

GUILHERME ALMEIDA LOPES

**ANÁLISE EMPÍRICA DA COMBINAÇÃO DE DVFS E TÉCNICAS DE
VIRTUALIZAÇÃO PARA A MELHORIA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E
DESEMPENHO EM DATA CENTERS**

RESUMO

A computação em nuvem se tornou popular nas últimas décadas, principalmente devido à sua capacidade de escalabilidade de recursos. No entanto, apesar dessa vantagem, há um grande problema relacionado ao consumo de energia. Conforme apresentado no artigo "On Energy Conservation in Data Centers"(ALBERS, 2017), o consumo de energia em data centers representa cerca de 2% da demanda energética mundial, o que equivale a aproximadamente 90 milhões de residências. Neste trabalho, apresento um estudo experimental que visa descobrir a relação entre eficiência energética e desempenho, aplicando técnicas de DVFS em ambientes virtualizados. Além disso, examino se essas técnicas podem ser aplicadas em data centers para reduzir o custo energético em larga escala, como isso influencia o desempenho e como diferentes microarquiteturas podem afetar a aplicação dessa técnica, tanto em eficiência energética como desempenho.

Palavras-chave: DVFS; Virtualização; Data Centers; Eficiência energética; Desempenho.

ABSTRACT

Cloud computing has become popular in recent decades, mainly due to its resource scalability capability. However, despite this advantage, there is a major problem related to energy consumption. As presented in the article "On Energy Conservation in Data Centers"(ALBERS, 2017), energy consumption in data centers accounts for about 2% of global energy demand, which is equivalent to approximately 90 million households. In this paper, I present an experimental study aimed at discovering the relationship between energy efficiency and performance by applying DVFS techniques in virtualized environments. Additionally, I examine whether these techniques can be applied in data centers to reduce energy costs on a large scale, how this influences performance, and how different microarchitectures can affect the application of this technique in terms of both energy efficiency and performance.

Keywords: DVFS; Virtualization; Data Centers; Energy efficiency; Performace.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a computação trabalha cada vez mais com aplicações que exigem maiores recursos, criando assim a necessidade de escalonamento de forma simples e barata. Por este motivo, os data centers se tornaram cada vez mais populares, especialmente com a ascensão dos serviços em nuvem.

Nos últimos anos, os serviços em nuvem se tornaram populares, sendo amplamente utilizados tanto pela indústria quanto pela área científica. No entanto, o aumento do consumo energético nos data centers se tornou uma preocupação crescente. Isso levou grupos de TI verde a adotarem a técnica de virtualização, que consiste em rodar várias VMs em um único servidor, permitindo a redução considerável dos custos energéticos e tornando-se uma prática popular. Embora essas técnicas ofereçam muitos benefícios, elas também podem causar uma degradação de desempenho em prol da eficiência energética.

Acredito que a utilização de técnicas DVFS (Dynamic Voltage and Frequency Scaling) em micro-arquiteturas diferentes, em servidores virtualizados, pode gerar uma eficiência energética significativamente maior em comparação com a ausência dessas técnicas. Além de refinar o estado da arte, também analisarei o impacto dessa técnica no desempenho das aplicações executadas em VMs.

Dependendo dos recursos computacionais utilizados por determinadas aplicações, essa técnica pode ser empregada para garantir uma maior economia de energia sem causar uma degradação significativa no desempenho. Acredito que a melhor forma de refinar o estado da arte em data centers é analisando a micro-arquitetura e as formas de paralelismo entre aplicações, permitindo uma otimização mais precisa e eficiente do uso de energia.

1.1 Estrutura do trabalho

Esta pesquisa será dividida em cinco partes principais. Primeiramente, será apresentada uma Fundamentação Teórica que incluirá a análise de Data Centers, a investigação da Micro-arquitetura Heterogêneas, o papel dos Sistemas Operacionais, e o estudo das políticas DVFS e DPM para eficiência energética.

Em seguida, será descrita a Metodologia utilizada, abordando as ferramentas e processos empregados na pesquisa. Os Resultados Preliminares serão apresentados com os dados obtidos e suas análises iniciais, seguidos pela Conclusão, que recapitulará as descobertas principais, discutirá a importância dos resultados e sugerirá possíveis direções para pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Data Centers

A utilização de data centers tem apresentado um aumento significativo nos últimos anos na indústria de computação. Conforme apresentado no artigo "Impact of Virtualization on Cloud Computing Energy Consumption: Empirical Study"(ATIEWI ABDULLAH ABUHUSSEIN, 2018), os data centers são atualmente um recurso extremamente valioso. Eles permitem uma escalabilidade de recursos computacionais sem que o usuário final precise se preocupar com a forma como esses recursos são obtidos, sendo necessário apenas garantir o acesso à banda larga do data center. Apesar desse crescimento substancial, surgem novas preocupações em relação a esse recurso, como a emissão de gás carbônico e a necessidade de reduzir o consumo de energia, que são muito altos para manter a operação dos data centers. A sustentabilidade e a eficiência energética tornaram-se questões cruciais à medida que a demanda por serviços de computação em nuvem continua a aumentar.

Para o entendimento do funcionamento de um data center, devemos entender suas estruturas e como elas se relacionam. Existe diversas topologias de data centers, contudo a mais comum é a multi-tier 3 níveis, como apresentado no artigo "DENS: Data Center Energy-Efficient Network-Aware Scheduling"(KLIASOVICH; BOUVRY, 2010).

