

Arquitetura de Software para Eficiência Energética: Uma revisão Bibliométrica

Software Architecture for Energy Efficiency: A Bibliometric Review

Ana Clara Moledo Neves

Universidade de Vassouras
anamoledo26@gmail.com

Daniel Alvarez Gonçalves

Universidade de Vassouras
alvarezgonca@gmail.com

Tiago Ruiz de Castro

Universidade de Vassouras
tiago.castro@univassouras.edu.br

Marcio Alexandre Dias Garrido

Universidade Federal Fluminense
marciogarrido@id.uff.br

Douglas Vieira Barboza

Universidade Iguaçu
douglas.barboza@campus1.unig.br

RESUMO

A crescente preocupação com a sustentabilidade no campo da engenharia de software tem impulsionado a pesquisa sobre eficiência energética em arquiteturas de software, especialmente em ambientes distribuídos e de computação em nuvem. Este estudo teve como objetivo analisar as tendências, lacunas e práticas adotadas na otimização energética de software por meio de uma revisão bibliométrica. A pesquisa foi conduzida com a utilização do pacote Bibliometrix no software R, analisando dados de publicações científicas, conferências e artigos relevantes. Os resultados indicaram um crescimento significativo nas publicações sobre o tema, especialmente após 2014, e destacaram áreas emergentes, como o uso de aprendizado de máquina para otimização energética. Contudo, a falta de métricas padronizadas e a predominância de publicações em conferências indicam que ainda há desafios a serem superados, como a consolidação de uma base teórica robusta. As contribuições da pesquisa incluem o mapeamento das principais tendências e a identificação de lacunas no conhecimento, apontando direções para futuras investigações, como a necessidade de estudos mais aprofundados em áreas como *IoT* e *Edge Computing* e a padronização de métricas para avaliar a eficiência energética.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Computação em Nuvem. Computação Sustentável. Gestão Sustentável. Métricas de Otimização.

* Recebido em 18 de junho de 2025, aprovado em 29 de julho de 2025, publicado em 31 de agosto de 2025.

ABSTRACT

The growing concern with sustainability in the field of software engineering has driven research on energy efficiency in software architectures, particularly in distributed and cloud computing environments. This study aimed to analyze trends, gaps, and practices adopted in the energy optimization of software through a bibliometric review. The research was conducted using the Bibliometrix package in R software, analyzing data from scientific publications, conferences, and relevant articles. The results indicated significant growth in publications on the topic, especially after 2014, highlighting emerging areas such as the use of machine learning for energy optimization. However, the lack of standardized metrics and the predominance of conference papers suggest that there are still challenges to be addressed, such as the consolidation of a robust theoretical framework. The contributions of this research include mapping key trends and identifying knowledge gaps, pointing to directions for future investigations, such as the need for more in-depth studies in areas like IoT and Edge Computing and the standardization of metrics for evaluating energy efficiency.

Keywords: Energy Efficiency. Cloud Computing. Sustainable Computing. Sustainable Management. Optimization Metrics.

1. INTRODUÇÃO

O avanço acelerado das tecnologias de informação e comunicação tem elevado significativamente o consumo energético global. De acordo com relatórios da *International Energy Agency* (IEA, 2024), os centros de dados e infraestruturas digitais já representam uma parcela relevante das emissões de CO₂, impulsionando a busca por soluções sustentáveis. Nesse contexto, a eficiência energética tornou-se um atributo essencial da qualidade de software, impactando tanto o desempenho técnico quanto os objetivos ambientais.

Embora existam inúmeros estudos voltados para a otimização de hardware e algoritmos, as decisões arquiteturais como estilos, padrões e táticas de software ainda são menos exploradas sob a ótica energética. O papel do arquiteto de software é fundamental na definição de estruturas que equilibrem desempenho, escalabilidade e consumo energético.

A eficiência energética também assume relevância no contexto das pequenas empresas, nas quais os custos associados ao consumo de energia podem representar importante componente das despesas operacionais. Estudos realizados no âmbito das micro e pequenas empresas brasileiras demonstram a necessidade de avaliar alternativas tecnológicas e energéticas não apenas sob a perspectiva ambiental, mas também quanto à sua viabilidade econômica (HERSEN; SANTOS, 2024).

Além da dimensão ambiental e da redução de custos, a eficiência energética pode ser compreendida como elemento associado à inovação organizacional e à criação de novos

modelos de geração e utilização de valor a partir dos recursos energéticos, ampliando sua relevância para além das decisões estritamente técnicas (KAWAI JR.; PEDROSO, 2024).

