

Uma abordagem de redução de energia na computação em nuvem verde

A power reduction approach to green cloud computing

Un enfoque de reducción de energía en la computación en la nube verde

Recebido: 20/06/2023 | Revisado: 30/06/2023 | Aceitado: 03/07/2023 | Publicado: 08/07/2023

Thiago Nelson Faria dos Reis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5312-8310>

Universidade Federal do Maranhão, Brasil

E-mail: thiagonelson@gmail.com

Mário Meireles Teixeira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8771-1478>

Universidade Federal do Maranhão, Brasil

E-mail: mario.meireles@ufma.br

Carlos de Salles Soares Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6800-1881>

Universidade Federal do Maranhão, Brasil

E-mail: carlos.salles@ufma.br

Resumo

À medida que a computação em nuvem se torna cada vez mais prevalente em nossas vidas diárias e no ambiente de negócios, é essencial que sejamos conscientes e proativos no gerenciamento do impacto ambiental dessa tecnologia. A computação em nuvem verde é uma abordagem que procura reduzir o consumo de energia e as emissões de CO₂ associadas à computação em nuvem, enquanto ainda fornece a funcionalidade e o desempenho necessários. Através do uso de simuladores, como o CloudSim Plus, e da implementação de algoritmos eficientes para a gestão de recursos, este estudo demonstrou que é possível obter melhorias significativas na eficiência energética, reduções nos custos operacionais e uma diminuição no impacto ambiental sem redução da capacidade computacional. Foi observada uma melhoria de pelo menos 49% na eficiência energética, uma redução de pelo menos 7% nos custos diretos e uma diminuição de 50% na emissão de CO₂ equivalente. Importante ressaltar que essas melhorias foram obtidas sem comprometer o desempenho dos sistemas, uma vez que os tempos de processamento permaneceram inalterados.

Palavras-chave: Computação em nuvem verde; Simulador de nuvem; Eficiência energética.

Abstract

As cloud computing becomes increasingly prevalent in our daily lives and the business environment, it is essential that we are aware and proactive in managing the environmental impact of this technology. Green cloud computing is an approach that seeks to reduce energy consumption and CO₂ emissions associated with cloud computing, while still providing the necessary functionality and performance. Through the use of simulators, such as CloudSim Plus, and the implementation of efficient algorithms for resource management, this study demonstrated that it is possible to achieve significant improvements in energy efficiency, reductions in operational costs, and a decrease in environmental impact without reducing computational capacity. An improvement of at least 49% in energy efficiency was observed, a reduction of at least 7% in direct costs, and a decrease of 50% in equivalent CO₂ emissions. It is important to emphasize that these improvements were achieved without compromising the performance of the systems, as the processing times remained unchanged.

Keywords: Green cloud computing; Cloud simulation; Energy efficiency.

Resumen

A medida que la computación en la nube se vuelve cada vez más prevalente en nuestra vida diaria y en el entorno empresarial, es esencial que seamos conscientes y proactivos en la gestión del impacto ambiental de esta tecnología. La computación en la nube verde es un enfoque que busca reducir el consumo de energía y las emisiones de CO₂ asociadas con la computación en la nube, mientras sigue proporcionando la funcionalidad y el rendimiento necesarios. A través del uso de simuladores, como CloudSim Plus, y la implementación de algoritmos eficientes para la gestión de recursos, este estudio demostró que es posible lograr mejoras significativas en la eficiencia energética, reducciones en los costos operativos y una disminución en el impacto ambiental sin reducir la capacidad computacional. Se observó una mejora de al menos el 49% en la eficiencia energética, una reducción de al menos el 7% en los costos directos, y una disminución del 50% en las emisiones equivalentes de CO₂. Es importante enfatizar que estas mejoras se lograron sin comprometer el rendimiento de los sistemas, ya que los tiempos de procesamiento se mantuvieron sin cambios.

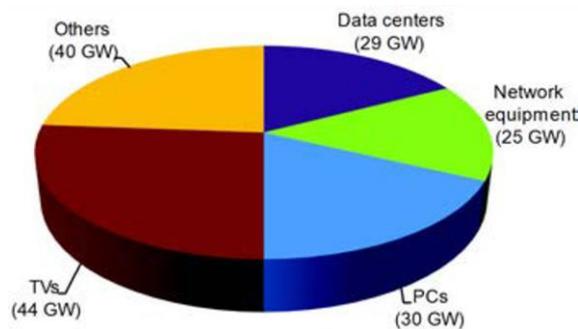
Palabras clave: Computación en nube verde; Simulador de nube; Eficiencia energética.

1. Introdução

A transição para a computação em nuvem apresenta um conjunto amplo de benefícios, abrangendo várias dimensões, tanto computacionais quanto outras. Entre eles, podemos mencionar a diminuição dos custos com energia e refrigeração por parte das empresas. Entretanto, essa diminuição não deve ser interpretada como um indicador de compromisso com o meio ambiente, pois, na realidade, esses custos e impactos estão apenas sendo transferidos. Aqueles que contratam serviços de computação em nuvem também compartilham, direta ou indiretamente, a responsabilidade pelo impacto ambiental.