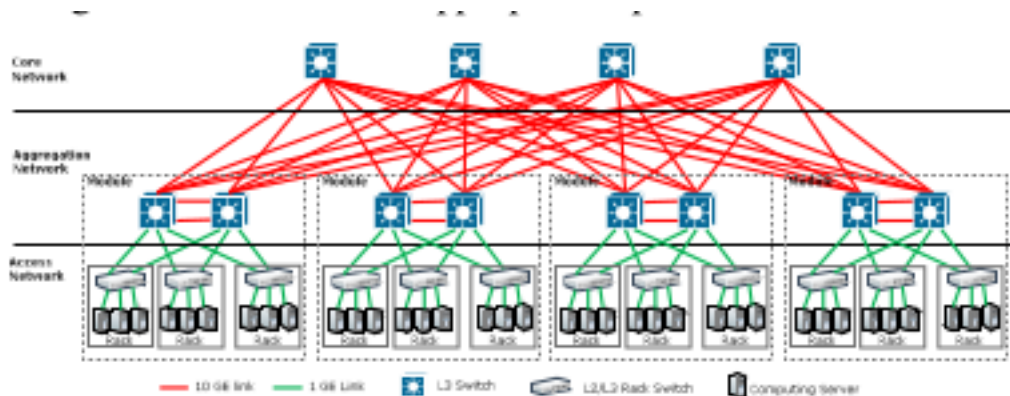


Figure 1. Three-tier data center architecture.

A arquitetura de três camadas é composta por três níveis: a camada de núcleo, a camada de agregação e a camada de acesso. A camada de núcleo, na raiz da estrutura, oferece conectividade rápida e redundante. A camada de agregação, ou distribuição, roteia entre sub-redes e implementa políticas de rede, usando o roteamento Equal Cost Multi-Path (ECMP) para equilibrar a largura de banda e limitar o número de switches de núcleo a oito. A camada de acesso contém os servidores, conectados aos switches Top-of-Rack (ToR) com links de 1 GE (Gigabit Ethernet). Os switches ToR conectam os servidores dentro dos racks e ligam-se aos switches da camada de agregação. O ECMP na camada de agregação distribui o tráfego de maneira equilibrada, otimizando a largura de banda e garantindo alta disponibilidade. Assim, a

arquitetura de três camadas oferece uma rede escalável, eficiente e resiliente, ideal para grandes centros de dados.

A análise dos parâmetros de entrada e saída nos data centers permite uma compreensão detalhada das características da carga de trabalho. Esses parâmetros são essenciais para definir políticas eficazes de gerenciamento de recursos. Por meio da análise minuciosa dos dados de entrada e saída, é possível implementar políticas de gerenciamento de recursos de hardware de maneira eficiente, promovendo uma computação sustentável.

2.1.1 Parâmetros de entrada

Os parâmetro de entrada são parâmetros de configuração dos servidores, por meio deles iremos configurar os servidores, adaptando aos objetivos da aplicação.

- **Carga de trabalho:** A carga de trabalho se refere ao volume total de processamento, operações e tarefas que precisam ser executadas por um sistema de computação, geralmente medido em termos de uso de CPU, memória, rede e armazenamento. No contexto de servidores e máquinas virtuais (VMs), a carga de trabalho pode incluir aplicações, serviços, bancos de dados e outras operações que exigem recursos computacionais. A avaliação da carga de trabalho é crucial para garantir que os recursos de TI sejam adequadamente provisionados e que o desempenho do sistema seja otimizado.
- **Numero de VM por servidor:** Este parâmetro indica quantas máquinas virtuais (VMs) são hospedadas em um único servidor físico. O número de VMs por servidor pode variar dependendo das capacidades do hardware do servidor (como CPU, memória e armazenamento), bem como das necessidades de recursos de cada VM. Um equilíbrio deve ser encontrado para garantir que cada VM tenha recursos suficientes para funcionar eficientemente sem sobrecarregar o servidor físico, o que poderia levar a problemas de desempenho e estabilidade.
- **Numero de servidores:** Refere-se à quantidade total de servidores físicos utilizados em uma infraestrutura de TI. O número de servidores necessários depende da carga de trabalho total e da estratégia de distribuição de VMs. Ter múltiplos servidores pode proporcionar redundância, balanceamento de carga, e escalabilidade, permitindo que a infraestrutura lide com aumentos na demanda e falhas de hardware sem interrupções significativas. Decidir o número adequado de servidores é uma parte crítica do planejamento de capacidade e pode influenciar diretamente os custos operacionais e o desempenho geral do sistema.

2.1.2 Parâmetros de Saída

Para medir de forma objetiva a carga de trabalho de um data center e adotar as políticas necessárias para ativar servidores, realizar migrações e suspender máquinas, são utilizados parâmetros de saída. Esses parâmetros são essenciais para garantir a eficiência, a disponibilidade e a escalabilidade das operações do data center. A seguir, estão os parâmetros de saída principais, detalhando suas definições, importâncias e relevância para políticas de gerenciamento:

- **Makespan:** é o tempo total necessário para completar um conjunto de tarefas, desde o início da primeira tarefa até a conclusão da última tarefa.
- **Falha de tarefas:** refere-se à ocorrência de interrupções ou não conclusões de tarefas durante a execução, resultando em tarefas que não são completadas com sucesso.
- **Throughput:** é a quantidade de trabalho ou número de tarefas concluídas com sucesso em um período de tempo específico. Pode referir-se ao volume de dados processados ou transações realizadas por unidade de tempo.

