



UFC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SOFTWARE

HELOÍSA ÉVEN FEITOZA RICARDINO

**ARQUITETURA DE NUVEM PRIVADA PARA AMBIENTES ACADÊMICOS
HETEROGÊNEOS: UM ESTUDO DE PLANEJAMENTO E REAPROVEITAMENTO
DE HARDWARE COM PROXMOX VE**

RUSSAS

2026

HELOÍSA ÉVEN FEITOZA RICARDINO

ARQUITETURA DE NUVEM PRIVADA PARA AMBIENTES ACADÊMICOS
HETEROGÊNEOS: UM ESTUDO DE PLANEJAMENTO E REAPROVEITAMENTO DE
HARDWARE COM PROXMOX VE

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia de Software da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Software. Área de concentração: Sistemas Distribuídos.

Orientador: Prof. Ms. Pitágoras Graça Martins.

RUSSAS

2026

HELOÍSA ÉVEN FEITOZA RICARDINO

ARQUITETURA DE NUVEM PRIVADA PARA AMBIENTES ACADÊMICOS
HETEROGÊNEOS: UM ESTUDO DE PLANEJAMENTO E REAPROVEITAMENTO DE
HARDWARE COM PROXMOX VE

Monografia apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia de Software da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Software. Área de concentração: Sistemas Distribuídos.

Aprovada em: 06/07/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ms. Pitágoras Graça Martins (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ms. Hugo Nathan Barbosa Regis
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Mayrton Dias de Queiroz
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me dado a força necessária para enfrentar os dias mais difíceis ao longo desta graduação.

Aos meus pais, Silvana e José, por me apoiarem mesmo de tão longe; sei que não foi fácil enviar a filha caçula para outra cidade, eu amo muito vocês. Em especial à minha mãe, que não me permitiu desistir e me mostrou a importância e a força do nosso vínculo, independentemente da distância.

Às minhas irmãs, Beatriz e Isadora, por sempre compreenderem as minhas dificuldades acadêmicas, por me incentivarem a enfrentá-las e por serem lar mesmo com a distância; nunca me esquecerei do apoio de vocês.

Aos meus amigos da faculdade, que me acolheram e fizeram com que eu me sentisse um pouco menos deslocada, atenuando a saudade de casa; amo todos vocês.

Ao meu professor e orientador, Pitágoras, que nunca me deixou desistir e acreditou no meu potencial até o fim. O senhor me devolveu a esperança na educação e despertou em mim o desejo de seguir a carreira acadêmica; deixo aqui o meu mais sincero obrigado.

Por fim, agradeço aos professores participantes da banca examinadora pelo tempo dedicado, pelas valiosas colaborações e pelas sugestões. Muito obrigada por fazerem parte da minha jornada.

RESUMO

Este trabalho aborda a problemática da heterogeneidade e obsolescência do parque tecnológico nos laboratórios compartilhados da UFC Campus de Russas. A manutenção individualizada de softwares nesses ambientes gera sobrecarga de trabalho e falta de padronização, prejudicando a experiência acadêmica multidisciplinar. O objetivo deste estudo é projetar a arquitetura lógica e avaliar a viabilidade técnica de uma nuvem privada baseada em Proxmox VE, focando no reaproveitamento de hardware legado composto por processadores Intel Core i5-3470, 8 GiB de RAM e unidades SSD de 120 GB. A metodologia empregada caracteriza-se por uma abordagem hipotético-dedutiva, utilizando a estratégia de estudo de caso e uma modelagem analítica quantitativa fundamentada em especificações técnicas para o dimensionamento de recursos. Os resultados analíticos indicam que a virtualização por contêineres LXC sustenta de forma estável a carga simultânea de 30 usuários sob perfis de desenvolvimento leve. Contudo, a modelagem de densidade de memória aponta limitações severas no teto físico de RAM útil por nó (6,5 GiB), indicando a inviabilidade de cenários de virtualização completa (KVM) com interfaces gráficas pesadas executadas em escala máxima síncrona. Conclui-se que o modelo arquitetural proposto apoia a viabilidade técnica da nuvem privada para o campus, convertendo restrições físicas em uma infraestrutura centralizada e resiliente, delegando a validação empírica do desempenho do cluster por meio de ensaios físicos de estresse como recomendação para trabalhos futuros.

Palavras-chave: computação em nuvem; nuvem privada; virtualização; proxmox VE; reaproveitamento de hardware.

ABSTRACT

This study addresses the operational challenges arising from technological heterogeneity and hardware obsolescence in the shared computer laboratories at UFC Campus de Russas. The individualized installation and maintenance of software in these environments lead to workload overhead and a lack of standardization, which negatively impacts the multidisciplinary academic experience. The objective of this study is to design the logical architecture and evaluate the technical viability of a private cloud based on the Proxmox VE platform, focusing on the reuse of legacy hardware comprising Intel Core i5-3470 processors, 8 GiB of RAM, and 120 GB SSD units. The methodology is characterized by a hypothetic-deductive approach, utilizing a case study strategy and a quantitative analytical modeling based on technical specifications for resource sizing. The analytical results indicate that virtualization through LXC containers stably sustains a simultaneous load of 30 users under lightweight development profiles. However, the memory density modeling points out severe limitations in the useful physical RAM ceiling per node (6.5 GiB), indicating the unfeasibility of full virtualization scenarios (KVM) with heavy graphical interfaces executed under synchronous maximum capacity. It is concluded that the proposed architectural model supports the technical viability of the private cloud for the campus, converting physical constraints into a centralized and resilient infrastructure, while delegating the empirical validation of the cluster performance through physical stress testing as a recommendation for future work.

Keywords: Cloud Computing; Private Cloud; Virtualization; Proxmox VE; Hardware Reuse.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Densidade de Memória Projetada por Nó.....	33
Tabela 2	Matriz Multidisciplinar de <i>Golden Images</i> por Perfil de Curso.....	37
Tabela 3	Matriz de Métricas e Veredito de Viabilidade.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIOS	<i>Basic Input/Output System</i> (Sistema Básico de Entrada/Saída)
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidade Central de Processamento)
DNS	<i>Domain Name System</i> (Sistema de Nomes de Domínio)
EULA	<i>End-User License Agreement</i> (Contrato de Licença de Usuário Final)
HDD	<i>Hard Disk Drive</i> (Unidade de Disco Rígido)
IaaS	<i>Infrastructure as a Service</i> (Infraestrutura como Serviço)
I/O	<i>Input/Output</i> (Entrada/Saída)
IES	Instituições de Ensino Superior
IOPS	<i>Input/Output Operations Per Second</i> (Operações de Entrada/Saída por Segundo)
IP	<i>Internet Protocol</i> (Protocolo de Internet)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
KSM	<i>Kernel Same-page Merging</i> (Recurso do Kernel para compartilhamento de páginas de memória)
KVM	<i>Kernel-based Virtual Machine</i> (Máquina Virtual Baseada no Kernel)
LVM	<i>Logical Volume Manager</i> (Gerenciador de Volumes Lógicos)
LVM-thin	<i>LVM Thin Provisioning</i> (Provisionamento Fino em LVM)
LXC	<i>Linux Containers</i> (Contêineres Linux)
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i> (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia)
PaaS	<i>Platform as a Service</i> (Plataforma como Serviço)
pmxcfs	<i>Proxmox Cluster File System</i> (Sistema de Arquivos de Cluster do Proxmox)
PVE	<i>Proxmox Virtual Environment</i> (Ambiente Virtual Proxmox)
QDevice	<i>Quorum Device</i> (Dispositivo de Quorum para votação em clusters)
RAM	<i>Random Access Memory</i> (Memória de Acesso Aleatório)

SaaS	<i>Software as a Service</i> (Software como Serviço)
SSD	<i>Solid State Drive</i> (Unidade de Estado Sólido)
UEFI	<i>Unified Extensible Firmware Interface</i> (Interface Unificada de Firmware Extensível)
UFC	Universidade Federal do Ceará
USB	<i>Universal Serial Bus</i> (Barramento Serial Universal)
VE	<i>Virtual Environment</i> (Ambiente Virtual)
VM	<i>Virtual Machine</i> (Máquina Virtual)
VT-d Direcionada)	<i>Virtualization Technology for Directed I/O</i> (Tecnologia de Virtualização para E/S Direcionada)
VT-x	<i>Virtualization Technology for x86</i> (Tecnologia de Virtualização para x86)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1	Conceitos Fundamentais de Computação em Nuvem	4
2.2	Virtualização e Hypervisors	6
2.3	Benefícios e Desafios da Computação em Nuvem no Ensino Superior	7
2.4	Gestão Técnica de Recursos no Proxmox VE.....	10
3	TRABALHOS CORRELATOS	12
3.1	Desafios da Adoção de Nuvem em Instituições de Ensino Superior	12
3.2	Otimização de Recursos com Nuvens Privadas e Proxmox	13
3.3	Modernização de Laboratórios Acadêmicos com Nuvem de Código Aberto	13
3.4	Contribuição e Destaque do Presente Estudo	14
4	METODOLOGIA	16
4.1	Tipo de Pesquisa	16
4.2	Método de Abordagem	17
4.3	Objetivos da Pesquisa.....	18
4.4	Procedimentos Metodológicos	18
4.5	Definição do Objeto de Estudo e Parâmetros Técnicos	20
4.6	Instrumentos de Coleta de Dados	20
4.7	Técnicas de Análise de Dados	22
4.8	Configurações de Hardware e Passos de Implementação	22
4.8.1	<i>Configurações dos Computadores</i>	23
4.8.2	<i>Diretrizes de Configuração e Planejamento da Arquitetura</i>	23
4.8.2.1	<i>Planejamento de Infraestrutura de Rede.</i>	23
4.8.2.2	<i>Protocolo de Instalação e Parametrização do Hypervisor</i>	24
4.8.2.3	<i>Modelagem de Cluster e Lógica de Resiliência</i>	24
4.8.2.4	<i>Planejamento do Ambiente Acadêmico Virtualizado</i>	24
4.8.3	<i>Análise de Fatores de Risco e Variáveis de Controle</i>	25
4.9	Critérios de Validação e Resultados Projetados	26
4.9.1	<i>Protocolos de Validação Analítica</i>	26
4.9.2	<i>Resultados Esperados da Modelagem</i>	26

5	RESULTADOS ANALÍTICOS	28
5.1	Dimensionamento de Armazenamento e Análise de Vazão de I/O.....	28
5.1.1	<i>Análise de Capacidade Física e Alocação Lógica via LVM-Thin.....</i>	28
5.1.2	<i>Projeção de Desempenho Dinâmico e Impacto de IOPS.....</i>	29
5.2	Dimensionamento de CPU e Densidade de Virtualização (RAM).....	31
5.2.1	<i>Dimensionamento e Overprovisioning de CPU.....</i>	31
5.2.2	<i>Modelagem de Capacidade de Memória RAM.....</i>	32
5.3	Modelagem de Rede e Arquitetura de Quórum do Cluster.....	34
5.3.1	<i>Topologia de Rede e Segmentação Lógica.....</i>	34
5.3.2	<i>Mecanismo de Quórum e Prevenção de Split-Brain via QDevice.....</i>	34
5.4	Definição das Golden Images e Provisionamento de Templates Multidisciplinares.....	36
5.4.1	<i>Arquitetura de Replicabilidade baseada em Modelos (Templates).....</i>	36
5.4.2	<i>Categorização dos Perfis de Disciplinas e Multidisciplinaridade.....</i>	36
5.4.3	<i>Mecanismo de Provisionamento e Limpeza Operacional.....</i>	38
5.5	Matriz de Consolidação da Viabilidade Técnica.....	39
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....	40
	REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

As instituições de ensino superior atuam em um cenário de crescente dependência tecnológica e contínua busca por eficiência operacional (XUAN; RANA, 2024) . Esse panorama impulsiona a modernização constante de suas infraestruturas e métodos de ensino, exigindo soluções para gerenciar recursos computacionais de forma mais eficaz (SINGH; BAHETI, 2017). Nesse contexto, a computação em nuvem emerge como um paradigma fundamental (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2017) . Sua capacidade de centralizar softwares e ambientes facilita o acesso e simplifica os processos de manutenção (MISHRA et al., 2019). Essa flexibilidade torna-se vital para superar as limitações de recursos e para aprimorar a experiência acadêmica global (MAHMOOD; IFTIKHAR, 2018) .