Trabalhos recentes (2010–2025) discutem abordagens de *green architecture* e *energy-aware design*, destacando o uso de padrões de nuvem (*cloud patterns*), microsserviços e táticas de escalabilidade eficiente. Contudo, há carência de revisões integradas que sistematizem as estratégias mais eficazes.

A metodologia adotada baseia-se em uma revisão bibliométrica de caráter bibliográfico e documental, conduzida na base Scopus, com o uso da string "*software architecture*" AND "*energy efficiency*" AND "*green computing*", abrangendo o período de 2010 a 2025, e analisada por meio da ferramenta Bibliometrix (R) para identificação de tendências, padrões e lacunas na literatura.

O objetivo principal deste estudo é realizar uma análise bibliométrica da produção científica sobre eficiência energética em software e arquiteturas sustentáveis, identificando tendências de pesquisa, autores mais produtivos, fontes de publicação, países e instituições mais relevantes, bem como as principais lacunas e desafios que orientam o avanço da área.

O artigo está estruturado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta uma revisão da literatura relevante sobre o tema; a Seção 3 descreve a metodologia adotada para a pesquisa; a Seção 4 discute os resultados obtidos a partir da análise bibliométrica; e, por fim, a Seção 5 traz as considerações finais, com possíveis direções para estudos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Eficiência energética e sustentabilidade em Software

A eficiência energética em software constitui um dos pilares da sustentabilidade digital contemporânea, representando o uso racional de recursos computacionais com o intuito de minimizar o impacto ambiental e otimizar o consumo de energia. Trata-se de um atributo transversal de qualidade, que extrapola o desempenho técnico e passa a incorporar dimensões ecológicas e econômicas do ciclo de vida do sistema (CAPRA; FRANCALANCI; SLAUGHTER, 2012).

De acordo com Lago et al. (2015), a eficiência deve ser compreendida como um atributo de qualidade não funcional, intrinsecamente associado às decisões arquiteturais que

determinam como os recursos computacionais são alocados, compartilhados e gerenciados. Essa abordagem reforça a ideia de que o design de software exerce influência direta sobre o consumo energético, tornando o arquiteto de software um agente essencial na promoção de práticas de sustentabilidade digital.

Wysocki, Miciuła e Plecka (2025) destacam que, embora o tema tenha avançado substancialmente na última década, a ausência de métricas consolidadas e de metodologias comparáveis ainda limita a mensuração objetiva do impacto energético do software. Essa lacuna metodológica revela a necessidade de unificar critérios de avaliação para diferentes domínios de aplicação, de modo a viabilizar a comparação entre soluções e tecnologias.

Desenvolver software sustentável implica compreender o comportamento energético das aplicações em diferentes contextos de execução, incluindo uso de CPU, memória, rede e armazenamento, de forma que a eficiência não seja apenas um subproduto da otimização de desempenho, mas um requisito intrínseco de qualidade e responsabilidade ambiental.

2.2 Arquitetura de software e impacto energético

As decisões arquiteturais desempenham um papel determinante na eficiência energética de sistemas computacionais, uma vez que definem não apenas a estrutura organizacional e os fluxos de comunicação, mas também as políticas de escalabilidade, distribuição de carga e alocação de recursos que moldam o comportamento energético do software (PROCACCIANTI; LAGO; LEWIS, 2014).

Arquiteturas monolíticas tendem a apresentar maior eficiência em ambientes locais, devido à menor sobrecarga de comunicação entre componentes e à maior previsibilidade do consumo. Em contrapartida, arquiteturas baseadas em microserviços e modelos *cloud-native* proporcionam elevada elasticidade e disponibilidade, porém, frequentemente, à custa de um incremento no overhead energético decorrente da orquestração, da replicação de instâncias e do tráfego distribuído. Tais paradigmas, portanto, demandam estratégias específicas de gerenciamento energético capazes de equilibrar flexibilidade operacional e sustentabilidade (HASSAN et al., 2024).

Nesse contexto, as táticas arquiteturais verdes configuram-se como instrumentos de projeto que permitem alinhar desempenho, qualidade e eficiência energética. Procaccianti, Lago e Lewis (2014) desenvolveram um catálogo de táticas sustentáveis aplicáveis a sistemas em nuvem, abrangendo práticas como *resource pooling*, *workload consolidation*, *energy-aware*

autoscaling e *dynamic resource allocation*. A aplicação sistemática dessas táticas demonstra potencial para reduzir o consumo energético global sem comprometer métricas de desempenho ou de qualidade de serviço (QoS).

