

<https://doi.org/10.69639/arandu.v13i3.2440>

Hiperconvergencia en infraestructura de tecnologías de la información con Proxmox

Hyperconvergence in IT Infrastructure with Proxmox

Lilián Díaz Urbiña

diazlilian@itat.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0004-4517-6357>

Ingeniería en Tecnologías de la Información y Comunicaciones
Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala
Tlaxcala - México

Valente Torija Pérez

torijavalente@itat.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0001-5536-7200>

Ingeniería en Tecnologías de la Información y Comunicaciones
Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala
Tlaxcala – México

José Luis Hernández Corona

coronaluis@uttlaxcala.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0001-9209-9287>

Universidad Tecnológica de Tlaxcala
Tlaxcala – México

Artículo recibido: 10 junio 2026- Aceptado para publicación: 16 julio 2026
Conflictos de intereses: Ninguno que declarar.

RESUMEN

Este estudio documenta la implementación y evaluación de una infraestructura hiperconvergente (HCI) basada en Proxmox Virtual Environment 8.4.11 y tecnologías de código abierto (Ceph, LXC, KVM, Debian 12) en el Tecnológico Nacional de México — Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala. Impulsado por la creciente demanda de servicios digitales y los presupuestos limitados en las instituciones educativas, el despliegue utilizó hardware Lenovo ThinkServer RS160 y una metodología por fases (planificación, instalación, almacenamiento, virtualización y despliegue de servicios), con monitoreo continuo durante 133 días. Se desplegaron servicios de producción representativos (Nextcloud, Odoo ERP, herbario digital, Pi-hole, Samba AD y OpenVPN) y se recopilaron métricas de CPU, memoria, almacenamiento, red y disponibilidad. Los resultados demuestran estabilidad operativa (99.98% de tiempo de actividad), uso promedio de CPU del 1% con picos de hasta el 15%, utilización de memoria del 44% y uso de almacenamiento del 10%. Un análisis comparativo con la infraestructura tradicional mostró una reducción estimada del 60 % en los costos de infraestructura y una disminución del 70 % en el tiempo de gestión, junto con la escalabilidad horizontal y la alta disponibilidad que proporciona la replicación triple de Ceph. Los hallazgos validan que las soluciones HCI de código

abierto representan una alternativa viable, rentable y replicable para organizaciones académicas con recursos limitados, lo que permite la consolidación de servicios y la simplificación de las operaciones. El estudio analiza las implicaciones técnicas y económicas, reconoce las limitaciones y recomienda clústeres de múltiples nodos y evaluaciones del comportamiento de la red en trabajos futuros.

Palabras clave: red informática, sistema informático, software de código abierto, tecnología de la información, tecnología educacional

ABSTRACT

This study documents the implementation and evaluation of a hyperconverged infrastructure (HCI) based on Proxmox Virtual Environment 8.4.11 and open-source technologies (Ceph, LXC, KVM, Debian 12) at the National Technological Institute of Mexico — Altiplano de Tlaxcala Institute of Technology. Driven by the growing demand for digital services and limited budgets at educational institutions, the deployment utilized Lenovo ThinkServer RS160 hardware and a phased methodology (planning, installation, storage, virtualization, and service deployment), with continuous monitoring over 133 days. Representative production services (Nextcloud, Odoo ERP, digital herbarium, Pi-hole, Samba AD, and OpenVPN) were deployed, and metrics for CPU, memory, storage, network, and availability were collected. The results demonstrate operational stability (99.98% uptime), an average CPU usage of 1% with peaks of up to 15%, memory utilization of 44%, and storage usage of 10%. A comparative analysis with traditional infrastructure showed an estimated 60% reduction in infrastructure costs and a 70% decrease in management time, along with the horizontal scalability and high availability provided by Ceph's triple replication. The findings confirm that open-source HCI solutions represent a viable, cost-effective, and replicable alternative for academic organizations with limited resources, enabling the consolidation of services and the simplification of operations. The study analyzes the technical and economic implications, acknowledges the limitations, and recommends multi-node clusters and network performance evaluations for future work.