Em seu estudo, Khan e Khan (2016) revelam que aproximadamente 10% do consumo total de energia em nível global é destinado para dispositivos eletrônicos e computacionais. Desses, 50% são especificamente para a computação - divididos entre 29 GW para data centers, 25 GW para equipamentos de rede e 30 GW para computadores. Os 50% restantes são divididos entre televisões (44 GW) e outros dispositivos (40 GW), como demonstrado na Figura 1. Além disso, Masdari e Zangakani (2020) indicam que 50% da energia consumida em um datacenter é usada para dissipar o calor, ou seja, para refrigeração.

Figura 1 – Consumo energético mundial.



Fonte: Khan e Khan (2016).

Em outras palavras, a responsabilidade por um parque computacional eficiente e ambientalmente amigável é compartilhada por todos. Quando discutimos computação e computação verde, é crucial entender suas diferenças. De maneira sucinta, a computação verde enfoca na redução do consumo de energia, na utilização de recursos renováveis e na eficiência no uso dos recursos.

Para tanto, é imprescindível possuir conhecimento em técnicas, frameworks, metodologias e classificações da computação verde. Este conhecimento é essencial para embasar a análise, desenvolvimento e implementações nesta área, pois existem várias abordagens a serem consideradas em termos de software, hardware e virtualização para otimizar o uso dos recursos e reduzir a emissão de CO₂, bem como o impacto ambiental (Gade et al., 2018).

De acordo com Saha (2018), os critérios para a escolha da infraestrutura em nuvem estão evoluindo. Além de aspectos computacionais e de custos, a eficiência energética do datacenter e a utilização de recursos renováveis começam a entrar na equação de decisão.

Computação verde não compreende somente a questão do uso de energia, mas também de água, da utilização de recursos renováveis e redução do desperdício computacional, ou seja, utilizar os recursos computacionais necessários somente.

Primeiramente, esta pesquisa apresenta trabalhos relacionados à computação em nuvem verde e sustentabilidade energética. A próxima seção inclui as principais categorias e abordagens de redução de energia no campo da computação em nuvem verde. Enquanto na seção seguinte contém os métodos adotados na pesquisa, bem como as métricas computacionais mais utilizadas relacionadas à eficiência energética que permitem a avaliação da eficiência de um data center e a garantia da qualidade na prestação de serviços.

Em sequência, o objetivo é demonstrar através de uma abordagem metodológica quantitativa que é possível reduzir o consumo de energia sem perda significativa dos indicadores de qualidade de serviço, ou seja, mantendo os tempos de resposta exatos e os volumes de processamento, com a adoção de algoritmos de alocação de máquinas virtuais mais eficientes. Neste caso específico, trata-se entre os algoritmos Round Robin e Otimização por Enxame de Partículas (PSO), incluindo assim este algoritmo nas possíveis soluções a serem adotadas dentro dos diversos trabalhos relacionados.

Simulações foram realizadas através de cenários de configuração com 400 execuções, totalizando aproximadamente 13.000 horas de processamento. Por fim, este artigo apresenta os resultados encontrados, juntamente com suas conclusões.

2. Trabalhos Relacionados

Considerando a vasta gama de abordagens, tanto físicas quanto lógicas, e a potencialidade de diversos usos, a área de computação em nuvem verde se apresenta como um terreno fértil para pesquisas. Isso impulsiona o desenvolvimento de métodos computacionais visando o uso eficiente de recursos computacionais e a redução de custos, beneficiando tanto os provedores de serviços quanto os usuários.

No que diz respeito à análise e estimativa do uso de recursos, os simuladores de computação em nuvem têm ganhado destaque, considerando-se a impossibilidade de dispor de um ambiente complexo de nuvem para a condução de experimentos. A seguir, serão apresentados alguns estudos que utilizam abordagens e simuladores para este fim em ambientes de nuvem.

Em trabalhos como os de Meyer et al. (2018), Makaratzis et al., (2018), e Jena et al. (2020), experimentos foram realizados utilizando vários simuladores de nuvem e algoritmos, como o *First-Fit-Approach* e *Round Robin*. Esses estudos visam analisar e comparar os resultados obtidos pelos simuladores entre si.

Por outro lado, Yang et al. (2018), Wadhwa et al. (2019) e Zong (2020) recorrem ao CloudSim como simulador e conduzem experimentos com algoritmos DPSO, DENS, Round Robin, Green Scheduler e Algoritmo Genético. A análise dos resultados tem como objetivo a comparação entre os algoritmos, considerando os tempos de execução e os consumos energéticos.