Definitivamente, identificar uma alta quantidade de falhas de tarefas é um indicador crucial de que algo está errado no ambiente do data center. Uma resposta eficaz seria ativar servidores adicionais e implementar a política de migração para acomodar a carga de trabalho de maneira mais equilibrada e garantir a continuidade dos serviços

2.2 Micro-arquiteturas Heterogêneas

A utilização de arquiteturas heterogêneas é uma prática amplamente adotada na indústria atualmente, conforme discutido na pesquisa "A Survey Of Techniques for Architecting and Managing Asymmetric Multicore Processors"(MITTAL, February 2016). Essa abordagem se tornou essencial devido à necessidade de executar diferentes tipos de aplicações no mesmo hardware. Esse princípio também se aplica aos data centers modernos. Devido à demanda por executar diversas aplicações com alto desempenho e eficiência energética, os data centers têm adotado cada vez mais arquiteturas heterogêneas. Embora essas arquiteturas ofereçam melhor eficiência energética e desempenho, a transição de arquiteturas homogêneas para heterogêneas apresenta desafios específicos.

Um dos principais desafios é a necessidade de que cada núcleo opere em diferentes voltagens, o que impacta diretamente as políticas de DVFS (nos data centers. Isso ocorre porque, para maximizar a eficiência energética, é crucial adaptar as políticas de DVFS para suportar múltiplos estados de suspensão.

Assim, para alcançar um ganho energético eficiente, é necessário revisar e ajustar as políticas de eficiência energética dos data centers. Isso envolve a implementação de estratégias

que possam gerenciar de forma eficaz os diferentes estados de suspensão dos núcleos em micro-arquiteturas heterogêneas, garantindo que o consumo de energia seja minimizado

Para aprimorar o estado da arte na eficiência energética em Data Centers, devemos entender a classificação de AMP, visto que existe uma relação entre o desempenho da aplicação e o tipo de núcleo. Destacarei as classificações que mais contribuem para o estudo em Data Centers:

- Monótico: Um núcleo é considerado monótico, quando em diversas aplicações oferecem um melhor desempenho, não sendo influenciado, pelo tipo da aplicação.
- Amonóticos: Um núcleo é considerado amonótico, quando em uma aplicação específica, possui um melhor desempenho.

O entendimento deste conceito é fundamental para o ganho de desempenho. Conforme apresentado no estudo "A Survey Of Techniques for Architecting and Managing Asymmetric Multicore Processors"(MITTAL, July 2014), a adoção de uma política de alocação de núcleos conscientes levou a uma redução na quantidade de migrações de VMs, permitindo assim a redução do custo energético e diminuindo a quantidade de tarefas não finalizadas a tempo.

2.2.1 Virtualização

As técnicas de virtualização são amplamente utilizadas para economizar energia como pode ser visto nos artigos "VirtualMachineBasedEnergy Efficient Data Center Architecture for Cloud Computing :A Performance Perspective"(YE DAWEI HUANG, 2010) e "Impact of Virtualization on Cloud Computing Energy Consumption: Empirical Study"(ATIEWI ABDULLAH ABUHUSSEIN, 2018) , permitindo rodar mais aplicações simultaneamente em servidores. Isso possibilita a ativação de técnicas DPM, reduzindo o consumo de energia de servidores inativos. No entanto, a virtualização pode ser prejudicada em arquiteturas AMP, pois nem todos os núcleos possuem a mesma capacidade de processamento, o que pode dificultar a implementação de justiça pelo sistema operacional.

Percebeu-se que, em alguns casos, a utilização de VCPUs iguais à quantidade de CPUs reais garante um maior desempenho, como apresentado "A Survey Of Techniques for Architecting and Managing Asymmetric Multicore Processors"(MITTAL, February 2016). Esse comportamento ocorre devido ao aproveitamento máximo do paralelismo que o hardware pode fornecer. Outro fator que pode reduzir a degradação do desempenho é a adoção de uma política de prioridade das VMs, atribuindo VMs de alta prioridade a núcleos com maior capacidade de processamento.

A migração é uma política muito importante para os data centers. Embora aumente o custo energético, ela evita a degradação do desempenho ao transferir a VM para um servidor com baixa carga de trabalho, permitindo que o servidor aumente o consumo de CPU devido à

maior carga. A migração é custosa devido à necessidade de realocar os dados na cache. Adotar uma cache compartilhada para todos os núcleos garante uma migração menos custosa.

2.2.2 GPU e CPU

O entendimento dos conceitos de GPU e CPU é fundamental para este estudo. No artigo "VirtualMachineBasedEnergy Efficient Data Center Architecture for Cloud Computing: A Performance Perspective"(ATIEWI ABDULLAH ABUHUSSEIN, 2018), é apresentado que data centers rodam diversos tipos de aplicações, algumas das quais podem exigir que sejam executadas em GPUs devido a sua natureza por exigir um alto uso de processamento, enquanto outras demandam menos e podem ser executadas em CPU.

As GPUs diferem das CPUs por apresentarem um cache menor e uma maior capacidade de processamento. No entanto, dependendo das aplicações em execução, pode ocorrer uma degradação na eficiência energética se a aplicação exigir leituras frequentes em disco. Isso geraria misses na cache, aumentando o tempo necessário para a finalização do processo e, consequentemente, elevando o custo energético.

As GPUs apresentam um maior consumo de energia e problemas de eficiência energética, como pode ser observado no artigo "A Survey of Methods for Analyzing and Improving GPU Energy Efficiency"(MITTAL, July 2014). Embora a utilização restrições térmica e políticas de controle de clock possam ajudar a reduzir os custos de energia, não são recomendadas, pois, como mostrado no estudo, essas práticas degradam significativamente o desempenho das GPUs, uma estratégia adotada para melhorar a política de migração e reduzir os custos é adotar uma cache LLC publica a todos os nucleos, o que reduzi o custo de migração, cotundo não permite adotar politicas de desligamento de cache, o que com cache privadas é possível.

