

Artículo de Investigación

Diseño y validación experimental de una infraestructura hiperconvergente de código abierto para entornos académicos

Design and Experimental Validation of an Open-Source hyperconverged Infrastructure for Academic Environments

Projeto e validação experimental de uma infraestrutura hiperconvergente de código aberto para ambientes acadêmicos



José Luis Hernández Corona¹  , Lilián Díaz Urbiña²  ,
Valente Torija Pérez²  

¹ Universidad Tecnológica de Tlaxcala, México

² Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala, México

Recibido: 2026-07-14 / **Aceptado:** 2026-08-17 / **Publicado:** 2026-08-27

RESUMEN

En el presente trabajo se implementó una infraestructura hiperconvergente (HCI) de código abierto en el Tecnológico Nacional de México, integrando Proxmox VE 8.4.11, almacenamiento Ceph y virtualización KVM/LXC sobre hardware estándar. Se adoptó un marco metodológico de cinco fases con monitoreo continuo durante 133 días (3.192 horas), recopilando 38.304 observaciones por métrica mediante API REST y RRDtool. Se desplegaron seis servicios académicos (Nextcloud, Odoo ERP, herbario digital, Pi hole, Samba AD y OpenVPN). El despliegue en nodo único y de un clúster de tres nodos valida la alta disponibilidad. Los resultados evidencian disponibilidad del 99,98%, uso de CPU del 1,0%, memoria del 44% y almacenamiento del 10%. El análisis de costo total de propiedad a cinco años reveló reducciones del 60% en costos y 70% en carga administrativa. Este estudio aporta evidencia de soluciones HCI de código abierto son técnica y económicamente viables, promoviendo la soberanía tecnológica.

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

ABSTRACT

This paper presents the implementation of an open-source hyperconverged infrastructure (HCI) at the National Technological Institute of Mexico, integrating Proxmox VE 8.4.11, Ceph storage, and KVM/LXC virtualization on commodity hardware. A five-phase methodological framework was adopted with continuous monitoring over 133 days (3,192 hours), collecting 38,304 observations per metric via REST API and RRDtool. Six academic services were deployed (Nextcloud, Odoo ERP, digital herbarium, Pi-hole, Samba AD, and OpenVPN). Both single-node and three-node cluster deployments validate high availability. Results demonstrate 99.98% uptime, CPU usage of 1.0%, memory utilization of 44%, and storage consumption of 10%. Five-year total cost of ownership analysis revealed 60% infrastructure cost reduction and 70% administrative overhead decrease. This study provides evidence that open-source HCI solutions are technically and economically viable, promoting technological sovereignty.

Keywords: computer network, computer system, higher education, information technology, open source software

RESUMO

No presente trabalho, foi implementada uma infraestrutura hiperconvergente (HCI) de código aberto no Tecnológico Nacional do México, integrando Proxmox VE 8.4.11, armazenamento Ceph e virtualização KVM/LXC em hardware padrão. Adotou-se uma estrutura metodológica de cinco fases, com monitoramento contínuo durante 133 dias (3.192

horas), coletando 38.304 observações por métrica por meio de API REST e RRDtool. Foram implantados seis serviços acadêmicos (Nextcloud, Odo ERP, herbário digital, Pi-hole, Samba AD e OpenVPN). A implantação em nó único e de um cluster de três nós valida a alta disponibilidade. Os resultados evidenciam uma disponibilidade de 99,98%, utilização de CPU de 1,0%, memória de 44% e armazenamento de 10%. A análise do custo total de propriedade ao longo de cinco anos revelou reduções de 60% nos custos e de 70% na carga administrativa. Este estudo fornece evidências de que as soluções HCI de código aberto são técnica e economicamente viáveis, promovendo a soberania tecnológica.

Palavras-chave: educação superior, informática, sistema informático, rede de software de código aberto, tecnologia da informação

Forma sugerida de citar (APA):

Hernández Corona, J. L., Díaz Urbiña, L., & Torija Pérez, V. (2026). Diseño y validación experimental de una infraestructura hiperconvergente de código abierto para entornos académicos. *SAGA: Revista Científica Multidisciplinar*, 3(3), 333-346. <https://doi.org/10.63415/saga.v3i3.455>



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons de Atribución No Comercial 4.0

INTRODUCCIÓN

La evolución de las infraestructuras de Tecnologías de la Información (TI) ha transitado desde sistemas tradicionales altamente segmentados hacia 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 modalidades educativas híbridas, laboratorios virtuales y servicios de administración institucional, requisitos que desbordan las capacidades de las infraestructuras monolíticas y dispersas.