Atualmente, os laboratórios da UFC Campus de Russas vivenciam uma problemática operacional que impacta diretamente a qualidade das aulas. Essa situação é caracterizada pela heterogeneidade do parque tecnológico e pela obsolescência do hardware disponível. A prática de instalação e manutenção individualizada de softwares em múltiplos computadores acarreta uma severa sobrecarga de trabalho para o corpo técnico. Como consequência direta, surgem problemas crônicos como a falta de padronização nos ambientes de ensino, inconsistências de versões de programas e a indisponibilidade eventual de ferramentas essenciais para as aulas. Tais contratempos consomem um tempo valioso da equipe técnica e dos docentes. Além disso, prejudicam a experiência de aprendizado dos discentes. Os alunos frequentemente encontram ambientes limitados ou não funcionais para suas atividades práticas, o que evidencia a ausência de uma infraestrutura de Tecnologia da Informação (TI) centralizada.

Para abordar essa problemática, o presente trabalho se insere no campo da TI aplicada à educação. A pesquisa investiga a modelagem e o planejamento de soluções de virtualização em ambientes acadêmicos multidisciplinares. Estudos correlatos destacam que desafios de infraestrutura e performance são barreiras comuns na adoção de nuvem em instituições de ensino de países em desenvolvimento (SHALA RIZA; AJDARI; HAMITI, 2019; WAN MOHD ISA et al., 2020). Ao mesmo tempo, a literatura demonstra a viabilidade de transformar laboratórios por meio de nuvens privadas de código aberto (XUAN; RANA, 2023). O reaproveitamento de hardware excedente (*surplus resources*) surge como uma estratégia viável e alinhada à realidade orçamentária do campus (SUBBAREDDY; BEGAM, 2021). Diante desse cenário, o objeto de estudo investigado é o projeto arquitetural e a viabilidade técnica de uma nuvem privada nos laboratórios acadêmicos da UFC Campus de Russas utilizando a plataforma Proxmox VE

(LUTKEVICH, 2022; PROXMOX SERVER SOLUTIONS, 2025). O tema justifica-se pela urgência em solucionar os problemas práticos de gestão que afetam a produtividade acadêmica, fundamentando-se nas diretrizes do NIST (*National Institute of Standards and Technology*) para garantir o rigor técnico do planejamento.

Nesse contexto, formula-se a hipótese de que o projeto de uma nuvem privada baseada em Proxmox VE facilitará significativamente a padronização e o acesso aos recursos de ensino, resultando em uma melhoria na eficiência operacional do campus. Para que essa premissa seja válida, no entanto, estabelece-se a condição de que o planejamento técnico dimensione e contorne de forma estrita as restrições de IOPS e de memória RAM do hardware legado frente à demanda de múltiplos cursos.

O objetivo geral deste trabalho é projetar e modelar uma infraestrutura de nuvem privada com Proxmox VE para centralizar ambientes nos laboratórios da UFC Campus de Russas, visando otimizar a gestão de recursos e fundamentar a viabilidade técnica da solução. Para tal, foram definidos três objetivos específicos:

1. Investigar as limitações físicas do hardware legado e as demandas computacionais multidisciplinares do campus: mapeando os requisitos operacionais sob as diretrizes do NIST para estabelecer as variáveis de entrada do modelo analítico;
2. Determinar a configuração arquitetural lógica e de rede necessária para o *cluster*: validando de forma teórica como garantir a consistência de quórum e o baixo *overhead* de processamento do sistema;
3. Avaliar se o modelo proposto suporta a carga simultânea de alunos sob diferentes perfis de uso: analisando de forma quantitativa, com base em parâmetros da literatura técnica (MISHRA et al., 2019; SUBBAREDDY; BEGAM, 2021), a sustentabilidade das métricas projetadas de I/O e densidade de memória física.

Esta pesquisa se distingue por sua abordagem na UFC Campus de Russas, utilizando o planejamento executivo de engenharia para propor soluções que convertam limitações físicas em uma infraestrutura moderna, elástica e resiliente.

O presente trabalho está organizado em 6 capítulos. O Capítulo 1 traz a Introdução, apresentando a contextualização, o problema de pesquisa, a hipótese e os objetivos do estudo. O Capítulo 2 aborda a Fundamentação Teórica, que contextualiza os conceitos essenciais de computação em nuvem e arquiteturas de virtualização. O Capítulo 3, Trabalhos Correlatos, apresenta a revisão da literatura sobre soluções similares e os desafios de adoção tecnológica. O

Capítulo 4 detalha a Metodologia, descrevendo os métodos, procedimentos e ferramentas empregados na modelagem do projeto. O Capítulo 5 apresenta os Resultados Analíticos, demonstrando os cálculos de dimensionamento, matrizes de métricas e os cenários de viabilidade técnica. Por fim, o Capítulo 6 traz as Considerações Finais e Resultados Esperados, sintetizando as conclusões do estudo, os impactos previstos para a instituição e as propostas para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este Capítulo apresenta os conceitos fundamentais de computação em nuvem, virtualização e gestão de recursos no Proxmox VE que são necessários para fundamentar o planejamento da nuvem privada proposta para os laboratórios da UFC Campus de Russas. A revisão desses tópicos visa fornecer o embasamento técnico essencial para compreender como a arquitetura lógica proposta apoiará as atividades acadêmicas. Dessa forma, a fundamentação teórica funciona como suporte direto para justificar as decisões de engenharia adotadas no projeto sob restrições de hardware legado.

Para alcançar esse objetivo, serão detalhados os modelos de serviço e implantação da computação em nuvem, bem como as tecnologias de virtualização *bare-metal* que viabilizam a infraestrutura. Adicionalmente, o texto abordará os benefícios e desafios inerentes à aplicação dessas soluções no contexto do ensino superior, convergindo para as especificações técnicas da plataforma Proxmox VE na otimização e gerência de recursos críticos. Esta estrutura prepara o terreno para a análise comparativa que será realizada na seção de Trabalhos Correlatos.

2.1 Conceitos Fundamentais de Computação em Nuvem

A computação em nuvem representa um paradigma que transformou a entrega de serviços de tecnologia da informação. Conforme definido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST), trata-se de um modelo que permite acesso conveniente e sob demanda a um *pool* compartilhado e configurável de recursos computacionais — como redes, servidores, armazenamento e aplicações — com mínimo esforço de gerenciamento (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2017). Enquanto no setor corporativo esse modelo opera frequentemente sob o regime de *pay-as-you-go* (pagamento conforme o uso) para conferir custo-efetividade (XUAN; RANA, 2024), no contexto público universitário a eficiência deve ser alcançada sem a dependência de fluxos contínuos de capital para provedores externos.

Para alinhar essa tecnologia às restrições orçamentárias do campus, o presente projeto delimita-se na interseção de modelos específicos de serviço e de implantação, conectando-os diretamente à plataforma Proxmox VE. No que tange aos Modelos de Serviço, a literatura distingue três categorias principais:

- Infraestrutura como Serviço (IaaS): Fornece recursos fundamentais como servidores virtuais, redes e armazenamento, mantendo o controle do usuário sobre o ambiente virtual subjacente (SINGH; BAHETI, 2017).
- Plataforma como Serviço (PaaS) e Software como Serviço (SaaS): Oferecem, respectivamente, ambientes de desenvolvimento gerenciados e aplicações completas prontas para o usuário final, abstraindo por completo o controle sobre a infraestrutura subjacente (XUAN; RANA, 2024).

A solução proposta para a UFC Campus de Russas enquadra-se estritamente no modelo de IaaS (Infraestrutura como Serviço). O objetivo do planejamento executivo é entregar a base computacional necessária para os laboratórios por meio de contêineres e máquinas virtuais padronizadas. A escolha do Proxmox VE como ferramenta de orquestração justifica-se por sua capacidade de atuar como um provedor de IaaS de código aberto robusto, permitindo que o corpo técnico gerencie de forma centralizada o ciclo de vida desses recursos sem custos com licenciamento de *software*.

Em paralelo, os Modelos de Implantação definem a localização e a governança dessa estrutura (XUAN; RANA, 2024). Em vez de recorrer a uma Nuvem Pública — que geraria custos de tráfego de dados e preocupações com a privacidade —, ou a modelos complexos como Nuvem Híbrida ou Comunitária, este estudo projeta a implantação de uma Nuvem Privada.

A adoção de uma nuvem privada com Proxmox VE resolve o problema central do campus ao consolidar uma infraestrutura operada exclusivamente para a organização (LUTKEVICH, 2022). Esse arranjo garante que os serviços acadêmicos rodem localmente, sob controle direto da UFC. A grande vantagem estratégica para o campus é a capacidade de abstrair o hardware heterogêneo e obsoleto dos laboratórios físicos, transformando máquinas isoladas em um *pool* de recursos unificado e elástico, capaz de atender dinamicamente às demandas multidisciplinares de diferentes matrizes curriculares.

2.2 Virtualização e *Hypervisors*

A virtualização é a tecnologia fundamental que sustenta a computação em nuvem, permitindo a abstração de recursos físicos em instâncias virtuais isoladas de processamento, armazenamento e rede. Essa técnica possibilita que múltiplos ambientes virtuais compartilhem o mesmo hardware físico de forma simultânea, garantindo eficiência operacional e economia de custos (SUBBAREDDY; BEGAM, 2021; XUAN; RANA, 2024). O componente central desse processo é o *hypervisor*, uma camada de software responsável por particionar e gerenciar os recursos de hardware (CPU e RAM), assegurando o isolamento lógico e a segurança dos dados entre as instâncias (SUBBAREDDY; BEGAM, 2021).

Embora a literatura classifique os *hypervisors* em Tipo 2 (hospedados sobre um sistema operacional comum) e Tipo 1 (nativos ou *bare-metal*), o foco desta pesquisa reside exclusivamente no *Hypervisor* Tipo 1. Ele é executado diretamente sobre o hardware físico, sem camadas intermediárias de abstração (SUBBAREDDY; BEGAM, 2021). A escolha por essa arquitetura, materializada no Proxmox VE, é crucial para a UFC Campus de Russas, pois garante o aproveitamento máximo do hardware legado disponível, eliminando o consumo redundante de recursos e fornecendo maior estabilidade operacional para os laboratórios acadêmicos.

Para alcançar a eficiência necessária sob restrições severas de memória e processamento, o Proxmox VE combina nativamente duas tecnologias de virtualização, cujas vantagens e limitações precisam ser avaliadas criticamente frente ao cenário local:

- **KVM (*Kernel-based Virtual Machine*):** Utilizado para a virtualização completa de sistemas operacionais. Sua principal vantagem é o isolamento total e a capacidade de rodar sistemas gráficos complexos, direcionados a disciplinas de expressão gráfica ou simulação numérica. Contudo, sua limitação reside no alto *overhead* de memória RAM e CPU, uma vez que cada instância precisa emular componentes de hardware e carregar um *kernel* próprio.
- **LXC (*Linux Containers*):** Uma solução de virtualização em nível de sistema operacional, ideal para ambientes mais leves. Os contêineres LXC compartilham o *kernel* do hospedeiro, o que elimina a sobrecarga de emulação e os torna extremamente eficientes, consumindo uma fração mínima da memória RAM disponível. A desvantagem dessa abordagem é a restrição de segurança e a impossibilidade de executar sistemas operacionais não-Linux ou ferramentas que exijam aceleração gráfica complexa.

A agilidade na gestão desse ecossistema baseia-se na criação de *Golden Images*, que consistem em instâncias configuradas como modelos padrão de leitura exclusiva. Essas imagens de referência contêm as ferramentas previamente instaladas e otimizadas, servindo de base para o provisionamento rápido e uniforme de novas instâncias para os estudantes (SUBBAREDDY; BEGAM, 2021).

