

MODELO DE COMPUTACIÓN DE BORDE APLICADO A LA EDUCACIÓN SUPERIOR EN LÍNEA

EDGE COMPUTING MODEL APPLIED TO ONLINE HIGHER EDUCATION

Eduardo Alvarado Unamuno ^{1*}

¹ Carrera Tecnologías de la Información, Facultad Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6145-7926>. Correo: eduardo.alvaradou@ug.edu.ec

Jenny Arizaga Gamboa ²

² Carrera Tecnologías de la Información, Facultad Ciencias Matemáticas y Físicas, Universidad de Guayaquil. Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2098-9077>. Correo: jenny.arizagag@ug.edu.ec

* Autor para correspondencia: eduardo.alvaradou@ug.edu.ec

Resumen

Este estudio presenta el diseño de un modelo de computación de borde enfocado en mejorar la experiencia de los estudiantes en la educación superior en línea en la Universidad de Guayaquil, particularmente en la Facultad de Ciencias Matemáticas. La investigación aborda problemas técnicos comunes en las plataformas educativas, como la latencia y la intermitencia en el acceso, que afectan negativamente el aprendizaje de los estudiantes. A través de una metodología mixta que incluye encuestas y entrevistas, se identificaron las principales dificultades técnicas en el uso de plataformas en línea. Los resultados indican que la implementación de la computación de borde con microservicios puede reducir significativamente la latencia y mejorar la accesibilidad de los recursos educativos, proporcionando una solución viable y efectiva. Finalmente, se sugiere la instalación de nodos de borde en puntos estratégicos del campus universitario para optimizar la infraestructura tecnológica y asegurar un acceso más confiable y continuo a los recursos educativos en línea.

Palabras clave: Computación de borde; latencia; plataformas en línea; microservicios

Abstract

This study presents the design of an edge computing model focused on improving the student experience in online higher education at the University of Guayaquil, particularly in the School of Mathematical Sciences. The research addresses common technical problems in educational platforms, such as latency and

intermittent access, which negatively affect student learning. Through a mixed methodology involving surveys and interviews, the main technical difficulties in the use of online platforms were identified. The results indicate that the implementation of edge computing with microservices can significantly reduce latency and improve the accessibility of educational resources, providing a viable and effective solution. Finally, the installation of edge nodes at strategic points of the university campus is suggested to optimize the technological infrastructure and ensure more reliable and continuous access to online educational resources.

Keywords: *Edge computing; latency; on-line platforms; microservices*

Fecha de recibido: 14/09/2024

Fecha de aceptado: 07/11/2024

Fecha de publicado: 12/11/2024

Introducción

La educación superior ha experimentado una transformación significativa en los últimos años, impulsada por la creciente integración de tecnologías de la información y la comunicación (TIC). Este cambio se ha visto acelerado por eventos recientes, como la pandemia de COVID-19, que obligaron a las instituciones educativas a adaptarse rápidamente a un entorno de enseñanza predominantemente virtual. La educación en línea se ha convertido en un componente fundamental en la formación académica, y su efectividad depende en gran medida de una infraestructura tecnológica sólida y confiable. Sin embargo, el despliegue de plataformas en línea también ha revelado desafíos críticos que afectan la experiencia de los estudiantes y docentes, tales como la latencia, la intermitencia en el acceso y la centralización de los recursos de la red. Estos problemas no solo dificultan la participación activa de los estudiantes en sus actividades académicas, sino que también limitan la efectividad de los procesos de enseñanza y aprendizaje en línea.

El acceso confiable y constante a las plataformas educativas en línea es esencial para una experiencia de aprendizaje exitosa. No obstante, en la Universidad de Guayaquil, específicamente en la Facultad de Ciencias Matemáticas, los estudiantes enfrentan dificultades frecuentes para acceder a los recursos digitales que necesitan en su formación. Estas limitaciones se deben principalmente a la infraestructura centralizada de las redes y a la dependencia casi total del acceso continuo a Internet. La latencia y los problemas de conexión intermitente son algunos de los factores que afectan negativamente la experiencia de los estudiantes, interrumpiendo su flujo de aprendizaje y generando frustración. La falta de una solución eficiente a estos problemas compromete tanto la calidad de la educación en línea como la accesibilidad de los recursos para aquellos que dependen de estas plataformas.