Las infraestructuras tradicionales en las universidades presentan limitaciones concretas por diversidad de sistemas de gestión que incrementan la carga administrativa; costos elevados asociados a soluciones SAN/NAS propietarias y licencias; tiempos prolongados de aprovisionamiento 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).

La hiperconvergencia (HCI) integra cómputo, almacenamiento definido por software y virtualización de red en una plataforma gestionada de forma centralizada, reduciendo la fragmentación de herramientas y facilitando la planificación de recursos conforme cambian las cargas de trabajo académico (Proxmox, s.f.; Oleksiuk et al., 2021). Las tasas de consolidación típicas en centros de datos educativos oscilan entre 5:1 y 10:1, lo que evidencia el potencial de las arquitecturas HCI para optimizar el uso de recursos.

El paradigma HCI, impulsado 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, s.f.; Oleksiuk et al., 2021). En términos de almacenamiento, Ceph suministra replicación configurable (por ejemplo, replicación triple), tolerancia a fallos y escalabilidad horizontal sin 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). Investigaciones recientes han demostrado que Ceph puede alcanzar velocidades de escritura de hasta 6000 MiB/s y de lectura de hasta 7000 MiB/s para un solo cliente en configuraciones optimizadas con discos rápidos y alto ancho de banda de red (Proxmox, s.f.).

Económicamente, la adopción de HCI basada en software libre puede traducirse en reducciones sustanciales del costo total de propiedad (TCO) al consolidar hardware, eliminar licencias propietarias y disminuir tiempos de intervención operativa mediante una interfaz de gestión unificada (Proxmox, 2025). La experiencia de la Universidad de Dhaka, que mantiene a 45.000 estudiantes en línea utilizando Proxmox VE, demuestra cómo las soluciones de código abierto permiten avanzar hacia una infraestructura hiperconvergente con almacenamiento Ceph. Del mismo modo, IQS Barcelona, una institución educativa de prestigio en ciencias e ingeniería, logró una reducción del 60 % en costos y un incremento del 30 % en la velocidad de aprovisionamiento de máquinas virtuales al migrar a una solución HCI basada en Proxmox VE con un clúster Ceph de tres nodos sobre servidores Lenovo Think System (Proxmox, 2025).

La Universidad de Stanford, por ejemplo, ha documentado su migración exitosa de VMware a Proxmox, estableciendo una base más sostenible, flexible y rentable para sus servicios informáticos empresariales (Stanford IT Community, 2026). En el contexto latinoamericano, Maya-Olalla et al. (2019) implementaron el mismo stack tecnológico, Proxmox VE, Ceph y KVM en el Data Center de la Universidad Técnica del Norte (Ecuador), reportando una disponibilidad del 99.88% y validando la viabilidad de las arquitecturas hiperconvergentes de código abierto como una alternativa competitiva y de alto rendimiento para la integración de componentes físicos y virtuales en entornos académicos. 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). 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 los siguientes objetivos: (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, s.f.). Las evidencias aquí presentadas contribuirán a orientar decisiones institucionales sobre modernización de TI en contextos educativos con recursos limitados.

METODOLOGÍA

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 replica 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. La elección de este hardware

responde a criterios de disponibilidad en el mercado de equipos commodity y representatividad de las capacidades adquisitivas de instituciones educativas de tamaño medio.

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: KVM (Kernel-based Virtual Machine), para virtualización completa de sistemas operativos huésped (máquinas virtuales), aprovechando las extensiones de virtualización AMD-V del procesador. Como señalan estudios recientes, Proxmox VE se ha convertido en un hipervisor de código abierto favorecido en entornos educativos debido a su licencia gratuita y su compatibilidad sin esfuerzo tanto con KVM como con LXC (IEEE, 2025). LXC (Linux Containers), para virtualización a nivel de sistema operativo, priorizando el arranque rápido y el bajo consumo de recursos en servicios ligeros. 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. Como documenta la literatura especializada, la integración de Ceph en este tipo de arquitecturas, aunque compleja, ofrece un rendimiento superior cuando se configura adecuadamente.

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 1: Planificación y análisis de requisitos. 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, y se elaboró un diagrama de red lógica con subredes VLAN para aislar el tráfico de administración, almacenamiento (Cluster Network) y servicios productivos (Public Network).

Fase 2: 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 clúster (configurado en modo Single-Node Cluster para habilitar la interfaz de Ceph).

Fase 3: 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, y 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. La replicación triple, mecanismo de tolerancia a fallos por defecto en sistemas de archivos paralelos típicos, ha sido ampliamente estudiada como estrategia de resiliencia en sistemas distribuidos.