Para refinar o estado da arte na economia de energia, é essencial compreender quais otimizações podem ser realizadas em nossos processos sem prejudicar o desempenho das aplicações. O entendimento da potência de fuga e da potência dinâmica é fundamental. A potência de fuga consiste na energia gasta para manter os circuitos em funcionamento, enquanto a potência dinâmica refere-se ao gasto energético necessário para a realização das tarefas em execução.

As politicas DVFS ao serem aplicadas em servidores, reduzimos a potência de dinâmica, limitando a quantidade de clocks dos núcleo,isto leva a aumento do tempo de finalização do processo, por executar uma quantidade menor de instruções por ciclo de clock, mas uma redução no consumo de energia.

2.2.3 Política de Escalonamento

A política de escalonamento é um aspecto muito importante para o refinamento deste trabalho. Por meio dela, entenderemos o impacto no desempenho das aplicações ao implementar uma política de redução de clock. Ao reduzir a frequência do clock, permitimos uma diminuição do consumo de energia, como já visto anteriormente. Contudo, ao aplicar uma política de DVFS em um servidor com uma carga muito alta, podemos aumentar significativamente a degradação do desempenho. Isso ocorre porque, ao reduzir a frequência do clock, diminuimos a quantidade de instruções realizadas por unidade de tempo, o que, consequentemente, leva a um maior número de escalonamentos de processos até que todos sejam finalizados.

As políticas de migração são implementadas como uma forma de redistribuição da carga de trabalho. No entanto, quando os processos não conseguem prosseguir, serão migrados para outro servidor. Se aplicarmos políticas de DVFS em servidores com alta carga de trabalho, forcemos migrações de VMs de forma desnecessária, o que acarretará um aumento do consumo de energia devido à ativação de servidores adicionais.

No livro "Sistemas Operacionais: Conceitos e Mecanismos"(MAZIERO, 2019) e no artigo "On Energy Conservation in Data Centers"(ALBERS, 2017), são apresentados conceitos que podem ser uma forma de lidar com o problema mencionado anteriormente. Ao verificar constantemente a lista de processos do servidor, conseguimos identificar os momentos adequados para adotar uma política DVFS. Já o artigo apresenta um algoritmo de distribuição de carga de servidores com múltiplos estados de suspensão, baseado em simulação de grafos, que, a meu ver, seria uma forma mais eficiente de lidar com o problema da sobrecarga.

2.3 Políticas de Gerenciamento de Energia

As técnicas de gerenciamento de energia são muito importantes para este trabalho, pois permitem reduzir os custos de energia, tornando nosso processo mais barato e sustentável. Sistemas computacionais geralmente apresentam essas políticas implementadas, já que, como apresentado no artigo "Monitoring System Activity for OS-Directed Dynamic Power Management"(RICCO, August 10-12, 1998) dificilmente qualquer sistema computacional utiliza todos os seus recursos constantemente, passando a maior parte do tempo ociosos. O mesmo vale para data centers, conforme demonstrado nos artigos "On Energy Conservation in Data Centers"(ALBERS, 2017), "VirtualMachineBasedEnergy Efficient Data Center Architecture for Cloud Computing: A Performance Perspective"(YE DAWEI HUANG, 2010) e "Impact of Virtualization on Cloud Computing Energy Consumption: Empirical Study"(ATIEWI ABDULLAH ABUHUSSEIN, 2018). Os Estudos mostram que os servidores operam em capacidade máxima em apenas cerca de 30% do tempo.

As técnicas de gerenciamento de energia são diversas e podem ser adotadas de várias maneiras. Um exemplo importante é o artigo "DENS: Data Center Energy-Efficient Network-

Aware Scheduling"(KLIASOVICH; BOUVRY, 2010), que apresenta conceitos de redes para um ganho maior em eficiência energética. No entanto, esses conceitos não serão abordados neste trabalho específico. As técnicas de gerenciamento que serão abordadas incluem virtualização, DMP e DVFS.

2.3.1 Sistema Operacional

Antes de nos aprofundarmos nas políticas de gerenciamento de energia, abordarei alguns conceitos sobre sistemas operacionais que ajudarão a entender melhor as políticas DMP e DVFS. O sistema operacional é um software que é executado diretamente no hardware e é responsável por implementar o conceito de justiça no sistema computacional. Na computação, esse conceito visa permitir que todas as aplicações possam prosseguir até serem finalizadas, de forma que nenhuma se sobressaia em relação às outras na obtenção dos recursos computacionais, que será controlado pelo próprio Sistema Operacional.

O sistema operacional é muito importante para os data centers, pois, ao rodar diversas aplicações ao mesmo tempo, precisa implementar um mecanismo de justiça para garantir que os usuários finais dessas aplicações não sejam prejudicados e que as diferentes necessidades dessas aplicações sejam atendidas de forma sustentável.

Quando se trata de políticas de gerenciamento de energia, podemos definir três pilares fundamentais para entender como o sistema operacional implementa o desligamento do hardware: Controlador, Observador e Política. Esse desligamento é realizado por meio de uma interface chamada ACPI, que possui um conjunto de protocolos sobre como o desligamento deve ser feito para garantir a preservação do hardware. O sistema operacional é responsável apenas por utilizar essa interface, abstraído-a.

2.3.2 Pilares

Os pilares de gerenciamento de energia podem ser divididos em três tipos, como pode ser visto no artigo "Monitoring System Activity for OS-Directed Dynamic Power Management"(RICCO, August 10-12, 1998). Cada pilar trabalha de forma conjunta para garantir que a eficiência energética seja alcançada.

