como en los sistemas que aplican pruebas homogéneas sin ajuste según el rendimiento [3]; la escasa **integración modular**, que dificulta la incorporación de nuevas funcionalidades pedagógicas [4]; y los problemas de **escalabilidad**, que se manifiestan en fallos o lentitud del sistema durante picos de uso [3]. Asimismo, se observa una ausencia de **retroalimentación** inmediata, especialmente en cursos que no ofrecen

corrección automatizada en tiempo real [5]; una gestión deficiente del **aprendizaje grupal** adaptativo, donde los grupos se conforman de manera aleatoria sin criterios pedagógicos; riesgos asociados a la privacidad de datos personales, sin mecanismos robustos de **anonimización o control de acceso** [6]; y la **latencia en la entrega de contenidos adaptados**, afectando la experiencia formativa [7].

## **2 Caracterización de las debilidades en Sistemas de Aprendizaje Adaptativo**

Las limitaciones observadas en los Sistemas de Aprendizaje Adaptativo pueden comprenderse desde una perspectiva más abstracta, identificando un conjunto de dimensiones críticas que subyacen a los problemas técnicos previamente descritos. Estas debilidades se relacionan, en primer lugar, con la adaptabilidad cognitiva del sistema, es decir, su capacidad para ajustar contenidos y estrategias pedagógicas según el perfil individual del estudiante. En segundo lugar, aparece la limitación en la adaptación evaluativa, que refleja la dificultad para generar procesos de evaluación dinámicos y retroalimentación inmediata. Asimismo, las necesidades de una arquitectura modular y flexible impide la integración fluida de nuevas funcionalidades, afectando la evolución del sistema [3]. A esto se suma la escasa escalabilidad, que compromete el rendimiento ante cargas intensivas de usuarios o datos. Otra dimensión crítica es la temporalidad pedagógica, asociada a la latencia en la entrega y disponibilidad de contenido personalizado y la imposibilidad de sostener una interacción fluida en tiempo real [7]. Igualmente, se observa una débil capacidad para gestionar entornos colaborativos adaptativos, lo que limita la implementación de dinámicas grupales adaptativas-inteligentes. Finalmente, la gestión de datos sensibles plantea desafíos éticos y técnicos, al carecerse de mecanismos robustos de seguridad, anonimización y cumplimiento normativo [6]. Esta caracterización permite establecer una base conceptual para la derivación sistemática de requerimientos tecnológicos orientados a superar las deficiencias actuales en las plataformas e-learning.

## **3 Requerimientos Tecnológicos para Sistemas de Aprendizaje Adaptativo**

Para superar las limitaciones estructurales y funcionales identificadas en los Sistemas de Aprendizaje Adaptativo, es necesario establecer un conjunto de capacidades tecnológicas fundamentales que permitan avanzar hacia entornos e-learning con estándares aceptados personalizados, escalables y éticamente responsables. Estas capacidades se expresan como requerimientos tecnológicos de alto nivel, los cuales se caracterizan en dos niveles complementarios: en primer lugar, se presenta una descripción funcional y conceptual que enmarca la necesidad desde una perspectiva pedagógica y adaptativa; en segundo lugar, se detallan aspectos técnicos y operativos que deben considerarse en la propuesta de solución, orientados a su implementación mediante componentes técnicos específicos.

- **REQ\_01 - Representación y actualización dinámica del perfil del estudiante:** Se necesita un mecanismo que permita construir y mantener representaciones actualizadas y granulares de cada estudiante, integrando información sobre sus estilos cognitivos, historial de aprendizaje, desempeño y contexto de uso, de forma continua y en tiempo real [2, 3].

Componente técnica: **UserProfileService.** Este componente procesa eventos asincrónicos de interacción del estudiante y los consolida en un perfil cognitivo actualizado en tiempo real. Utiliza un modelo de datos flexible en JSON o GraphQL, y expone una API REST para que otros componentes puedan consultar o modificar atributos del perfil. Genera eventos cuando se detectan cambios relevantes que puedan afectar otros módulos del sistema adaptativo.

- **REQ\_02 - Generación y ajuste dinámico de contenidos evaluativos:** El entorno debe ser capaz de generar instrumentos de evaluación que se adapten automáticamente al nivel de competencia y progreso de cada estudiante, ajustando la dificultad, el formato y el feedback en función de interacciones previas y objetivos de aprendizaje [3, 8].