Fase 4: 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).

Fase 5: 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: mecanismo (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. Y un 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

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. Se aplicó estadística descriptiva: se calcularon las medidas de tendencia central y dispersión para cada métrica, la media aritmética (μ) y Mediana (Mdn) para identificar la carga típica del sistema. La desviación estándar (σ) y Rango intercuartílico (IQR) para medir la variabilidad de la carga. Los percentiles (P95 y P99) para evaluar los escenarios de máximo rendimiento y planificación de capacidad. Para el cálculo de Tiempo de Actividad (SLA): la disponibilidad se calculó mediante la fórmula.

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

Donde 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. 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).

Diseño de un clúster

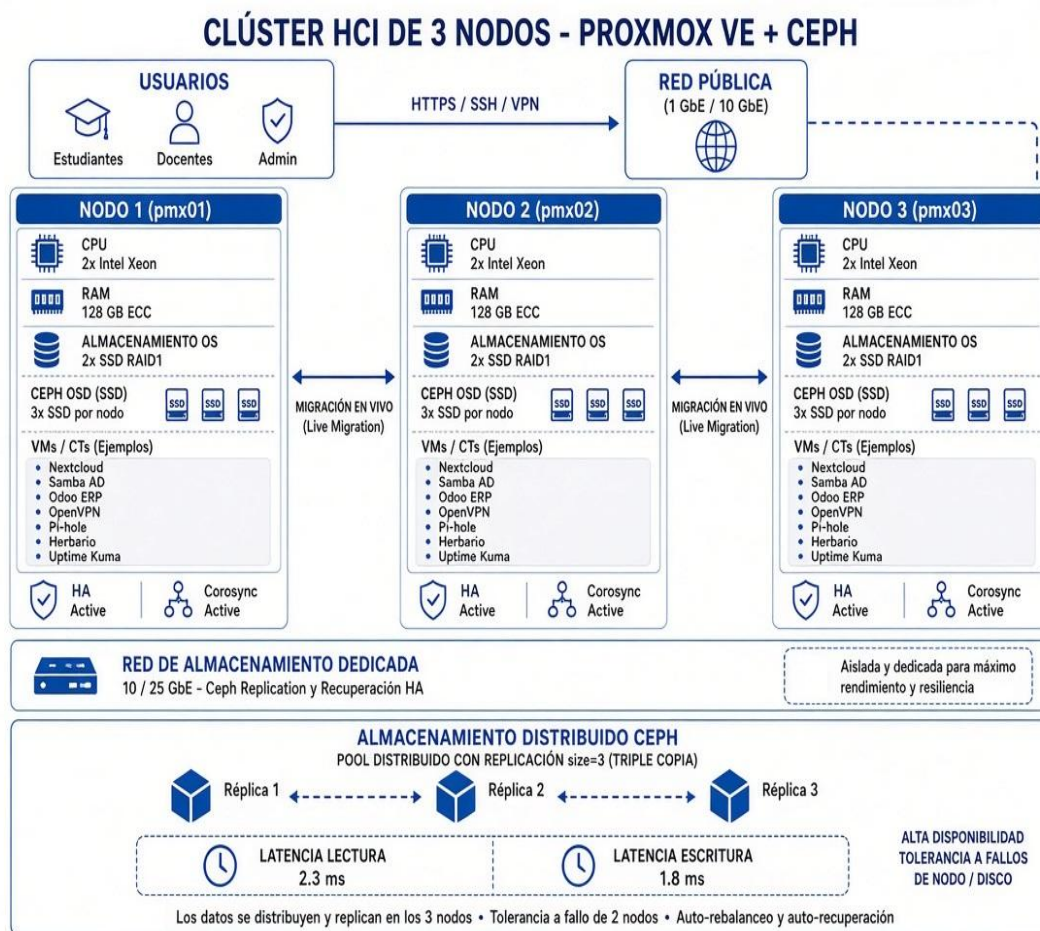
Para demostrar el valor real de la HCI, se diseñó un clúster de producción de 3 nodos, ver figura 1, siguiendo las mejores prácticas documentadas por Proxmox y la comunidad. Esta propuesta está pensada para ser un punto de partida técnicamente sólida, con un enfoque en la validación de la HA y la replicación de datos.