O estudo conduzido por da Silva et al. (2022) apresenta um comparativo entre os simuladores CloudSim e iSPD, demonstrando a eficácia do uso deste último e, conseqüentemente, disponibilizando uma nova opção para ser explorada pelos pesquisadores.

Por outro lado, a pesquisa de Stergiou, Psannis e Ishibashi (2020) analisa a computação em nuvem verde no contexto do uso de Big Data. Em seus experimentos, eles comparam utilizando a métrica DCIE, registrando resultados significativos de redução energética de, no mínimo, 47%. Enquanto isso, Saboor et al. (2022) conduzem sua investigação utilizando algoritmos baseados em distribuição de classificação, além de comparar os resultados em termos de métricas de emissão de CO₂.

No que diz respeito às abordagens sobre geração de energia renovável, o trabalho de França et al. (2020) discute a utilização de algoritmos de redes neurais para a previsão de energia eólica, de modo a estimar para grandes datacenters a viabilidade do uso deste tipo de modelo.

No campo de outras metodologias para a computação em nuvem verde, o trabalho de Araújo (2022) apresenta um panorama mundial da utilização de energias renováveis, onde os provedores de nuvem, podem, não somente usufruir dessas tecnologias, mas também investir e incentivar as pesquisas nessa área. Atualmente, são poucos os provedores de nuvem que utilizam de energias renováveis em seus datacenters.

O objetivo deste estudo é expandir o conjunto de algoritmos utilizados nestes modelos, especificamente incluindo o *Particle Swarm Optimization* (PSO) na gama de algoritmos já avaliados. Para esse fim, o Round Robin e o CloudSim foram utilizados como base para comparação, seguindo a metodologia adotada nos estudos correlatos.

3. Eficiência Energética e Computação em Nuvem Verde

3.1 Principais Abordagens para Eficiência Energética

Há uma ampla gama de abordagens que podem ser implementadas para otimizar a economia de energia, potencialmente aumentando a lucratividade e diminuindo o impacto ambiental. Analogamente, é recomendável que essas abordagens sejam correlacionadas, garantindo assim benefícios ótimos em várias categorias, como destacado por Radu (2017), Bash et al. (2011), Agrawal et al., (2020), Garg et al., (2011), Khan e Khan (2016), e Masdari e Zangakani (2020).

Um gerenciamento mais eficaz das máquinas virtuais pode ser alcançado por meio de técnicas como a consolidação de VMs em servidores físicos, a redução das velocidades dos processadores, a realocação de tarefas, o uso de engenharia de software distribuída especializada e a alocação em datacenters de maior eficiência energética.

Abordagens que dependem do hardware também são viáveis, incluindo a redução da dissipação de calor, o planejamento energético de placas e processadores que permitem a transmissão independente de energia, e a utilização de armazenamento mais eficiente.

Outras estratégias englobam a utilização de fontes renováveis e a reutilização de recursos energéticos, como energia eólica, solar e hidráulica, entre outras.

Para o escopo deste trabalho, adotaremos a abordagem voltada para o gerenciamento das máquinas virtuais em servidores físicos, por meio da consolidação de VMs e desligamento das não utilizadas. Essa estratégia não requer modificações em equipamentos físicos nem investimento em infraestrutura, permitindo sua aplicação nas políticas que podem ser implementadas em qualquer ambiente em nuvem.

4. Materiais e Métodos

4.1 Ambiente de Simulação CloudSim Plus

A simulação de ambientes de computação em nuvem representa um desafio significativo, considerando a complexidade desses ambientes, o grande volume de informações e o tempo de processamento necessários para alcançar parâmetros realistas.

Nesse sentido, conforme indicado por Barbierato et al. (2019), Toledo Junior e Bruschi (2020), Silva Filho et al. (2017), e CloudSim (2016), para este trabalho, optou-se pelo uso do CloudSim Plus. Este é um ambiente de simulação baseado em Java 8, que possibilita a modelagem e simulação de diferentes serviços de computação em nuvem, abrangendo desde as camadas de infraestrutura como serviço (IaaS) até as camadas de software como serviço (SaaS). O ambiente do CloudSim Plus permite a implementação de cenários de simulação para experimentação, avaliação e validação de algoritmos com diversos objetivos.

4.2 Execução do CloudSim Plus

O CloudSim Plus acompanha as execuções, o uso da CPU e o consumo de energia nos hosts e nas Máquinas Virtuais (VMs) para cada cloudlet (aplicação), possibilitando o cálculo dos custos de pagamento pelo uso das referidas máquinas virtuais.

Tanto o tempo simulado do ambiente quanto o de execução da simulação são monitorados, juntamente com o uso de CPU, RAM e Max Heap no ambiente.

Após a conclusão da execução, os dados coletados são analisados e os resultados são avaliados com base em dois algoritmos de alocação: Round Robin (RR), já incluído no CloudSim, e Otimização por Enxame de Partículas (PSO), adaptado para a execução nestes experimentos (Farahnakian et al., 2015).