Diversos estudios han señalado que la computación de borde puede ser una solución viable para mejorar la experiencia de los usuarios en entornos digitales que requieren interacciones en tiempo real y gran cantidad de recursos en línea. La computación de borde, a diferencia de las arquitecturas centralizadas tradicionales, permite el procesamiento y almacenamiento de datos lo más cerca posible de la fuente de datos, en este caso, de los usuarios finales. Esto se traduce en una reducción significativa de la latencia y una mayor resiliencia

ante problemas de conectividad. Al procesar los datos localmente, la computación de borde puede proporcionar una experiencia de usuario más rápida y confiable, mejorando el acceso a los recursos educativos sin depender exclusivamente de una conexión constante a la red.

Con base en esta problemática y en los beneficios potenciales de la computación de borde, el presente estudio tiene como objetivo diseñar un modelo que permita a la Universidad de Guayaquil implementar esta tecnología para mejorar la educación en línea en la Facultad de Ciencias Matemáticas. Este modelo busca descentralizar el procesamiento de los datos educativos, lo que permitirá una mayor eficiencia en la entrega de contenido y un acceso más continuo a los recursos de aprendizaje. Al aplicar nodos de computación de borde en puntos estratégicos del campus, se espera optimizar el flujo de datos y reducir los problemas técnicos que actualmente afectan la experiencia de los estudiantes.

En términos de metodología, este estudio emplea un enfoque mixto que incluye tanto métodos cualitativos como cuantitativos para comprender de manera integral los desafíos y oportunidades de la computación de borde en el contexto educativo. A través de encuestas y entrevistas realizadas a estudiantes y docentes, se recogen datos sobre sus experiencias y percepciones de las plataformas en línea. Los resultados permitirán determinar la viabilidad y eficacia del modelo propuesto y, a su vez, validar si este enfoque contribuye a solucionar los problemas técnicos que enfrenta actualmente la universidad.

Computación de Borde (Edge Computing)

La computación de borde es una arquitectura de procesamiento de datos que distribuye las operaciones y el almacenamiento en ubicaciones más cercanas a los puntos donde se generan los datos. En lugar de depender exclusivamente de servidores centralizados o en la nube, la computación de borde permite realizar el procesamiento de datos en dispositivos locales o en servidores ubicados en la misma red del usuario final. Este enfoque reduce significativamente la latencia, pues minimiza el tiempo que tarda la información en viajar desde el usuario hasta el servidor y de vuelta. Además, mejora la eficiencia en la transmisión de datos y alivia la carga en la infraestructura de red centralizada (Douch et al., 2022).

El concepto de computación de borde ha cobrado relevancia en múltiples áreas, como el Internet de las Cosas (IoT), donde la conectividad es fundamental para el funcionamiento en tiempo real de dispositivos y sistemas inteligentes. En el ámbito educativo, esta tecnología resulta prometedora debido a que permite mejorar la experiencia de los estudiantes al proporcionar acceso más rápido y confiable a los recursos en línea, lo cual es esencial en plataformas educativas donde la interacción en tiempo real y el acceso a contenido multimedia son críticos (Yu et al., 2017).

Importancia de la Computación de Borde en la Educación Superior en Línea

El uso de tecnologías digitales en la educación ha transformado la forma en que los estudiantes y docentes acceden y comparten el conocimiento. Con el auge de la educación en línea, especialmente acelerado durante la pandemia de COVID-19, las instituciones educativas enfrentan el reto de ofrecer plataformas digitales eficientes que soporten una alta demanda de usuarios sin afectar la calidad del servicio (Aristovnik et al., 2023). Sin embargo, los sistemas tradicionales de gestión de redes y servidores centralizados suelen presentar problemas de latencia y fallos de conectividad, afectando la experiencia de los estudiantes que dependen de estas plataformas para su aprendizaje.