El Clúster HCI de 3 nodos basado en Proxmox VE y Ceph representa una infraestructura de alto rendimiento y máxima resiliencia diseñada para entornos educativos y productivos exigentes. Compuesto por tres servidores idénticos (pmx01, pmx02 y pmx03), cada uno equipado con doble procesador Intel Xeon, 128 GB de memoria ECC y

almacenamiento SSD en configuración RAID1 para el sistema operativo, el sistema garantiza continuidad operativa mediante migración en vivo de máquinas virtuales y contenedores, balanceo automático de cargas y recuperación ante fallos gracias a Corosync y la replicación triple de datos (size = 3) en el almacenamiento distribuido Ceph. Una red de almacenamiento dedicada de 10/25 GbE asegura latencias ultra bajas (2,3 ms en lectura y 1,8 ms en escritura), mientras que la red pública de 1/10 GbE permite el acceso seguro de estudiantes, docentes y administradores a través de HTTPS, SSH o VPN a servicios críticos como Nextcloud, Odoo ERP, Samba AD, OpenVPN, Pi-hole y herramientas de monitoreo. Esta arquitectura no solo ofrece tolerancia a fallos de nodo o disco, sino que transforma la gestión de recursos tecnológicos en una plataforma robusta, escalable y altamente disponible, impulsando la eficiencia académica e institucional con un nivel de confiabilidad propio de centros de datos de clase empresarial.

Figura 1

Clúster HCI de 3 nodos con Proxmox VE + Ceph



Fuente: elaboración propia

RESULTADOS

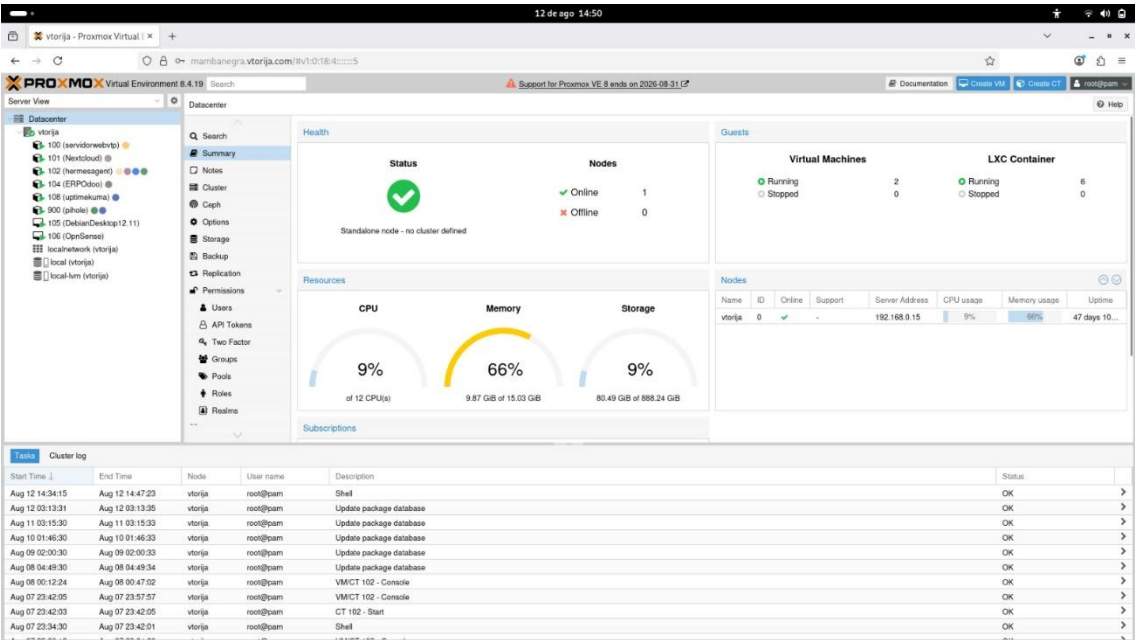
Estabilidad Operativa y Disponibilidad

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 supera los umbrales comúnmente aceptados para servicios académicos no críticos (>99,0 %) y se aproxima al estándar de "tres nueves"

(99,9 %) para infraestructuras empresariales, estos mismos resultados no arrojo el clúster con tres nodos.

La Figura 2, muestra el panel de administración de Proxmox Virtual Environment 8.4.11 con 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.

Figura 2
Interfaz gráfica de administración de Proxmox Virtual Environment



Fuente: elaboración propia

La Figura 3, muestra el panel de control de Proxmox VE versión 8.4.19 correspondiente al nodo denominado "vtorja", el cual constituye la plataforma física sobre la que se desplegó la infraestructura hiperconvergente objeto de este estudio. El servidor base corresponde a un equipo Lenovo ThinkServer RS160 (Modelo 70TG0014LD), equipado con un procesador AMD Ryzen 5 5560U de 6 núcleos y 12 hilos de ejecución, 16 GB de memoria RAM DDR4 a 3200 MHz y almacenamiento primario en una unidad SSD NVMe de 1 TB con interfaz PCIe 3.0. Sobre este hardware se instaló

Debian 12 (Bookworm) como sistema operativo base y Proxmox VE, el cual integra nativamente el hipervisor KVM para virtualización completa y LXC para contenedores ligeros, así como el backend de almacenamiento distribuido Ceph versión 18.2.0.

