

Tomada de Decisão Multicritério em Nuvens Privadas para Aplicações, Considerando os Requisitos de Desempenho e Custo

Paulo Roberto de Lima¹, Erica Teixeira Gomes de Sousa², Robson Wagner Albuquerque de Medeiros²

¹ Centro de Informática - CIN – Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)
Av. Jornalista Aníbal Fernandes, s/n – Cidade Universitária. Recife-PE – Brasil

² Departamento de Computação – Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, Recife - PE

paulo.prl.lima@gmail.com, erica.sousa@ufrpe.br,
robson.medeiros@gmail.com

Abstract. *This article presents a structured methodology for decision-making in private clouds, integrating Design of Experiments (DOE), Total Cost of Ownership (TCO), and the Analytic Hierarchy Process (AHP). The approach replaces subjective choices with a quantitative analysis between performance and cost. Validated by a case study between OpenStack and CloudStack, the research revealed that CloudStack maintained stable latency and a TCO 33% lower than OpenStack. The results, synthesized by AHP, gave CloudStack an overall score of 77.8%, confirming the platform's efficiency for the evaluated requirements. As main contributions, this work provides an approach that links empirical performance evaluation to direct cost and consolidates a replicable methodological framework through a practical case study, allowing for further investigations with other private cloud applications and platforms under controlled conditions.*

Resumo. *Este artigo apresenta uma metodologia estruturada para a tomada de decisão em nuvens privadas, integrando Planejamento de Experimentos (DOE), Custo Total de Propriedade (TCO) e o Processo de Análise Hierárquica (AHP). A abordagem substitui escolhas subjetivas por uma análise quantitativa entre desempenho e custo. Validada por um estudo de caso entre OpenStack e CloudStack, a pesquisa revelou que o CloudStack manteve latência estável e TCO 33% inferior ao OpenStack. Os resultados, sintetizados pelo AHP, conferiram um escore global de 77,8% ao CloudStack, confirmando a eficiência da plataforma para os requisitos avaliados. Como principais contribuições, este trabalho provê uma abordagem que vincula a avaliação de desempenho empírica ao custo direto e consolida uma estrutura metodológica replicável por meio de um estudo de caso prático, permitindo a realização de novas investigações com outras aplicações e plataformas de nuvem privada sob condições controladas.*

1. Introdução

A computação em nuvem consolidou-se como um paradigma essencial para o fornecimento de serviços de tecnologia da informação, oferecendo escalabilidade,

flexibilidade e eficiência operacional. No contexto corporativo, a adoção de nuvens privadas tem se destacado por oferecer controle sobre a infraestrutura, atendendo a requisitos rigorosos de segurança e soberania de dados [Mell e Gupta 2011]. Entretanto, a seleção de uma Plataforma de Gerenciamento de Nuvem (*Cloud Management Platform – CMP*) adequada representa um desafio estratégico, uma vez que as organizações precisam equilibrar o desempenho técnico com a viabilidade econômica [Gupta e Sehrawat 2020].

A diversidade de soluções de código aberto, como OpenStack e CloudStack, introduz complexidade ao processo de decisão devido às diferentes arquiteturas e demandas de recursos. Frequentemente, a escolha de uma plataforma é baseada em percepções subjetivas ou popularidade, sem uma análise quantitativa que considere o comportamento da aplicação sob carga de trabalho e os custos operacionais envolvidos [Singh e Kaur 2021]. Como ressaltam [Sharma e Sehrawat 2020], a falta de uma metodologia estruturada pode levar a investimentos ineficientes e ao não cumprimento dos acordos de nível de serviço (SLA).

Diante deste cenário, este trabalho apresenta uma metodologia estruturada para apoiar a tomada de decisão na escolha de plataformas de nuvem privada. A pesquisa integra técnicas de Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments – DOE*) para avaliação de desempenho, fundamentada nos princípios de [Li et al. 2013] e [Ali 2021] para a análise estatística de serviços em nuvem. Para a análise financeira, emprega-se a modelagem de Custo Total de Propriedade (*Total Cost of Ownership – TCO*), baseada em modelos de eficiência energética e custos operacionais discutidos por [Barroso e Hölzle 2018] e [Sharma e Sehrawat 2020]. A síntese multicritério é realizada através do Processo de Análise Hierárquica (*Analytic Hierarchy Process – AHP*), como defende [Saaty 2008] para a resolução de decisões complexas em infraestrutura. O objetivo é fornecer um processo replicável que permita identificar a solução que melhor atenda aos requisitos de desempenho e custo, validado por um estudo de caso comparativo entre as plataformas OpenStack e CloudStack. Como principais contribuições, este trabalho estabelece uma abordagem sistemática que vincula diretamente a avaliação de desempenho empírica ao custo operacional de infraestrutura. Adicionalmente, por meio do estudo de caso prático executado, consolida-se uma estrutura metodológica totalmente replicável, servindo como referência para que futuras pesquisas analisem outras aplicações e plataformas de nuvem privada sob condições controladas.