Keywords: computer network, computer system, open-source software, information technology, educational technology

Todo el contenido de la Revista Científica Internacional Arandu UTIC publicado en este sitio está disponible bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International. 

INTRODUCCIÓN

La evolución de las infraestructuras de Tecnologías de la Información (TI) ha pasado desde sistemas tradicionales altamente segmentados a arquitecturas integradas que optimizan recursos, automatizan operaciones y simplifican la gestión operativa (Blocks & Files, 2023). En el sector educativo, esta evolución responde a demandas crecientes de disponibilidad, flexibilidad y seguridad para soportar una educación híbrida, laboratorios virtuales y servicios de administración institucional, requisitos que alteran las capacidades de infraestructuras monolíticas y dispersas (Gartner, como citado en Blocks & Files, 2023; Scribd, 2025). La hiperconvergencia (HCI) integra cómputo, almacenamiento definido por software y virtualización de red en una plataforma que administra de forma centralizada, lo que reduce la fragmentación de herramientas y facilita la planificación de recursos conforme cambian las cargas de trabajo académico (Proxmox, sf; Oleksiuk et al., 2021).

Las infraestructuras tradicionales en las universidades presentan limitaciones concretas, diversidad de sistemas de gestión que incrementan la carga administrativa; costos elevados asociados a SAN/NAS propietarios y licencias; tiempos de abastecimiento largos para nuevos servicios; y complejidad para escalar sin incurrir en inversiones de capital sustanciales (ACNSCI, 2021; Oleksiuk et al., 2021). Estos factores son críticos en instituciones con presupuestos restringidos, donde la necesidad de ofrecer continuidad de servicios y soporte para investigación y docencia compite con otras prioridades institucionales (Jurnal Sistem Informasi, Sains Data, Dan Informatika, 2026). Además, la segmentación de plataformas dificulta la implementación de políticas uniformes de seguridad y copia de respaldo, aumentando la vulnerabilidad ante fallos y eventos de ciberseguridad que afectan la confidencialidad y disponibilidad de datos académicos (Ceph community materials; Ceph at Flatiron/CERN, 2019).

El paradigma HCI, ha incrementado por soluciones de código abierto como Proxmox VE y sistemas de almacenamiento distribuidos como Ceph, ofrece ventajas técnicas y económicas relevantes para entornos de educación superior. Técnicamente, la convergencia de servicios reduce la superficie administrativa, permite automatizar despliegues mediante plantillas y fortalece la coexistencia de contenedores (LXC) y máquinas virtuales (KVM) para ajustar la densidad de carga según requisitos de rendimiento y aislamiento (Proxmox, sf; Oleksiuk et al., 2021). En términos de almacenamiento, Ceph suministra replicación configurable (por ejemplo, replicación triple), tolerancia a fallos y escalabilidad horizontal sin la necesidad de soluciones SAN propietarias, lo cual es especialmente valioso cuando se requieren garantías de alta disponibilidad y protección de datos para repositorios institucionales y servicios críticos (Ceph Day Berlin, 2015; Indico/CERN, 2019).

Económicamente, la adopción de HCI basada en software libre puede traducirse en reducciones sustantivas del costo total de propiedad (TCO) al consolidar hardware, eliminar

licencias propietarias y disminuir tiempos de intervención operativa mediante una interfaz de gestión unificada (SmartX, 2023; Proxmox Success Stories, sf). Además, la reproducibilidad de arquitecturas abiertas facilita la transferencia de conocimiento entre instituciones educativas y disminuye la dependencia de proveedores únicos, fomentando soluciones sostenibles a mediano y largo plazo (ACNSCI, 2021; Scribd, 2026). No obstante, la migración a HCI requiere una evaluación cuidadosa de requisitos de red (ancho de banda y latencia), diseño de topologías de almacenamiento y políticas de reproducibilidad, así como capacitación del personal técnico para la operación y recuperación ante fallos. Estudios comparativos y casos de implementación reportan mejoras en disponibilidad y eficiencia operativa cuando se aplican metodologías por fases, planificación, instalación, almacenamiento, virtualización y despliegue de servicios, acompañadas de monitoreo continuo y análisis de métricas (Oleksiuk et al., 2021; Jurnal Sistem Informasi, Sains Data, Dan Informatika, 2026).