La computación de borde ofrece una solución para abordar estos problemas al permitir que los datos se procesen en ubicaciones cercanas al usuario, lo cual reduce los tiempos de respuesta y mejora la disponibilidad de los recursos. Esto es particularmente beneficioso en entornos de educación superior, donde los estudiantes necesitan acceder rápidamente a contenido multimedia, interactuar en tiempo real y realizar actividades que demandan una conectividad estable y de baja latencia. La implementación de nodos de borde en campus universitarios puede, por lo tanto, optimizar el acceso a recursos digitales y facilitar la gestión de grandes volúmenes de datos generados por estudiantes y profesores (Gao et al., 2018).

Beneficios de la Computación de Borde para Plataformas Educativas en Línea

Entre los beneficios clave de la computación de borde para la educación superior en línea, destacan:

- **Reducción de la latencia:** Al procesar y almacenar los datos más cerca de los estudiantes, la computación de borde permite una interacción más rápida y fluida con los recursos en línea. Esto es especialmente útil en plataformas de videoconferencia, laboratorios virtuales y entornos de realidad aumentada o virtual, donde la latencia puede afectar negativamente la experiencia educativa (Satyanarayanan, 2017).
- **Mayor resiliencia y disponibilidad:** La descentralización del procesamiento de datos permite que las plataformas educativas funcionen con mayor estabilidad, incluso en casos de fallas en la conexión principal a Internet. Esto asegura que los estudiantes puedan acceder a los materiales de estudio y participar en actividades sin interrupciones.
- **Optimización de recursos:** Al distribuir el procesamiento y almacenamiento de datos en nodos de borde, se reduce la carga en los servidores centrales de la institución. Esto disminuye los costos de infraestructura y permite una gestión de red más eficiente, especialmente en situaciones de alta demanda.
- **Seguridad y privacidad de los datos:** La computación de borde facilita el procesamiento local de información sensible, lo que reduce la necesidad de transferir grandes cantidades de datos a servidores remotos. Esto puede ser beneficioso para proteger la privacidad de los estudiantes y cumplir con las normativas de protección de datos, ya que minimiza los riesgos de seguridad asociados con la transmisión de datos a largas distancias (Alwarafy et al., 2021).

Casos de Estudio de Computación de Borde en Educación

Varios estudios han explorado la aplicación de la computación de borde en el ámbito educativo, mostrando resultados positivos en términos de rendimiento y experiencia de usuario. Por ejemplo, la Universidad Nacional de Singapur implementó un sistema de computación de borde para mejorar el acceso a los recursos en línea de sus estudiantes, reduciendo significativamente la latencia y mejorando la disponibilidad de las plataformas durante los picos de uso (Paul, 2022). De manera similar, el Distrito Escolar de Los Ángeles en Estados Unidos ha aplicado esta tecnología para facilitar el acceso a contenido educativo multimedia, permitiendo que los estudiantes en áreas con conectividad limitada accedan a los recursos de aprendizaje de manera más eficiente.

Estos casos evidencian que la computación de borde puede convertirse en un pilar importante para la infraestructura educativa moderna, permitiendo una educación más inclusiva y accesible para todos los estudiantes, independientemente de su ubicación o recursos de conectividad. Los beneficios de esta tecnología se alinean con las necesidades de instituciones educativas como la Universidad de Guayaquil, donde la implementación de un modelo de computación de borde podría resolver problemas de latencia y mejorar la experiencia de los estudiantes en plataformas de educación en línea.