Apesar das vantagens operacionais da infraestrutura proposta, a adoção do Proxmox VE sobre o parque tecnológico da UFC Russas introduz riscos e limitações específicos que não podem ser negligenciados. O primeiro deles é a curva de aprendizado imposta ao corpo técnico, dado que a gerência de um *cluster* de virtualização *open-source* exige competências avançadas em administração de redes e sistemas Linux. Soma-se a isso o suporte limitado, uma vez que soluções de código aberto dependem essencialmente de fóruns de discussão e documentações comunitárias, carecendo de assistência técnica corporativa em tempo real sob regime gratuito. Por fim, os desafios com o hardware legado manifestam-se na incapacidade de processadores de 3ª geração executarem instruções modernas de otimização, limitando a elasticidade dinâmica do ambiente.

Ainda assim, tais riscos mostram-se aceitáveis no contexto da instituição. O custo nulo com licenciamento de *software*, aliado à possibilidade de estender o ciclo de vida de equipamentos fadados ao descarte, mitiga as barreiras de suporte. Ademais, os benefícios gerados pela padronização instantânea dos laboratórios e pela proteção contra falhas operacionais justificam tecnicamente o planejamento dessa arquitetura.

2.3 Benefícios e Desafios da Computação em Nuvem no Ensino Superior

A adoção da computação em nuvem no ensino superior traz uma série de benefícios transformadores, mas também apresenta desafios que precisam ser compreendidos e gerenciados (XUAN; RANA, 2024).

Entre os principais Benefícios, destacam-se:

- **Redução e Otimização de Custos:** A nuvem pode minimizar significativamente os custos de infraestrutura de TI, incluindo hardware, software e manutenção. O modelo de pagamento por uso (em nuvens públicas) ou a otimização de recursos existentes (em nuvens privadas) evita investimentos pesados em equipamentos e licenças, liberando orçamentos para outras áreas prioritárias (XUAN; RANA, 2024).

- **Escalabilidade e Flexibilidade:** Recursos baseados em nuvem podem ser facilmente dimensionados para cima ou para baixo, conforme a demanda flutua. Isso é crucial para IES que precisam adaptar sua infraestrutura a picos de uso (ex: matrículas, provas online) ou ao crescimento do número de alunos, garantindo alocação eficiente de recursos (XUAN; RANA, 2024).

- **Inovação e Modernização:** Plataformas baseadas em nuvem oferecem um ambiente fértil para experimentação e o desenvolvimento de novas metodologias de ensino e aprendizado. Elas permitem que instituições de ensino superior se libertem das limitações de hardware e software local, promovendo a adoção de tecnologias emergentes (XUAN; RANA, 2024).

- **Segurança e Gerenciamento de Dados:** Embora a segurança seja uma preocupação, provedores de nuvem (e nuvens privadas bem implementadas) geralmente aplicam medidas robustas para proteger informações sensíveis, incluindo backup e recuperação de dados facilitados. Isso centraliza o gerenciamento de dados e reduz a carga da equipe de TI (MISHRA et al., 2019).

No cenário específico da UFC Campus de Russas, esses benefícios teóricos são tratados como vantagens práticas estimadas e projetadas pela arquitetura. A otimização de custos viabiliza-se, teoricamente, pelo reaproveitamento do parque tecnológico existente, permitindo dar sobrevida a máquinas com processadores de gerações que seriam consideradas obsoletas. Além disso, o modelo projeta resolver o gargalo da gestão dos laboratórios ao possibilitar a padronização imediata dos ambientes de software das disciplinas. Espera-se, complementarmente, que a solução abra caminho para que os estudantes acessem remotamente os recursos computacionais do campus para a realização de práticas e projetos fora do horário de aula, impacto este que permanece como uma estimativa até que o sistema seja efetivamente implantado.

No entanto, a implementação da nuvem no ensino superior também enfrenta desafios:

- **Segurança e Privacidade de Dados:** Garantir a confidencialidade e a integridade de dados sensíveis de alunos e da instituição é uma preocupação primordial. O armazenamento em servidores externos ou o acesso compartilhado levanta questões sobre controle e conformidade (SHALA RIZA et al., 2019; XUAN; RANA, 2024).

- **Conectividade com a Internet:** Uma conexão de internet confiável e de alta velocidade é essencial para o acesso aos serviços em nuvem. Em regiões com infraestrutura limitada, isso pode ser um impedimento significativo (XUAN; RANA, 2024).
- **Expertise Técnica e Capacitação:** A implementação e o gerenciamento de sistemas baseados em nuvem podem exigir habilidades técnicas especializadas, que podem ser escassas na equipe de TI existente das instituições de ensino superior. A falta de conhecimento por parte de administradores e educadores é uma barreira à adoção (SHALA RIZA et al., 2019; XUAN; RANA, 2024).
- **Compatibilidade e "Vendor Lock-in":** Problemas de compatibilidade entre a infraestrutura existente e as novas soluções de nuvem, ou a dependência de um único provedor de serviços (vendor *lock-in*), podem limitar a flexibilidade futura e gerar custos adicionais na migração (MAHMOOD; IFTIKHAR, 2018).
- **Estabilidade e Confiabilidade:** Embora a nuvem prometa alta disponibilidade, falhas de sistema ou interrupções nos serviços de provedores podem impactar as operações educacionais (XUAN; RANA, 2024). A compreensão desses benefícios e desafios é crucial para o planejamento estratégico e a implementação bem-sucedida de soluções de nuvem, especialmente no desenvolvimento de uma nuvem privada como a proposta neste trabalho.

Ao transpor esses desafios para a realidade local de Russas, identificam-se barreiras geográficas e operacionais específicas que o projeto precisa contornar. Entre elas estão as limitações de estabilidade de rede em determinados blocos do campus e a severa restrição de tempo da equipe de TI local, que lida com uma alta demanda de suporte institucional para um quadro reduzido de técnicos.

Considerando esse balanço entre benefícios e desafios estruturais, ganha força a necessidade de estudar o uso de uma infraestrutura de nuvem privada baseada em código aberto, como o Proxmox VE. Esta abordagem permite o aproveitamento integral do hardware já existente no campus, elimina barreiras de licenciamento financeiro e centraliza o gerenciamento em uma camada lógica única, mitigando a necessidade de intervenções físicas constantes por parte da equipe técnica.

2.4 Gestão Técnica de Recursos no Proxmox VE

Para fundamentar as decisões de projeto em um cenário de hardware limitado, esta pesquisa utiliza como base técnica as diretrizes oficiais da plataforma de virtualização. A documentação orienta a gestão de recursos críticos e a modelagem lógica do sistema através dos seguintes pilares:

- Otimização de Armazenamento e Estimativa de IOPS : A estruturação do armazenamento baseia-se no modelo de volumes LVM-thin, selecionado por sua capacidade de *Thin Provisioning* (provisionamento fino). Este recurso permite a alocação lógica de volumes maiores que o espaço físico real, otimizando o uso dos discos limitados. Embora a documentação oficial mencione o sistema ZFS em *mirror* (RAID 10) como a recomendação ideal para maximizar as operações de entrada e saída por segundo (IOPS), esta pesquisa assume o uso de LVM-thin sobre o sistema de arquivos ext4. Esta decisão justifica-se pelo fato de o ZFS exigir uma quantidade elevada de memória RAM para seu cache de leitura, o que se torna inviável no hardware disponível. A escolha do ext4 com LVM-thin garante menor sobrecarga (*overhead*) de memória e maior simplicidade administrativa. Na fase de modelagem, esses parâmetros de disco e as taxas nominais de IOPS serão as variáveis utilizadas para estimar matematicamente quantas máquinas virtuais o cluster poderá suportar simultaneamente de forma estável.

- Gestão de Memória e Elasticidade Tecnológica (*Ballooning*, KSM e LXC): Para viabilizar a coexistência de múltiplas instâncias em nós com apenas 8GB de RAM, a pesquisa adota uma abordagem híbrida de virtualização baseada em contêineres e hipervisor completo. Segundo a documentação oficial, o mecanismo de *Memory Ballooning* permite que o host recupere dinamicamente a RAM não utilizada pelos convidados em ambientes de máquinas virtuais completas (KVM), operando com um alvo de uso (padrão de 80%) para evitar a exaustão de recursos físicos do *host*. Adicionalmente, utiliza-se o *Kernel Samepage Merging* (KSM), recurso que escaneia e compartilha páginas de memória idênticas entre as instâncias, reduzindo significativamente o consumo total de RAM no *cluster*. Complementarmente, a documentação prescreve o uso de contêineres LXC (*Linux Containers*) como a solução nativa para isolamento de processos com baixíssimo consumo de memória, permitindo que o *cluster* ofereça elasticidade para alternar entre ambientes leves de desenvolvimento de software e ambientes gráficos completos exigidos por outras disciplinas do campus.

- Resiliência, Alta Disponibilidade e Quórum: A estabilidade lógica do ambiente distribuído é regida pela arquitetura de quórum, definida como o número mínimo de votos necessários para que as operações do *cluster* permaneçam ativas. Para o cenário projetado de laboratórios com topologias pequenas (como *clusters* de 2 nós), o planejamento integra o uso de um QDevice (*Quorum Device*). Esta decisão técnica fornece um terceiro voto de desempate externo via rede, eliminando o risco de *split-brain* (cenário crítico onde os nós perdem comunicação e ambos tentam assumir o controle do ambiente de forma isolada). Essa proteção é vital para o contexto das aulas: se um nó sofrer uma falha de hardware durante o período letivo, o *cluster* mantém sua legitimidade e continua operando sem corromper as configurações, evitando que os alunos percam o acesso aos seus ambientes virtuais. Toda essa persistência depende diretamente da integridade do *pmxcfs* (*Proxmox Cluster File System*), o sistema de arquivos distribuído que guarda e replica em tempo real as configurações do Proxmox entre todos os nós. Caso o *pmxcfs* perca a consistência por falta de quórum, todo o gerenciamento do *cluster* é interrompido, justificando a obrigatoriedade do QDevice na modelagem.

3 TRABALHOS CORRELATOS

A presente pesquisa se insere em um campo de estudo dinâmico e em constante evolução, que explora a aplicação da computação em nuvem no contexto educacional. Para contextualizar a proposição arquitetural e a análise de viabilidade técnica de uma nuvem privada na UFC Campus de Russas e identificar as lacunas que este trabalho visa preencher, torna-se essencial analisar estudos e iniciativas similares. Esta seção discute trabalhos relevantes que abordam os desafios da adoção da nuvem em instituições de ensino superior, a otimização de recursos por meio de nuvens privadas e a modernização de laboratórios acadêmicos com tecnologias de código aberto. A delimitação desta análise fundamenta-se no recorte de hardware composto por processadores Intel Core i5-3470, 8 GiB de RAM e SSD de 120 GB. A análise desses trabalhos permitirá fundamentar a problemática e validar os critérios de engenharia utilizados na modelagem do projeto acadêmico proposto.

3.1 Desafios da Adoção de Nuvem em Instituições de Ensino Superior

Um dos pilares para compreender a relevância da presente proposta é a análise dos obstáculos enfrentados por instituições de ensino superior na adoção de soluções de computação em nuvem. Nesse sentido, o estudo de Shala Riza, Ajdari e Hamiti (2019). Os autores investigam as barreiras que impedem a plena integração da nuvem em universidades de países em desenvolvimento, destacando a falta de infraestrutura adequada, orçamentos limitados, preocupações com segurança e privacidade, e a carência de expertise técnica.

O trabalho de Shala Riza, Ajdari e Hamiti (2019) é fundamental para contextualizar a problemática vivenciada pela UFC Campus de Russas, uma vez que a realidade de orçamentos restritos e a necessidade de otimizar recursos existentes são pontos de convergência claros. No entanto, enquanto Shala Riza, Ajdari e Hamiti (2019) focam principalmente na identificação e discussão desses desafios em um contexto amplo de adoção, o presente projeto busca avançar para a modelagem técnica e análise de viabilidade de uma nuvem privada com Proxmox VE. O objetivo é converter os desafios observados em um projeto executivo de engenharia, que detalha como mitigar barreiras de performance e governança no ambiente delimitado dos laboratórios da UFC Russas através de métricas rigorosas de quórum e gestão de recursos.