A seguir apresentarei cada função de cada pilar, e mostrarei como tais conceitos podem influenciar os data centers:

- **Controlador:** Este componente é responsável por executar ações de gerenciamento com base nas políticas estabelecidas e nas observações realizadas. Ele ajusta os recursos do sistema, como potência e desempenho, conforme necessário para manter a eficiência e a estabilidade do Data Center.

- **Política:** Refere-se ao conjunto de regras e diretrizes que determinam como os recursos devem ser gerenciados. As políticas podem ser projetadas para otimizar o uso de energia, maximizar o desempenho ou equilibrar ambos, dependendo das necessidades e prioridades do Data Center.
- **Observador:** Este pilar monitora o estado do sistema e coleta dados sobre o uso de recursos, desempenho e condições ambientais. As informações coletadas são essenciais para que o controlador tome decisões informadas e ajuste as políticas de gerenciamento conforme necessário.

Os três pilares trabalham de forma conjunta para garantir a eficiência energética e a estabilidade do Data Center. O observador coleta dados cruciais, o controlador ajusta os recursos com base nesses dados, e as políticas fornecem as diretrizes necessárias para alcançar o equilíbrio desejado entre desempenho e consumo de energia.

O Observador é um pilar central, nesta composição, visto que ao realizar coleta de dados de forma errada ou ineficiente pode gerar uma perda de desempenho, por influenciar o controlador de forma errada a adotar uma política que na situação atual não seria a melhor decisão e ao mesmo tempo deve ser feita de forma mais intrusiva a coleta de dados do ambiente, não influenciando a coleta na tomada de decisão pelo controlador.

Uma forma de tornar a coleta de dados menos intrusiva é apresentada no artigo "Monitoring System Activity for OS-Directed Dynamic Power Management"(RICCO, August 10-12, 1998). Para garantir uma coleta mais eficiente e menos intrusiva, o software de monitoramento foi executado diretamente na memória do kernel. Isso assegura maior estabilidade na coleta de dados, pois evita o processo de paginação.

2.3.3 DPM (Dynamic Power Management)

Ao trabalharmos com políticas de gerenciamento de energia, podemos citar duas abordagens principais: DPM (Dynamic Power Management) e DVFS (Dynamic Voltage and Frequency Scaling). Ambas têm como objetivo reduzir o consumo de energia dos componentes de hardware.

Neste tópico, abordaremos a política de DPM. A DPM consiste em desligar ou reduzir o consumo de energia de componentes ociosos, como memória e disco. Um exemplo de política DPM é a redução da quantidade de rotações de um HD quando não está sendo utilizado, diminuindo assim o consumo de energia.

Essa abordagem é eficaz porque identifica componentes que não estão sendo usados ativamente e os coloca em um estado de baixa energia ou os desliga completamente, contribuindo para a eficiência energética do sistema como um todo, também é importante destacar que ao realizar a ativação do componente para um modo ativo, aumentamos o consumo energético.

Os data centers utilizam a política de DPM (Dynamic Power Management) de forma mais recorrente que os computadores pessoais. Isso se deve ao fato de que os data centers frequentemente precisam desligar grande parte de seus servidores para economizar energia. Outro ponto a destacar é que, como apresentado no artigo “DENS: Data Center Energy-Efficient Network-Aware Scheduling”(KLIASOVICH; BOUVRY, 2010), switches também são incluídos nesse tipo de política.

Essa prática é essencial para data centers devido à escala de operação e ao consumo de energia envolvido. Desligar componentes ociosos, como servidores e switches, ajuda a reduzir significativamente o consumo de energia, melhorando a eficiência energética geral do data center

Um ponto crucial na política de DPM (Dynamic Power Management) é determinar o momento adequado para colocar um componente em estado de baixo consumo de energia ou desligá-lo. Como mencionado anteriormente, a ativação de um componente consome energia adicional, portanto, decisões frequentes de ligar e desligar podem ser prejudiciais à eficiência energética. Por isso, é necessário ter cautela ao aplicar essa política, garantindo que a decisão de desligar ou reduzir o consumo de energia de um componente seja bem fundamentada para evitar desperdícios e garantir a eficiência do sistema.

2.3.4 DVFS(Dynamic Voltage and Frequency Scaling))

As políticas DVFS (Dynamic Voltage and Frequency Scaling) consistem em reduzir a frequência de clock conforme a necessidade do processador. Quando o processador não está sendo utilizado, a frequência de clock é diminuída para um valor mais baixo. Embora a política DVFS não apresente um ganho energético tão grande em comparação ao DPM (Dynamic Power Management), é possível combinar estas técnicas com outras abordagens. Por exemplo, no artigo "A Survey of Methods for Analyzing and Improving GPU Energy Efficiency"(MITTAL, July 2014) é apresentado o escalonamento das threads com base no núcleo em que a aplicação terá maior desempenho, aplicando DVFS.

Por meio do conjunto de fórmulas apresentado no artigo "A Survey of Methods for Analyzing and Improving GPU Energy Efficiency", é possível entender como a redução da frequência de clock leva à economia de energia.

$$P \propto F \cdot V^2 \quad (1)$$

Como apresentado na equação (1), existe uma relação de proporcionalidade entre a frequência e a potência. Ou seja, ao reduzir a frequência de clock, reduzimos a potência dinâmica.

Quando reduzimos a frequência de clock do processador, economizamos energia. Contudo, essa redução acarreta uma queda de desempenho, pois a quantidade de instruções exe-

cutadas será menor antes que o processo perca o processador. Portanto, adotar uma política DVFS muito agressiva pode ser prejudicial, resultando em uma queda considerável de desempenho.