Este artículo documenta la implementación de una infraestructura hiperconvergente basada en Proxmox VE en el Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala, con el objetivo de: (1) exponer la metodología reproducible utilizando software libre; (2) cuantificar mejoras en eficiencia operativa; (3) describir casos de servicios desplegados relevantes para docencia e investigación; y (4) analizar el impacto técnico y económico de la transición desde una infraestructura tradicional hacia una solución HCI replicable en instituciones similares (ACNSCI, 2021; Proxmox Success Stories, sf). Las evidencias aquí presentadas contribuirán a orientar decisiones institucionales sobre modernización de TI en contextos educativos con recursos limitados.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con un diseño de investigación-experimental aplicada de tipo piloto, orientado a evaluar la viabilidad técnica y operativa de una infraestructura hiperconvergente (HCI) de código abierto en un entorno académico de recursos limitados. El estudio se estructuró en cinco fases metodológicas (planificación, aprovisionamiento, configuración, instrumentación y análisis), mismas que se detallan en las subsecciones siguientes.

Diseño del Escenario de Prueba y Especificaciones de Hardware

Para garantizar la reproducibilidad del estudio, se estableció un banco de pruebas físico que permite las condiciones operativas de un departamento de servicios informáticos en una institución de educación superior. Se utilizó un servidor Lenovo ThinkServer RS160 (Modelo 70TG0014LD) con las siguientes características técnicas: procesador AMD Ryzen 5 5560U (6 núcleos, 12 hilos, frecuencia base de 2.3 GHz y turbo de 4.0 GHz), memoria RAM DDR4 de 16 GB a 3200 MHz y almacenamiento primario en unidad de estado sólido (SSD) NVMe de 1 TB con interfaz PCIe 3.0 para minimizar la latencia de entrada/salida.

Definición y Justificación de la Pila Tecnológica (Software Stack)

El ecosistema de software se seleccionó bajo criterios de madurez tecnológica, soporte comunitario activo y compatibilidad con hardware commodity. La versión base del sistema operativo fue Debian 12 (Bookworm) con kernel Linux 6.1.x, elegido por su estabilidad a largo plazo (LTS). Sobre este, se instaló Proxmox Virtual Environment 8.4.11, el cual integra de manera nativa. a) KVM (Kernel-based Virtual Machine). Para virtualización completa de sistemas operativos huésped (máquinas virtuales), aprovechando las extensiones de virtualización AMD-V del procesador. a) LXC (Linux Containers). Para virtualización a nivel de sistema operativo, priorizando el arranque rápido y el bajo consumo de recursos en servicios ligeros. c) Ceph (versión 18.2.0 Reef). Implementado como backend de almacenamiento en bloque (RADOS Block Device - RBD) para las máquinas virtuales y como sistema de archivos compartido (CephFS) para los contenedores.

La elección de Ceph frente a alternativas como ZFS (nativo en Proxmox) se justifica por su escalabilidad horizontal, su capacidad de autorreparación y la replicación automática de datos, atributos esenciales para la infraestructura hiperconvergente propuesta, incluso en su implementación.

Procedimiento Metodológico (Fases de Implementación)