No primeiro caso, o algoritmo Round Robin seleciona a máquina virtual alternando entre os hosts, distribuindo igualmente o número de máquinas. Em contraste, a Otimização por Enxame de Partículas é um algoritmo de otimização baseado em população inspirado no comportamento social de bandos de pássaros, cardumes de peixes e insetos em enxame. Serve como um método para resolver problemas de otimização contínua e discreta e tem sido amplamente aplicado em diversos campos,

como inteligência artificial, aprendizado de máquina, robótica e design de engenharia (Cloudsim, 2016; Mandal & Dehuri, 2019).

4.3 Experimento

Este experimento tem como objetivo validar a possibilidade de redução de energia sem comprometer a capacidade computacional do ambiente em nuvem. Para isso, serão utilizados dois algoritmos de escalonamento de máquinas virtuais, Round Robin (RR) e Otimização por Enxame de Partículas (PSO). Os mesmos parâmetros do (Stergiou et al., 2020) foram utilizados, com o número de hosts variando de 50 a 250 máquinas, com configurações de 2 núcleos de 2,2 GHz/núcleo e 4 GB de memória.

A utilização do modelo proposto por (Stergiou et al., 2020) neste trabalho é necessária devido ao uso de Big Data e, em contrapartida ao trabalho referenciado o uso de um único data center, um cenário comum em várias situações. Além de realizar o estudo da eficiência energética, comparamos com outros cenários já estudados. Todos os cenários experimentais foram planejados com um projeto de experimento fatorial completo baseado em uma avaliação sistemática de desempenho para sistemas computacionais (Jain, 2010), com 10 execuções cada. Os valores obtidos possuem um intervalo de confiança de 95% de acordo com a tabela T-student.

Os parâmetros definidos são as máquinas virtuais, que neste caso compreendem 4 conjuntos de configurações:

- Quantidade de máquinas virtuais: 50, 100, 150, 200 e 250;
- Todas com 2GB de memória RAM e 1 núcleo de processamento.

Além das máquinas virtuais, também se parametrizou a quantidade de cloudlets, ou seja, de aplicações que foram executadas no ambiente, de forma a avaliar o modelo em diversas cargas de trabalho:

- Quantidade de cloudlets: 10, 100, 1000 e 2000;
- Todos os cloudlets possuem 150.000 MIPS (Milhões de Instruções Por Segundo).

Todas as demais configurações, incluindo armazenamento, largura de banda, entre outros, foram mantidas idênticas em todos os cenários. Adicionalmente, estabeleceu-se que o consumo energético é de 150W em estado de inatividade (0% de utilização) e 300W quando estiver operando com 100% de utilização. Estes parâmetros servem para analisar a premissa de que a melhor relação custo-benefício ocorre ao instanciar um maior número de máquinas virtuais com uma menor quantidade de processadores, ou um menor número de máquinas com mais processadores, além de confrontar estes dados com outros trabalhos realizados.

Por fim, as políticas de alocação foram estabelecidas para a execução das simulações, com o objetivo de avaliar os tempos de resposta, o consumo energético e os custos das execuções. É importante salientar que os valores monetários são expressos em dólares americanos e foram extraídos das bases e configurações da AWS americana, bem como os consumos energéticos dos processadores. Ressalta-se também que, nesses experimentos, está sendo considerado apenas o consumo energético dos processadores, tanto dos hosts quanto das VMs.

Para cada execução, foram coletados os resultados de tempo de processamento das aplicações, custos, consumo energético, entre outras informações. O tempo total simulado de processamento foi de 812.476 minutos (13.541 horas, equivalente a 564 dias), com um total de 400 simulações executadas.

5. Análise dos Resultados

Esta seção apresenta os resultados das simulações, bem como a análise detalhada. Os dados utilizados como entrada definidos em 4.3 atendem aos requisitos de carga de trabalho leve e pesada.

Os resultados da simulação obtidos foram compilados e analisados com a finalidade de avaliar os critérios discutidos nas seções precedentes. Os resultados apresentados nas Tabelas 1 e 2, a seguir, foram consolidados para a elaboração deste artigo. Estas tabelas exibem as configurações utilizadas, os resultados alcançados para cada algoritmo e a relação entre eles, com o propósito de ilustrar o percentual de ganho obtido.