Este artigo está estruturado em seis seções: a Seção 2 fundamenta os conceitos de nuvem privada, DOE, TCO e AHP; a Seção 3 apresenta os trabalhos relacionados sobre decisão multicritério em ambientes de nuvem; a Seção 4 detalha a metodologia proposta; a Seção 5 apresenta o estudo de caso entre OpenStack e CloudStack com a discussão dos resultados; por fim, a Seção 6 apresenta conclusões e trabalhos futuros

2. Conceitos Básicos

Nesta seção, são apresentados os fundamentos teóricos necessários para a compreensão da metodologia proposta.

A computação em nuvem privada é uma infraestrutura provisionada para uso exclusivo por uma única organização que compreende vários consumidores (por exemplo, unidades de negócios). Ela pode pertencer, ser gerenciada e operada pela própria organização, por terceiros ou por uma combinação de ambos, podendo existir nas

dependências da organização ou fora delas [Mell e Gupta 2011]. Para a gestão dessas infraestruturas, destacam-se as Plataformas de Gerenciamento de Nuvem (CMP), como o OpenStack e o CloudStack, que automatizam o provisionamento de recursos computacionais, armazenamento e rede [Singh e Kaur 2021].

Para o Planejamento de Experimentos, o *Design of Experiments* (DOE) é uma técnica estatística utilizada para planejar e conduzir experimentos de forma a coletar dados que possam ser analisados estatisticamente para obter conclusões válidas e objetivas. No contexto de avaliação de desempenho em nuvem, o DOE permite identificar quais fatores (como tipo de oferta de CPU/RAM) influenciam significativamente as variáveis de resposta (como latência e *throughput*), minimizando o número de execuções necessárias [Li et al. 2013, Ali 2021]

O Custo Total de Propriedade, o *Total Cost of Ownership* (TCO) é uma métrica financeira destinada a auxiliar consumidores e gestores a determinar os custos diretos e indiretos relacionados à aquisição e operação de um produto ou sistema. Em ambientes de nuvem privada, o TCO não se limita ao gasto de capital (CapEx), mas abrange fortemente as despesas operacionais (OpEx), incluindo consumo de energia, manutenção de hardware, licenças de software e custos de pessoal especializado necessários para sustentar a infraestrutura [Gupta e Sehrawat 2020].

O Processo de Análise Hierárquica, o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é um método de tomada de decisão multicritério (MCDM) que permite a decomposição de um problema complexo em uma estrutura hierárquica. O método baseia-se em comparações paritárias entre critérios e alternativas, utilizando uma escala de importância relativa que varia de 1 a 9 [Saaty 2008]. A principal vantagem do AHP neste estudo é a capacidade de integrar métricas quantitativas de desempenho e custos com julgamentos qualitativos, garantindo a consistência das escolhas através do Índice de Consistência (CI) e Razão de Consistência (CR).

3. Trabalhos Relacionados

A literatura apresenta métodos de Tomada de Decisão Multicritério (MCDM) como ideais para gerenciar critérios conflitantes na avaliação de nuvens computacionais. Para reduzir subjetividades, [Huamaní 2014] propôs um modelo via AHP, destacando o critério “Rendimento” junto a métricas de escalabilidade e acessibilidade.

Em ambientes híbridos e móveis, a escolha da infraestrutura é vital. O trabalho de [Kurup e Guruprasad 2022] avaliou a seleção de infraestruturas utilizando AHP para ponderar parâmetros de QoS, aplicando TOPSIS e MOORA para garantir a robustez das conclusões. O artigo [Mishra et al. 2020] focou na otimização fog-cloud, demonstrando que incluir a carga de rede no AHP resulta em alocações eficientes.

Quanto aos métodos de decisão, o AHP sintetiza métricas heterogêneas. Os autores do trabalho [O. Gómez et al. 2022] avaliaram arquiteturas de microsserviços, concluindo que integrar desempenho de rede e recursos computacionais é vital para a precisão da infraestrutura. A dimensão econômica também é central: O trabalho [Sharma e Sehrawat 2020] demonstraram que o custo é fator fundamental, mas ponderado a benefícios de segurança e governança. Os autores [Ramos e Justo 2023b] utilizaram o AHP para selecionar modelos de implantação de modelos de computação em nuvem em instituições públicas, onde o custo atua como vetor estratégico de longo prazo.

Novas metodologias buscam eficiência em larga escala. O trabalho [Mostafa 2024] introduziu o *Group Best-Only Method* (GBOM) para tornar decisões em grupo ágeis e confiáveis, avaliando provedores sob critérios de desempenho. Já o artigo [Petrov 2021] propôs estruturar o AHP “em blocos”, agrupando critérios em categorias lógicas para reduzir a complexidade de comparações paritárias e otimizar o processo.

Tabela 1. Comparativo dos trabalhos relacionados

Trabalho	Decisão Multicritério (MCDM/AHP)	Avaliação Empírica de Desempenho	Foco em Nuvem Privada	Análise de Custo (TCO)	Replicabilidade sob Condições Controladas
Huamaní (2014)	Sim	-	-	-	-
Mishra et al. (2020)	Sim	-	-	-	-
Sharma e Sehrawat (2020)	Sim	-	-	Sim	-
Petrov (2021)	Sim	-	-	-	-
Kurup e Guruprasad (2022)	Sim	-	-	-	-
Gómez et al. (2022)	Sim	Sim	-	-	-
Ramos e Justo (2023)	Sim	-	-	Sim	-
Mostafa (2024)	Sim	-	-	-	-
Este Trabalho	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

A Tabela 1 sintetiza as abordagens da literatura pesquisada frente aos critérios fundamentais utilizados nesta pesquisa para a seleção de plataformas privadas. Todavia, há uma lacuna na obtenção de dados de entrada que sustentem esses modelos sem depender de estimativas abstratas ou questionários.