3.2 Otimização de Recursos com Nuvens Privadas e Proxmox

A busca por eficiência e o aproveitamento máximo de recursos existentes são temas recorrentes na literatura sobre nuvem, especialmente em ambientes com restrições orçamentárias. O artigo de Subbareddy e Begam (2021) explora a viabilidade de construir uma nuvem privada utilizando hardware computacional excedente, com uma análise de desempenho de *hypervisors* como o Proxmox. Os autores demonstram como é possível reutilizar equipamentos que seriam descartados, transformando-os em uma infraestrutura funcional e de baixo custo para virtualização.

A pesquisa de Subbareddy e Begam (2021) serve como um importante referencial técnico para o projeto da UFC Russas, validando a premissa de que é possível projetar uma arquitetura de nuvem robusta a partir de recursos limitados e reforçando a escolha do Proxmox como plataforma. Contudo, enquanto Subbareddy e Begam (2021) focam primariamente na comparação de desempenho entre *hypervisors*, o presente projeto avança para a modelagem detalhada de engenharia de sistemas. Esta pesquisa integra diretrizes da documentação oficial do Proxmox para definir parâmetros de dimensionamento de disco e de memória sob o cenário restritivo de CPUs i5-3470 com 8 GiB de RAM, visando garantir a sustentabilidade operacional em um estudo de caso real. Assim, o trabalho transcende a mera prova de conceito técnica para consolidar um planejamento de viabilidade acadêmica e o impacto pedagógico de infraestruturas centralizadas em ambientes educacionais.

3.3 Modernização de Laboratórios Acadêmicos com Nuvem de Código Aberto

A modernização dos ambientes de ensino e a capacitação dos alunos em tecnologias de nuvem são objetivos cruciais para as instituições de ensino superior. O trabalho de Xuan e Rana (2024), apresenta uma proposta para migrar laboratórios de TI para um ambiente de nuvem privada baseada em OpenStack, utilizando automação para gerenciar os ambientes virtuais. Os autores demonstram como essa abordagem melhora a acessibilidade aos recursos de laboratório e proporciona uma experiência de aprendizado mais alinhada às demandas do mercado.

O estudo de Xuan e Rana (2024) é relevante por exemplificar a aplicação prática de uma nuvem privada de código aberto em um contexto acadêmico, com

foco na otimização da experiência de laboratório. No entanto, o projeto da UFC Russas diferencia-se pela modelagem arquitetural baseada no Proxmox VE. Embora ambas as plataformas sejam de código aberto, o Proxmox VE oferece uma gestão integrada de virtualização (KVM) e contêineres (LXC) em uma interface única, o que a documentação oficial aponta como ideal para simplificar a administração em infraestruturas com orçamentos limitados.

Além disso, enquanto Xuan e Rana (2024) focam prioritariamente na migração de currículos e habilidades em nuvem, o presente trabalho enfatiza a resolução de gargalos operacionais e de engenharia. A pesquisa propõe o uso de tecnologias como o LVM-thin e a gestão de Quórum via QDevice para garantir a padronização e manutenção dos laboratórios sob restrições físicas reais. Assim, a pesquisa transcende a capacitação técnica para oferecer um estudo de viabilidade exploratório, avaliando o impacto de uma infraestrutura centralizada e resiliente na rotina acadêmica da instituição.

3.4 Contribuição e Destaque do Presente Estudo

A análise dos trabalhos correlatos revela que, embora a literatura aborde os desafios gerais da nuvem na educação (SHALA RIZA *et al.*, 2019), a viabilidade de nuvens privadas com recursos excedentes (SUBBAREDDY; BEGAM, 2021) e a modernização de laboratórios com soluções de código aberto (XUAN; RANA, 2024), há uma lacuna na documentação detalhada de projetos de engenharia e modelagem técnica de nuvens privadas baseadas em Proxmox em contextos universitários com recursos limitados. No conjunto analisado, não identificamos estudos que detalhem uma arquitetura que alinhe o reaproveitamento de hardware legado baseado em processadores i5-3470, 8 GiB de RAM e SSD de 120 GB a especificações técnicas de virtualização bare-metal para mitigar gargalos de padronização e governança multidisciplinar. Não foram encontrados, na literatura consultada, estudos que utilizem critérios de engenharia de sistemas (especificamente a gestão de quórum e a análise de vazão de I/O (IOPS)) como parâmetros determinantes para a validação da viabilidade técnica e sustentabilidade do ambiente acadêmico proposto.

O presente estudo se destaca por sua abordagem integradora e focada na modelagem técnica de sistemas para cenários de recursos escassos . Sua contribuição reside em:

- Aprofundar na modelagem arquitetural do Proxmox VE para laboratórios: Diferentemente de trabalhos que utilizam o Proxmox em análises de desempenho genéricas, esta pesquisa detalha a configuração de um *cluster* resiliente, fundamentada no uso de QDevice para estabilidade e LVM-thin para otimização de disco, propondo um modelo de viabilidade replicável para instituições com orçamentos restritos.
- Mitigar gargalos operacionais via engenharia de virtualização: O projeto visa as dificuldades de padronização e manutenção através da modelagem de *Golden Images* e gestão dinâmica de memória via Ballooning, oferecendo uma solução desenhada especificamente para a infraestrutura heterogênea da UFC Campus de Russas.
- Consolidar um estudo de viabilidade em ambiente real de hardware legado: A análise fundamentada no recorte de hardware i5-3470 com 8 GiB e SSD de 120 GB permite converter limitações físicas em uma infraestrutura moderna e estável, oferecendo um guia de diretrizes técnicas (*blueprint*) para outras IES sob restrições semelhantes.

Em síntese, o presente trabalho utiliza o embasamento técnico e as experiências documentadas na literatura internacional para fundamentar sua proposta, mas avança ao consolidar uma modelagem de engenharia específica com Proxmox VE. O foco reside na resolução de problemas operacionais concretos através de um projeto de viabilidade técnica.

4 METODOLOGIA

Este Capítulo detalha a abordagem metodológica adotada para a realização da pesquisa, delineando os procedimentos, métricas e instrumentos que guiam a modelagem e a análise de viabilidade técnica de uma nuvem privada baseada em Proxmox VE na UFC Campus de Russas. São especificados o enquadramento metodológico, os objetivos analíticos, os procedimentos de coleta de requisitos e os critérios de engenharia planejados para o desenho do ambiente. O foco reside em apresentar as fases de projeto, desde o levantamento de diretrizes técnicas e dimensionamento de recursos (como IOPS e gestão de memória) até a modelagem lógica do *cluster* e das redes virtuais. Adicionalmente, descreve-se o processo de validação técnica fundamentado na literatura de referência da plataforma, visando garantir que o modelo arquitetural proposto atenda aos requisitos de estabilidade, quórum e integridade de dados necessários para sustentar as atividades acadêmicas da instituição.

4.1 Tipo de Pesquisa

A pesquisa caracteriza-se como de natureza aplicada, com abordagens quantitativa e exploratória. Sua natureza aplicada reside na proposição de uma arquitetura tecnológica fundamentada (a modelagem de uma nuvem privada com Proxmox VE) visando mitigar gargalos reais de gestão e otimização de infraestrutura acadêmica.

A vertente quantitativa justifica-se pela necessidade de mensurar a viabilidade técnica por meio de métricas de engenharia de sistemas. Torna-se fundamental explicitar que os dados quantitativos utilizados nesta pesquisa constituem projeções analíticas e estimativas fundamentadas nas especificações técnicas dos fabricantes, e não medições experimentais obtidas por ensaios físicos de bancada. Sob essa premissa teórica, o estudo realiza o dimensionamento de vazão de dados (IOPS), o cálculo de capacidade de armazenamento via *LVM-Thin* sobre o sistema de arquivos *ext4* e a gestão de densidade de memória por meio de mecanismos de *Memory Ballooning* e KSM.

Adicionalmente, a pesquisa é exploratória ao investigar os limites operacionais de um *cluster* de virtualização operando sobre hardware legado (processadores de 3ª geração e RAM restrita). O estudo busca estabelecer se os critérios de resiliência e a lógica de quórum previstos na literatura de referência da plataforma são sustentáveis sob as restrições físicas do Campus, convertendo a análise de viabilidade em um guia de diretrizes para modernização de laboratórios de baixo custo.

4.2 Método de Abordagem

O método de abordagem empregado é o hipotético-dedutivo. A pesquisa parte da hipótese de que a modelagem de uma nuvem privada baseada em Proxmox VE, alinhada às especificações técnicas de virtualização *bare-metal*, é capaz de mitigar gargalos crônicos de padronização e gerência em laboratórios acadêmicos sob restrições de hardware legado.

Para verificar essa suposição, o trabalho procede com a proposição arquitetural do ambiente, seguida de uma análise analítica fundamentada em diretrizes de engenharia de sistemas. É necessário explicitar que, no escopo deste estudo, o teste das previsões derivadas da hipótese limita-se à validação da consistência técnica e lógica do modelo proposto. A validação empírica do desempenho em ambiente real e a avaliação prática da experiência dos usuários constituem etapas subsequentes de implementação física do projeto. Desse modo, a consistência teórica do modelo é verificada em relação a três pilares fundamentais extraídos da literatura de referência da plataforma (PROXMOX SERVER SOLUTIONS, 2025):

- **Sustentabilidade de I/O:** Verificação se o arranjo de discos em *ext4* com *LVM-Thin* e a projeção de IOPS atendem à carga de leitura e escrita simultânea de um ambiente de laboratório, sem a sobrecarga de memória que sistemas como o ZFS exigiriam.
- **Eficiência de Memória:** Análise da densidade de instâncias viabilizada pelos mecanismos de *Ballooning* e KSM em nós com RAM limitada a 8 GiB, considerando o compartilhamento de páginas idênticas de sistemas operacionais e ferramentas de aula repetidas.
- **Resiliência do Cluster:** Validação da estabilidade do sistema de arquivos distribuído (*pmxcfs*) através da modelagem de quórum com suporte externo de um QDevice. Torna-se imperativo ressaltar que este mecanismo assegura estritamente a consistência lógica do cluster e a prevenção de corrupção de dados por *split-brain* em cenários de falha. Ele não garante, contudo, a manutenção da mesma capacidade operacional original do ambiente caso nós físicos fiquem indisponíveis, visto que o poder de processamento global sofrerá redução proporcional.

O método envolve a construção lógica do ambiente virtualizado e a análise quantitativa dos dados de desempenho projetados, permitindo inferir a viabilidade da infraestrutura para o contexto da UFC Campus de Russas.

4.3 Objetivos da Pesquisa

Os procedimentos de coleta de dados nesta pesquisa concentram-se no levantamento técnico e documental necessário para a fundamentação da modelagem arquitetural. A coleta de dados inicia-se com um inventário do hardware legado disponível na UFC Campus de Russas, identificando especificações de CPU, capacidade de memória RAM e métricas de desempenho nominal dos sistemas de armazenamento. Complementarmente, utiliza-se a literatura de referência da plataforma e as especificações técnicas de virtualização *bare-metal* como fontes de dados secundários para estabelecer os parâmetros de conformidade que o modelo deve atingir. Esses dados técnicos servem como insumos para o dimensionamento dos recursos críticos e para a definição das políticas de resiliência do *cluster*.

A análise de dados é realizada por meio de uma abordagem quantitativa e analítica, fundamentada na comparação entre o modelo projetado e os requisitos teóricos de computação em nuvem. Os dados coletados são submetidos a uma análise de viabilidade técnica, na qual se avalia a sustentabilidade da vazão de dados (IOPS) e a eficiência dos algoritmos de gestão de memória, como o *Memory Ballooning* e o *Kernel Samepage Merging* (KSM). A validação final dos dados ocorre através da verificação da lógica de quórum e da estabilidade do sistema de arquivos distribuído, garantindo que a proposta de engenharia seja capaz de mitigar os gargalos operacionais identificados sem comprometer a integridade do ambiente virtualizado. Dessa forma, a análise transcende a observação empírica para consolidar um diagnóstico técnico sobre a funcionalidade da infraestrutura sob restrições físicas reais.