Arquitecturas aplicables al Edge Computing

Las siguientes son arquitecturas aplicables a la computación de borde

- **Arquitectura de Nodo de Borde:** Esta arquitectura desplaza el procesamiento y almacenamiento de datos desde un centro de datos centralizado hacia nodos de borde ubicados cerca de los dispositivos que generan los datos, como gateways y microcentros de datos. Estos nodos procesan y almacenan datos localmente, lo que reduce la latencia y mejora la eficiencia en tiempo real. En el contexto educativo, los nodos de borde pueden instalarse en áreas estratégicas como laboratorios y bibliotecas para procesar datos relacionados con recursos educativos y mejorar el tiempo de acceso a los materiales.
- **Arquitectura de Microservicios en el Borde:** Segmenta las aplicaciones en servicios pequeños e independientes que se pueden desarrollar y escalar de manera autónoma. En el borde, los microservicios distribuidos en varios nodos facilitan la gestión flexible de aplicaciones. En el ámbito educativo, una plataforma basada en micro servicios permite una respuesta más rápida y escalabilidad para funciones como gestión de contenidos y foros de discusión (Hossain et al., 2023).
- **Arquitectura de Computación Colaborativa en el Borde:** Implica la cooperación entre múltiples nodos de borde y la nube central, donde los nodos colaboran en la ejecución de tareas para mejorar la distribución de la carga y el rendimiento. Esto es especialmente útil durante los picos de demanda, asegurando un acceso continuo a los recursos educativos (Ren et al., 2020).
- **Arquitectura de Computación Jerárquica en el Borde:** Organiza los recursos de procesamiento en niveles jerárquicos, desde dispositivos IoT y nodos de borde hasta centros de datos locales y la nube central. Este enfoque permite asignar tareas a diferentes niveles según sus requisitos de latencia y procesamiento, optimizando así la gestión de contenidos educativos de alta demanda y datos complejos.
- **Arquitectura Basada en Contenedores en el Borde:** Utiliza tecnologías de contenerización, como Docker, para desplegar aplicaciones en nodos de borde. Los contenedores permiten una ejecución eficiente y una rápida escalabilidad, lo cual facilita la actualización y el despliegue de aplicaciones educativas en el borde (Oleghe, 2021).

Materiales y métodos

El estudio adopta un diseño exploratorio de enfoque mixto, combinando métodos cualitativos y cuantitativos. Este enfoque permite una comprensión integral de los problemas técnicos asociados al acceso y uso de plataformas educativas en línea, así como la evaluación de la viabilidad de implementar un modelo de computación de borde en la Universidad de Guayaquil. La investigación se llevó a cabo en la Facultad de Ciencias Matemáticas de la Universidad de Guayaquil, la población objetivo incluyó a estudiantes y docentes

de esta facultad, quienes utilizan activamente las plataformas en línea para su aprendizaje y enseñanza. Se seleccionó una muestra no probabilística, utilizando el método de muestreo por conveniencia, para obtener respuestas de aquellos usuarios que enfrentan problemas de conectividad y acceso en su interacción con las plataformas educativas.

Las encuestas realizadas a los estudiantes de la Facultad de Ciencias Matemáticas revelaron el siguiente dato significativo:

Problemas de conectividad y latencia: De acuerdo al resultado de la encuesta el 71.06% de los estudiantes (Figura 1) reportó problemas de conexión intermitente al acceder a las plataformas educativas en línea. Estos problemas incluyen tiempos de carga prolongados, desconexiones durante el uso de videoconferencias y dificultades para acceder a contenido multimedia en tiempo real.

Tabla 1. Resultado de encuesta a estudiantes.

Experimento problemas de conexión intermitente al acceder a las plataformas en línea de mi institución educativa	Cantidad	Porcentaje
De acuerdo	112	36,01%
Totalmente de acuerdo	109	35,05%
Totalmente en desacuerdo	21	6,75%
En desacuerdo	23	7,40%
Neutral	46	14,79%
Total	311	100,00%