A diferenciação deste trabalho reside na proposição de uma abordagem integrada que une o plano computacional ao custo. Ao contrário das pesquisas correlatas, este estudo de caso elimina critérios subjetivos ao alimentar o processo decisório com métricas de desempenho extraídas em tempo real sob condições controladas, relacionada ao custo direto de infraestrutura local. Assim, este trabalho diferencia-se por consolidar uma estrutura operacional replicável direcionada especificamente a ambientes de nuvem privada, onde a escolha final baseia-se em evidências físicas e econômicas.

4. Metodologia para Tomada de Decisão na Escolha de Plataformas de Nuvem

Esta seção detalha a metodologia adotada para auxiliar na tomada de decisão sobre a escolha de plataformas de nuvens privadas, considerando métricas de desempenho e custo. A pesquisa empregou uma abordagem estruturada que combina técnicas de Planejamento

de Experimentos (DOE), modelagem de Custo Total de Propriedade (TCO) e o Processo de Análise Hierárquica (AHP).

Para o desenvolvimento da pesquisa, as atividades foram organizadas em quatro fases sequenciais, conforme ilustrado no fluxo metodológico da Figura 1.

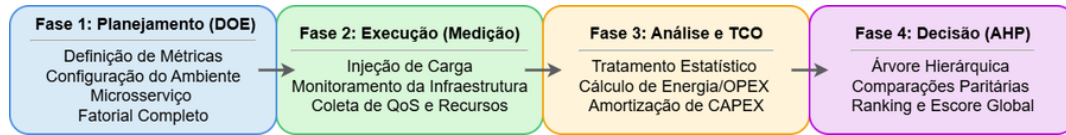


Figura 1. Metodologia

4.1. Fase 1: Planejamento e Preparação do Experimento

Esta fase tem a função de estabelecer os parâmetros de teste, isolar a infraestrutura e definir a estruturação estatística dos cenários. Ela é composta por quatro atividades:

- **Atividade 1: Analisar o Objetivo do Estudo e Selecionar as Métricas:** O passo inicial consiste na definição formal dos indicadores. Estabelecem-se indicadores quantitativos divididos em três categorias: (i) métricas associadas ao SLA na perspectiva do cliente (como Tempo de Resposta, Latência e *Throughput*); (ii) métricas de utilização de recursos sistêmicos (como uso de CPU e Memória RAM); e (iii) métricas econômicas, representadas pelo TCO mensal.
- **Atividade 2: Configurar os Ambientes de Nuvem:** Para garantir a validade dos dados, é imperativo que o ambiente base seja idêntico. Os gerenciadores de nuvem sob avaliação devem ser implantados em infraestrutura de *hardware* físico com especificações rigorosamente idênticas. Esse isolamento assegura que as métricas de *overhead* registradas sejam originadas exclusivamente pelos componentes de gerência de cada plataforma, eliminando vieses físicos.
- **Atividade 3: Implantar a Aplicação para Testes de Carga:** Para submeter os ambientes a um estresse computacional representativo, padroniza-se a carga de trabalho (*workload*). Desenvolve-se e implanta-se uma aplicação simuladora, tipicamente baseada em microsserviços e operando de forma assíncrona. A arquitetura da aplicação deve permitir alta concorrência em operações de Entrada/Saída (E/S), emulando com fidelidade o perfil de tráfego de ambientes corporativos modernos.
- **Atividade 4: Planejar os Experimentos (Metodologia DOE):** A estruturação das baterias de teste é formalizada adotando-se o modelo estatístico apropriado, como o Fatorial Completo 3^2 [Li et al. 2013], composto por fatores de controle centrais. O Fator A (Oferta de Serviço) define a capacidade das instâncias virtuais em diferentes níveis predefinidos. O Fator B (Intensidade de Carga) define o volume de concorrência simultânea. A combinação paramétrica gera os cenários exclusivos de teste. Para assegurar a robustez estatística e permitir o cálculo de variâncias, estabelece-se a execução de um número fixo de réplicas independentes por cenário.

4.2. Fase 2: Execução e Medição de Desempenho

Esta fase tem como finalidade a execução controlada dos testes estipulados no DOE e a extração empírica dos dados. Ela concentra-se em uma atividade central:

- **Atividade 5: Medir o Desempenho das Plataformas:** O processo de medição deve capturar simultaneamente duas perspectivas cliente e servidor. Sob a perspectiva da borda (cliente), emprega-se uma ferramenta geradora de carga automatizada para injetar as conexões simultâneas contra a aplicação, registrando a vazão e o tempo de processamento. Sob a perspectiva do hospedeiro (servidor), o monitoramento é realizado por um sistema de telemetria. Utilizam-se protocolos de baixo impacto para aferir conectividade e agentes locais operando em baixo nível para extrair as métricas de recursos diretamente do sistema operacional.