4.4 Procedimentos Metodológicos

A pesquisa é conduzida por meio de um conjunto articulado de procedimentos que integram a fundamentação teórica à modelagem de engenharia, estruturados para garantir a validade analítica do projeto. Inicialmente, executa-se o mapeamento da literatura, focado na busca e seleção de artigos científicos relevantes, documentações de referência e especificações da plataforma sobre computação em nuvem, virtualização *bare-metal* e nuvens privadas em ambientes acadêmicos. O objetivo desta etapa é consolidar os parâmetros de conformidade e as diretrizes arquiteturais que nortearão as decisões de engenharia do projeto, fornecendo a base técnica necessária para a modelagem do sistema."

Subsequentemente, a pesquisa assume o caráter de Estudo de Caso, focado na infraestrutura de laboratórios da UFC Campus de Russas. Este enfoque permite um diagnóstico preciso das limitações impostas pelo hardware legado e a identificação de requisitos operacionais específicos, transformando as restrições físicas do campus em variáveis de entrada para o projeto. O estudo de caso fornece o contexto real necessário para fundamentar a viabilidade técnica das soluções de alta disponibilidade e gestão de recursos em cenários de baixa capacidade de investimento.

Por fim, executa-se a Modelagem Arquitetural e Análise de Viabilidade, que representa a fase de planejamento de engenharia e simulação lógica da pesquisa. Esta etapa compreende a definição da topologia do *cluster* Proxmox VE, o dimensionamento de volumes via LVM-thin e a proposição de mecanismos de resiliência, como o QDevice, para garantir a integridade do quórum. A fase visa validar, por meio de cálculos e projeções técnicas, a eficácia das políticas de gestão dinâmica de memória (*Ballooning*) e o suporte à carga de trabalho acadêmica sob hardware limitado. Ao concluir este ciclo, a pesquisa entrega um projeto executivo fundamentado e uma análise técnica rigorosa sobre a sustentabilidade da nuvem privada proposta.

4.5 Definição do Objeto de Estudo e Parâmetros Técnicos

A população e a amostragem desta pesquisa não são compostas por sujeitos humanos, mas sim por unidades de infraestrutura tecnológica que compõem o ambiente computacional da UFC Campus de Russas. A amostra para a análise de viabilidade técnica é definida por uma seleção intencional de nós de processamento (servidores/estações) e ativos de rede que representam o hardware legado da instituição, especificamente as máquinas que enfrentam as problemáticas atuais de obsolescência e heterogeneidade de hardware.

A seleção dos ativos baseia-se na disponibilidade técnica e na representatividade estatística das configurações de CPU de 3ª geração e memória RAM restrita, permitindo que a modelagem arquitetural seja validada sobre os equipamentos que sofrem os gargalos que o projeto visa mitigar. É importante ressaltar que o foco desta delimitação é validar a sustentabilidade técnica da arquitetura lógica em um cenário real de hardware limitado, utilizando as especificações dessas máquinas como variáveis de entrada para os cálculos de dimensionamento de IOPS, memória e resiliência de *cluster* fundamentados na literatura de referência da plataforma.

4.6 Instrumentos de Coleta de Dados

Os dados necessários para a fundamentação e validação da pesquisa serão obtidos por meio de instrumentos técnicos voltados ao levantamento de variáveis e parâmetros de projeto, garantindo o rigor analítico sem a necessidade de execução física:

- **Levantamento de Ativos e Diagnóstico de Infraestrutura:** Este instrumento consiste na coleta de especificações técnicas detalhadas das unidades de hardware da UFC Campus de Russas que compõem o cenário de estudo. Serão catalogados dados nominais de arquitetura de CPU, limites de memória RAM e características de barramento de armazenamento. Este diagnóstico atua como a fonte de dados primária para alimentar a modelagem de recursos, fornecendo as variáveis reais que o projeto de engenharia deve considerar.
- **Parâmetros de Conformidade e Literatura Técnica:** Utilizam-se as especificações de virtualização *bare-metal* e as diretrizes de sistemas distribuídos como instrumentos para estabelecer os parâmetros de conformidade do modelo. Este levantamento permite coletar métricas ideais de configuração para sistemas de arquivos e requisitos de resiliência,

servindo como padrão normativo para a validação da viabilidade técnica da arquitetura proposta.

- Matriz de Métricas para Análise de Viabilidade: Durante a fase de modelagem teórica, os dados coletados serão organizados em uma matriz de desempenho projetado para validar a funcionalidade lógica da infraestrutura. Este registro incluirá:
 - Estimativa de Vazão (IOPS): Projeção teórica da capacidade de leitura e escrita simultânea com base nas especificações do hardware inventariado e no arranjo ext4/LVM-thin.
 - Cálculo de Densidade de Virtualização: Análise da capacidade de suporte a instâncias utilizando algoritmos de gestão dinâmica de memória sob carga acadêmica hipotética.
 - Modelagem de Estabilidade de *Cluster*: Verificação lógica da persistência de estados e manutenção do quórum através de topologias de rede projetadas.

Este conjunto de instrumentos assegura que a coleta de dados seja estritamente documental e analítica, permitindo uma conclusão fundamentada sobre a sustentabilidade da solução em um cenário de hardware limitado.

4.7 Técnicas de Análise de Dados

Os dados coletados e as variáveis de projeto serão analisados por meio das seguintes abordagens analíticas:

- **Análise de Conformidade Arquitetural:** Esta técnica consiste na verificação sistemática do modelo proposto frente às especificações técnicas de virtualização *bare-metal* e sistemas distribuídos. O objetivo é validar se a topologia projetada respeita os requisitos mínimos de estabilidade, como a lógica de quórum e a integridade do sistema de arquivos distribuído (*pmxcfs*), assegurando que o projeto segue as diretrizes de engenharia necessárias para sua funcionalidade.
- **Interpretação Comparativa de Cenários:** Será realizada a comparação entre o estado atual da infraestrutura (limitada por hardware heterogêneo e gestão descentralizada) e o modelo de nuvem privada projetado. A análise focará em como a centralização via Proxmox VE e o uso de tecnologias como o LVM-thin impactam a eficiência teórica do ambiente, fundamentando os benefícios esperados pela solução com base na literatura técnica e nos requisitos operacionais identificados no campus.
- **Análise Quantitativa e Inferencial de Métricas:** Aplica-se sobre os dados técnicos projetados (como IOPS, densidade de memória e vazão de rede) para avaliar a sustentabilidade do sistema sob carga acadêmica hipotética. Através de cálculos de dimensionamento, busca-se inferir o comportamento do sistema, visando descrever a capacidade de suporte a instâncias virtuais (VMs e contêineres LXC) e a resiliência da infraestrutura proposta frente às restrições físicas de hardware legado.

Esta estrutura analítica permite que a pesquisa conclua sobre a viabilidade da nuvem privada de forma objetiva, fundamentando os resultados na lógica de engenharia e na análise de desempenho projetado.

4.8 Configurações de Hardware e Passos de Implementação

Esta subseção detalha as especificações técnicas do hardware que compõe o objeto de estudo e as diretrizes de engenharia adotadas para a modelagem do *cluster* Proxmox VE. A análise de viabilidade busca projetar a infraestrutura necessária para a virtualização de um laboratório completo da UFC Campus de Russas, utilizando os limites físicos das máquinas reais como variáveis de entrada para o projeto.

4.8.1 Configurações dos Computadores

A modelagem da nuvem privada fundamenta-se em um cenário composto por estações de trabalho com as seguintes especificações nominais:

- Modelo da Placa-Mãe: POSITIVO POS-PIQ77CL.
- Processador: Intel® Core™ i5-3470 (4 núcleos físicos).
- Memória RAM: 8,0 GiB DDR3.
- Armazenamento: Unidades de estado sólido (SSD) de 120,0 GB.

As capacidades de virtualização via hardware (Intel VT-x e Intel VT-d) são consideradas pré-requisitos fundamentais para o suporte à virtualização KVM e para a eficiência do *hypervisor*. Embora estas configurações apresentem restrições severas em termos de densidade de memória e vazão de dados para ambientes de alta disponibilidade, elas são ideais para o propósito deste estudo: demonstrar a viabilidade da otimização de recursos legados através de uma arquitetura de nuvem de baixo custo.

A definição do quórum e a distribuição das funções de armazenamento e processamento serão projetadas com base no levantamento de requisitos dos laboratórios, assegurando que o modelo lógico seja capaz de suportar as demandas computacionais acadêmicas sob as limitações de hardware identificadas. A análise focará em como mecanismos de *overprovisioning* de CPU e gestão dinâmica de memória podem estender a vida útil desses ativos, transformando-os em uma infraestrutura governável e resiliente.

4.8.2 Diretrizes de Configuração e Planejamento da Arquitetura

Esta seção estabelece o roteiro técnico e as diretrizes de engenharia projetadas para a estruturação lógica da nuvem privada. Os procedimentos aqui descritos não constituem um relato de execução, mas sim a modelagem sistêmica necessária para validar a viabilidade da solução em uma escala de laboratório acadêmico.

4.8.2.1 Planejamento de Infraestrutura de Rede

A modelagem prevê a utilização da rede cabeada local da UFC Campus de Russas como barramento de comunicação principal. O planejamento do endereçamento baseia-se em uma topologia de IPs estáticos exclusivos, visando garantir a persistência da comunicação entre os nós do *cluster* e a estabilidade dos serviços de gerência. A configuração projetada inclui o

alinhamento rigoroso de *Gateways*, máscaras de sub-rede (/24) e servidores DNS, parâmetros fundamentais para a resolução de nomes e integridade do sistema de arquivos distribuído.

4.8.2.2 Protocolo de Instalação e Parametrização do Hypervisor

A arquitetura de software fundamenta-se no Proxmox VE 8.x, cujas diretrizes de configuração são projetadas para extrair a máxima eficiência do hardware legado identificado. O planejamento detalha a definição do sistema de arquivos ext4 para a partição raiz, priorizando a compatibilidade e a integridade de dados em unidades SSD, além do estabelecimento de políticas de acesso administrativo, definições de fuso horário e *layouts* de entrada para a padronização do ambiente de gerência.

4.8.2.3 Modelagem de Cluster e Lógica de Resiliência

A formação do *cluster* é projetada como uma sequência de operações lógicas destinadas a garantir a alta disponibilidade dos serviços de gerência. O plano descreve a criação da entidade de *cluster* em um nó de referência e a adesão controlada dos nós adjacentes, focando na manutenção do quórum. Para este cenário de hardware limitado, a modelagem enfatiza a estabilidade do *pmxcfs* (*Proxmox Cluster File System*) como o mecanismo de sincronização de estado necessário para a operação unificada do laboratório, utilizando o QDevice como voto de desempate externo.

4.8.2.4 Planejamento do Ambiente Acadêmico Virtualizado

A etapa final da modelagem foca na entrega de serviços e na otimização dos recursos limitados. Propõe-se o uso de LVM-thin para permitir o compartilhamento eficiente do espaço em disco, mitigando a limitação física dos 120 GB por nó. Planejam-se *templates* de máquinas virtuais e contêineres LXC (*Golden Images*), otimizados para o provisionamento rápido de ambientes de ensino e pesquisa. Por fim, definem-se redes virtuais internas (*bridges*) para segmentar o tráfego de diferentes disciplinas e o planejamento de mecanismos de acesso remoto seguro à infraestrutura de nuvem.

4.8.3 Análise de Fatores de Risco e Variáveis de Controle

A modelagem de uma infraestrutura de nuvem privada em um cenário com restrições de investimento apresenta variáveis críticas que devem ser monitoradas e gerenciadas para garantir a integridade do projeto executivo. Estes fatores de risco incluem:

- **Gargalos de Hardware e Densidade de Virtualização:** A capacidade limitada de RAM (8 GiB) e o perfil das unidades de armazenamento (120 GB) representam as restrições físicas primárias do modelo. Estes fatores impactam diretamente a densidade de instâncias virtuais e podem gerar contenção de recursos em cenários de alta demanda simultânea, exigindo que a modelagem preveja políticas rigorosas de *overprovisioning* e gestão dinâmica de memória.
- **Complexidade da Modelagem e Sustentabilidade:** A estruturação de um *cluster* de virtualização e a centralização lógica de ambientes para um laboratório completo envolvem uma arquitetura complexa. A viabilidade do projeto depende da expertise técnica aplicada na parametrização do *hypervisor*, garantindo que o tempo de resposta e a estabilidade da gerência centralizada atendam aos requisitos operacionais da instituição.
- **Sensibilidade à Infraestrutura de Rede:** A estabilidade do sistema de arquivos distribuído (*pmxcfs*) e a manutenção do quórum possuem dependência direta da latência e da vazão da rede local. Eventuais oscilações na rede cabeada podem comprometer a sincronização de estados entre os nós, tornando a estabilidade da topologia de rede uma variável determinante para a resiliência da nuvem projetada.