Componente técnica: **AdaptiveAssessmentService.** Implementa modelos de machine learning que, en base al historial de aprendizaje y perfil del estudiante, seleccionan preguntas, ajustan dificultad y definen estrategias de retroalimentación. Este componente puede generar bancos de ítems personalizados y es capaz de interactuar con servicios de presentación para mostrar evaluaciones en distintos formatos.

- **REQ\_03 - Estructura modular e interoperable de los componentes funcionales:** La plataforma debe diseñarse como un conjunto de componentes independientes y reutilizables, que puedan ser desarrollados, desplegados, mantenidos y actualizados sin dependencia directa del resto del sistema, facilitando así la incorporación de nuevas funcionalidades adaptativas [4, 3].

Componente técnica: **IntegrationMiddlewareService.** Este componente gestiona las interacciones entre los módulos independientes del sistema mediante APIs REST, protocolos RPC y comunicación basada en eventos asincrónicos. Soporta la interoperabilidad entre servicios a través de la definición de contratos estandarizados con OpenAPI, lo que permite una integración fluida y su descubrimiento automatizado. Además, incorpora capacidades de transformación de mensajes y una infraestructura de bus de eventos que facilita la comunicación desacoplada en tiempo real, así como el registro y monitoreo distribuidos para garantizar transparencia operativa y detección de fallos.

- **REQ\_04 - Capacidad de escalado selectivo según demanda funcional:** Es imprescindible que el sistema pueda incrementar su capacidad operativa para funciones críticas (como entrega de contenidos, análisis del progreso o procesamiento evaluativo) en respuesta a picos de uso o expansión geográfica, sin comprometer la estabilidad general [7, 3].

Componente técnica: **Orchestration.** Cada módulo funcional se despliega en contenedores Docker orquestados con Kubernetes, con reglas de escalado

horizontal automático basadas en métricas (uso de CPU, latencia, número de peticiones). Esta estrategia garantiza la disponibilidad ante variaciones en la carga del sistema.

- **REQ\_05 - Procesamiento en tiempo real de eventos pedagógicos:** El sistema debe gestionar eventos e interacciones de forma sincrónica y en baja latencia, garantizando respuestas inmediatas en momentos clave del proceso formativo, como la retroalimentación tras una evaluación o la actualización del itinerario de aprendizaje [5, 7].

Componente técnica: **FeedbackEngine.** Este módulo escucha y procesa eventos pedagógicos a través de un bus de eventos (por ejemplo, Kafka o RabbitMQ), y genera respuestas inmediatas, ya sea retroalimentación textual automática basada en NLP, activación de cambios en la secuencia de contenidos o alerta al tutor humano.

- **REQ\_06 - Agrupamiento inteligente y dinámico de usuarios:** Debe existir una capacidad para formar grupos de aprendizaje colaborativo a partir de criterios significativos, como intereses comunes, complementariedad de habilidades o sincronización en objetivos de aprendizaje, con soporte para reorganización dinámica según evolución grupal [3].

Componente técnica: **GroupFormationService.** Utiliza algoritmos de clustering sobre vectores de características extraídos del perfil del estudiante para formar grupos óptimos. Soporta actualización dinámica y reevaluación periódica de la agrupación basada en cambios de desempeño y comportamiento.

- **REQ\_07 - Gestión segura, ética y transparente de los datos personales:** La plataforma debe asegurar el tratamiento adecuado de los datos educativos y personales, mediante mecanismos de segregación lógica, cifrado en tránsito y reposo, control de acceso granular, trazabilidad de operaciones y cumplimiento con normativas de protección de datos [6, 3].

Componente técnica: **SecurityGateway.** Aplica políticas de autenticación y autorización (OAuth2, JWT), encripta datos sensibles (TLS, AES-256), gestiona trazas de auditoría y asegura el cumplimiento normativo (por ejemplo, General Data Protection Regulation (GDPR)). Controla y monitorea todos los accesos a módulos y recursos de datos.

- **REQ\_08 - Soporte técnico transversal para módulos funcionales:** Todos los componentes del sistema comparten una infraestructura común que garantiza la eficiencia operativa, resiliencia y mantenibilidad del sistema.

Componente técnica:

- **Almacenamiento:** MongoDB y PostgreSQL según el tipo de datos.
- **Caché:** Redis para datos de acceso frecuente y baja latencia.
- **API Gateway:** Kong o Zuul para control de acceso y enrutamiento.
- **Observabilidad:** Prometheus + Grafana para monitoreo, ELK para análisis de logs.
- **Trazabilidad:** Jaeger o Zipkin para seguimiento de transacciones distribuidas.
- **Contenerización:** Docker y Kubernetes con CI/CD para gestión de despliegues.