4.3. Fase 3: Tratamento Estatístico e Modelagem de TCO

Esta fase é dedicada ao processamento quantitativo das amostras brutas extraídas e à sua conversão em indicadores de viabilidade estratégica. Ela agrupa três atividades:

- **Atividade 6: Desenvolver o Modelo de Custo:** Para a avaliação financeira, quantifica-se o impacto da arquitetura. Desenvolve-se um modelo de TCO separando os custos em Despesas de Capital (CAPEX) e Despesas Operacionais (OPEX). O CAPEX é mensurado pela depreciação do *hardware* durante seu ciclo de vida. O OPEX considera o custo da equipe técnica (precificado de acordo com a complexidade de manutenção de cada solução) e o consumo energético. A energia é calculada através de um modelo matemático dinâmico que interpola a potência dissipada pelo servidor em estado ocioso (*idle*) e em capacidade máxima, utilizando as taxas reais de consumo de recursos coletadas na fase anterior.
- **Atividade 7: Analisar Estatisticamente os Dados:** As amostras geradas pelas réplicas dos testes passam por tratamento estatístico descritivo. Calculam-se a média aritmética e o desvio-padrão das métricas em cada cenário, filtrando anomalias e estabelecendo um referencial numérico sólido.
- **Atividade 8: Analisar os Cenários de Desempenho e Custo:** Esta atividade consiste no cruzamento dos dados analisados, gerando artefatos comparativos que pareiam os limites de desempenho alcançados frente às metas de SLA com o custo mensal (*overhead* traduzido em consumo energético e horas de esforço técnico) associado a cada infraestrutura.

4.4. Fase 4: Tomada de Decisão Multicritério (AHP)

A fase final consolida os dados de desempenho e custo, aplicando o método AHP para determinar a plataforma que apresenta os resultados mais adequados. Esta atividade é subdividida em quatro etapas metodológicas:

- 1) **Estruturação Hierárquica do Problema:** O problema de decisão é decomposto em três níveis: o objetivo central (seleção da nuvem privada), os critérios de avaliação (Tempo de Resposta, Uso de CPU, Latência, Uso de RAM e TCO) e as alternativas de solução (Ambientes de Nuvem).
- 2) **Comparações Paritárias e Definição de Prioridades:** Utilizando a Escala Fundamental de [Saaty 2008], realizam-se comparações par-a-par entre os critérios para determinar sua importância relativa. Esse procedimento gera uma matriz de decisão que estabelece os pesos (vetor de prioridades) de cada indicador, traduzindo as preferências arquiteturais em valores matemáticos.
- 3) **Análise de Consistência:** Para garantir a validade dos pesos atribuídos, avalia-se a coerência lógica da matriz por meio do cálculo da Razão de Consistência (CR

- *Consistency Ratio*). Confirma-se que as matrizes geradas respeitam o limite de tolerância estipulado pela literatura ($CR \leq 0,10$).

- 4) **Avaliação das Alternativas e Síntese Final:** Os dados estatísticos de desempenho e TCO de cada nuvem são normalizados. Posteriormente, esses valores normalizados são multiplicados pelos respectivos pesos dos critérios. O somatório final gera um escore quantitativo (pontuação normalizada) para cada plataforma.

O resultado desta fase é a seleção formal da plataforma de nuvem privada, validada matematicamente pelos artefatos gerados pelo AHP (matriz de comparação, vetor de prioridades e pontuação normalizada), concluindo a execução do fluxo metodológico.

5. Estudo de Caso

Essa seção apresenta um estudo de caso para avaliação da metodologia proposta. O objetivo do estudo é apresentar uma análise comparativa das plataformas de nuvem OpenStack e CloudStack, considerando as métricas de desempenho e custo. Os resultados das métricas de tempo de execução das VMs, utilização de processador, utilização de memória, tempo de resposta, latência, throughput e custo total de propriedade são adotados para a tomada de decisão na seleção dessas plataformas com base na metodologia proposta.

5.1. Fase 1: Planejamento Preparação do Experimento

Nessa atividade, o estudo implementou e configurou ambientes de nuvem privada com as plataformas OpenStack e CloudStack em hardwares idênticos. Foram utilizados dois computadores *bare-metal*, um roteador, um *switch* e um *nobreak*. Os servidores físicos seguiram as seguintes características: processador Intel Core I7, 16GB de Memória RAM, Disco de 240GB e Sistema Operacional Ubuntu 24.04.2 LTS.

A carga de trabalho foi representada por um microsserviço desenvolvido para esta pesquisa, implantado em máquinas virtuais (VMs) idênticas em ambos os ambientes. A aplicação foi construída com os seguintes componentes: Linguagem Python 3.10; framework web FastAPI operando de forma assíncrona sob o padrão ASGI (Asynchronous Server Gateway Interface); servidor de aplicação Gunicorn com workers Uvicorn; e mapeamento objetorelacional (ORM) SQLAlchemy. O modelo de dados consistiu nas tabelas “Categorias” e “Livros”, cujos endpoints geraram cargas de escrita (requisições POST) e de leitura (requisições GET).

Os testes seguiram o Planejamento de Experimentos (DOE) por meio de um planejamento fatorial completo 3^2 [Ali 2021], variando sistematicamente dois fatores independentes:

- Oferta de Serviço: Capacidade computacional alocada às VMs em três níveis: Pequena (2 Cores; 4GB RAM; 60GB HD), Média (4 Cores; 6GB RAM; 60GB HD) e Grande (8 Cores; 8GB RAM; 60GB HD).
- Requisições Simultâneas: Volume de concorrência com 500, 700 e 900 requisições.