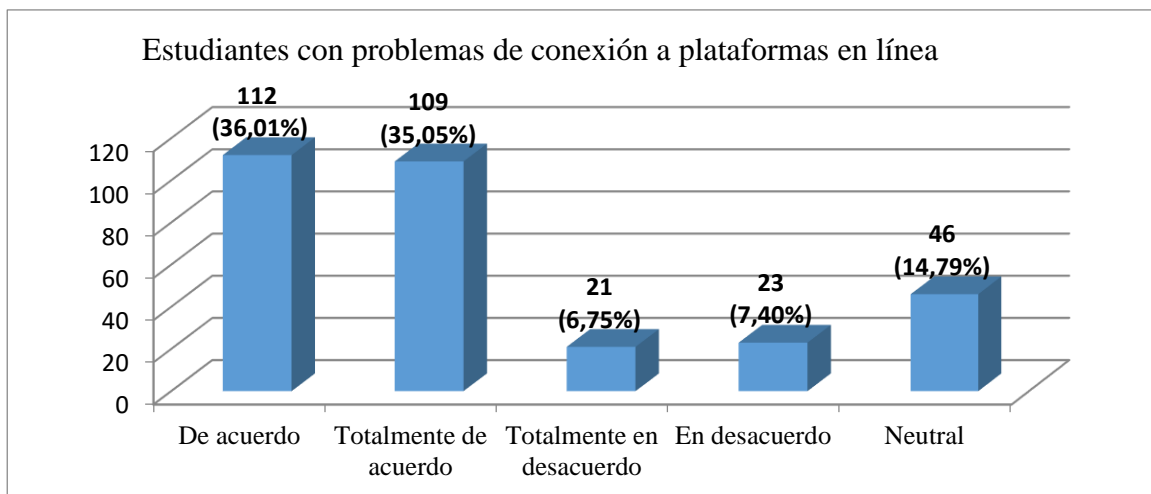


Figura 1. Estudiantes con problemas de conexión a plataformas en línea.

Resultados y discusión

Propuesta de Diseño del Modelo de Computación de Borde con Microservicios

El modelo de computación de borde propuesto para la Universidad de Guayaquil tiene como objetivo resolver problemas de latencia, congestión de red y dependencia de conexión con el servidor central que afectan la experiencia educativa de estudiantes y docentes en las plataformas en línea. Este modelo combina la arquitectura de computación de borde con microservicios para proporcionar una infraestructura más escalable, flexible y eficiente, acercando el procesamiento y el almacenamiento de datos a los usuarios finales y optimizando así la experiencia en línea, en la figura 2 se presenta la arquitectura de referencia.

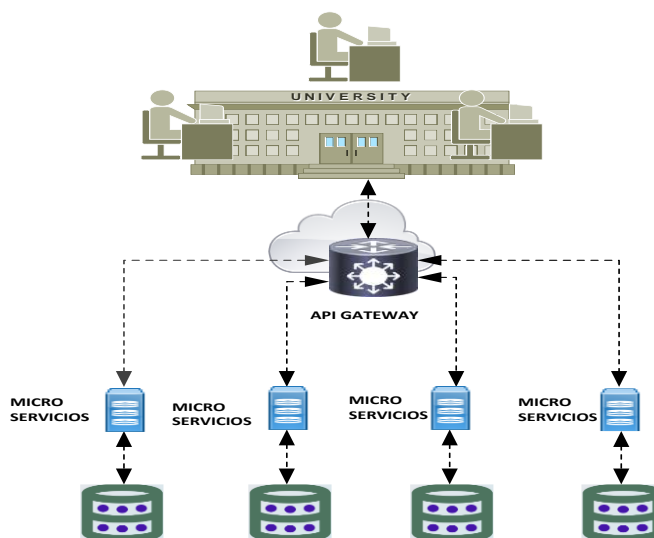


Figura 2. Arquitectura de Microservicios en el Borde

Arquitectura del Modelo de Computación de Borde con Microservicios

La arquitectura del modelo se basa en la implementación de nodos de borde distribuidos estratégicamente dentro del campus, donde cada nodo opera como un mini servidor que integra diversos microservicios específicos. Estos microservicios cumplen funciones educativas específicas y pueden ejecutarse de forma autónoma o conjunta según las necesidades de los usuarios, en la figura 3 se muestra un esquema de alto nivel del diseño. Los componentes clave de esta arquitectura son:

Nodos de Borde Locales: Los nodos de borde se ubican en áreas de alta concentración de estudiantes y docentes, como edificios de facultades y bibliotecas. Cada nodo de borde almacena y procesa localmente recursos educativos de alta demanda, como videoclases, documentos y simuladores interactivos, lo que reduce el tiempo de carga y dependencia del servidor central. Además, los nodos ejecutan microservicios específicos que gestionan diferentes aplicaciones y contenidos educativos de manera eficiente.