Outro ponto importante a destacar é que, por meio de técnicas de overclock, podemos aumentar o desempenho mantendo o processador operando em uma alta frequência constantemente. No entanto, é essencial tomar cuidado ao utilizar essa técnica, pois ela pode prejudicar ou até danificar o processador.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

O artigo "On Energy Conservation in Data Centers"(ALBERS, 2017) apresenta um algoritmo de distribuição de carga de trabalho, utilizando como critério o conceito de múltiplos estados de suspensão para manter servidores em estado que, ao ser ativado, gaste menos energia.

O estudo "Virtual Machine Based Energy-Efficient Data Center Architecture for Cloud Computing: A Performance Perspective"(YE DAWEI HUANG, 2010)explora a técnica de virtualização e como ela pode reduzir o consumo de energia em data centers, além de apresentar formas de evitar a degradação de desempenho adotando determinadas configurações.

O trabalho "Impact of Virtualization on Cloud Computing Energy Consumption: Empirical Study"(ATIEWI ABDULLAH ABUHUSSEIN, 2018) destaca-se por apresentar um experimento de virtualização que roda diferentes aplicações em diferentes VMs, e como as suas necessidades de recursos computacionais podem prejudicar ou ajudar as aplicações a serem mais eficientes na sua execução.

O estudo "A Survey Of Techniques for Architecting and Managing Asymmetric Multicore Processors"(MITTAL, February 2016) apresenta o conceito de microarquiteturas heterogêneas AMP, explorando os conceitos, pontos positivos e negativos desse tipo de arquitetura, bem como sua aplicação em data centers.

Já o estudo "A Survey of Methods for Analyzing and Improving GPU Energy Efficiency"(MITTAL, July 2014) aborda principalmente a falta de eficiência energética em GPUs, oferecendo maneiras de mitigar esse custo. Ele discute várias técnicas de diversos artigos, como o uso de políticas de migração de núcleos combinadas com políticas DVFS.

O livro "Sistemas Operacionais: Conceitos e Mecanismos de Rodrigo Mazi-ero"(MAZIERO, 2019) apresenta os conceitos de thread, processo e gerência de processos, que são fundamentais para entender como as aplicações interagem com as máquinas virtuais e como influenciam os servidores.

O artigo "Monitoring System Activity for OS-Directed Dynamic Power Management"(RICCO, August 10-12, 1998) apresenta um sistema de monitoramento de energia baseado na coleta de dados em tempo real para implementar políticas de mitigação de energia. Além disso, o artigo discute a interface entre o sistema operacional e o hardware, essencial para adotar políticas de gerenciamento dinâmico de energia (DPM).

O artigo "DENS: Data Center Energy-Efficient Network-Aware Scheduling"(KLIASOVICH; BOUVRY, 2010) apresenta o hardware que compõe um data center, como switches e servidores, detalhando sua topologia. Além disso, aborda um algoritmo de eficiência energética baseado no perfil de rede.

No meu trabalho, os artigos "On Energy Conservation in Data Centers", "Virtual Machine Based Energy-Efficient Data Center Architecture for Cloud Computing: A Performance Perspective", "Impact of Virtualization on Cloud Computing Energy Consumption: Empirical Study,"e

"DENS: Data Center Energy-Efficient Network-Aware Scheduling"contribuíram com as definições de data centers. Contudo, diferentemente desses trabalhos, não utilizei qualquer tipo de servidor para a minha metodologia. Em vez disso, utilizei essas definições para a elaboração de técnicas de DVFS combinadas com a virtualização de servidores, permitindo assim analisar como essa técnica poderia influenciar um ambiente real de data centers.

Os trabalhos "A Survey Of Techniques for Architecting and Managing Asymmetric Multicore Processors"e "A Survey of Methods for Analyzing and Improving GPU Energy Efficiency"apresentam política de DVFS e os conceitos de microarquiteturas heterogêneas. Isso permite uma melhor compreensão de como os data centers lidam com GPUs integradas em suas microarquiteturas, algo muito comum hoje em dia em data centers e computadores em geral. Além disso, esses trabalhos ajudam a entender como o hardware dos data centers funciona com políticas de migração de VMs, DVFS e DPM, contribuindo para o avanço do estado da arte da eficiência energética em data centers.

O livro "Sistemas Operacionais: Conceitos e Mecanismos de Rodrigo Maziero"e o artigo "Monitoring System Activity for OS-Directed Dynamic Power Management", contribuíram para o entendimento de protocolos de desligamento do hardware realizadas pelo Sistema Operacional e como isso influenciou as Vms com as aplicações sendo executadas, permitindo analisar de forma mais aprofundada as técnicas de virtualização, pois como já estabelecido a VM e nada mais que SO rodando em um sistema hospedeiro.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A construção da minha metodologia apresentou diversos obstáculos, principalmente devido à falta de um data center dedicado para o experimento. Por esse motivo, adotei as técnicas de DVFS e virtualização em dois computadores desktops, com diferentes tipos de cache em seus núcleos.

Como pode ser visto na parte de fundamentação teórica, as diferentes micro-arquiteturas estão presentes tanto em data centers quanto em computadores desktops. Por esse motivo, acredito que as técnicas de DVFS combinadas com virtualização podem ser replicadas em um computador pessoal, simulando o resultado com uma micro-arquitetura semelhante.

Para a realização deste experimento, serão utilizadas duas aplicações multi-threads executadas em máquinas virtuais (VMs), utilizando um software de gerenciamento de energia avançado que permite controlar o clock do processador. Será utilizado um benchmark para a obtenção de dados, com quatro níveis de utilização de CPU definidos: 50%, 75% e 100%, sendo rodado em dois computadores com uma micro-arquitetura diferente.