Tabela 2. Cenários gerados pelo planejamento de experimentos

Cenário	Oferta de Serviço	Requisições Simultâneas
1	Pequena	500
2		700
3		900
4	Média	500
5		700
6		900
7	Grande	500
8		700
9		900

A combinação desses fatores configurou um planejamento fatorial 3^2 , gerando nove cenários de teste distintos para cada plataforma, conforme detalhado na Tabela 2, os quais delimitam os volumes de carga de trabalho suportados pela infraestrutura local. Para cada cenário, houve a execução de 30 réplicas, o que resultou em 270 baterias de testes em cada ambiente, totalizando 540 testes. Esse procedimento totalizou 270 minutos de experimentação ativa por plataforma (246 minutos de execução líquida para o CloudStack e 236 minutos para o OpenStack, acrescidos dos intervalos de estabilização operacional).

A escolha de 30 réplicas por cenário fundamenta-se no Teorema Central do Limite, garantindo que a distribuição das médias amostrais aproxime-se de uma curva normal e confira robustez estatística aos testes paramétricos, adotando-se o nível de confiança padrão de 95% $\alpha = 0,05$ [Jain 1991]. Quanto às análises combinadas e de interação entre os fatores que o planejamento 3^2 viabiliza, optou-se por focar na agregação consolidada dos efeitos principais nas variáveis de resposta (latência e uso de recursos). Essa abordagem prioriza os dados brutos necessários para alimentar as matrizes de julgamento paritário do AHP, mitigando a complexidade combinatória no modelo de decisão final.

Os ensaios empíricos revelaram que a aplicação atinge o limiar de saturação sob a carga máxima de 900 requisições simultâneas, permitindo avaliar o comportamento extremo das plataformas sem submetê-las a um regime permanente de degradação irrealista fora de condições de produção.

5.2. Fase 2: Execução e Medição de Desempenho

A análise de desempenho envolveu a medição e a coleta das métricas para cada cenário planejado. Para isso, foram utilizadas duas ferramentas de forma simultânea: o Apache JMeter, para geração de carga e o sistema Zabbix integrado ao Grafana [O. Gómez et al. 2022], para coletar as métricas de utilização de recursos diretamente do servidor.

No cliente, o JMeter injetou as conexões simultâneas predefinidas nos *endpoints* do microsserviço, registrando os tempos de processamento. Durante os testes, foram coletadas as métricas de desempenho vinculadas ao SLA: Tempo de Resposta (s), Latência (s), *Throughput* (vazão).

Do lado do servidor o Zabbix, monitorou a Utilização de Memória (%) e do Processador (%) do hospedeiro (*host*). A coleta extraiu o *overhead* gerado pelos componentes de gerência do OpenStack e CloudStack [Patel e Patel 2016, Chaudhry 2015].

Com base nos experimentos realizados, a Tabela 3 sintetiza a diferença percentual de desempenho e consumo de recursos do OpenStack em relação ao CloudStack. Os valores representam o quanto o OpenStack é superior (valores positivos) ou inferior (valores negativos/degradação) em cada métrica e oferta de serviço.

Tabela 3. Diferença Percentual de Performance (Referência: CloudStack)

Métrica	Oferta: Grande	Oferta: Média	Oferta: Pequena
Utilização de Memória	+107,00%	+55,54%	+8,94%
Utilização de Processador	+1682,00%	+1456,00%	+1231,00%
Tempo de Resposta	+1261,00%	+1424,00%	+29359,00%
Latência	+1201,00%	+1596,00%	+28480,00%
Throughput (Vazão)	+0,07%	-9,02%	-7,88%

A análise conjunta dos dados apresentados na Tabela 3 apresenta as diferenças de desempenho entre as duas plataformas de nuvem privada, especialmente sob condições de estresse e variação de carga.

1) Overhead de Recursos (Processador e Memória)

O OpenStack demonstrou um consumo de recursos computacionais drasticamente superior. No perfil Grande, a utilização do processador chega a ser 1.682% maior que a do CloudStack. Esse comportamento indica que a arquitetura modular do OpenStack, embora flexível, impõe um custo operacional elevado (*overhead*) para a gerência do ambiente [Patel e Patel 2016], consumindo ciclos de CPU que poderiam ser destinados às instâncias de usuário [Chaudhry 2015]. Na utilização de memória, a diferença também é acentuada, dobrando o consumo (+107%) no cenário de maior carga.

2) Atendimento ao SLA e Escalabilidade

As métricas de Tempo de Resposta e Latência apresentam uma degradação de quase 30,000% (29,359% no tempo de resposta) na oferta Pequena no OpenStack. Isso sugere que, em configurações de hardware mais limitadas ou com menor reserva de recursos, a plataforma se torna instável ou ineficiente para processar requisições em tempo hábil.

3) Eficiência de Vazão (Throughput)

O CloudStack supera o OpenStack em vazão nas ofertas de serviço Média (-9,02%) e Pequena (-7,88%). Isso demonstra que o CloudStack consegue entregar uma maior densidade de requisições processadas com um custo de infraestrutura significativamente menor.