Microservicios Especializados: Cada función educativa, como video clases, descarga de documentos o acceso a simulaciones, se descompone en microservicios que funcionan de manera autónoma en los nodos de borde. Esta arquitectura modular permite que cada microservicio opere y escale independientemente,

brindando flexibilidad y optimizando el uso de recursos. Por ejemplo, un microservicio de videoconferencias se encarga únicamente de gestionar el acceso a las clases en vivo, mientras que un microservicio de almacenamiento facilita la descarga de documentos educativos.

Orquestador de Microservicios: Un componente de orquestación gestiona la interacción entre los microservicios en cada nodo de borde, coordinando las solicitudes de los usuarios y asegurando que se ejecuten de manera eficiente. Este orquestador permite que los microservicios actúen en conjunto sin interferir entre sí y gestiona la comunicación entre ellos cuando es necesario.

API Gateway o Puerta de Enlace de Datos: La API Gateway funciona como el intermediario entre los usuarios y los microservicios en los nodos de borde, gestionando las solicitudes de los estudiantes y dirigiéndolas al microservicio correspondiente. También maneja la seguridad de las conexiones y garantiza que cada solicitud sea procesada de manera rápida y segura.

Funcionamiento del Modelo Propuesto

La arquitectura de computación de borde con microservicios permite una distribución de recursos y una reducción significativa en los tiempos de respuesta para los usuarios, asegurando una experiencia más ágil y continua en el uso de las plataformas educativas en línea. Su funcionamiento se describe a continuación:

Procesamiento Descentralizado de Solicitudes: Cuando un estudiante intenta acceder a un recurso, la solicitud se dirige primero al nodo de borde más cercano, donde se ejecuta el microservicio correspondiente. Si el recurso está disponible localmente, se procesa inmediatamente, reduciendo el tiempo de carga y mejorando la experiencia del usuario. Por ejemplo, si un estudiante accede a una video clase y luego a una simulación, estos servicios se procesan en paralelo mediante sus respectivos microservicios, optimizando la velocidad y eficiencia.

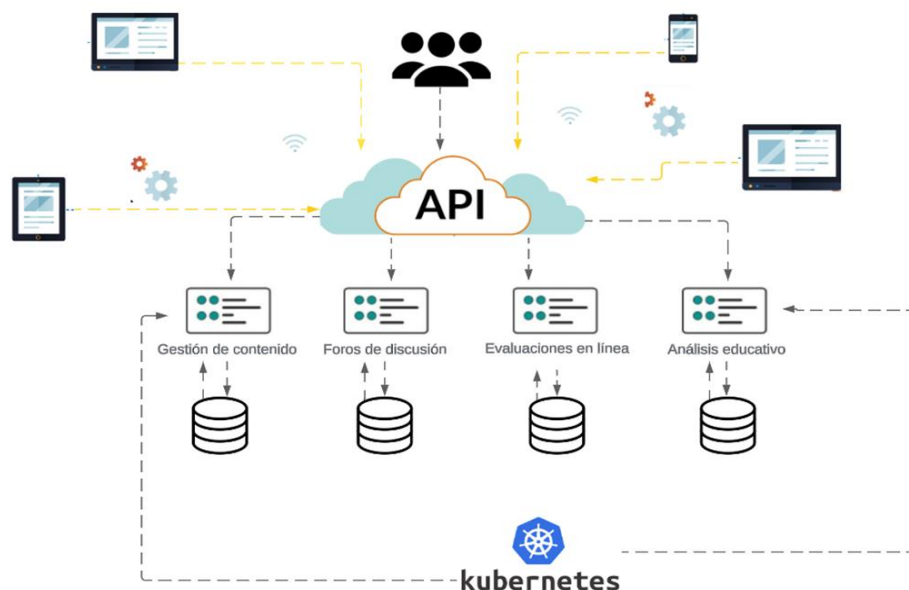


Figura 3. Arquitectura de Microservicios en el Borde propuesta.