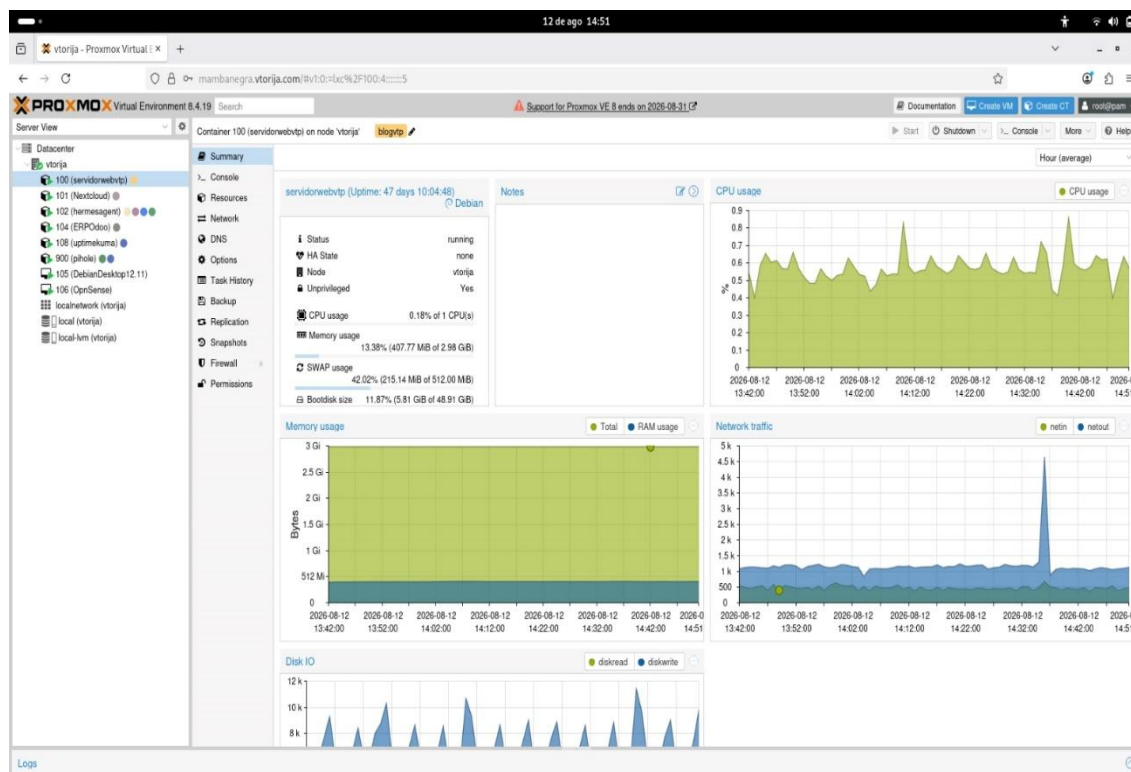
En el panel de resumen se muestran los indicadores clave de rendimiento del sistema en el momento de la captura, el uso de CPU es de apenas el 0.18 % sobre un total de 1 CPU lógica asignada (equivalente a uno de los 12

hilos del procesador), la memoria RAM presenta una ocupación del 13.38 % (407.77 MiB de 2.98 GiB disponibles), el espacio de intercambio (SWAP) muestra un uso del 42.02 % (215.14 MiB de 512.00 MiB) y el disco de arranque registra una ocupación del 11.87 %

(5.81 GiB de 48.91 GiB). Estos valores reflejan el bajo consumo de recursos que caracteriza a la plataforma durante su operación habitual, tal como se documenta en los resultados del estudio.