## 4 Estado del arte

La adaptación es un componente fundamental en los Sistemas de Aprendizaje Adaptativo (SAA), cuyo objetivo es personalizar la experiencia educativa para atender las necesidades individuales de los estudiantes. Esta personalización se logra ajustando diversos elementos del proceso de enseñanza-aprendizaje en función de las características del estudiante, su comportamiento dentro del entorno virtual y su progreso. A partir del análisis de literatura científica reciente, es posible identificar diferentes enfoques de adaptación que pueden agruparse en tres dimensiones clave: características del estudiante, comportamiento y progreso, y elementos del sistema adaptado.

### 4.1 Adaptación basada en las características del estudiante

Uno de los enfoques más difundidos se centra en la adaptación según los estilos de aprendizaje, mediante la personalización del contenido y su forma de presentación. Diversos sistemas emplean lógica difusa e inteligencia artificial para identificar automáticamente estilos de aprendizaje y ajustar la interfaz y las actividades ofrecidas [2, 9]. También se observa la utilización del conocimiento previo del estudiante como parámetro para seleccionar materiales adecuados al nivel inicial, lo que permite evitar tanto la repetición como la sobrecarga cognitiva [10, 4].

Algunos modelos incorporan además la capacidad cognitiva, como la memoria de trabajo, para ajustar la secuencia y la complejidad de los contenidos [11]. Otros autores proponen considerar variables individuales y sociales —como género, capital cultural y actitudes— como dimensiones útiles para mejorar la precisión adaptativa [12]. Asimismo, se identifican sistemas que adaptan la retroalimentación o los itinerarios de aprendizaje según las metas personales del estudiante (por ejemplo, motivación intrínseca versus extrínseca) [13, 14]. Este principio se extiende también al diseño de tareas, donde se ajusta la dificultad en función de la autoeficacia percibida para garantizar experiencias de éxito [15]. Finalmente, algunos estudios recientes exploran el uso de sensores fisiológicos para detectar estados afectivos y emocionales, proponiendo así mecanismos adaptativos basados en el estado cognitivo del estudiante en tiempo real [16].

### 4.2 Adaptación basada en el comportamiento y progreso del estudiante

Otra dimensión clave corresponde a la adaptación continua a partir del rendimiento y la comprensión demostrada por el estudiante. Sistemas adaptativos registran errores, tiempos de respuesta y desempeño en evaluaciones para modificar dinámicamente el contenido o sugerir actividades remediales [7]. Además, las interacciones del estudiante con la plataforma —como rutas de navegación o recursos consultados— también son utilizadas para inferir patrones de preferencia y dificultad [17].

La retroalimentación inmediata es un mecanismo ampliamente reconocido en este contexto. Ofrecer comentarios específicos y temporales favorece la autorregulación y fortalece la conexión con el contenido [5, 18]. Algunos sistemas incluso integran motores de recomendación para proponer materiales, actividades o rutas según el comportamiento del estudiante y el historial de usuarios con perfiles similares.

#### 4.3 Aspectos del sistema adaptados

Los elementos que suelen adaptarse en los SAA incluyen el contenido, la navegación, las actividades, la evaluación y la interfaz. En el caso del contenido, se adapta tanto el nivel de detalle como el formato de presentación, incluyendo textos, simulaciones o videos [19]. La navegación personalizada permite destacar recursos relevantes y guiar al estudiante en trayectorias individualizadas, mientras que la dificultad y la naturaleza de las tareas se ajustan en función de la competencia observada. La evaluación adaptativa, aunque menos común, busca modificar la secuencia de preguntas o el tipo de instrumentos evaluativos en respuesta al progreso del estudiante. La interfaz y las herramientas, por su parte, pueden adaptarse para mejorar la accesibilidad, especialmente en usuarios con necesidades especiales [20].

### 5 Solución Basada en Microservicios

La implementación de los requerimientos tecnológicos identificados en la sección 3 exige una arquitectura que priorice la escalabilidad, modularidad, interoperabilidad y capacidad de adaptación en tiempo real. En este contexto, la adopción de una arquitectura basada en microservicios representa una solución efectiva y coherente para abordar las problemáticas propias de los Sistemas de Aprendizaje Adaptativo (SAA) [3, 7].