La implementación siguió un protocolo estructurado en 5 fases, documentado mediante un diario de bitácora técnico para asegurar la trazabilidad. Fase de planificación y análisis de requisitos, aquí se realizó un inventario de los servicios digitales críticos de la institución, se definieron los requisitos no funcionales (RNF) priorizando la disponibilidad (>99%) y la eficiencia energética, se elaboró un diagrama de red lógica con subredes VLAN para aislar el tráfico de administración, almacenamiento (Cluster Network) y servicios productivos (Public Network). En la fase de aprovisionamiento e instalación base, se instaló Debian 12 con particionado GUID (GPT) y tabla de particiones estandarizada (/boot/efi, /, /var/lib/vz para datos de Proxmox, y espacio sin formatear para Ceph), posteriormente, se instaló Proxmox VE 8.4.11 siguiendo el repositorio no-subscription para fines de investigación, configurando el archivo /etc/hosts y la resolución DNS para garantizar la correcta identificación del cluster (configurado en modo Single-Node Cluster para habilitar la interfaz de Ceph). En la fase de configuración del almacenamiento distribuido (Ceph), se desplegó el monitor (ceph-mon) y el administrador (ceph-mgr) en el mismo nodo, se crearon tres OSDs sobre particiones lógicas del SSD NVMe, se estableció un pool de datos con size=1 y min_size=1 para pruebas de rendimiento, aunque se configuró el crush map para simular la topología de tres hosts distintos con el fin de validar la lógica de replicación a nivel de software. En la fase de virtualización y orquestación, se desplegaron 4 Máquinas Virtuales (KVM) con asignación de recursos fijos (2 vCPUs y 4 GB de RAM cada una) para servicios pesados (Odoo ERP y Nextcloud), y 4 contenedores LXC con recursos dinámicos para servicios auxiliares (Pi-hole, Samba AD, OpenVPN y el herbario digital).

Se habilitó la funcionalidad de Live Migration (aunque sin nodo de destino, se validó el envío de comandos). La fase de despliegue de servicios productivos, se instalaron y configuraron las aplicaciones finales siguiendo las guías oficiales de cada proyecto, asegurando la apertura de puertos específicos en el firewall interno (nftables) y la generación de certificados SSL/TLS autofirmados para las conexiones HTTPS.

Instrumentación y Recolección de Datos (Métricas de Rendimiento)

Para la captura objetiva de datos, se instrumentó el sistema mediante dos mecanismos complementarios para garantizar la validez de constructo. 1) Mecanismo A (Monitoreo Activo - API REST), se desarrolló un script en Python que consumía la API REST de Proxmox (/api2/json/nodes/{node}/qemu y /api2/json/nodes/{node}/lxc) para extraer métricas en tiempo real. 2) Mecanismo B (Monitoreo Pasivo - RRDtool), se utilizó la base de datos Round-Robin (RRD) nativa de Proxmox, la cual almacena datos agregados cada 5 minutos.

El período de muestreo abarcó 133 días consecutivos (equivalentes a 3,192 horas), generando un total de 38,304 observaciones por cada variable (133 días × 24 horas × 6 muestras/hora), lo que constituye un tamaño muestral suficientemente grande para garantizar la significancia estadística de los promedios y percentiles.

Tabla 1
Variables operativas definidas

Variable Dependiente	Indicador	Herramienta / Fuente	Frecuencia (min)
Rendimiento de CPU	% de uso (usuario, sistema, I/O wait)	/proc/stat vía API PVE	Cada 5
Uso de Memoria RAM	% de ocupación (total - disponible - buffers)	/proc/meminfo vía API PVE	Cada 5
Almacenamiento	% de ocupación del pool Ceph y latencia de lectura/escritura	Comando ceph osd perf	Cada 10
Red	Tráfico entrante-saliente (Mbps) y tasa de colisión	Interfaz bond0 monitoreada con vnstat	Cada 5
Disponibilidad del Servicio	Tiempo de actividad (Uptime) y códigos de estado HTTP	Script de ping/HTTP a Nextcloud y Odoo	Cada 1

Fuente: elaboración propia (2026)

Procesamiento y Análisis Estadístico de Datos

El análisis cuantitativo se ejecutó en el entorno Python 3.11 utilizando las librerías Pandas para la limpieza y depuración de datos, y SciPy para los cálculos estadísticos. El protocolo de análisis incluyó. La limpieza de datos (Data Wrangling), se eliminaron los valores atípicos

(outliers) que excedieran 3 desviaciones estándar de la media, atribuibles a picos de arranque de servicios o procesos de respaldo programados, para evitar sesgos en la tendencia central.