Tabela 1 – Resultados consolidados dos tempos de execução (s) e consumo energético das simulações (w).

| Configuração de VMs | Média do Tempo de Execução | | | Média do Consumo de Energia | | |
|---------------------|----------------------------|-------|------------------|-----------------------------|--------|------------------|
| | Round Robin (RR) | PSO | Relação RR e PSO | Round Robin (RR) | PSO | Relação RR e PSO |
| 50 | 32.52 | 32.52 | 0.00% | 268.03 | 134.03 | -50.00% |
| 100 | 9.91 | 9.91 | 0.00% | 255.39 | 127.76 | -49.97% |
| 150 | 5.31 | 5.31 | 0.00% | 238.34 | 119.26 | -49.96% |
| 200 | 3.52 | 3.52 | 0.00% | 237.44 | 118.76 | -49.99% |
| 250 | 2.65 | 2.65 | -0.21% | 237.16 | 118.61 | -49.99% |

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Tabela 2 – Resultados consolidados dos custos (US\$) dos ambientes em simulações.

| Configuração das VMs | Algoritmos de Alocação | | |
|----------------------|------------------------|--------|------------------|
| | Round Robin (RR) | PSO | Relação RR e PSO |
| 50 | 276.84 | 255.63 | -7.66% |
| 100 | 118.29 | 109.78 | -7.19% |
| 150 | 91.34 | 74.26 | -18.70% |
| 200 | 75.49 | 64.78 | -14.18% |
| 250 | 70.26 | 60,24 | -14.26% |

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Para tanto foram criados alguns cenários para discussão:

- Cenário 1: Tempo de processamento das aplicações;
- Cenário 2: Consumo de energia das aplicações;
- Cenário 3: Custo da execução das aplicações;
- Cenário 4: Emissão de CO₂.

5.1 Cenário 1: tempo de processamento das aplicações

Ao analisar os trabalhos relacionados ao desempenho computacional é levado em consideração os tempos de processamento das aplicações para medir a eficácia de um determinado cenário. Observando os dados na Tabela 2, verifica-se que não houve reduções significativas no tempo. Isso demonstrou que a adoção do algoritmo de escalonamento para este cenário não prejudicou a capacidade de processamento do modelo ou o SLA (Acordo de Nível de Serviço).

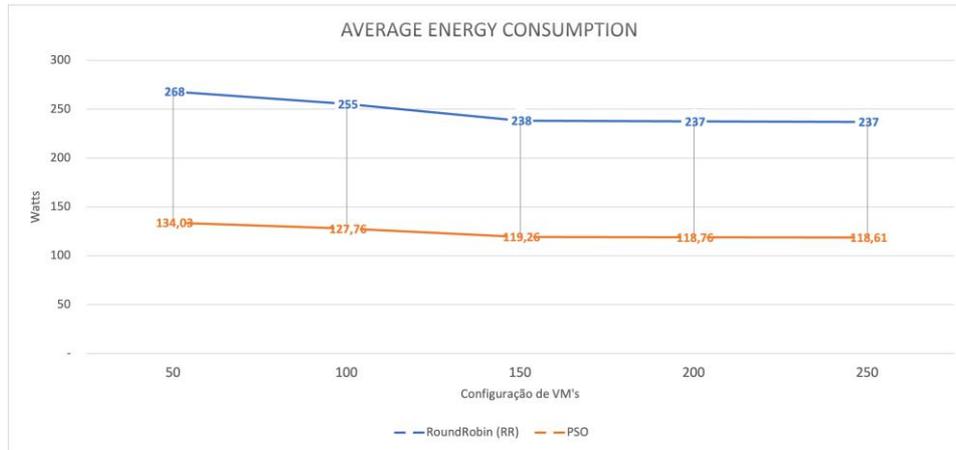
É essencial ressaltar que o uso de um modelo computacional mais distribuído gerou ganhos significativos, citando uma redução no tempo médio de processamento de 70% na mudança de 50 para 100 máquinas virtuais, considerando a mesma carga de trabalho.

O aumento do escalonamento de máquinas virtuais também reduz significativamente em 46%, 34% e 25%, respectivamente, em 150, 200 e 250 VMs. Essa melhoria no desempenho depende de como a aplicação é construída para um modelo distribuído.

5.2 Cenário 2: consumo de energia das aplicações

Levando em consideração o cenário energético, tem-se a partir da análise consolidada da Tabela 2, representado na Figura 2, uma redução de até 50% no consumo energético para a mesma carga de trabalho, visto no modelo de 50 máquinas virtuais. Têm-se ainda a menor redução de consumo energético em cerca de 49,96%, no modelo de 150 VMs.

Figura 2 – Consumo energético.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O consumo de energia para os algoritmos Round Robin e PSO mostrou a mesma variação, próxima a 13% (237,16 e 268,03) no Round Robin e no PSO (118,61 e 134,03). Em outras palavras, ainda é possível obter uma melhor redução de energia usando um algoritmo PSO devido ao menor valor inicial.

Analisando os dados de energia por conjunto de cloudlets, conforme a Tabela 3, observou-se uma redução significativa no consumo, variando de 49,94% a 50% através dos modelos de distribuição de máquinas virtuais e algoritmos, a fim de confirmar os dados apresentados de maneira consolidada.