La arquitectura de microservicios consiste en la descomposición del sistema en múltiples servicios autónomos, cada uno responsable de una funcionalidad específica y comunicados entre sí mediante interfaces estandarizadas, típicamente API REST o mensajería asíncrona. Esta aproximación permite una evolución tecnológica ágil, despliegue independiente de componentes, integración de modelos de inteligencia artificial distribuidos y respuesta eficiente ante escenarios de alta concurrencia [4, 3]. Además, la modularidad inherente facilita la integración de sistemas heterogéneos y la modernización de aplicaciones legadas, aspectos cruciales en entornos educativos en constante evolución [29].

Teniendo en cuenta las propiedades generales de los microservicios, los antecedentes de aplicación en sistemas similares a las SAA [3, 7, 2] y los requerimientos elegidos en este trabajo, se propone un diseño de componentes para la definición de una propuesta de arquitectura, partiendo de una división de propiedades funcionales relacionadas con los requerimientos.

- **Modularidad e interoperabilidad (REQ\_03):** Cada funcionalidad adaptativa —como el perfil cognitivo, la evaluación dinámica o el agrupamiento

colaborativo— puede encapsularse como un microservicio, asegurando desacoplamiento, mantenimiento aislado y evolución independiente [4, 3]. Esta modularidad también permite la integración de herramientas educativas diversas, facilitando la creación de entornos de aprendizaje más ricos y personalizados [29].

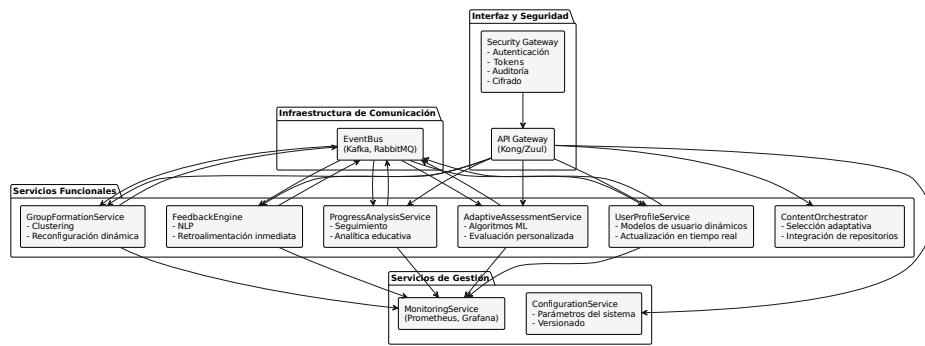
- **Escalabilidad selectiva (REQ\_04):** Los microservicios críticos (por ejemplo, el motor de retroalimentación o el servicio de análisis del progreso) pueden escalarse horizontalmente en función de su carga específica, optimizando el uso de recursos y garantizando estabilidad bajo picos de demanda [7]. La capacidad de escalar servicios individuales sin afectar al sistema completo es especialmente beneficiosa en plataformas de aprendizaje en línea con grandes volúmenes de usuarios concurrentes [29].
- **Actualización dinámica de perfiles y eventos (REQ\_01, REQ\_05):** El uso de colas de mensajes, como Kafka o RabbitMQ, permite manejar eventos pedagógicos asincrónicos, actualizando modelos de usuario en tiempo real sin bloquear procesos principales. Este enfoque soporta flujos de trabajo sensibles al tiempo, como la retroalimentación inmediata y la personalización continua del itinerario de aprendizaje [5, 3]. La capacidad de adaptación en tiempo real es esencial para mantener la relevancia y eficacia de los contenidos educativos [29].
- **Generación adaptativa de evaluaciones (REQ\_02):** Microservicios especializados pueden orquestar algoritmos de *machine learning* entrenados para ajustar contenidos evaluativos en función del rendimiento y trayectoria del estudiante, permitiendo una evaluación personalizada y formativa [8, 3]. La integración de inteligencia artificial en microservicios facilita la automatización de procesos adaptativos complejos, mejorando la experiencia de aprendizaje [29].
- **Agrupamiento inteligente (REQ\_06):** Un microservicio dedicado al análisis colaborativo puede aplicar técnicas de *clustering* y segmentación para formar grupos con base en métricas sociocognitivas, permitiendo su reconfiguración dinámica conforme evolucionan las necesidades de los estudiantes [3]. Este enfoque promueve la colaboración efectiva y el aprendizaje entre pares, elementos clave en entornos educativos modernos [29].
- **Gestión segura de datos (REQ\_07):** La arquitectura puede incorporar *gateways* de autenticación y servicios de seguridad con segregación de funciones, auditoría de acceso y mecanismos de cifrado distribuidos que aseguren la protección de los datos personales conforme a regulaciones como el GDPR, garantizando un tratamiento ético y transparente de la información educativa [6]. La seguridad de los datos es fundamental en plataformas educativas para mantener la confianza de los usuarios y cumplir con las normativas legales [29].