5.3. Fase 3: Tratamento Estatístico e Modelagem de TCO

Os dados empíricos extraídos na etapa de medição passaram por tratamento estatístico, calculando-se a média aritmética das 30 execuções e o desvio-padrão para cada

métrica avaliada nos cenários. Esses dados de desempenho consolidados serviram como base técnica para a modelagem financeira das plataformas.

O modelo de Custo Total de Propriedade (TCO) foi decomposto em três elementos principais: Custo de *Hardware* (CAPEX), Custo da Equipe Técnica (OPEX) e Custo de Consumo de Energia Elétrica (OPEX).

O Custo de *Hardware* ($C_{hardware}$) quantificou o investimento de capital em toda a infraestrutura física. Para traduzir o investimento inicial em uma despesa mensal recorrente, o custo total de aquisição dos servidores ($V_{servidor}$) e dos demais ativos de rede (V_{ativo_rede}) foi somado e amortizado ao longo de um tempo de vida útil padrão estipulado em meses (T_{vida}), conforme a Equação 1.

$$C_{hardware} = \frac{(\sum_{i=1}^n V_{servidor_i}) + (\sum_{k=1}^p V_{ativo_rede_k})}{T_{vida}} \quad (1)$$

O Custo da Equipe Técnica ($C_{pessoal}$) modelou as despesas operacionais referentes ao esforço humano. Este valor considerou a quantidade de horas mensais de gestão estimadas (H_{gestao}) para cada membro da equipe multiplicada pelo valor de sua hora de trabalho (V_{hora}), o qual foi derivado do nível de qualificação exigido pelas arquiteturas do OpenStack e CloudStack, o estudo considerou valores diferentes para o valor da hora pelo nível de complexidade de cada arquitetura [Gupta e Sehrawat 2020], [S. Filho e G. Filho 2016].

Equação 2:

$$C_{pessoal} = \sum_{j=1}^m (H_{gesto_j} \times V_{hora_j}) \quad (2)$$

O Custo de Energia Elétrica ($C_{energia}$) foi derivado do esforço computacional real aferido na Fase 2. A equação de energia primeiro determina a Potência Média de Consumo ($P_{consumo}$) de cada servidor interpolando a sua potência em estado ocioso (P_{ociosa}) e a sua potência máxima (P_{maxima}) [Barroso e Hölzle 2018], multiplicada pela Utilização Média de Recursos ($U_{recursos}$), as taxas empíricas de CPU e RAM medidas pelo Zabbix. A fórmula da potência dinâmica é dada pela Equação 3:

$$P_{consumo_i} = P_{ociosa_i} + (P_{maxima_i} - P_{ociosa_i}) \times U_{recursos_i} \quad (3)$$

A partir da potência dinâmica em Watts, calculou-se o custo mensal de energia convertendo o valor para Quilowatt-hora (kWh) – multiplicando-se pelo total de horas no mês (H_{mes}) e dividindo por 1000, e aplicando o valor da tarifa de energia (V_{tarifa}) e a métrica de eficiência do *datacenter* (PUE), de acordo com a Equação 4:

$$C_{energia} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{P_{consumo_i} \times H_{ms}}{1000} \right) \times V_{tarifa} \times PUE \quad (4)$$

Por fim, o TCO mensal estimado para cada ambiente de nuvem foi consolidado pela Equação 5, somando-se os componentes de capital amortizado e os custos operacionais:

$$TCO = C_{hardware} + C_{pessoal} + C_{energia} \quad (5)$$

Nesta etapa, evidenciou-se que a divergência no TCO decorre da eficiência computacional e da complexidade arquitetural de cada plataforma. Como os parâmetros de *hardware* e a tarifa elétrica são constantes, a maior exigência de processamento ($U_{recursos}$) do OpenStack elevou diretamente o seu consumo energético (Equação 3). Somado a isso, a sua maior complexidade de implantação e gestão exigiu mais esforço e qualificação

da equipe de TI, aumentando o custo operacional (Equação 2). Consequentemente, o TCO mensal estimado atingiu R\$ 10.968,53 para o OpenStack, contra R\$ 7.367,43 do CloudStack. Detalhamento TCO na Tabela 4.

Tabela 4. Cálculo do Custo Total de Propriedade (TCO) Mensal

Modelos de custo	Equação / Lógica	OpenStack	CloudStack
Custo de Hardware	Equação 1	R\$ 222,22	R\$ 222,22
Custo da Equipe Técnica	Salário dividido por hora, aplicado na Equação 2. O estudo considerou salários pelo nível de complexidade.	R\$ 10.500,00	R\$ 7.000,00
Custo de Energia	Equação 4	R\$ 246,31	R\$ 145,21
Custo Total Mensal (TCO)	Equação 5	R\$ 10.968,53	R\$ 7.367,4

5.4. Fase 4: Tomada de Decisão Multicritério (AHP)

A etapa final aplicou o Processo de Análise Hierárquica (AHP) para integrar as dimensões técnicas e econômicas, determinando qual plataforma apresentou a solução mais adequada. O AHP é particularmente eficaz nesse contexto, pois decompõe problemas complexos de decisão em uma estrutura lógica e matemática [Saaty 1990].