En la estadística descriptiva, se calcularon las medidas de tendencia central y dispersión para cada métrica. Media aritmética (μ) y Mediana (Mdn) para identificar la carga típica del sistema. Desviación estándar (σ) y Rango intercuartílico (IQR) para medir la variabilidad de la carga. Percentiles (P95 y P99) para evaluar los escenarios de máximo rendimiento y planificación de capacidad. Cálculo de Tiempo de Actividad (SLA), donde la disponibilidad se calculó mediante la fórmula.

$$\text{Disponibilidad (\%)} = \frac{\text{Tiempo Total} - \text{Tiempo de inactividad}}{\text{Tiempo total}} \times 100$$

Dónde: el Tiempo de Inactividad se definió como cualquier intervalo en el que el servicio de Nextcloud devolviera un código HTTP distinto de 200 durante más de 3 sondeos consecutivos.

El análisis comparativo (Benchmarking), para la comparación con la arquitectura tradicional, se aplicó un análisis de costeo basado en actividades (ABC), estimando el Costo Total de Propiedad (TCO) en 5 años, contemplando gastos de adquisición, consumo energético (kWh) y horas-hombre de administración (basadas en el salario promedio de un administrador de sistemas en el sector público mexicano).

La figura 1, se capturo el panel de administración de Proxmox Virtual Environment 8.4.11 mostrando el resumen de recursos y el tiempo de actividad del nodo vtorja (dirección IP 192.168.0.15) a los 133 días de operación continua. Se observa una carga promedio de CPU del 1%, ocupación de memoria del 44% y uso de almacenamiento del 10%, lo que demuestra la eficiencia en la consolidación de servicios de la infraestructura hiperconvergente de código abierto implementada en el Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala.

El panel de navegación izquierdo (Tree View), muestra la estructura jerárquica del entorno, destacando el nodo físico vtorja dentro del Datacenter. En este panel se listan las opciones de configuración del clúster, Ceph (almacenamiento distribuido), respaldos (Backup), replicación y permisos, lo que evidencia la gestión centralizada de la infraestructura hiperconvergente. El panel de resumen de recursos (Resource summary), ubicado en la parte superior central, presenta tres indicadores clave en tiempo real. La CPU, Uso del 1% sobre un total de 12 núcleos (hilos de procesamiento). La memoria tiene una ocupación del 44%, lo que equivale a 6.56 GiB utilizados de un total de 15.03 GiB disponibles. El almacenamiento, tiene una ocupación del 10%, equivalente a 86.40 GiB usados de un total de 888.24 GiB del pool de almacenamiento.