Tabela 3 – Resultados detalhados por cloudlets do consumo de energia (w).

| Qtd de Cloudlets | Algoritmos | | |
|------------------|------------------|--------|------------------|
| | Round Robin (RR) | PSO | Relação RR e PSO |
| 10 | 157.37 | 78,70 | -49.99% |
| 100 | 218.93 | 109.60 | -49.94% |
| 1000 | 293.73 | 146.87 | -50.00% |
| 2000 | 297.80 | 148.93 | -49.99% |

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

5.3 Cenário 3: custos da execução das aplicações

O simulador faz o cálculo dos custos baseado nas configurações das máquinas virtuais, conforme parâmetros citados na seção 4.3.

Conforme pode ser observado na Tabela 2, houve reduções significativas nos valores simulados, de no mínimo 7% para os cenários mais simples e, no cenário mais complexo, ultrapassou 18% na alocação de máquinas virtuais.

Entretanto, se compararmos os modelos de arquitetura, a redução dos custos se torna maior no algoritmo PSO devido à melhor eficiência para ambientes mais distribuídos. Essa tendência reforça que não somente a construção de uma infraestrutura distribuída se faz necessária, mas também o desenvolvimento de aplicações que possam usufruir desse ambiente.

5.4 Cenário 4: emissão de CO₂

O consumo de energia do data center está diretamente relacionado às emissões de dióxido de carbono equivalentes à energia. Como este estudo se concentrou na utilização de energia dos equipamentos somente, foi necessário calcular e comparar as emissões de dióxido de carbono, utilizando a referência americana, em EPA (2022), já que, usou-se parâmetros da AWS localizada nos Estados Unidos. Não estão sendo levadas em consideração os consumos energéticos necessários à refrigeração, redes, demais equipamentos elétricos relacionados.

A comparação de ambas as estratégias de alocação dos algoritmos, conforme mostrado na Tabela 4 e Figura 3, indicam claramente que a emissão de carbono equivalente no algoritmo PSO é significativamente menor quando comparada com ao algoritmo de Round Robin, considerando todo o consumo energético para cada configuração.

Os resultados indicam que a utilização do algoritmo Particle Swan Optimization (PSO) pode ter um impacto significativo na redução das emissões de CO₂ equivalente em comparação ao algoritmo Round Robin. Em particular, as emissões de CO₂ equivalentes no uso do algoritmo PSO variaram de 116 a 513 toneladas, uma redução substancial em comparação às 232 a 1.026 toneladas produzidas usando o Round Robin. É importante salientar que essas emissões são para todo o processamento realizado, que na simulação foi cerca de 564 dias.

Um fato interessante a se observar é que a maior quantidade de emissão do PSO (ocorrida com 250 máquinas) é próxima da segunda menor emissão do Round Robin (com 100 máquinas). Além disso, o crescimento das emissões é mais acentuado no algoritmo Round Robin do que no PSO, indicando uma eficiência energética mais otimizada com o uso do PSO.

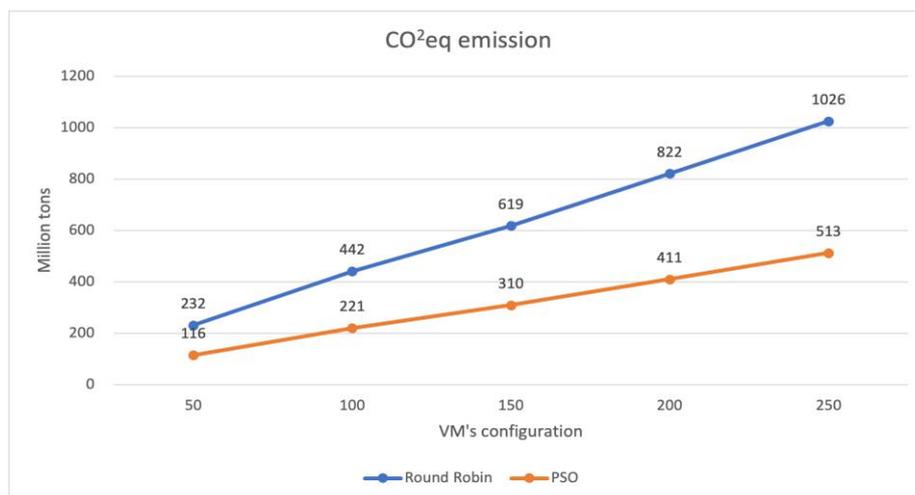
Ao comparar ambos os algoritmos para cada modelo e carga de trabalho, observa-se uma redução nas emissões de CO₂ de no mínimo 49,92% e no máximo 50,00% ao usar o algoritmo PSO em comparação ao Round Robin.