4.1 Materiais

Os materiais utilizados para a realização deste experimento foram: 2 computadores desktops, TLP, PowerTOP, Debian 12 (ISO), VirtualBox e duas aplicações em C, Makefile.

Para o controle de clock, foi utilizado o TLP (Optimize Linux Laptop Battery Life), um software que permite configurações avançadas de eficiência energética, incluindo a manipulação dos clocks do processador. Contudo, é importante ressaltar que essas configurações devem ser feitas com cuidado, pois a quantidade de clocks está intimamente ligada à arquitetura e ao tipo de processador. O PowerTOP é um software utilizado para obter estatísticas do consumo de energia da bateria. Recomendado na própria documentação do TLP, é pouco intrusivo na obtenção dos dados.

Para rodar a máquina virtual, foi utilizada a ISO do Debian 12, amplamente usada em data centers devido à sua estabilidade e aos módulos que facilitam sua configuração. Como VM, foi utilizado o Oracle VM VirtualBox Manager.

Os computadores utilizados para rodar ambas as aplicações foram: um Dell com um processador 12th Gen Intel® Core™ i7-1255U × 12, 15.3 GiB de RAM e 512.8 GB de SSD; e um Lenovo com um processador Intel® Core™ i3-10110U CPU @ 2.10GHz × 2, 3.6 GB de RAM e 128 GB de SSD.

4.2 Métodos

Para executar a experimentação, os seguintes passos foram realizados:

- Foram baixados os seguintes softwares no sistema operacional local da máquina: ISO do Debian 12, Oracle VM VirtualBox Manager, TLP e PowerTOP.
- Utilizou-se o Vim para abrir o arquivo `tlp.config`, que contém um conjunto de variáveis de controle de status de energia.
- Foi alterada a variável `CPUMAXPERFONAC` de acordo com as porcentagens estabelecidas (75%, 100% e 50%) e utilizado o comando `sudo tlp start` para aplicar as novas configurações de frequência de clock.
- Para cada uma das configurações citadas, foi rodada duas aplicações do tipo CPU-bound e I/O-bound, com as seguintes combinações: CPU-bound e I/O-bound, CPU-bound e CPU-bound, I/O-bound e I/O-bound, dentro da VM, 5 vezes cada combinação e calculado o tempo de execução de cada cenário.
- depois foi rodado, no sistema operacional da máquina o comando, `"sudo powertop -html=name"` para gerar as estatísticas das aplicações em arquivo `.html`.
- Realizado em ambos computadores.

4.2.1 Aplicação CPU e I/O-bound

Para a realização do experimento, foram definidas duas cargas de trabalho totalmente diferentes, baseando-se nos recursos que essas aplicações podem exigir durante sua execução.

As aplicações que serão executadas nas VMs estão presentes no seguinte repositório: <https://github.com/alguiguilo098/Metodologia-do-projeto-final-de-computa-o-verde>. O repositório contém dois arquivos `.c`, que representam, respectivamente, uma aplicação CPU-bound e uma aplicação I/O-bound. A aplicação CPU-bound demanda mais recursos da CPU, enquanto a aplicação I/O-bound exige mais do disco e da RAM.

A aplicação CPU-bound realiza a soma aritmética e geométrica das linhas e colunas de uma matriz. Por outro lado, a aplicação I/O-bound imprime as linhas de uma matriz, onde cada thread percorre uma linha.

5 RESULTADOS

100%	CPU	CPUIO	IO
potência	1.77 W	1.68 W	1.62 W
real	6m2seg	9m46seg	15m32seg
user	2m37seg	3m15seg	3m6seg
sys	0m30seg	0m25seg	0m54seg

Tabela 1 – Dell com 100% da frequência de clock

75%	CPU	CPUIO	IO
potência	1.58 W	1.06 W	1.82 W
real	6m15seg	12m37seg	15m18seg
user	2m38seg	3m22seg	3m7seg
sys	0m18seg	0m42seg	1m01seg

Tabela 2 – Dell com 75% da frequência de clock

50%	CPU	CPUIO	IO
potência	1.34 W	1.34 W	1.67 W
real	7m8seg	12m0seg	15m30seg
user	2m38seg	3m3seg	3m6seg
sys	0m18seg	0m32seg	22seg

Tabela 3 – Dell com 50% da frequência de clock

100%	CPU	CPUIO	IO
potência	1.79 W	1.72 W	1.65 W
real	6m29seg	9m59seg	15m47seg
user	2m48seg	3m45seg	3m9seg
sys	0m37seg	0m58seg	1m12seg

Tabela 4 – Lenovo com 100% da frequência de clock

75%	CPU	CPUIO	IO
potência	1.62 W	1.2 W	1.85 W
real	6m45seg	12m37seg	15m24seg
user	2m47seg	3m47seg	3m15seg
sys	0m20seg	0m48seg	1m20seg

Tabela 5 – Lenovo com 75% da frequência de clock

50%	CPU	CPUIO	IO
potência	1.54 W	1.51 W	1.7 W
real	7m27seg	12m51seg	15m50seg
user	2m42seg	3m10seg	3m20seg
sys	0m25seg	0m52seg	52seg

Tabela 6 – Lenovo com 50% da frequência de clock

5.1 Discussões

Os resultados apresentados mostram que, ao reduzir a frequência do clock do processador de 100% para 75%, houve uma redução de cerca de 5% no consumo de energia para duas aplicações CPU-bound rodando na mesma máquina virtual. Em contrapartida, o aumento do tempo necessário para que as aplicações fossem finalizadas foi de apenas 1%.