Sincronización con el Servidor Central: Los nodos de borde sincronizan periódicamente sus bases de datos locales con el servidor central, asegurando que los contenidos académicos estén actualizados sin sobrecargar la red. Esta sincronización permite que los nodos de borde operen de manera autónoma entre cada actualización, lo que disminuye la dependencia constante del servidor central.

Escalabilidad y Manejo de Fallos: La arquitectura basada en microservicios proporciona una alta resiliencia; si uno de los microservicios falla, no afecta al resto del sistema. Además, el modelo permite escalar microservicios específicos en función de la demanda, por lo que, durante períodos de alta demanda, se pueden incrementar las instancias de microservicios como los de videoconferencia o descarga de documentos sin necesidad de escalar toda la infraestructura.

Ejemplos de Microservicios en el Modelo

Los siguientes microservicios son ejemplos de cómo se estructuran las funcionalidades en los nodos de borde:

- **Microservicio de Videoconferencias:** Gestiona la transmisión de video y audio en tiempo real, optimizando la calidad según el ancho de banda disponible y asegurando que los estudiantes puedan acceder a clases en vivo con baja latencia.
- **Microservicio de Almacenamiento de Documentos:** Facilita el acceso a documentos y recursos educativos, permitiendo una descarga rápida y reduciendo la carga en la red central. Este microservicio es especialmente útil para materiales de estudio que los estudiantes necesitan consultar frecuentemente.
- **Microservicio de Simulaciones y Laboratorios Virtuales:** Proporciona acceso a entornos interactivos y simulaciones que requieren procesamiento intensivo. Al estar ubicados en los nodos de borde, los simuladores operan de manera fluida, brindando una experiencia educativa enriquecida sin interrupciones.
- **Microservicio de Gestión de Autenticación y Autorización:** Este servicio maneja los accesos de los usuarios a los recursos educativos, garantizando que solo personas autorizadas puedan acceder a contenidos específicos.
- **Microservicio de Sincronización de Contenidos:** Administra la sincronización entre los recursos en el servidor central y los nodos de borde, asegurando que la información esté actualizada y minimizando las solicitudes duplicadas a la infraestructura central.

Beneficios del Modelo de Computación de Borde con Microservicios

La implementación de esta arquitectura de borde con microservicios ofrece varios beneficios importantes:

- **Reducción de Latencia y Mayor Disponibilidad:** La cercanía de los nodos de borde a los usuarios permite respuestas más rápidas, mientras que la modularidad de los microservicios asegura que el sistema funcione eficientemente incluso en períodos de alta demanda.
- **Escalabilidad y Flexibilidad:** Los microservicios pueden escalarse individualmente según la demanda, permitiendo a la universidad adaptarse a picos de uso o ajustar los recursos en función de las necesidades académicas sin afectar la operación general del sistema.

- **Mantenimiento y Actualización Eficientes:** La arquitectura de microservicios permite actualizar y mantener componentes individuales sin interrumpir todo el sistema. Esto facilita la implementación de mejoras continuas en el modelo.

Estrategia de implementación

Para una implementación efectiva, se recomienda realizar una prueba piloto en un área del campus con alta densidad de usuarios, configurando nodos de borde con los microservicios de mayor demanda, como videoconferencias y almacenamiento de documentos. Durante esta fase, es importante monitorear el rendimiento de cada microservicio, ajustando su capacidad y configuración según las observaciones iniciales. La expansión gradual de los microservicios a otros nodos en el campus permitirá consolidar la infraestructura, optimizando los recursos y asegurando una transición sin interrupciones.

Además, se debe establecer un plan de mantenimiento continuo y un sistema de monitoreo para garantizar la estabilidad y seguridad de los nodos de borde. El monitoreo permitirá detectar y corregir rápidamente fallos en los microservicios o en la conectividad de los nodos, asegurando que los estudiantes y docentes tengan acceso continuo y de alta calidad a los recursos educativos.