Tabela 4 – Cálculo de emissão CO_{2eq}.

| Configuração das VMs | Emissão de CO _{2eq} (Tons) | | |
|----------------------|-------------------------------------|--------|------------------|
| | Round Robin (RR) | PSO | Relação RR e PSO |
| 50 | 232.00 | 116.00 | -50.00% |
| 100 | 442.00 | 221.00 | -50.00% |
| 150 | 619.00 | 310.00 | -49.92% |
| 200 | 822.00 | 411.00 | -50.00% |
| 250 | 1.026.00 | 513.00 | -50.00% |

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 3 – Emissão de CO₂ para os modelos.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Em suma, esta pesquisa destaca que é possível reduzir significativamente o impacto ambiental associado à computação em nuvem ao adotar técnicas e estratégias eficientes de gerenciamento de recursos. Conforme revelado pelos cenários simulados, uma redução de pelo menos 50% no impacto ambiental pode ser alcançada sem comprometer a capacidade computacional.

Notavelmente, a implementação dessas medidas não gera custos diretos e pode até levar a economias substanciais de infraestrutura tanto para os provedores de serviços de nuvem quanto para os usuários. Portanto, é um cenário vantajoso para todos, no qual a qualidade e capacidade computacional são mantidas, o impacto ambiental é reduzido e há uma economia de custos associada.

No que diz respeito aos quatro modelos simulados, o modelo que utiliza 150 máquinas virtuais oferece o melhor custo-benefício. Com a aplicação do algoritmo PSO neste modelo, é possível alcançar uma redução de 49,96% no impacto ambiental e uma diminuição de 18,70% nos custos. Além disso, comparado ao modelo que utiliza 50 máquinas virtuais, o tempo de resposta é reduzido em cerca de 84%.

Essas descobertas destacam o poder e a eficácia da computação em nuvem verde e reforçam a necessidade de uma adoção mais ampla de práticas sustentáveis na indústria da tecnologia da informação.

6. Conclusão

A computação em nuvem verde tem se tornado um tópico de discussão cada vez mais prevalente tanto na indústria quanto no meio acadêmico. As empresas estão progressivamente migrando para esse modelo em resposta ao aumento do armazenamento de dados e demandas computacionais, acarretando em consequência, a expansão da infraestrutura dos provedores em nuvem. Tal crescimento traz consigo impactos econômicos e socioambientais consideráveis, seja devido à demanda energética, ao consumo de água ou à emissão de CO₂. Diante desta demanda, amplia-se a necessidade de datacenters mais eficientes em termos energéticos e com utilização de recursos renováveis.

Este estudo teve como objetivo identificar as principais métricas utilizadas, assim como as possíveis áreas e categorias de transformação para a Computação em Nuvem Verde. Adicionalmente, buscou-se avaliar a suposição de que é possível obter uma redução no consumo energético sem comprometer os tempos de processamento.

Os resultados obtidos neste estudo são bastante significativos e demonstram o potencial de técnicas eficientes de gerenciamento de recursos na computação em nuvem. Por meio da utilização do simulador CloudSim Plus, foi possível implementar e avaliar diferentes estratégias e algoritmos com foco na redução de energia e na otimização de indicadores de qualidade de serviço.

Através da utilização de algoritmos mais eficientes para a alocação de recursos ou de abordagens diferenciadas, foi possível obter reduções consideráveis no consumo energético, variando entre 49,92% e 50,00%, sem comprometer os tempos de processamento. Essa redução no consumo energético não só contribui para minimizar o impacto ambiental, mas também pode resultar em economias significativas em termos de custos operacionais e de infraestrutura.

Além disso, o estudo também encontrou uma redução direta nos custos associados à alocação de máquinas virtuais, variando de um mínimo de 7% até um máximo de 18%. Isso demonstra que a adoção de práticas de computação em nuvem mais eficientes em termos de energia não só é benéfica para o meio ambiente, mas também é economicamente vantajosa.

Com a adoção deste modelo, utilizando algoritmos PSO, o impacto ambiental é significativamente reduzido, alcançando até 50% na redução das emissões de dióxido de carbono, com exatamente 513 toneladas a menos de CO₂ no ambiente.

Usando um número maior de máquinas virtuais, de 50 a 150 Máquinas Virtuais, ou seja, adotando um modelo de infraestrutura mais distribuído, utilizando o algoritmo PSO e considerando a mesma carga de trabalho apresentada, resultou em uma redução de 84% no tempo de execução das tarefas e uma redução direta de custos de cerca de 67%. Porém, nesse caso, outras abordagens são necessárias para tirar proveito da arquitetura associada ao desenvolvimento de software distribuído.

A adoção deste modelo de alocação de máquinas virtuais tem um impacto positivo no custo operacional da infraestrutura, além de reduzir o tempo de execução, permitindo assim que pesquisadores e gestores de data centers façam melhor uso de seu parque tecnológico, seja em uma nuvem pública ou privada.

Com estudos mais avançados de simuladores e algoritmos, como trabalho futuro, será possível definir os melhores parâmetros para mensurar a eficiência computacional e energética de um data center e os benefícios das várias abordagens implementadas, contribuindo assim para uma adoção mais eficiente do Green Cloud Computing.