A estruturação do problema foi decomposta em três níveis: o objetivo central (Selecionar a Plataforma de Gerenciamento de Nuvem Ótima), os critérios de avaliação (Custo Total de Propriedade - TCO, Utilização de CPU, Utilização de Memória, Latência, Tempo de Resposta e *Throughput*) e as alternativas de solução (OpenStack e CloudStack).

Utilizando a Escala Fundamental de Saaty [Saaty 2008], realizaram-se as comparações paritárias entre os critérios para determinar sua importância relativa, gerando a matriz de decisão e o vetor de prioridades (pesos). Para garantir a validade dos julgamentos, atestou-se a coerência lógica da matriz por meio do cálculo da Razão de Consistência (CR). O cálculo do índice para a matriz de critérios deste estudo resultou em um CR = 0,04, o que valida perfeitamente os pesos adotados, pois o valor respeita o limite empírico de tolerância estipulado pela literatura ($CR \leq 0,10$).

Após a ponderação dos critérios, os dados estatísticos brutos de desempenho e o TCO (calculado em R\$ 10.968,53 para o OpenStack e R\$ 7.367,43 para o CloudStack) foram normalizados. É fundamental destacar a mecânica matemática dessa normalização no contexto deste estudo: a maioria das métricas avaliadas (TCO, Utilização de CPU, Latência e Tempo de Resposta) atua como “critérios de custo”, onde a premissa de negócio é “menor é melhor”. Portanto, o método aplicou uma inversão proporcional, fazendo com que a plataforma que registrou os menores valores brutos de consumo e despesa recebesse a maior pontuação normalizada.

Posteriormente, esses valores normalizados foram multiplicados pelos pesos de seus respectivos critérios através de um cálculo de soma ponderada. O somatório final gerou o escore global das alternativas.

Como o CloudStack demandou um esforço computacional significativamente menor (evidenciado pelo baixo *overhead* de CPU no hipervisor), demonstrou latências

estáveis como valores em milissegundos e operou com um custo total de propriedade aproximadamente 33% inferior ao do OpenStack, a normalização do AHP traduziu esses baixos consumos em altas pontuações. O CloudStack obteve o escore global de 77,8%, consolidando-se matematicamente como a infraestrutura os melhores resultados para os requisitos do experimento, superando o OpenStack, que atingiu apenas 22,2% no escore final, como detalha a Tabela 5.

Tabela 5. Síntese Final para a Escolha da Plataforma

Critério	Peso	Pontuação OpenStack	Pontuação CloudStack
CUSTO (TCO)	23,3%	0,400	0,600
CPU (%)	23,3%	0,064	0,936
MEM (%)	23,3%	0,404	0,596
LAT	9,4%	0,008	0,992
TMR	6,1%	0,008	0,992
THR	3,3%	0,476	0,524
SOMA (Resultado Final)	100%	22,2%	77,8%

5.5. Discussão Comparativa

Os resultados obtidos no estudo de caso corroboram e expandem as observações isoladas encontradas na literatura correlata. A constatação de que o OpenStack impõe um elevado overhead de processamento devido à sua modularidade e à complexidade do subsistema de rede Neutron valida empiricamente as análises conceituais de [Patel e Patel 2016] e [Chaudhry 2015]. O critério de custo no modelo de decisão multicritério alinha-se com as conclusões estratégicas de [Sharma e Sehrawat 2020] e [Ramos e Justo 2023a], que apontam o fator econômico como vetor decisivo de longo prazo em instituições. Contudo, este trabalho avança em relação aos estudos de [Mostafa 2024] e [Petrov 2021] enquanto tais autores limitam suas propostas metodológicas ao refinamento abstrato de pesos algorítmicos, esta pesquisa elimina a subjetividade dos julgamentos paritários ao injetar medições físicas reais de consumo de hardware e custos amortizados de TCO na matriz do AHP. Desta forma, o estudo de caso funciona como o elo prático que prova que o CloudStack entrega maior previsibilidade de metas de SLA com menor custo operacional.

6. Conclusões

Os resultados das métricas de desempenho das arquiteturas mostram que o CloudStack manteve a latência e o tempo de resposta invariavelmente baixos (média de 11,9 ms), enquanto o OpenStack apresentou uma degradação de até 29,359%; no tempo de resposta em configurações de recursos limitados (oferta Pequena). O OpenStack apresentou um *overhead* computacional superior, consumindo até 1,68% a mais de CPU e 107% a mais de memória RAM para processar a mesma carga de trabalho, o que é atribuído à sua modularidade e complexidade do plano de controle. O modelo de TCO demonstrou que o CloudStack possui um custo mensal operacional (R\$ 7.367,43) aproximadamente 33% menor que o do OpenStack (R\$ 10.968,53), economia impulsionada pela menor complexidade de gestão e pela maior eficiência energética.

Uma contribuição central é que esta estrutura metodológica é replicável, permitindo a realização de estudos com outras aplicações e plataformas de nuvem privada sob condições controladas. O resultado obtido com o método AHP atribuiu uma pontuação de preferência de 77,8% ao CloudStack contra 22,2% ao OpenStack. Isso mostra que para cenários que priorizam a eficiência de custos e a previsibilidade, o CloudStack apresenta-se como a alternativa com melhores resultados.