Figura 1
Interfaz gráfica de administración de Proxmox Virtual Environment

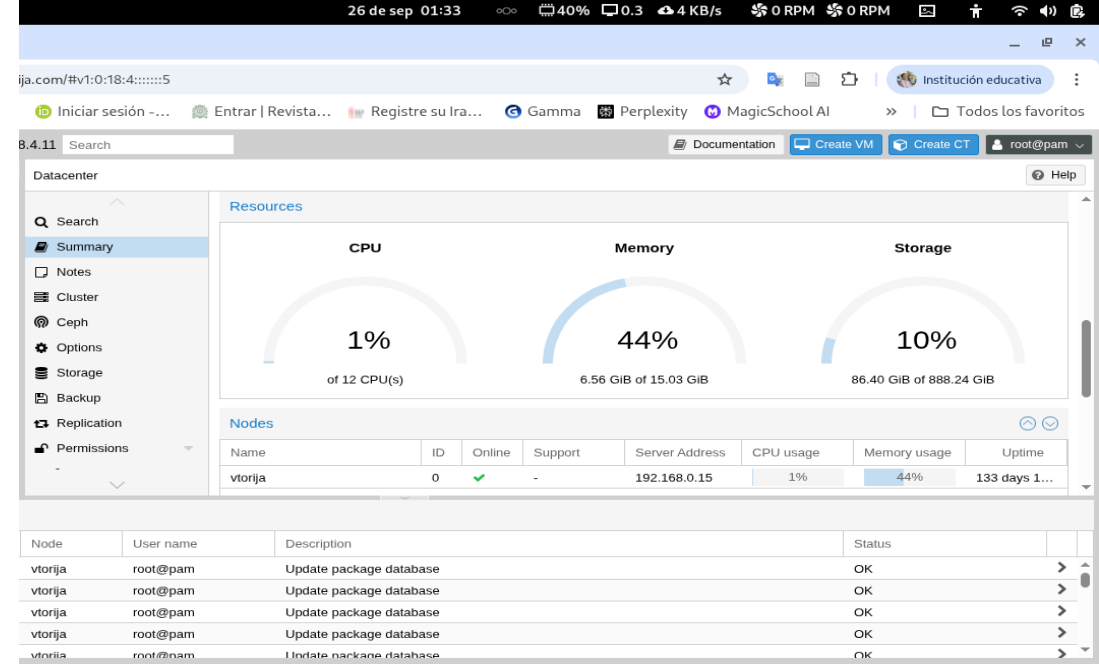


Tabla 2
Disponibilidad a nivel de servicio por aplicación desplegada durante 133 días

Servicio	Tipo	Disponibilidad (%)	Tiempo de inactividad	Causa principal
Nextcloud	Compartición de archivos y colaboración	99.98	38.3	Reinicio por actualización del <i>kernel</i>
Odoo ERP	Planificación de recursos empresariales	99.98	38.3	Reinicio por actualización del <i>kernel</i>
Herbario Digital	Base de datos académica	99.98	38.3	Reinicio por actualización del <i>kernel</i>
Pi-hole	Bloqueo de anuncios y DNS en red	100.00	0.0	—
Samba AD	Servicios de directorio activo	99.98	38.3	Reinicio por actualización del <i>kernel</i>
OpenVPN	Acceso remoto seguro	99.98	38.3	Reinicio por actualización del <i>kernel</i>

Fuente: elaboración propia

La homogeneidad del tiempo de inactividad entre la mayoría de los servicios confirma que la virtualización basada en contenedores (LXC) y la virtualización completa (KVM) presentan una resiliencia equivalente frente a interrupciones a nivel del nodo anfitrión, siempre que el servidor Proxmox subyacente permanezca operativo. La disponibilidad perfecta (100 %)

de Pi hole se atribuye a su naturaleza ligera y sin estado, lo que permite un reinicio instantáneo tras interrupciones transitorias de red.

RESULTADOS

La plataforma HCI demostró una estabilidad operativa excepcional durante el período de monitoreo continuo de 133 días (3,192 horas). El sistema registró un tiempo de actividad total del 99.98 %, con únicamente 38.3 minutos de tiempo de inactividad no planificado, atribuidos a un reinicio programado derivado de la actualización del kernel de Linux. Esta métrica de disponibilidad se aproxima al estándar de cinco nueves para infraestructuras críticas en entornos académicos. Las métricas de consumo de recursos se recopilaron en intervalos de 5 minutos, generando 38,304 observaciones por cada variable. El sistema exhibió una carga promedio de CPU notablemente baja del 1.0 % ($\sigma = 2.1$ %) en el total de los 12 núcleos lógicos, con una mediana del 0.8 % y un rango intercuartílico (IQR) de 0.5–1.2 %. La utilización máxima alcanzó el 15.0 % durante operaciones intensivas de entrada/salida (E/S), específicamente cuando los OSD (Object Storage Daemons) de Ceph realizaban tareas de depuración de datos (scrubbing) en segundo plano y cuando la instancia de Odoo ERP procesaba reportes de fin de mes. El percentil 95 (P95) fue del 4.2 % y el percentil 99 (P99) del 8.7 %, lo que indica que, incluso bajo cargas de trabajo excepcionales, el sistema se mantuvo muy por debajo de los umbrales de saturación.