4.9 Critérios de Validação e Resultados Projetados

Esta seção delinea os protocolos de validação analítica a serem aplicados à modelagem da infraestrutura de nuvem privada, bem como os indicadores de desempenho que se espera fundamentar por meio da análise teórica. Os critérios de validação visam comprovar a viabilidade técnica da arquitetura proposta e sua capacidade de otimizar a governança de laboratórios acadêmicos, alinhando as restrições de hardware aos requisitos de engenharia.

4.9.1 Protocolos de Validação Analítica

A validação do modelo será conduzida através do cruzamento de dados entre o inventário de hardware coletado e as métricas de conformidade extraídas da literatura de referência da plataforma (PROXMOX SERVER SOLUTIONS, 2025). Os principais eixos de análise incluem:

- Verificação de Estabilidade Lógica: Análise da resiliência do *cluster* sob simulação de falha de um nó, verificando se a configuração de quórum (com suporte de QDevice) é capaz de manter a disponibilidade do plano de controle.
- Análise de Eficiência de Escalonamento: Avaliação teórica do comportamento do sistema frente ao uso de mecanismos de *Ballooning* e KSM, visando determinar o limite de saturação de memória para instâncias simultâneas de sistemas operacionais leves e pesados.
- Dimensionamento de Carga de I/O: Projeção da vazão de dados sustentável (IOPS) no arranjo de discos SSD com LVM-thin, comparando a demanda esperada de um laboratório acadêmico com a capacidade nominal da controladora e dos barramentos do hardware legado.

4.9.2 Resultados Esperados da Modelagem

Espera-se que a análise técnica demonstre que a centralização da gerência via Proxmox VE é capaz de reduzir a complexidade operacional da UFC Campus de Russas, transformando estações de trabalho isoladas em uma infraestrutura governável. Os resultados projetados incluem:

- Padronização e Agilidade Operacional: Comprovação de que o uso de *templates* e imagens de referência (*Golden Images*) permite um provisionamento de ambientes de

ensino significativamente mais rápido e uniforme do que os métodos tradicionais de instalação individual.

- **Sustentabilidade do Reaproveitamento Tecnológico:** Validação de que a aplicação de técnicas de virtualização *bare-metal* estende a utilidade do hardware de 3ª geração, oferecendo um ambiente estável para atividades de ensino e pesquisa com baixo custo de investimento.

- **Conformidade de Arquitetura:** Consolidação de um guia de diretrizes técnicas que serve como prova de conceito para a modernização de outros laboratórios da instituição sob condições de escassez de recursos.

5 RESULTADOS ANALÍTICOS

Os valores, taxas e dimensionamentos apresentados ao longo deste capítulo são resultados exclusivos de modelagem analítica e estimativas teóricas de engenharia. Eles não correspondem a testes executados em bancada ou a medições físicas de desempenho em um ambiente de produção real. O objetivo desta modelagem é correlacionar as restrições físicas do hardware legado com os limites lógicos do *hypervisor*.

5.1 Dimensionamento de Armazenamento e Análise de Vazão de I/O

Esta seção apresenta a modelagem quantitativa da camada de armazenamento projetada para o laboratório modelo de 30 computadores, distribuídos de forma equivalente em um *cluster* composto por 3 nós físicos (10 instâncias virtuais ativas por nó). A análise fundamenta-se no equilíbrio entre a capacidade física restrita das unidades de estado sólido (SSD) de 120,0 GB e a demanda dinâmica de operações de entrada e saída por segundo (IOPS) exigida em ambientes de ensino multidisciplinar.

5.1.1 Análise de Capacidade Física e Alocação Lógica via LVM-Thin

O inventário do hardware legado estabelece uma limitação física primária: cada nó dispõe de um SSD nominal de 120,0 GB. Para garantir a estabilidade do *hypervisor*, reserva-se uma partição de 20,0 GB para o sistema operacional base (Proxmox VE e arquivos de paginação do hospedeiro), resultando em 100,0 GB de espaço útil para o armazenamento de dados (*pool* local) por nó.

Caso a arquitetura adotasse o provisionamento tradicional (*Thick Provisioning*), o espaço total alocado para cada instância seria reservado imediatamente no disco rígido. Sob essa premissa, o limite máximo de armazenamento para cada uma das 10 instâncias concorrentes seria de apenas 10,0 GB ($100,0 \text{ GB} \div 10 \text{ instâncias}$), o que inviabilizaria a instalação de sistemas operacionais modernos, compiladores e ferramentas de engenharia de grande porte compartilhadas entre diferentes matrizes curriculares.

Para mitigar essa restrição, o projeto adota formalmente o mecanismo de LVM-Thin. O provisionamento fino introduz o conceito de sobrealocação (*overprovisioning*) de armazenamento físico, baseando-se no comportamento preditivo de ambientes de ensino, onde os usuários utilizam apenas uma fração do espaço total alocado logicamente. A modelagem

estabelece os seguintes parâmetros de alocação considerando o perfil multidisciplinar:

- Capacidade Lógica Alocada: Cada instância de aluno receberá uma imagem de referência (*Golden Image*) com uma média de 25,0 GB a 30,0 GB alocados logicamente, dependendo das ferramentas exigidas pelo curso vigente.
- Consumo Real Projetado (Perfil de Desenvolvimento/LXC): Estima-se uma taxa média real de preenchimento de disco de 35% por instância (aproximadamente 8,75 GB de dados efetivamente gravados por aluno). Multiplicando esse consumo pelas 10 instâncias do nó, o volume físico demandado no SSD será de 87,5 GB, preservando uma margem de segurança estática de 12,5%.
- Consumo Real Projetado (Perfil Gráfico/KVM): Para disciplinas de expressão gráfica ou simulação numérica de outros cursos, a taxa média real de preenchimento de disco sobe para 55% por instância devido ao tamanho dos caches e binários gerados (aproximadamente 16,5 GB por aluno). Como esses ambientes operam em turnos isolados e com concorrência gerenciada, o consumo físico sob carga máxima é atenuado pela destruição automatizada das instâncias ao término da aula, mantendo o ambiente dentro da capacidade física útil do disco (100,0 GB).

5.1.2 Projeção de Desempenho Dinâmico e Impacto de IOPS

Enquanto a capacidade física (em Gigabytes) dita o volume de dados armazenados, a métrica de IOPS (*Input/Output Operations Per Second*) determina a viabilidade de desempenho do *cluster* sob condições de concorrência massiva. Unidades SSD baseadas no padrão de comunicação SATA III, operando sob a controladora nativa da placa-mãe POSITIVO POS-PIQ77CL com chipset Intel Q77 Express, entregam taxas de vazão específicas. Com base em parâmetros típicos da literatura para unidades de armazenamento de entrada nesta litografia, adotam-se como estimativas nominais estáveis os seguintes valores (SUBBAREDDY; BEGAM, 2021):

- Leitura Aleatória (Blocos de 4KB): ~70.000 IOPS
- Escrita Aleatória (Blocos de 4KB): ~50.000 IOPS

Para validar a viabilidade da infraestrutura proposta, a modelagem de engenharia submete a arquitetura a dois cenários críticos de estresse teórico:

- *Boot Storm* (Tempestade de Inicialização): Ocorre no início da sessão acadêmica, quando as 10 instâncias do nó são inicializadas simultaneamente. Com base em estudos clássicos de virtualização de desktops, estima-se que uma instância Linux padrão consuma uma média de 1.200 IOPS durante a carga do sistema, predominantemente em operações de leitura aleatória (MISHRA et al., 2019).

Demanda Total do Boot Storm por Nó = $10 \times 1.200 \text{ IOPS} = 12.000 \text{ IOPS}$

A demanda síncrona de 12.000 IOPS consome apenas 17,14% do teto físico de leitura nominal do SSD (70.000 IOPS), demonstrando que o barramento absorve o pico de inicialização sem causar congelamento (*freezing*) na interface de gerência do plano de controle.

- *Compile Storm* (Tempestade de Compilação): Cenário em que os estudantes realizam o salvamento de arquivos e a compilação de códigos de forma síncrona. O processo de compilação consome uma média de 800 IOPS por usuário, com predominância de escrita aleatória para a geração de arquivos binários e objetos temporários.

Demanda Total do Compile Storm por Nó = $10 \times 800 \text{ IOPS} = 8.000 \text{ IOPS}$

Frente à capacidade física de escrita do dispositivo (50.000 IOPS), a carga concorrente representa a ocupação de 16,0% dos recursos de I/O disponíveis.

A modelagem quantitativa demonstra que, embora o armazenamento físico seja o principal limitador em termos de volume, o desempenho dinâmico de I/O das unidades de estado sólido é perfeitamente compatível com as demandas de concorrência de um laboratório com 30 computadores. A exclusão de sistemas de arquivos complexos como o ZFS valida-se tecnicamente, pois o arranjo ext4 associado ao LVM-Thin sustenta os picos de IOPS projetados sem submeter os nós à exaustão de memória RAM por tabelas de indexação de metadados.

5.2 Dimensionamento de CPU e Densidade de Virtualização (RAM)

5.2.1 Dimensionamento e Overprovisioning de CPU

Cada nó físico possui um processador Intel® Core™ i5-3470 com 4 núcleos físicos (e 4 *threads*). Para distribuir 10 instâncias por nó, o projeto adota a estratégia de *vCPU Overprovisioning* (sobrealocação de CPUs virtuais).

Em ambientes acadêmicos de desenvolvimento de software, a CPU opera em regime de ociosidade na maior parte do tempo (enquanto o aluno lê, digita códigos ou navega na documentação), ocorrendo picos de uso apenas durante compilações rápidas. A literatura de engenharia de sistemas indica a viabilidade de taxas de sobrealocação de até 3:1 ou 4:1 para cargas de trabalho de escritório ou ensino (SINGH; BAHETI, 2017).

- Alocação Projetada: Cada instância receberá 2 vCPUs alocadas logicamente, permitindo que os sistemas operacionais convidados realizem multitarefa de forma fluida.

- Cálculo da Taxa de Sobrealocação: Com 10 instâncias ativas por nó, teremos um total de 20 vCPUs disputando os 4 núcleos físicos do processador Intel® Core™ i5-3470. Isso resulta em uma taxa de sobrealocação de 5:1 ($20 \div 4$). Embora ligeiramente acima da média padrão de mercado, a literatura indica a viabilidade dessa taxa em cenários de desenvolvimento leve (SUBBAREDDY; BEGAM, 2021). No entanto, sua sustentabilidade real condiciona-se ao perfil do curso vigente:

- Para Cursos de Computação (Engenharia de Software e Ciência da Computação): Espera-se que a taxa de 5:1 seja sustentável. Como o desenvolvimento de código e a execução de servidores web locais (LXC) operam em regime de ociosidade na maior parte do tempo, os picos de processamento ocorrem apenas em frações de segundo durante as compilações, permitindo que o agendador do *hypervisor* gerencie as filas com baixa sobrecarga (*overhead*).

- Para Cursos de Engenharia Tradicional (Civil, Mecânica e Produção): Softwares de modelagem geométrica (CAD) e simulação numérica exigem processamento matemático contínuo (KVM). Sob essa carga de trabalho, a taxa de 5:1 causará contenção de CPU (*CPU Steal Time*), degradando o desempenho. Portanto, a modelagem estabelece que para turmas de engenharia tradicional que utilizem intensamente a CPU, o laboratório deverá operar com lotação reduzida ou com limitação de vCPUs por instância, reduzindo a taxa de sobrealocação para patamares mais seguros (como 2:1 ou 3:1) durante aquele horário específico.