Referências

- Agrawal, M. N.; Saini, M. J. K. & Wankhede, P. (2020). *Review on green cloud computing: A step towards saving global environment*.
- Araújo, R. S. et al. (2022). Fontes de energias renováveis: pesquisas, tendências e perspectivas sobre as práticas sustentáveis. *Research, Society and Development*, 11(11), e468111133893-e468111133893.
- Barbierato, E. et al. (2019) Exploiting cloudsims in a multiformalism modeling approach for cloud based systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 93, 133-147.
- Bash, C. et al. (2011). Cloud sustainability dashboard, dynamically assessing sustainability of data centers and clouds. *Proceedings of the Fifth Open Cirrus Summit, Hewlett Packard, CA, USA*, Citeseer. 13.
- CloudSim (2016). *Full-featured and fully documented cloud simulation framework*. <http://cloudsimplus.org/>.
- da Silva, D. T., Rodrigues, J. A., Manacero, A., Lobato, R. S., Spolon, R., & Cavenaghi, M. A. (2022, October). Modeling and simulation of cloud computing with ispd. In *Anais do XXIII Simpósio em Sistemas Computacionais de Alto Desempenho* (pp. 217-228). SBC.
- Epa, U. S. E. P. A. (2022). *Greenhouse Gas Equivalencies Calculator*. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>.
- Farahnakian, F. et al. (2015). Using ant colony system to consolidate vms for green cloud computing. *IEEE Transactions on Services Computing*. 8(2), 187-198, 2015.
- França, C. G. et al. (2020). Análise comparativa de modelos de previsão de geração de energia eólica baseados em machine learning. *Revista de Sistemas e Computação-RSC*. 9(2).
- Gade, A.; Bhat, N. & Thakare, N. (2018). Survey on energy efficient cloud: A novel approach towards green computing. *Helix*, 8(5), 3976-3979.
- Garg, S. K.; Yeo, C. S. & Buyya, R. (2011). Green cloud framework for improving carbon efficiency of clouds. *European Conference on Parallel Processing*, Bordeaux, França, 17, 491-502.
- Jain, R. (2010). *Computer systems performance analysis*. https://www.cs.wustl.edu/~jain/iucee/ftp/k_01int.pdf.
- Jena, S. R. et al. (2020). Cloud computing tools: inside views and analysis. *Procedia Computer Science*, 173, 382-391.
- Khan, R. & Khan, S. U. (2016). Achieving energy saving through proxying applications on behalf of idle devices. *Procedia Computer Science*, 83, 187-194.
- Makaratzis, A. T.; Giannoutakis, K. M. & Tzovaras, D. (2018). Energy modeling in cloud simulation frameworks. *Future Generation Computer Systems*, 79, 715-725.
- Mandal, A. K. & Dehuri, S. (2019). A survey on ant colony optimization for solving some of the selected np-hard problem. *International Conference on Biologically Inspired Techniques in Many-Criteria Decision Making*. 85-100.
- Masdari, M.; Zangakani, M. (2020). Green cloud computing using proactive virtual machine placement: challenges and issues. *Journal of Grid Computing*, Springer, 18(4), 727-759.
- Meyer, V. et al. (2018). Simulators usage analysis to estimate power consumption in cloud computing environments. *Symposium on High Performance Computing Systems (WSCAD)*. 70-76.
- Radu, L. D. (2017) Green cloud computing: A literature survey. *Symmetry, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 9(12), 295.
- Saboor, A. et al. (2022) Enabling rank-based distribution of microservices among containers for green cloud computing environment. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, Springer, 15(1), 77-91.
- Saha, B. (2018). Green computing: current research trends. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 6(3), 467-469.
- Silva Filho, M. C. et al. (2017). Cloudsim plus: A cloud computing simulation framework pursuing software engineering principles for improved modularity, extensibility and correctness. *Symposium on integrated network and service management (IM)*. 400-406.
- Stergiou, C. L.; Psannis, K. E. & Ishibashi, Y. (2020). Green cloud communication system for big data management. *3rd World Symposium on Communication Engineering (WSCE)*. 69-73.

Toledo Junior, T. J. & Bruschi, S. (2020). Epcac-extensible platform for cloud scheduling algorithm comparison. *Anais Estendidos do XXI Simpósio em Sistemas Computacionais de Alto Desempenho, evento online*. 46-53.

Wadhwa, M. et al. (2019). Green cloud computing-a greener approach to it. *International conference on computational intelligence and knowledge economy (ICCIKE)*. 760-764.

Yang, J. et al. (2018). Ai-powered green cloud and data center. *IEEE Access, IEEE*, 7, 4195-4203.

Zong, Z. 2020. An improvement of task scheduling algorithms for green cloud computing *15th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*. 654-657.