Conclusiones

Basado en el marco teórico, los resultados de la encuesta y la propuesta de diseño, se pueden extraer las siguientes conclusiones sobre la viabilidad y beneficios potenciales de un modelo de computación de borde aplicado a la educación superior en línea:

La propuesta de un modelo de computación de borde, que acerca el procesamiento de datos a los usuarios finales a través de nodos de borde locales, tiene un potencial significativo para reducir la latencia en plataformas educativas. La arquitectura de microservicios dentro del modelo de computación de borde facilita una mayor flexibilidad y escalabilidad en la entrega de recursos educativos, la modularidad de esta arquitectura permite una experiencia de usuario más personalizada y eficiente. La estructura modular basada en microservicios posibilita una escalabilidad eficaz del sistema, permitiendo que el diseño responda dinámicamente a variaciones en la demanda sin comprometer el rendimiento general.

Aunque el modelo de computación de borde es prometedor, el diseño conlleva ciertos desafíos. La infraestructura de borde requiere de inversión inicial y personal técnico capacitado para el mantenimiento y monitoreo continuo. Además, algunos usuarios podrían requerir orientación para adaptarse a esta nueva arquitectura, por lo que se recomienda un plan de comunicación y capacitación para maximizar la aceptación. La propuesta de diseño es viable y alineada con las tendencias tecnológicas en la infraestructura educativa.

La propuesta de diseño de un modelo de computación de borde con microservicios representa una solución viable para optimizar la experiencia de aprendizaje en línea en la educación superior. Si se implementa, esta arquitectura proporcionaría una infraestructura tecnológica más robusta, accesible y flexible, que responde a las crecientes demandas de estudiantes y docentes en entornos de educación en línea cada vez más dinámicos.

Referencias

- Alwarafy, A., Al-Thelaya, K. A., Abdallah, M., Schneider, J., & Hamdi, M. (2021). A Survey on Security and Privacy Issues in Edge-Computing-Assisted Internet of Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(6), 4004–4022. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3015432>
- Aristovnik, A., Karampelas, K., Umek, L., & Ravšelj, D. (2023). Impact of the COVID-19 pandemic on online learning in higher education: a bibliometric analysis. *Frontiers in Education*, 8(August), 1–13. <https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1225834>
- Douch, S., Abid, M. R., Zine-Dine, K., Bouzidi, D., & Benhaddou, D. (2022). Edge Computing Technology Enablers: A Systematic Lecture Study. *IEEE Access*, 10(June), 69264–69302. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3183634>
- Gao, Z., Cheng, Z., Yang, X., Lu, H., Ye, M., & Diao, W. (2018). ECUE: An Edge Computing System for University Education. *Proceedings - 9th International Conference on Information Technology in Medicine and Education, ITME 2018*, 471–476. <https://doi.org/10.1109/ITME.2018.00111>
- Hossain, M. D., Sultana, T., Akhter, S., Hossain, M. I., Thu, N. T., Huynh, L. N. T., Lee, G. W., & Huh, E. N. (2023). The role of microservice approach in edge computing: Opportunities, challenges, and research directions. *ICT Express*, 9(6), 1162–1182. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2023.06.006>
- Oleghe, O. (2021). Container Placement and Migration in Edge Computing: Concept and Scheduling Models. *IEEE Access*, 9, 68028–68043. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3077550>
- Paul, P. K. . (2022). Edge Computing & Educational Systems: Towards Advanced and Intelligent Learning—A Conceptual Overview. *International Journal of Information Science and Computing*, 9(1). <https://doi.org/10.30954/2348-7437.1.2022.2>
- Ren, J., Wang, H., Hou, T., Zheng, S., & Tang, C. (2020). Collaborative Edge Computing and Caching with Deep Reinforcement Learning Decision Agents. *IEEE Access*, 8(2), 120604–120612. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007002>
- Satyanarayanan, M. (2017). The emergence of edge computing. *Computer*, 50(1), 30–39. <https://doi.org/10.1109/MC.2017.9>
- Yu, W., Liang, F., He, X., Hatcher, W. G., Lu, C., Lin, J., & Yang, X. (2017). A Survey on the Edge Computing for the Internet of Things. *IEEE Access*, 6, 6900–6919. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2778504>