Com base nas conclusões e limitações identificadas no estudo, as seguintes direções para pesquisas futuras são propostas:

- 1) Executar a análise comparativa em um cluster de múltiplos nós com hardware de classe empresarial, avaliando o comportamento das plataformas sob alta disponibilidade e balanceamento de carga real.
- 2) Conduzir testes de carga de média ou longa duração para capturar sobrecustos computacionais gerados pelas tarefas rotineiras de *housekeeping* das plataformas de nuvem, mapeando o impacto de rotinas periódicas de verificação, limpeza de cache e atualizações internas (como os processos *nova-compute* e *nova-conductor* no OpenStack).
- 3) Ampliar a modelagem de custo de pessoal, discretizando e quantificando as horas de trabalho efetivas alocadas especificamente para as disciplinas de implantação, operação, triagem de falhas e manutenção da infraestrutura de nuvem.
- 4) Avaliar cenários de escalabilidade horizontal através do acréscimo progressivo de máquinas virtuais sem submeter a aplicação ao estresse limite, validando se a economia de recursos do CloudStack permite reduzir a densidade de nós físicos necessários para suportar o ambiente.
- 5) Desenvolver experimentos com *workloads* compostos por centenas de microsserviços simultâneos, diversificando os perfis de consumo para abranger fluxos intensivos de Entrada/Saída de armazenamento e rede.

7. Declaração sobre uso de Inteligência Artificial

Os autores declaram que não utilizaram ferramentas de Inteligência Artificial Generativa na escrita e revisão do conteúdo deste artigo.

Referências

- Ali, S. (2021). A systematic review of performance evaluation of cloud computing systems using design of experiments. *Journal of Systems and Software*, 173.
- Barroso, L. A. e Hölzle, U. (2018). The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines. *Morgan & Claypool*.
- Chaudhry, J. (2015). Performance evaluation of OpenStack Neutron with Open vSwitch. In *2015 IEEE 4TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CLOUD NETWORKING (CLOUDNET)*, volume 258, p. – 253, Niagara Falls, ON, Canada. IEEE.
- Gupta, M. e Sehrawat, R. (2020). Investigating the determinants influencing the adoption decision of cloud computing in the healthcare sector: An integrated ISM-AHP-TOPSIS approach. *Technology in Society*, 61.
- Huamaní, G. T. (2014). Modelo AHP para seleccionar proveedores de Cloud Computing. p. 100 – 106.

- Jain, R. (1991). *The Art of Computer Systems Performance Analysis: Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. 1. ed.
- Kurup, S. e Guruprasad, H. S. (2022). Hybrid multi criteria decision methods for optimal cloud selection in mobile cloud computing. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, p. 404 – 412.
- Li, Z., O'Brien, L., Zhang, H., e Ranjan, R. (2013). Applying Design of Experiments (DOE) to performance evaluation of commercial cloud services. *International Journal of Grid and High Performance Computing*, v. 5:p. 75 – 93.
- Mell, P. e Gupta, M. (2011). *The NIST Definition of Cloud Computing*. National Institute of Standards and Technology (NIST). Special Publication.
- Mishra, S., Chhabra, A., e Madan, D. (2020). Multi-criteria decision making for resource distribution in fog-cloud computing environment. *Journal of Discrete Mathematical Sciences and Cryptography*, v. 23(n. 2):p. 385 – 393.
- Mostafa, A. M. (2024). A Group Multi-Criteria Decision-Making Approach Based on the Best-Only Method for Cloud Service Selection. *IEE*.
- O. Gómez, G. Pérez, e Rojas, E. (2022). Performance evaluation of microservices architectures through load testing. *Journal of Systems and Software*, 188.
- Patel, P. B. e Patel, A. M. (2016). A survey on OpenStack and its components. In *INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATION AND SIGNAL PROCESSING (ICCSP)*, p. 1386 – 1390, Melmaruvathur, India. IEEE.
- Petrov, I. (2021). Combined criteria weighting in MCDM: AHP in blocks with traditional Entropy and novel Hierarchy in TOPSIS evaluation of Cloud Services.
- Ramos, B. A. e Justo, J. E. S. (2023a). Seleção de modelo de implantação de computação em nuvem usando o método de análise multicritério AHP. 25(3).
- Ramos, R. S. e Justo, J. F. (2023b). Uso do método AHP para seleção do modelo de implantação de computação em nuvem em uma instituição pública. *Vértices*, 25(3).
- S. Filho, J. V. D. e G. Filho, E. A. D. M. (2016). OpenStack e CloudStack: Uma Análise Comparativa das Plataformas de Orquestração de Nuvem Open Source. In de Computação, S. B., editor, *WORKSHOP DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO DAS INSTITUIÇÕES FEDERAIS DE ENSINO SUPERIOR DO BRASIL (WTICIFES)*, p. 283 – 292, Porto Alegre.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48:p. 9 – 26.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, v. 1:p. 83 – 98.
- Sharma, M. e Sehrawat, R. (2020). Investigating the determinants influencing the adoption decision of cloud computing in the healthcare sector: An integrated ISM-AHP-TOPSIS approach. *Technology in Society*, v. 61.
- Singh, P. e Kaur, A. (2021). A comparative analysis of OpenStack and CloudStack cloud management platforms. In *5th International conference on computing methodologies and communication (ICCMC)*, p. 1297 – 1303, Erode, India. IEEE.