No caso de uma aplicação CPU-bound e outra I/O-bound rodando ao mesmo tempo, a redução no consumo de energia foi de cerca de 23%, enquanto o aumento no tempo de execução foi de 13%. Contudo, quando duas aplicações I/O-bound rodaram simultaneamente, o consumo de energia aumentou em cerca de 5%, com uma redução de 0,6% no tempo de execução.

Já quando analisados os resultados para uma redução de 100% para 50% na frequência do clock da CPU, houve uma diminuição de 18% no consumo de energia para duas aplicações CPU-bound rodando na mesma máquina virtual, com um aumento de 18% no tempo de resposta. Nos casos em que uma aplicação CPU-bound e outra I/O-bound rodam ao mesmo tempo, a redução no consumo de energia foi de 10%, enquanto o aumento no tempo de resposta foi de 10%. No caso de duas aplicações I/O-bound, o aumento no consumo de energia foi de 0,14%, com um aumento de cerca de 0,2% no tempo de resposta.

No computador Lenovo, ao rodar simultaneamente duas aplicações CPU-bound com uso entre 100% e 75%, houve uma redução de 4% no consumo de energia, mas um aumento de 2% no tempo de resposta. No caso de uma aplicação combinada de CPU e I/O, a redução no consumo de energia foi de 16%, com um aumento de 10% no tempo de resposta. Para uma aplicação apenas de I/O, houve um aumento de 5% no consumo de energia, com um aumento de 0,12% no tempo de resposta.

Ao analisar os resultados com uso entre 100% e 50%, obtivemos os seguintes resultados: no caso de duas aplicações CPU-bound, houve uma diminuição de 6% no consumo de energia e um aumento de 4% no tempo de resposta. No cenário de uma aplicação I/O-bound e uma CPU-bound, houve um aumento de 12% no tempo de resposta e uma diminuição de 7% no consumo de energia. Para uma aplicação apenas I/O-bound, houve uma diminuição de 0,7% no consumo de energia e um aumento de 1% no tempo de resposta.

6 CONCLUSÃO

Os resultados preliminares foram muito positivos, embora ainda pouco desenvolvidos. Pode-se perceber que a utilização de técnicas DVFS combinadas com a virtualização resultou em uma economia de energia, à custa de um aumento no tempo de resposta.

Os casos apresentados mostram que aplicações que exigem diferentes quantidades de recursos apresentaram melhores resultados a uma frequência de clock de 75%, ou seja, quando CPU e I/O-bound são executados simultaneamente. Observa-se também que aplicações I/O-bound a uma frequência de clock de 75% apresentaram um aumento no consumo de energia, acompanhado de um aumento no tempo de resposta da aplicação, como foi o caso do computador Dell. Acredito que esse comportamento se deve ao fato de que, por possuir maior capacidade de processamento, o gerenciador de processos priorizou as aplicações CPU-bound, visto que, ao serem finalizadas, liberariam mais recursos para as demais aplicações que necessitam menos desses recursos.

As aplicações I/O-bound rodando simultaneamente apresentaram uma melhor performance de processamento quando operadas a uma frequência de 50%. Acredito que esse comportamento se deve ao fato de que, por possuir maior capacidade de memória do que de processamento, o gerenciador de processos priorizou as aplicações I/O-bound, visto que, ao serem finalizadas, liberariam mais recursos para as demais aplicações que necessitam menos desses recursos. Isso é reforçado pelo fato de que, comparado aos demais casos, a combinação de CPU e I/O apresenta uma degradação de desempenho e energia maior comparando de 75 % a 50 %.

Quando analisada em computadores com menos capacidade de processamento, como no caso do Lenovo, essa técnica não se mostrou tão eficiente em comparação com o Dell. Isso indica que a melhor forma de aplicar essa técnica seria em servidores com maior capacidade de processamento. Outro fator que dificulta a utilização dessa técnica é a classificação dos tipos de VM nos servidores. Ao aplicar uma redução de clock, é necessário conhecer a quantidade de VMs de cada tipo para determinar a porcentagem de clock a ser utilizada, garantindo assim um ganho real de energia.

Para trabalhos futuros, acredito que o desenvolvimento de uma política de virtualização e uma divisão mais criteriosa dos recursos permitiria uma melhor utilização dessa técnica, resultando em uma redução expressiva no consumo de energia, mesmo com tempo de resposta maior.

REFERÊNCIAS

- ALBERS, S. On energy conservation in data centers. **SPAA '17**, 2017. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3087556.3087560>.
- ATIEWI ABDULLAH ABUHUSSEIN, M. A. S. S. Impact of virtualization on cloud computing energy consumption: Empirical study. **ISCSIC '18**, 2018.
- KLIAZOVICH, D.; BOUVRY, S. U. K. P. Dens: datacenter energy-efficient network-aware scheduling. **IEEE**, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3284557.3284738>.
- MAZIERO, P. C. A. **Sistemas Operacionais: Conceitos e Mecanismos**. [S.l.]: DINF - UFPR, 2019.
- MITTAL, J. S. V. S. A survey of methods for analyzing and improving gpu energy efficiency. **ACM Computing Surveys**, Vol. 47, No. 2, Article 19, July 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1145/2636342>.
- MITTAL, S. A survey of techniques for architecting and managing asymmetric multicore processors. **ACM Computing Surveys**, February 2016.
- RICCO, L. B. A. B. S. C. B. Monitoring system activity for os-directed dynamic power management. **ACM ISBN**, August 10–12, 1998.
- YE DAWEI HUANG, X. J. H. C. S. W. C. o. C. S. Z. U. K. Virtual machine based energy-efficient data center architecture for cloud computing: A performance perspective. **IEEE**, 2010.