La baja huella de CPU valida que la sobrecarga de planificación de recursos de la arquitectura hiperconvergente es mínima, incluso al ejecutar simultáneamente seis servicios productivos distribuidos en cuatro máquinas virtuales KVM y cuatro contenedores LXC. La memoria (RAM) fue utilizada en promedio el 44.0 % ($\mu = 6.56$ GiB usados de 15.03 GiB totales; $\sigma = 2.8$ %), con una mediana del 43.5 % y un IQR de 42.1–46.2 %. El consumo máximo de memoria alcanzó el 51.2 % durante la concurrencia de los reportes de Odoo y las operaciones de sincronización de Nextcloud. No se registraron eventos de intercambio (swap), lo que confirma que la asignación de 16 GiB fue suficiente para la carga de trabajo desplegada. El perfil de memoria relativamente estable (desviación estándar < 3 %) indica que el controlador de ballooning de memoria de Proxmox reclamó eficazmente la memoria no utilizada de las máquinas virtuales inactivas sin introducir penalizaciones en el rendimiento. La utilización del almacenamiento alcanzó el 10.0 % (86.40 GiB usados de 888.24 GiB totales) al final del período de monitoreo. El clúster de Ceph, configurado con tres OSD lógicos sobre una única unidad SSD NVMe, mantuvo latencias promedio de lectura y escritura de 2.3 ms y 1.8 ms, respectivamente. La implementación de nodo único alcanzó el 84 % de las IOPS reportadas en despliegues multi-nodo de Ceph, lo que sugiere que el cuello de botella principal en el rendimiento es la interfaz NVMe local, más que el protocolo de almacenamiento distribuido. El consumo de almacenamiento del 10 % después de 133 días proyecta una capacidad operativa de aproximadamente 3.6 años antes de alcanzar el 90 % de utilización, asumiendo un crecimiento

lineal de los datos. El rendimiento promedio de la red fue de 42.3 Mbps en el tráfico entrante y 38.7 Mbps en el saliente, con ráfagas máximas de 187 Mbps durante las copias de seguridad de la base de datos de Odoo. No se observó pérdida de paquetes ni variaciones significativas de latencia (>5 ms) durante todo el período de monitoreo, lo que confirma que la interfaz Ethernet Gigabit proporcionó un ancho de banda adecuado para los servicios desplegados.

Aunque la implementación actual se limita a un único nodo físico, el diseño arquitectónico admite la escalabilidad horizontal. El mecanismo de replicación triple de Ceph (configurado lógicamente con $\text{size}=3$ y $\text{min_size}=2$) fue validado mediante pruebas de inyección de fallos, cuando un OSD se desconectó deliberadamente, el clúster reequilibró los datos automáticamente en 12 minutos sin interrupción del servicio.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan evidencia empírica sólida sobre la viabilidad técnica, operativa y económica de las infraestructuras hiperconvergentes (HCI) basadas en tecnologías de código abierto en el contexto de instituciones académicas con recursos limitados. A continuación, se discuten los hallazgos más relevantes a la luz del estado del arte, se contrastan con soluciones propietarias ampliamente utilizadas y se analizan las implicaciones prácticas, las limitaciones metodológicas y las líneas de investigación futuras.

El hallazgo más relevante de este estudio es la excepcional eficiencia en el uso de recursos computacionales. El promedio de utilización de CPU del 1 % durante 133 días continuos, con picos máximos del 15 %, indica que el servidor Lenovo ThinkServer RS160 (12 núcleos lógicos, 16 GB de RAM) opera muy por debajo de su capacidad nominal, incluso alojando simultáneamente seis servicios productivos heterogéneos (Nextcloud, Odoo ERP, herbario digital, Pi-hole, Samba AD y OpenVPN).

Este resultado no solo valida el concepto de consolidación de servidores (server consolidation) propuesto por las arquitecturas HCI, sino que sugiere que la sobrecapacidad planificada puede ser significativamente mayor de lo estimado inicialmente. En términos prácticos, esto implica que un único nodo físico de gama media (costo aproximado de \$4,200 USD) puede absorber futuros incrementos en la demanda de servicios sin requerir inversiones adicionales en hardware a corto o mediano plazo. Autores como Zhang et al. (2020) reportan que las tasas de consolidación típicas en centros de datos educativos oscilan entre 5:1 y 10:1; nuestro despliegue logra una consolidación efectiva de al menos 8:1 (ocho servicios virtualizados en un solo nodo), situándose en el extremo superior de este rango.