De este modo, la arquitectura de microservicios no solo habilita el cumplimiento técnico de los requerimientos, sino que también provee una infraestructura escalable, resiliente y evolutiva que potencia la implementación real de las propiedades del aprendizaje adaptativo en entornos *e-learning* [7, 3, 26]. La

combinación de microservicios con tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, abre nuevas posibilidades para la personalización y eficacia de los sistemas educativos [29].

### 5.1 Arquitectura de la Solución

La arquitectura propuesta se basa en un esquema distribuido compuesto por componentes técnicos funcionales, organizados en dominios lógicos que corresponden a las capacidades adaptativas del sistema [3, 4]. Cada uno de estos componentes es autónomo, responsable de una unidad funcional específica, y se implementa de forma independiente. La comunicación entre componentes se realiza mediante mecanismos asíncronos o llamadas RESTful, siguiendo principios de diseño orientado a eventos y desacoplamiento funcional [7].



**Fig. 1.** Arquitectura propuesta basada en componentes funcionales adaptativos para sistemas e-learning

Los componentes principales de la arquitectura son los siguientes:

- **UserProfileManager:** Gestiona la construcción y actualización continua del modelo de usuario. Este modelo es dinámico, multivariado y se actualiza en tiempo real a partir de eventos capturados por el sistema. Integra dimensiones cognitivas, afectivas y contextuales, permitiendo una representación granular y evolutiva del estudiante [2, 30].
- **AdaptiveAssessmentEngine:** Orquesta la generación personalizada de evaluaciones mediante algoritmos de *machine learning*. Utiliza el perfil del estudiante y su historial de desempeño para ajustar dinámicamente la dificultad, el formato y la retroalimentación de las actividades evaluativas [8, 20].
- **ContentOrchestrator:** Selecciona, adapta y secuencia contenidos pedagógicos desde repositorios heterogéneos mediante integración basada en estándares (por ejemplo, SCORM, LTI). Considera el perfil del estudiante y los objetivos pedagógicos para entregar materiales multiformato (texto, video, simulación) [27, 28].