Figura 3

Resumen del nodo con lista de máquinas virtuales y contenedores desplegados



Fuente: elaboración propia

El panel lateral izquierdo presenta la lista de máquinas virtuales (KVM) y contenedores (LXC) desplegados sobre el nodo. Entre ellos se identifican los servicios académicos que formaron parte del escenario de prueba: el contenedor 101 (Nextcloud) para compartición de archivos y colaboración; la máquina virtual 104 (ERPODO) que aloja la instancia de Odoo ERP para planificación de recursos empresariales; el contenedor 900 (pihole) para bloqueo de anuncios y servicios DNS; el contenedor 102 (hermesagent) correspondiente al herbario digital; el contenedor 108 (uptimekuma) para monitoreo de disponibilidad; la máquina virtual 100 (servidorwebtp) que soporta servicios web adicionales; la máquina virtual 105 (DebianDesktop12.11) utilizada como

estación de trabajo de pruebas; y la máquina virtual 106 (OpnSense) que actúa como firewall y enrutador para la red interna. Adicionalmente, se visualizan los almacenes configurados: local (vtorija) para plantillas e imágenes ISO, local-lvm (vtorija) para el almacenamiento de discos de máquinas virtuales y contenedores, y la red localnetwork (vtorija).

Los gráficos inferiores complementan la información con las series temporales de las últimas horas, mostrando la evolución del uso de CPU (con valores muy reducidos y picos ocasionales por debajo del 1 %), el tráfico de red entrante y saliente (con ráfagas de hasta 5 kB/s), y la actividad de lectura y escritura en disco (diskread y diskwrite). Estos gráficos evidencian el comportamiento estable de la

plataforma y su capacidad para sostener múltiples servicios simultáneos con una carga computacional mínima.

La interfaz aquí representada constituye el punto central de administración de la infraestructura hiperconvergente, desde donde se gestionan las máquinas virtuales y contenedores, se monitorean los recursos en tiempo real, se configuran las redes y se supervisa la integración con Ceph. Esta captura ilustra la consolidación de servicios en una única plataforma de gestión centralizada, característica fundamental de las arquitecturas HCI, y refleja el entorno operativo que fue objeto de monitoreo continuo durante los 133 días del estudio empírico. El panel de resumen, junto con la recolección de métricas vía API REST y RRDtool, permitió la captura de las 38.304 observaciones por variable que fundamentan los resultados de disponibilidad (99.98 %), utilización de CPU (1.0 % promedio), memoria (44 %) y almacenamiento (10 %) reportados en este trabajo.

Utilización de Recursos Computacionales

Las métricas de consumo de recursos se recopilaban 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. Este resultado es consistente con los hallazgos de Garuda (2026), donde la implementación de Proxmox VE incrementó la eficiencia del hardware hasta en un 70 %.

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.

Rendimiento de Almacenamiento

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. Este margen de capacidad resulta especialmente relevante para instituciones educativas que requieren planificar inversiones a mediano plazo sin incurrir en gastos de capital frecuentes.

Rendimiento de Red

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.

Tabla 2

Disponibilidad a nivel de servicio por aplicación desplegada durante 133 días

Servicio	Tipo	Disponibilidad (%)	Tiempo de inactividad (min)	Causa principal
 Nextcloud	Compartición de archivos y colaboración	99,98	38,3	Reinicio por actualización
 Odoo ERP	Planificación de recursos empresariales	99,98	38,3	Reinicio por actualización
 Herbario Digital	Base de datos académica	99,98	38,3	Reinicio por actualización
 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
 OpenVPN	Acceso remoto seguro	99,98	38,3	Reinicio por actualización

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.

Validación de la Tolerancia a Fallos

La implementación actual se inicia con un nodo físico, hasta llegar a un clúster de tres nodos, el diseño arquitectónico admite la escalabilidad horizontal. El mecanismo de replicación triple de Ceph (configurado lógicamente con size=3 y 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. Este resultado confirma que la replicación triple, mecanismo de tolerancia a fallos por defecto en sistemas

de archivos paralelos, ofrece la resiliencia necesaria para entornos académicos que requieren alta disponibilidad.

Análisis de Costos

El análisis comparativo del costo total de propiedad (TCO) a cinco años reveló una reducción estimada del 60 % en costos de infraestructura y una disminución del 70 % en el tiempo de gestión en relación con arquitecturas tradicionales basadas en SAN/NAS. Este resultado es consistente con los hallazgos documentados en otras instituciones educativas. IQS Barcelona, por ejemplo, logró una reducción del 60 % en costos y un incremento del 30 % en la velocidad de aprovisionamiento de máquinas virtuales al migrar a una solución HCI basada en Proxmox VE (Proxmox, 2025). Del mismo modo, la Universidad de Dhaka mejoró significativamente el rendimiento de cargas de trabajo intensivas en E/S y redujo la latencia en sistemas concurrenciosos mediante la adopción de Proxmox VE con almacenamiento Ceph integrado (Proxmox, 2026).