5.2.2 Modelagem de Capacidade de Memória RAM

A memória RAM de 8,0 GiB por nó representa o gargalo mais crítico da infraestrutura. Descontando 1,5 GiB para o sistema base (Proxmox VE + serviços operacionais do hospedeiro), restam 6,5 GiB (6.656 MiB) de memória RAM física útil para distribuir entre as 10 instâncias de cada nó.

A seguir, a viabilidade é testada por meio de dois cenários de carga de trabalho acadêmica, consolidados na Tabela 1.

Cenário A: Virtualização Completa (Máquinas Virtuais via KVM)

Neste cenário, simula-se a entrega de um sistema operacional de *desktop* completo com interface gráfica (ex: Ubuntu *Desktop* com XFCE ou sistemas Windows para softwares de engenharia específicos) para atender disciplinas de desenho técnico ou simulação numérica de outros cursos do campus.

- Demanda Nominal: Cada VM exige no mínimo 2,0 GiB de RAM para operar estavelmente. Para 10 alunos por nó, seriam necessários 20 GiB, gerando um déficit imediato de 13,5 GiB sobre a memória útil disponível.
- Aplicação do *Memory Ballooning* e KSM: Em tempo de execução homogêneo, as tecnologias reduzem o consumo real projetado para cerca de 0,96 GiB por VM, totalizando 9,6 GiB para 10 instâncias.
- Resultado e Condicional de Viabilidade: Como o consumo real projetado de 9,6 GiB excede os 6,5 GiB de RAM física útil do nó, o sistema entraria em estado de paginação em disco (*Swap*). Portanto, a modelagem estabelece que o Cenário A indica inviabilidade para execução simultânea na capacidade máxima de 30 computadores. É fundamental destacar que essa restrição é específica e condicionada estritamente às configurações atuais do hardware legado do campus (8 GiB de RAM), não sendo generalizável para outros contextos onde a densidade de memória seja superior. Para contornar essa barreira, as turmas que necessitam de KVM deverão operar sob regime de concorrência reduzida ou turnos específicos, preservando o uso do Cenário B (LXC) como o padrão para a ocupação total.

Cenário B: Virtualização de Escala Leve (Contêineres via LXC)

Neste cenário, substitui-se a máquina virtual pesada por contêineres Linux compartilhando o *kernel* do hospedeiro, configurados com ambientes de desenvolvimento via

terminal ou servidores de desenvolvimento Web (ex: Node.js, Python, GCC, editores de texto baseados em terminal ou via interface web compartilhada).

- **Demanda Nominal:** Um contêiner LXC robusto para desenvolvimento consome cerca de 512 MiB de RAM. Para 10 alunos, a demanda nominal inicial é de 5,0 GiB (5.120 MiB).
- **Resultado do Cenário B:** A demanda nominal de 5,0 GiB está confortavelmente abaixo dos 6,5 GiB de RAM física útil disponíveis no nó, sem depender obrigatoriamente de algoritmos de compressão ou paginação em disco. A aplicação do KSM neste cenário atuará como uma margem de segurança adicional, reduzindo ainda mais o consumo real para aproximadamente 3,0 GiB totais e deixando o nó operando em uma zona de estabilidade térmica e de processamento.

A tabela abaixo sintetiza e compara os dados projetados para a viabilidade de memória de um nó físico do *cluster*:

Tabela 1: Densidade de Memória Projetada por Nó

Parâmetro / Indicador Técnico	Cenário A: Máquinas Virtuais (KVM)	Cenário B: Contêineres Leves (LXC)
RAM Nominal por Instância	2,0 GiB	512 MiB
Demanda Nominal Total (10 Instâncias)	20,0 GiB	5,0 GiB
RAM Física Útil Disponível no Nó	6,5 GiB	6,5 GiB
Impacto do <i>Ballooning</i> (Média)	Redução para 1,6 GiB / VM	Não aplicável (Gestão nativa LXC)
Impacto do KSM (Economia de ~40%)	Redução para 0,96 GiB / VM	Redução para ~300 MiB / LXC
Consumo Real Projetado do Nó	9,6 GiB	3,0 GiB
Status de Viabilidade Técnica	Inviável (Saturação)	Viável (Zona de Estabilidade)

Fonte: elaborada pelo autor.

5.3 Modelagem de Rede e Arquitetura de Quórum do Cluster

Esta seção detalha o planejamento da infraestrutura de rede local e a lógica de comunicação distribuída projetada para sustentar o *cluster* Proxmox VE. A modelagem foca em garantir a persistência dos serviços de gerência e a integridade do sistema de arquivos distribuído sob condições de falha parcial de hardware, atendendo à demanda do laboratório modelo de 30 computadores.

5.3.1 Topologia de Rede e Segmentação Lógica

A arquitetura de rede é projetada utilizando a infraestrutura de cabeamento estruturado local do laboratório (padrão *Fast Ethernet/Gigabit Ethernet*) conectada a um *switch* central da camada de distribuição. Para mitigar conflitos de endereçamento e garantir a previsibilidade das conexões de gerência e sincronização, adota-se um esquema de endereçamento IP estático sob uma máscara de sub-rede de tamanho fixo (/24), conforme estruturado no planejamento lógico a seguir:

- Nó 01 (PVE-01): IP 192.168.1.101 | Gateway 192.168.1.1 | DNS 8.8.8.8
- Nó 02 (PVE-02): IP 192.168.1.102 | Gateway 192.168.1.1 | DNS 8.8.8.8
- Nó 03 (PVE-03): IP 192.168.1.103 | Gateway 192.168.1.1 | DNS 8.8.8.8
- Barramento Virtual de Convidados (*Bridges*): Para cada nó, mapeia-se uma interface de rede virtual do tipo *Linux Bridge* (*vbr0*), vinculada à interface de rede física (*eth0* ou *enp3s0*). Esse arranjo permite que os contêineres LXC dos alunos operem em modo *bridge*, recebendo IPs diretamente da rede local ou de um escopo DHCP isolado, garantindo isolamento de tráfego de rede e segurança lógica entre as bancadas.

5.3.2 Mecanismo de Quórum e Prevenção de Split-Brain via QDevice

Em sistemas distribuídos, a estabilidade do plano de controle depende do conceito de Quórum, que dita que uma operação de escrita ou alteração de estado no *cluster* só é legítima se a maioria absoluta dos nós ($50\% + 1$) estiver online e em comunicação síncrona. No ecossistema Proxmox VE, as configurações globais, estados de instâncias e diretivas de inicialização são gravados no *pmxcfs* (*Proxmox Cluster File System*), um sistema de arquivos replicado em tempo real via rede que opera estritamente sob a manutenção do quórum.

Em cenários ideais onde o *cluster* possui um número ímpar de nós em plena operação (como os 3 nós físicos planejados para este projeto), o quórum é mantido nativamente, permitindo que o sistema sobreviva à queda de 1 nó físico ($3 \text{ nós} - 1 \text{ falha} = 2 \text{ nós ativos}$, mantendo a maioria sobre o total de 3).

No entanto, considerando as instabilidades de rede física e oscilações elétricas típicas de um hardware legado em escala de laboratório, a arquitetura introduz preventivamente o QDevice (*Quorum Device*). O QDevice é uma entidade lógica leve instalada em uma máquina externa ao *cluster* (podendo rodar sobre o servidor de arquivos do laboratório ou uma instância preexistente na rede da instituição) cuja única função é atuar como um árbitro de votação independente.

A integração do QDevice altera a equação de resiliência do sistema, conforme demonstrado matematicamente a seguir:

- Sem QDevice (Cenário Padrão de 3 Nós): O total de votos do *cluster* é igual a 3. O quórum mínimo para operação é de 2 votos. Se uma falha de rede isolar o Nó 01 dos Nós 02 e 03, o subgrupo com 2 nós mantém o quórum, enquanto o Nó 01 entra em modo de isolamento e bloqueia escritas. Contudo, se um segundo nó falhar, o *cluster* perde o quórum por completo (restando apenas 1 voto), congelando a gerência de todo o laboratório.
- Com QDevice (Cenário Modelado): O QDevice adiciona 1 voto externo ao sistema, elevando o total para 4 votos no ecossistema de decisão (3 nós físicos + 1 voto de desempate lógico). O quórum mínimo passa a ser de 3 votos ($4 \div 2 + 1 = 3$). Se houver uma falha catastrófica síncrona que derrube 2 nós físicos ao mesmo tempo (restantes: 1 nó físico online), este único nó sobrevivente se comunicará com o QDevice externo via rede. Juntos, o nó ativo e o QDevice somam 2 votos. Em um cenário com falhas progressivas, o QDevice fornece o mecanismo dinâmico para reajustar o peso dos votos (*Corosync Qdevice integration*), permitindo que o ambiente preserve a consistência do sistema de arquivos e evite o fenômeno do *Split-Brain* (onde partes isoladas do *cluster* tentam gravar dados conflitantes simultaneamente, corrompendo o banco de dados do laboratório).

Esta modelagem lógica de rede e quórum prova a viabilidade arquitetural da proposta: mesmo sob as severas restrições orçamentárias e de hardware da UFC Campus de Russas, a aplicação de topologias de redes virtuais e algoritmos de consenso distribuído garante um ambiente resiliente. Se um servidor falhar ou perder conectividade física durante uma aula, o plano de controle mantém-se íntegro através do paramento do *pmxcfs*, impedindo a interrupção das atividades das demais bancadas e assegurando a continuidade do fluxo de ensino.

5.4 Definição das *Golden Images* e Provisionamento de *Templates* Multidisciplinares

Esta seção estabelece o planejamento para a criação, otimização e distribuição das imagens de referência (*Golden Images*) dentro da nuvem privada projetada. A estratégia visa padronizar os ambientes de ensino e pesquisa para atender à demanda multidisciplinar da UFC Campus de Russas, transformando o processo tradicional de instalação manual de softwares em um mecanismo ágil de provisionamento lógico centralizado e elástico.

5.4.1 *Arquitetura de Replicabilidade baseada em Modelos (Templates)*

No modelo tradicional de gerenciamento de laboratórios compartilhados, cada computador físico precisa receber a instalação de dezenas de ferramentas pesadas e, por vezes, conflitantes de diferentes matrizes curriculares. Esse método gera heterogeneidade de versões de software ao longo do semestre, além de consumir espaço em disco de forma redundante e sobrecarregar o hardware legado.

A infraestrutura projetada adota o conceito de *Templates* do Proxmox VE. Uma *Golden Image* é uma instância virtual (máquina virtual ou contêiner) estruturada de forma limpa, contendo apenas o sistema operacional base e o conjunto de compiladores, dependências e softwares necessários para um escopo de ensino específico. Uma vez configurada e validada pelo administrador, essa instância é congelada e convertida em um *Template* de leitura exclusiva.

A partir desse modelo estático, o *hypervisor* pode provisionar novas instâncias lógicas para os alunos utilizando o conceito de Clones Vinculados (*Linked Clones*). Esta abordagem permite que a nova instância compartilhe os discos de leitura do *template* base e grave em um arquivo local do LVM-Thin apenas as alterações realizadas pelo usuário corrente em tempo de execução. Esse mecanismo permite criar uma nova bancada de trabalho para o aluno em menos de 5 segundos, ocupando inicialmente poucos megabytes no SSD físico de 120 GB do nó.

5.4.2 *Categorização dos Perfis de Disciplinas e Multidisciplinaridade*

Como os laboratórios de informática da UFC Campus de Russas operam sob um regime de compartilhamento entre diversos cursos (como Engenharia de Software, Ciência da Computação, Engenharia Civil, Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção), a infraestrutura foi modelada para suportar perfis de software altamente heterogêneos sem sobrecarregar a memória RAM restrita de 8 GiB dos nós.

Para otimizar os recursos, a modelagem prioriza o uso de contêineres LXC para disciplinas focadas em desenvolvimento lógico, programação e servidores. Para disciplinas de outros departamentos que demandam ferramentas com interfaces gráficas complexas ou softwares proprietários de simulação que exigem isolamento de *kernel*, o projeto prevê a alocação controlada de Máquinas Virtuais KVM, garantindo a flexibilidade de horários. A Tabela 2 apresenta a matriz de planejamento das *Golden Images* projetadas para o campus.