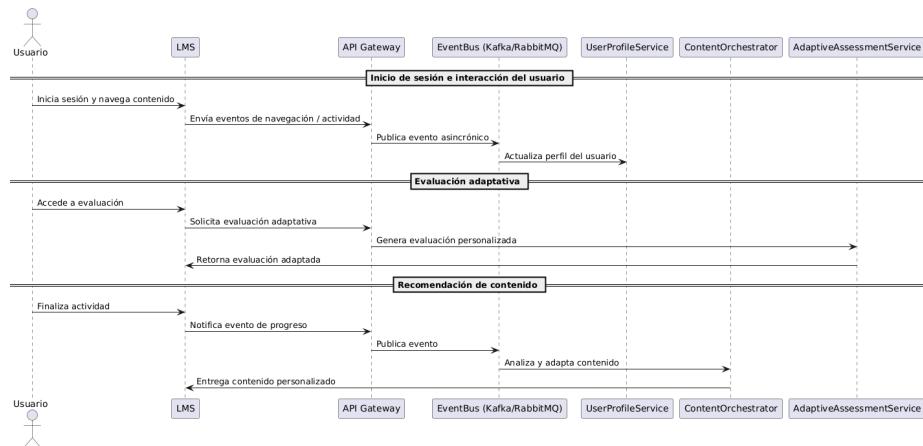
- **FeedbackEngine:** Genera retroalimentación automática inmediata en respuesta a las interacciones del estudiante. Utiliza procesamiento de lenguaje natural (NLP), reglas pedagógicas y contexto de uso. Está optimizado para responder en flujos sensibles al tiempo, reforzando la autorregulación y el aprendizaje autónomo [5, 18].
- **GroupFormationEngine:** Aplica algoritmos de *clustering* y análisis de similitud para conformar y reconfigurar grupos colaborativos dinámicos, basados en métricas sociocognitivas, intereses y trayectorias de aprendizaje. La formación de grupos es automatizada, adaptativa y sensible a la evolución de los perfiles [3].
- **ProgressAnalyzer:** Evalúa en tiempo real el progreso del estudiante a partir del análisis longitudinal de interacciones, resultados y comportamiento de navegación. Su salida alimenta a otros componentes para la reconfiguración del itinerario formativo.
- **EventBus:** Canal de mensajería asíncrona que permite el desacoplamiento temporal entre componentes. Implementado sobre colas de mensajes como Kafka o RabbitMQ, soporta eventos pedagógicos críticos como actualizaciones de perfil, entregas de tareas o generación de evaluaciones [7].
- **SecurityGateway:** Centraliza la gestión de autenticación y autorización. Implementa validación de identidades, administración de tokens, segregación de funciones, auditoría de acceso y mecanismos de cifrado distribuido. Asegura el cumplimiento de normativas como el GDPR y promueve la transparencia en el tratamiento de datos [6].
- **ConfigurationManager:** Administra de forma centralizada las configuraciones del sistema, incluyendo políticas de adaptación, versiones de servicios y parámetros pedagógicos activos. Permite realizar ajustes dinámicos sin reiniciar el entorno.
- **MonitoringAgent:** Instrumenta los componentes para exponer métricas operativas y pedagógicas. Se integra con herramientas como Prometheus y Grafana para habilitar trazabilidad, detección temprana de fallos y evaluación continua del desempeño del sistema.
- **InteractionLogger:** Captura y almacena eventos relevantes generados por las acciones del estudiante en el sistema. Facilita auditorías, análisis de comportamiento y generación de informes educativos personalizados.
- **DataRepository:** Encargado del almacenamiento estructurado y seguro de datos académicos, conductuales y de contexto. Incluye soporte para persistencia histórica y recuperación eficiente.
- **CacheManager:** Acelera el acceso a información crítica, como configuraciones activas o consultas frecuentes al perfil del estudiante, reduciendo la latencia general del sistema.
- **APIGateway:** Punto de entrada unificado al sistema. Gestiona el enrutamiento de solicitudes, la autenticación, el control de acceso y la aplicación de políticas de seguridad. Abstacta la complejidad de los componentes internos frente a consumidores externos.

Esta arquitectura modular y distribuida permite el mantenimiento aislado de componentes, la escalabilidad según demanda funcional específica y la evolución

ágil de funcionalidades pedagógicas adaptativas. Además, habilita la automatización de procesos adaptativos, la integración de herramientas educativas heterogéneas, la reconfiguración dinámica de grupos, y el monitoreo integral del ecosistema. Todo esto enmarcado en una infraestructura resiliente y conforme a estándares de seguridad y normativas vigentes.

## 5.2 Integración con Plataformas de Gestión del Aprendizaje (LMS)

La arquitectura propuesta permite una integración eficiente con plataformas de gestión del aprendizaje (LMS) como Moodle, Sakai o Blackboard [34], particularmente aquellas de código abierto, mediante el uso de API REST y mecanismos de comunicación asíncrona basados en eventos. Estas plataformas suelen ofrecer interfaces de extensión a través de servicios web, complementos o sistemas de eventos internos, que permiten interceptar interacciones clave del estudiante, tales como la navegación por contenidos, la entrega de actividades o la solicitud de evaluaciones [32, 31].



**Fig. 2.** Secuencia de interacción entre una plataforma LMS y los componentes del sistema adaptativo

Esta capacidad se aprovecha configurando el componente de acceso centralizado (API Gateway) para redirigir estas interacciones hacia los servicios adaptativos correspondientes. Como se ilustra en la Figura 2, el ciclo comienza con la interacción del estudiante a través del LMS. Las acciones relevantes son capturadas y enviadas al API Gateway, que publica eventos pedagógicos en el bus de eventos (EventBus). Este mecanismo desencadena la actualización del perfil del estudiante mediante el *UserProfileService*, el cual mantiene una representación granular y dinámica de su progreso y estilo de aprendizaje.

Posteriormente, cuando el estudiante accede a una evaluación, el LMS solicita una prueba personalizada al *AdaptiveAssessmentService*, que genera un

instrumento adaptado con base en el perfil actualizado y lo devuelve al LMS. De manera análoga, tras la finalización de una actividad, los eventos de progreso publicados son procesados por el *ContentOrchestrator*, que selecciona nuevos contenidos adaptados al contexto del estudiante, integrándolos nuevamente en la interfaz del LMS. Así, la plataforma actúa como una capa de presentación, mientras que el procesamiento adaptativo y la lógica pedagógica se delegan en la arquitectura modular externa [33].