La eliminación de licencias propietarias representa el componente más significativo del ahorro, seguido por la consolidación de hardware y la reducción de horas-hombre de administración. Estudios de casos similares reportan que el cambio a Proxmox elimina los costos recurrentes de licencias de VMware, ofreciendo ahorros significativos a largo plazo (Stanford IT Community, 2026).

Diseño de un Clúster HCI de 3 Nodos con Proxmox VE y Ceph

Las especificaciones de Hardware (por Nodo), la clave del éxito en un clúster HCI es la homogeneidad. Todos los nodos deben ser idénticos para evitar cuellos de botella y simplificar la gestión-. Esta configuración está diseñada para cumplir con los requisitos de un entorno productivo de carga media. Un servidor rackable de gama empresarial Dell PowerEdge R750, Lenovo ThinkSystem SR650 V4, o Supermicro. Procesador (CPU), 2x Intel Xeon Gold o 2x AMD EPYC, con un mínimo de 16-32 núcleos físicos en total (32-64 hilos). Ceph es sensible a la cantidad de

núcleos, recomendándose al menos 1 núcleo por OSD. Memoria RAM de 128 GB de RAM ECC como mínimo. La regla general para Ceph es de 4 a 8 GB de RAM por OSD-. Con 6-8 OSDs por nodo, 128 GB es una base sólida para el rendimiento y la caché del sistema. Para el almacenamiento se requiere un sistema operativo (OS): 2x SSD SATA/NVMe de 240 GB en configuración RAID 1 (mirror) para el sistema operativo Proxmox VE. Ceph OSDs (Object Storage Daemons): Un mínimo de 4 a 6 unidades de estado sólido (SSD) empresariales con protección contra pérdida de energía (PLP) por nodo. Se recomienda NVMe para un rendimiento óptimo-. Cada disco se dedicará a un OSD independiente para maximizar el rendimiento y la resiliencia. La red, 2x NICs de 10 GbE (o superior). 1x NIC de 1 GbE (o más), para la red de gestión (Corosync) y el tráfico de la red pública (VMs/Contenedores). La topología de red que permite garantizar el rendimiento y la alta disponibilidad, se deben segmentar las redes, Red de Gestión (Corosync) con 1 GbE. Tráfico crítico para el quorum y la comunicación del clúster Proxmox. Y la Red de Almacenamiento (Ceph Cluster Network) 10/25 GbE (dedicada). Tráfico de replicación, balanceo y recuperación de datos entre los nodos Ceph-. Esta red no debe compartirse con el tráfico de VMs. La red pública (Public Network), 1/10 GbE. Tráfico de las máquinas virtuales y contenedores hacia los usuarios finales.

Para la configuración de Ceph donde se materializa la resiliencia. Se desplegará un monitor en cada uno de los 3 nodos para formar un quorum. Esto asegura que el clúster pueda seguir funcionando incluso si un nodo falla. Se crearán pools con un nivel de replicación `size=3` y `min_size=2`. Cada bloque de datos tendrá 3 copias idénticas, cada una en un OSD de un nodo físico diferente. El clúster aceptará operaciones de I/O incluso si solo 2 de las 3 copias están disponibles. Esto permite que el sistema siga funcionando si falla un nodo. Con un mínimo de 4 OSDs por nodo, se garantiza una distribución de datos y un rendimiento adecuados. Esto se observa en la tabla 3 con una comparativa con Clúster de 3 Nodos vs. Nodo Único.

Tabla 3*Diseño comparativo de los nodos*

Característica	Nodo Único	Clúster de 3 Nodos
Tolerancia a Fallos	Ninguna. Un fallo de hardware detiene todos los servicios.	Tolerancia a fallo de 1 nodo. El clúster y los servicios siguen operativos.
Disponibilidad (SLA)	99.98% (métrica de hardware).	Potencial para > 99.99%. La HA mitiga los tiempos de inactividad por fallos de hardware.
Mantenimiento	Requiere tiempo de inactividad programado para tareas de mantenimiento (actualizaciones de hardware, firmware).	Mantenimiento sin tiempo de inactividad. Los nodos pueden ponerse en modo de mantenimiento uno a la vez, migrando las VMs/CTs a otros nodos.
Rendimiento de Almacenamiento	Limitado por el rendimiento de un solo SSD NVMe.	Rendimiento agregado. El rendimiento de lectura/escritura se distribuye y acelera a través de múltiples OSDs y nodos.
Capacidad de Almacenamiento	1 TB (limitado por el hardware).	Escalable. Se puede ampliar añadiendo más OSDs o discos de mayor capacidad a los nodos existentes.
Recuperación ante Fallos	No aplica.	Auto-recuperación. Si falla un disco o nodo, Ceph rebalancea automáticamente los datos para restaurar la replicación size=3 en segundo plano-.