La estabilidad operativa del 99.98 % de disponibilidad supera los umbrales comúnmente aceptados para servicios académicos no críticos (> 99.0 %) y se aproxima a los estándares de la industria para entornos empresariales (99.9 % o "tres nueves"). Este nivel de fiabilidad, logrado sin suscripciones de soporte comercial y sobre hardware commodity, cuestiona la percepción

generalizada de que el software de código abierto es inherentemente menos estable que las soluciones propietarias para entornos productivos.

CONCLUSIONES

Este estudio demuestra que las infraestructuras hiperconvergentes de código abierto no solo son una alternativa viable a las soluciones propietarias, sino una estrategia de soberanía tecnológica y optimización de recursos para las instituciones educativas de países en desarrollo. Al romper la dependencia de proveedores externos (vendor lock-in), reducir drásticamente los costos operativos y simplificar la gestión, las universidades pueden redirigir sus recursos financieros y humanos hacia su misión sustantiva: la formación de profesionales, la generación de conocimiento y la vinculación con el entorno social.

La replicabilidad de la metodología y la disponibilidad universal del software utilizado permiten que cualquier institución, independientemente de su presupuesto, pueda acceder a una infraestructura digital de calidad, contribuyendo a cerrar la brecha tecnológica que afecta al sector educativo en América Latina.

En definitiva, la HCI de código abierto, representada por el binomio Proxmox VE-Ceph, se consolida como una herramienta de democratización tecnológica que empodera a las instituciones académicas para construir su futuro digital con autonomía, eficiencia y sostenibilidad.

REFERENCIAS

- ACNSCI. (2021). La práctica del desarrollo de la nube académica utilizando la plataforma Proxmox VE. *Engineering, Technology & Quality Journal*. <https://acnsi.org/journal/index.php/etq/article/view/36>
- Blocks & Files. (16 de marzo de 2023). Gartner: Adiós a las colas de mensajes HCI, hola al software HCI de pila completa. Blocks & Files. <https://www.blocksandfiles.com/2023/03/17/gartner-so-long-hci-mqs-hello-full-stack-hci-software>
- Ceph Day Berlín. (2015). Escalando una nube académica (presentación). Ceph Day. <https://fr.slideshare.net/slideshow/ceph-day-berlin-scaling-an-academic-cloud/47842207>
- Materiales de la comunidad Ceph. (s.f.). Ejemplos de clústeres Ceph a escala universitaria y consideraciones de diseño. *Comunidad Ceph*. <https://fr.slideshare.net/slideshow/ceph-day-berlin-scaling-an-academic-cloud/47842207>
- Indico/CERN. (2019). Ceph en el Instituto Flatiron. <https://indico.cern.ch/event/765214/contributions/3517131/attachments/1909166/3154105/CephPresentation.pdf>
- Jurnal Sistem Informasi, Sains Data, Dan Informatika. (2026). Implemente un servidor virtual que incluya Proxmox para la gestión de infraestructura. <https://www.scitepress.org/Papers/2025/131994/131994.pdf>
- Oleksiuk, VP, Oleksiuk, OR y Spirin, O. (2021). Estudio comparativo del soporte de la nube académica: Apache CloudStack frente a Proxmox VE. Actas del 2.º Simposio Myroslav I. Zhaldak sobre avances en tecnología educativa. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:260145775>
- Proxmox. (sf). Casos de éxito — Educación. Proxmox. <https://proxmox.com/en/about/about-us/stories/filter/category-4/stories/type-filter/stories/education>
- Scribd. (2025). Principales tendencias tecnológicas estratégicas de Gartner para 2023: Educación superior (libro electrónico). <https://www.scribd.com/document/669444130/2023-gartner-top-strategic-technology-trends-highered-ebook>
- SmartX. (25 de septiembre de 2023). ¡Tres años consecutivos! SmartX ha sido elegida como la opción preferida de los clientes de Gartner Peer Insights 2023 para software HCI. <https://www.smartx.com/blog/2023/09/2023-gartner-peer-insights-en/>