Esta estrategia de integración no solo conserva la experiencia del usuario y la estabilidad de la plataforma base, sino que también promueve la interoperabilidad con múltiples entornos educativos. Gracias a la modularidad de los LMS (Moodle, Sakai, etc.), es posible incorporar esta infraestructura de forma incremental, facilitando una evolución gradual hacia modelos más adaptativos sin reemplazar las soluciones existentes. El uso de estándares abiertos y eventos distribuidos garantiza, además, la flexibilidad necesaria para implementar nuevas funcionalidades con bajo impacto en los sistemas actuales [32].

## 6 Conclusiones

Este trabajo abordó los desafíos técnicos y conceptuales presentes en el diseño de Sistemas de Aprendizaje Adaptativo (SAA), sugiriendo una arquitectura distribuida basada en principios de modularidad, separación de responsabilidades y diseño orientado a eventos. A partir de una caracterización funcional de propiedades esenciales de los SAA, se definieron requerimientos tecnológicos representativos y se describieron componentes técnicos asociados, permitiendo vincular los objetivos pedagógicos con decisiones de arquitectura.

La propuesta se apoya en una infraestructura distribuida compuesta por componentes especializados —como el motor de evaluación adaptativa, el gestor de perfiles estudiantiles y el orquestador de contenidos— que interactúan mediante APIs, colas de mensajes y contratos estandarizados. Además, se indicó un camino viable para la integración con plataformas LMS existentes, mostrando cómo esta arquitectura puede extender su funcionalidad sin alterar las plataformas subyacentes.

Este enfoque representa un aporte concreto a la construcción de marco estratégico para la integración y extensión de SAA mediante arquitecturas basadas en microservicios, promoviendo soluciones más flexibles, escalables y alineadas con las demandas actuales de personalización en entornos educativos digitales.

## References

1. Barbosa, P. L. S., Carmo, R. A. F. D., Gomes, J. P., & Viana, W. (2024). Adaptive learning in computer science education: A scoping review. *Education and Information Technologies*, 29(8), 9139–9188. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12458-4>
2. El-Sabagh, H. A. (2021). Adaptive e-learning environment based on learning styles and its impact on development students' engagement. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s41239-021-00269-6>

3. Gligoreau, I., Cioca, M., Oancea, R., Gorski, A. T., Gorski, H., & Tudorache, P. (2023). Adaptive Learning Using Artificial Intelligence in e-Learning: A Literature Review. *Educ. Sci.*, 13(12), 1216. <https://doi.org/10.3390/eduesci13121216>
4. Bian, C., Dong, S., Li, C., Shi, Z., & Lu, W. (2017). Generation of adaptive learning path based on concept map and immune algorithm. *ICCSE 2017 - 12th International Conference on Computer Science and Education*, 409–414. <https://doi.org/10.1109/ICCSE.2017.8085526>
5. Alvarado, M. (2014). Retroalimentación en educación en línea: una estrategia para la construcción del conocimiento. *Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 17(2), 59–73.
6. Kovalchuk, V.I., Maslich, S.V., & Movchan, L.H. (2023). Digitalization of vocational education under crisis conditions. *Educational Technology Quarterly*, 2023(1), 1–17. <https://doi.org/10.55056/etq.49>
7. Contrino, M. F., Reyes-Millán, M., Vázquez-Villegas, P., & Membrillo-Hernández, J. (2024). Using an adaptive learning tool to improve student performance and satisfaction. *Interactive Learning Environments*, 32(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/10494820.2021.1880425>
8. Jiménez Galán, Y. I., & Hernández Jaime, J. (2023). Educación en línea y evaluación del aprendizaje. *RIIDE*, 12(23), e013. <https://doi.org/10.23913/ride.v12i23.1005>
9. Alshammari, M., Anane, R., & Hendley, R. (2015). An E-Learning Investigation into Learning Style Adaptivity. *2015 48th Hawaii International Conference on System Sciences*, 3648–3657. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2015.13>
10. Angelaccio, M., & Buttarazzi, B. (2011). EduSHARE®: A peer to peer document sharing system for obtaining adaptive learning procedures. *International Journal of Technology Enhanced Learning*, 3(5), 525–535. <https://doi.org/10.1504/IJTEL.2011.042103>
11. Lestari, W., Nurjanah, D., & Selviandro, N. (2017). Adaptive presentation based on learning style and working memory capacity. *CSEDU 2017*, 1, 363–370.
12. Kerr, P. (2016). Adaptive learning. *ELT Journal*, 70(1), 88–93. <https://doi.org/10.1093/elt/ccv055>
13. Winne, P. H., & Perry, N. E. (2018). Measuring self-regulated learning. In D. H. Schunk & J. A. Greene (Eds.), *Handbook of self-regulation of learning and performance* (2nd ed., pp. 167–187). Routledge.
14. Tai, J., Sadler, L., & D., U. (2017). Self-regulation in open-ended online assignment tasks. *Studies in Higher Education*, 43(11), 2006–2021. <https://doi.org/10.1080/03075079.2017.1284441>
15. Valle, A., Núñez, J. C., Cabanach, R. G., González-Pienda, J. A., Rodríguez, S., Rosário, P., & Cerezo, R. (2009). Academic goals and learning quality in higher education students. *The Spanish journal of psychology*, 12(1), 96–105.
16. Qianqian, L., et al. (2022). Research on Behavior Analysis of Real-Time Online Teaching. *IEEE Access*, 10, 81476–81491. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3195017>
17. Romero, C., Ventura, S., Zafra, A., & Bra, P. de. (2009). Applying Web usage mining for personalizing hyperlinks. *Computers Education*, 53(3), 828–840.
18. Gros Salvat, B., & Cano, E. (2021). Procesos de feedback con soporte tecnológico en educación superior. *RIED*, 24(2), 99–118. <https://doi.org/10.5944/ried.24.2.30377>
19. Pu, D., & Zhou, Z. (2021). Teaching Path generation model based on machine learning. *ICCIA*, 26–30. <https://doi.org/10.1109/ICCIA52203.2021.00013>
20. Barberá, E. (2006). Aportaciones de la tecnología a la e-evaluación. *Revista de Educación a Distancia*, M6, 1–13.