Tabela 2 — Matriz Multidisciplinar de *Golden Images* por Perfil de Curso

Identificador do Template	Tecnologia Base	Cursos Atendidos Primariamente	Escopo de Aplicação / Softwares Pré-instalados	RAM Máxima Alocada	Espaço Lógico Alocado
PVE-TMP-COMP-LEVE	LXC (Debian / Alpine)	Engenharia de Software, Ciência da Computação, Engenharias.	Disciplinas de introdução à programação e lógica. Compiladores GCC/G++, Python 3, Git e editores baseados em terminal.	256 MiB	10,0 GB
PVE-TMP-DEV-WEB	LXC (Ubuntu Server)	Engenharia de Software, Ciência da Computação.	Desenvolvimento Web, Banco de Dados e Sistemas Distribuídos. Node.js, Docker Engine, PostgreSQL e Java JDK.	512 MiB	25,0 GB
PVE-TMP-ENG-GRAPH	KVM (Ubuntu XFCE)	Engenharia Civil, Engenharia Mecânica, Engenharia de Produção.	Expressão Gráfica e Desenho Técnico. Interface gráfica otimizada, softwares de modelagem CAD/CAE bidimensionais e tridimensionais de código aberto (ex: QCad, FreeCAD).	2,0 GiB	35,0 GB
PVE-TMP-ESTAT-NU	LXC (Ubuntu /	Engenharias, Ciência da	Cálculo Numérico, Estatística e	1,0 GiB	20,0 GB

M	Rocky)	Computação.	Otimização de Processos. Ambiente integrado com R-Base, GNU Octave e bibliotecas científicas Python (NumPy, SciPy).		
---	--------	-------------	--	--	--

Fonte: elaborada pelo autor.

5.4.3 Mecanismo de Provisionamento e Limpeza Operacional

O ciclo de vida das instâncias virtuais durante o período letivo é projetado para garantir que o laboratório permaneça limpo, livre de lentidão acumulada e com desempenho constante, seguindo o fluxo automatizado:

1. Início da Aula: O plano de controle do Proxmox VE dispara comandos automatizados (via interface web ou API) que geram os *Linked Clones* a partir do *Template* correspondente ao curso daquele horário (ex: ativando LXC leves pela manhã para Engenharia de Software e alternando para as instâncias KVM da Engenharia Civil no turno da tarde). Os alunos recebem o acesso à sua instância isolada imediatamente.
2. Durante a Aula: Toda alteração de código, *download* de dependências de projetos ou modelagem geométrica por parte do estudante é gravada de forma incremental na camada fina do LVM-Thin instalada sobre o SSD ext4, consumindo apenas o estritamente necessário da capacidade real do disco.
3. Término da Aula: Os dados de produção acadêmica gerados pelos alunos são salvos em repositórios remotos ou nuvens institucionais da UFC. Em seguida, o administrador executa uma rotina de destruição das instâncias temporárias criadas para aquela sessão.

Esse processo de descarte e re-provisionamento garante a eliminação completa de falhas de configuração e "lixo digital" deixado por turmas anteriores. A modelagem prova que o uso combinado de *templates*, automação de ciclo de vida e a flexibilidade entre contêineres e máquinas virtuais soluciona o gargalo de manutenção que afeta o quadro enxuto da equipe de TI da UFC Campus de Russas, estendendo a utilidade do hardware legado de forma sustentável para toda a comunidade acadêmica.

5.5 Matriz de Consolidação da Viabilidade Técnica

Para finalizar a análise analítica, as variáveis físicas do hardware legado e as métricas projetadas nos cenários multidisciplinares foram consolidadas na Tabela 3. Esta matriz funciona como o indicador de conformidade final do projeto executivo, correlacionando a capacidade disponível com a demanda máxima estimada para o laboratório de 30 computadores.

Tabela 3 — Matriz de Métricas e Veredito de Viabilidade

Recurso Crítico	Capacidade Física Total (<i>Cluster</i>)	Demanda Máxima Projetada	Algoritmo / Mecanismo de Controle	Status de Viabilidade
Armazenamento (Espaço)	300,0 GB (Útil)	262,5 GB (Pico Real LXC)	<i>Thin Provisioning</i> via LVM-Thin	Viável com Margem de 12,5%
Desempenho de Disco	70k IOPS (<i>Read</i>) / 50k (<i>Write</i>)	12k IOPS (<i>Boot Storm</i>) / 8k (<i>Compile</i>)	Escalonamento nativo ext4	Viável (Folga de >80%)
Memória (Aulas Lógicas)	19,5 GiB (Útil)	9,0 GiB (Total 30 Alunos)	Isolamento nativo LXC + KSM	Totalmente Viável (Zona de Estabilidade)
Memória (Aulas Gráficas)	19,5 GiB (Útil)	28,8 GiB (Se síncrono 30 VMs)	<i>Memory Ballooning</i> + KSM	Inviável em Escala Máxima (Exige turmas reduzidas ou turnos)
Resiliência Lógica	3 Votos Físicos	4 Votos (3 Nós + QDevice)	Protocolo Corosync / <i>Split-Brain</i>	Viável (Suporta queda de até 2 nós)

Fonte: elaborada pelo autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou a modelagem arquitetural e a análise de viabilidade técnica de uma nuvem privada baseada na plataforma Proxmox VE, projetada para mitigar os gargalos de heterogeneidade, obsolescência de hardware e complexidade de gerência nos laboratórios compartilhados da UFC Campus de Russas. Diante de um cenário de severas restrições orçamentárias e de pessoal, a pesquisa cumpriu seu objetivo principal ao desenhar uma infraestrutura elástica e de baixo custo, utilizando como variáveis de entrada os limites físicos de estações de trabalho legadas equipadas com processadores de 3ª geração e apenas 8,0 GiB de memória RAM.

Os resultados quantitativos e analíticos obtidos ao longo da modelagem forneceram suporte teórico para a sustentabilidade da hipótese inicial, caracterizando uma validação parcial direcionada estritamente ao escopo do planejamento. Do ponto de vista de engenharia de sistemas e consistência lógica do modelo, a hipótese é suportada pelos cálculos de dimensionamento. Contudo, do ponto de vista de usabilidade prática, estabilidade sob estresse real e experiência dos usuários finais, a hipótese permanece pendente de validação empírica, a ser realizada em uma fase subsequente de implementação física. A modelagem analítica sugere a viabilidade do ecossistema ao adotar contêineres LXC como padrão para as disciplinas de lógica e desenvolvimento de software (Cenário B). Nesse cenário, o consumo de memória estimado para o *cluster* mantém-se em uma zona de estabilidade de 3,0 GiB por nó, patamar que se posiciona abaixo do teto físico disponível. Por outro lado, a análise de densidade de memória acendeu um alerta estrutural ao revelar que a virtualização completa via KVM (Cenário A), necessária para softwares de expressão gráfica de outras engenharias, indica inviabilidade se executada na capacidade máxima de 30 alunos simultâneos. Essa carga empurraria os nós ao esgotamento da RAM física útil e à consequente paginação em disco. Torna-se fundamental reforçar que essa limitação é uma restrição específica e condicionada ao hardware legado inventariado no campus, não sendo generalizável para infraestruturas dotadas de maior densidade de memória. Essa constatação não anula o projeto, mas consolida a necessidade de uma governança inteligente por parte da instituição, exigindo o escalonamento dessas turmas específicas em turnos isolados ou com concorrência reduzida.

No que tange ao armazenamento e à resiliência, a escolha do arranjo *ext4* combinado ao *LVM-Thin* mostrou-se consistente nos testes analíticos, indicando capacidade para absorver os picos estimados de *Boot Storm* (12.000 IOPS) e *Compile Storm* (8.000 IOPS) sem a sobrecarga de memória que sistemas alternativos causariam. Adicionalmente, a introdução lógica do

QDevice apoiou a resiliência teórica do sistema de arquivos distribuído (*pmxcfs*), indicando que falhas elétricas ou oscilações na rede local do campus tendem a ser mitigadas, prevenindo o fenômeno do *split-brain* no plano de controle.

Por fim, o mecanismo de provisionamento baseado em *Templates (Golden Images)* e clones vinculados indica o potencial para otimizar expressivamente a eficiência operacional do laboratório. Estima-se que o modelo seja capaz de disponibilizar uma bancada de trabalho padronizada para o aluno em menos de 5 segundos. O ciclo de vida planejado — que prevê a destruição automatizada das instâncias ao término de cada aula — sugere uma rota sustentável para eliminar o acúmulo de "lixo digital", projetando uma redução drástica na carga de suporte técnico da equipe de TI do campus.

Como trabalhos futuros para o desdobramento e validação empírica obrigatória desta pesquisa, recomenda-se:

1. A execução física desta prova de conceito em um ambiente de testes controlado no campus para validar empiricamente as taxas de compressão de memória do KSM sob carga real.
2. O desenvolvimento de um portal de autoatendimento integrado à API do Proxmox VE para que os professores possam agendar e disparar os *templates* das disciplinas de forma autônoma.
3. O estudo de viabilidade para a integração de tecnologias de aceleração gráfica compartilhada (vGPU) que possam estender a viabilidade das instâncias KVM para os cursos de engenharia tradicional.

Com estas diretrizes, esta pesquisa entrega não apenas um projeto executivo fundamentado, mas uma prova de conceito de que o reaproveitamento tecnológico, aliado à engenharia de sistemas de código aberto, é um caminho sustentável para a modernização da infraestrutura de ensino superior público.

REFERÊNCIAS

- MAHMOOD, Z.; IFTIKHAR, W. A study on Cloud Computing issues and challenges in higher education institutes of Middle Eastern countries. *International Journal of Creative Research Thoughts*, [s.l.], v. 6, n. 2, p. 894-902, 2018.
- MISHRA, J. P. et al. A Novel Observation on Cloud Computing in Education. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, [s.l.], v. 8, n. 3, p. 5262-5274, 2019.
- NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). **The NIST Definition of Cloud Computing**. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2017. (NIST Special Publication, SP 800-145).
- LUTKEVICH, B. **What is a private cloud?** TechTarget, 2022. Disponível em: <https://searchcloudcomputing.techtarget.com/definition/private-cloud>. Acesso em: 10 jul. 2025.
- SHALA RIZA, L.; AJDARI, J.; HAMITI, M. Challenges of Adoption of Cloud Computing Solutions in Higher Education: Case Study Republic of Kosovo. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, [s.l.], v. 10, n. 2, p. 1-10, 2019.
- SINGH, U.; BAHETI, P. K. Role and Service of Cloud Computing for Higher Education System. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, [s.l.], v. 4, n. 11, p. 708-711, 2017.
- SUBBAREDDY, R.; BEGAM, B. F. Implementation - Surplus resources to Private Cloud. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, [s.l.], v. 12, n. 2, p. 264-268, 2021.
- WAN MOHD ISA, W. A. R. et al. Factors influencing cloud computing adoption in higher education institution. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, [s.l.], v. 17, n. 1, p. 412-419, 2020.
- XUAN, C. Z.; RANA, M. E. Empowering Undergraduate Students With Cloud Computing Skills: A Proposal for OpenStack-Centric Education. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATA ANALYTICS FOR BUSINESS AND INDUSTRY (ICDABI)**, 4., 2023, [s.l.]. *Anais [...]*. [S.l.]: IEEE, 2023. p. 341-346.
- XUAN, C. Z.; RANA, M. E. Revolutionizing Higher Education: A Critical Analysis of Cloud Computing's Impact, Suitability, and Challenges. In: **ASU INTERNATIONAL CONFERENCE IN EMERGING TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABILITY AND INTELIGENT SYSTEMS (ICETISIS)**, 2024, [s.l.]. *Anais [...]*. [S.l.]: IEEE, 2024. p. 733-738.
- PROXMOX Server Solutions GmbH. **Proxmox Virtual Environment Administration Guide**. Version 8.x. Vienna, Austria: Proxmox, 2025. Disponível em: <https://pve.proxmox.com/pve-docs/pve-admin-guide.html>. Acesso em: 26 maio 2026.