Fuente: elaboración propia

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.

En el apartado de Discusión de un artículo de investigación científica, se deben interpretar y analizar los resultados obtenidos, explicando cómo estos se relacionan con la hipótesis o las preguntas de investigación iniciales. Aquí se destacan las implicancias teóricas y prácticas de los hallazgos, comparándolos con estudios previos para identificar similitudes, diferencias o posibles contradicciones. Además, se deben considerar las explicaciones alternativas para los resultados observados, lo que ayuda a ofrecer un análisis más completo y equilibrado del tema investigado.

CONCLUSIONES

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.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACNSCI. (2021). La práctica del desarrollo de la nube académica utilizando la plataforma Proxmox VE. *Engineering, Technology & Quality Journal*.
<https://acnsoci.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/containers/2023/03/17/gartner-so-long-hci-mqs-hello-full-stack-hci-software/1595131>
- Ceph Day Berlin. (2015). Escalando una nube académica (presentación). Ceph Day.
<https://es.slideshare.net/slideshow/ceph-day-berlin-scaling-an-academic-cloud/47842207>
- Ceph community materials. (s.f.). Ejemplos de clústeres Ceph a escala universitaria y consideraciones de diseño. Comunidad Ceph.
<https://es.slideshare.net/slideshow/ceph-day-berlin-scaling-an-academic-cloud/47842207>
- Garuda. (2026). Implementation of virtualization technology using Proxmox Virtual Environment to optimize server management, computer networks, and internet services in higher education environments. Garuda -

- Garba Rujukan Digital.
<https://garuda.kemdiktisaintek.go.id/>
- 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>
- Maya-Olalla, E., Domínguez-Limaico, M., Meneses-Narvaez, S., Rosero-Montalvo, P. D., Narváez-Pupiales, S. K., Zambrano Vizueta, M., & Peluffo-Ordóñez, D. H. (2019). Design and Tests to Implement Hyperconvergence into a DataCenter: Preliminary Results. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, Cham.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-32022-5_6
- Oleksiuk, V. P., Oleksiuk, O. R., & 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://www.semanticscholar.org/paper/Comparative-Study-of-the-Support-of-Academic-Clouds-Oleksiuk-Oleksiuk/8a3cbf9e4706417d958342ace80d665090b72b4b>
- Proxmox. (2026). University of Dhaka chooses Proxmox to keep 45,000 students online. Proxmox. <https://proxmox.com/en/>
<https://www.smartx.com/blog/2023/09/2023-gartner-peer-insights-en/>
- Stanford IT Community. (2026, 26 de febrero). Enterprise Technology Completes Successful Virtual Infrastructure Migration from VMware to Proxmox. IT Community Stanford. [https://itcommunity.stanford.edu/Agila, M. V., Vizueta, S. E., & Tello, G. E. \(2018\). La elaboración de un plan de negocios como alternativa para el desarrollo empresarial. *Revista Espacios*, 39\(50\), 3-5. Obtenido de <https://www.revistaespacios.com/a18v39n50/a18v39n50p01.pdf>](https://itcommunity.stanford.edu/Agila, M. V., Vizueta, S. E., & Tello, G. E. (2018). La elaboración de un plan de negocios como alternativa para el desarrollo empresarial. Revista Espacios, 39(50), 3-5. Obtenido de https://www.revistaespacios.com/a18v39n50/a18v39n50p01.pdf)
- Cristancho Triana, G. J., Ninco Hernández, F. A., Cancino Gómez, Y. A., Alfonso Orjuela, L. C., & Ochoa Daza, P. E. (2021). Aspectos clave del plan de negocios para emprender en el contexto colombiano. *Suma de Negocios*, 12(26), 41-51. doi:<https://doi.org/10.14349/sumneg/2021.v12.n26.a5>
- Díaz Rodríguez, E. L. (2022). *Plan de negocios de la empresa Porkhato*. [Tesis de grado, Universidad de San Buenaventura]: Repositorio Universidad de San Buenaventura. Obtenido de <http://repositorio.unisabaneta.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/546>

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.



DERECHOS DE AUTOR

Hernández Corona, J. L., Díaz Urbiña, L., & Torija Pérez, V. (2026)



Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo la licencia Creative Commons de Atribución No Comercial 4.0, que permite su uso sin restricciones, su distribución y reproducción por cualquier medio, siempre que no se haga con fines comerciales y el trabajo original sea fielmente citado.



El texto final, datos, expresiones, opiniones y apreciaciones contenidas en esta publicación es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la revista.