21. Bra, P. de, & Calvi, L. (1998). AHA!: An Open Adaptive Hypermedia Architecture. *Workshop on Adaptive Hypertext and Hypermedia*, 81–88.
22. Cristea, A. I., & De Mooij, A. (2003). My Online Teacher: Towards Adaptivity. *Adaptive Hypermedia*, 678–681.
23. Romero, C., Ventura, S., & García, E. (2008). Data mining in Moodle. *Computers Education*, 51(1), 368–384.
24. Sanchez-Santillan, M., Paule-Ruiz, M., Cerezo, R., & Alvarez-García, V. (2016). MeL: Modelo de adaptación dinámica. *Anales de Psicología*, 32(1), 106–114.
25. Cristea, A. I., Smits, D., & Bra, P. de. (2007). GRAPPLE: Authoring Adaptive Hypermedia. *Int. J. of Semantic Web and Info Systems*, 3(1), 68–95.
26. Fadieieva, L. O. (2023). Adaptive Learning in Higher Education: A Systematic Review. *Educational Technology Quarterly*, 2023(3), 319–366. <https://doi.org/10.55056/etq.613>
27. Álvarez, G., & Álvarez, G. (2012). Análisis de ambientes virtuales de aprendizaje. *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, 14(2), 73–86.
28. Moreira, C., & Delgadillo, B. (2014). La virtualidad en los procesos educativos. *Tecnología en Marcha*, 28(1), 121–129.
29. Fox, K., et al. (2021). Strategies for implementing digital learning infrastructure. *Every Learner Everywhere*. <https://www.everylearnereverywhere.org/resources/>
30. Díaz, F. S., Rubilar, T. P., Figueroa, C. C., & Silva, R. M. (2018). An Adaptive E-Learning Platform with VARK. *IEEE EDUNINE*. <https://doi.org/10.1109/EDUNINE.2018.8463232>
31. Ellis, R. (2009). *Learning Management Systems*. <https://home.csulb.edu/~arezaei/ETEC551/web/LMSfieldguide20091.pdf>
32. Solano-Gutiérrez, G. A. (2024). La Tecnología en la Educación a Distancia. *Revista Científica Zambos*, 3(2), 48–73. <https://doi.org/10.69484/rcz/v3/n2/17>
33. Hrastinski, S. (2008). Asynchronous and Synchronous E-Learning. *Educause Review*. <https://er.educause.edu/articles/2008/11/asynchronous-and-synchronous-elearning>
34. Rodriguez, M. A., Esteso, A., Alemany, M. M. E., & Boza, A. (2021). Analysis of digital teaching tools in the new educational paradigm. In *INTED2021 Proceedings* (pp. 9564–9570). IATED.