Pesquisas subsequentes ampliaram essa abordagem. Vos et al. (2022) evidenciam que, em ambientes de nuvem pública, estratégias baseadas em elasticidade adaptativa e monitoramento energético contínuo são fundamentais para a otimização sustentável de *workloads* distribuídos. De modo complementar, Moghaddam et al. (2018) validaram empiricamente táticas de *cyber-foraging* voltadas à computação móvel, demonstrando que o particionamento dinâmico de tarefas entre dispositivos locais e surrogates remotos promove ganhos simultâneos de desempenho e eficiência energética.

Dessa forma, a arquitetura de software assume um papel estratégico e integrador, atuando como mediadora entre qualidade, desempenho e sustentabilidade. Mais do que um componente técnico, configura-se como o vetor central da engenharia de software verde, orientando decisões de projeto que visam à construção de sistemas computacionais energeticamente eficientes, resilientes e ambientalmente responsáveis.

2.3 Panorama Atual

A literatura recente (2010–2025) evidencia uma consolidação do campo da engenharia de software verde, com crescente número de publicações dedicadas a *Cloud Computing*, *Microservices* e Computação Distribuída. Esse aumento reflete a maturidade do tema e a integração de práticas sustentáveis em ciclos de desenvolvimento orientados à escalabilidade e à eficiência (WY SOCKI; MICIUŁA; PLECKA, 2025).

Estudos contemporâneos, como os de Hassan et al. (2024) e Zanfardino, Memon e Tucci (2025), incorporam inteligência artificial e aprendizado de máquina como mecanismos para prever demandas de carga e ajustar automaticamente o consumo energético. Essa tendência demonstra uma evolução conceitual da eficiência energética, antes associada a otimizações estáticas, para abordagens auto adaptativas e preditivas, que alinham sustentabilidade e automação inteligente.

Entretanto, ainda há lacunas significativas na literatura, especialmente no que se refere à ausência de métricas padronizadas e à escassez de experimentos em *IoT* e *Edge Computing*, áreas nas quais a restrição de energia é particularmente relevante (MOGHADDAM et al., 2018). Pesquisas como as de Pazienza et al. (2024) e Schaffernak (2025) argumentam que a

sustentabilidade deve ser abordada de maneira holística, contemplando não apenas a eficiência energética, mas também manutenibilidade, longevidade e resiliência do software.

Desse modo, observa-se que o panorama atual transita de uma perspectiva puramente técnica para uma abordagem sistêmica, na qual a sustentabilidade é tratada como atributo de qualidade global. Essa mudança de paradigma reforça a importância das decisões arquiteturais baseadas em evidências, capazes de integrar desempenho, escalabilidade e impacto ambiental em uma visão unificada de desenvolvimento sustentável.

3. METODOLOGIA

O estudo caracteriza-se como pesquisa bibliográfica e documental, realizada por meio de uma Revisão Bibliométrica e visando garantir a transparência e reprodutibilidade, seus procedimentos são descritos a seguir.

3.1 Etapas do procedimento

As etapas metodológicas foram conduzidas conforme descrito no Quadro 1, a seguir:

Quadro 1: Procedimentos metodológicos da análise.

Procedimentos da Bibliometria	
String de Busca:	"software architecture" AND "energy efficiency" AND "green computing"
Base de Dados:	Scopus.
Período:	2010-2025 (totalizando 54 publicações)
CrITÉrios de Inclusão:	Artigos que abordam a relação entre arquitetura de software e consumo energético.
CrITÉrios de Exclusão:	Estudos focados exclusivamente em hardware, compiladores ou algoritmos de baixo nível.
Ferramentas:	Scopus Export (.bib) + Bibliometrix (R).

Após aplicar os filtros, 54 publicações foram identificadas, sendo 16 artigos primários selecionados para análise aprofundada, considerando relevância e aderência aos critérios.

Foram gerados gráficos de:

- Número de publicações por ano;
- Nuvem de palavras-chave;

- Revistas com maior número de publicações;
- Tipos de Publicação;
- Autores mais produtivos;
- Distribuição das Publicações por País;
- Afiliações das publicações.

Essas visualizações permitiram identificar tendências e autores de destaque na área de eficiência energética em software.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

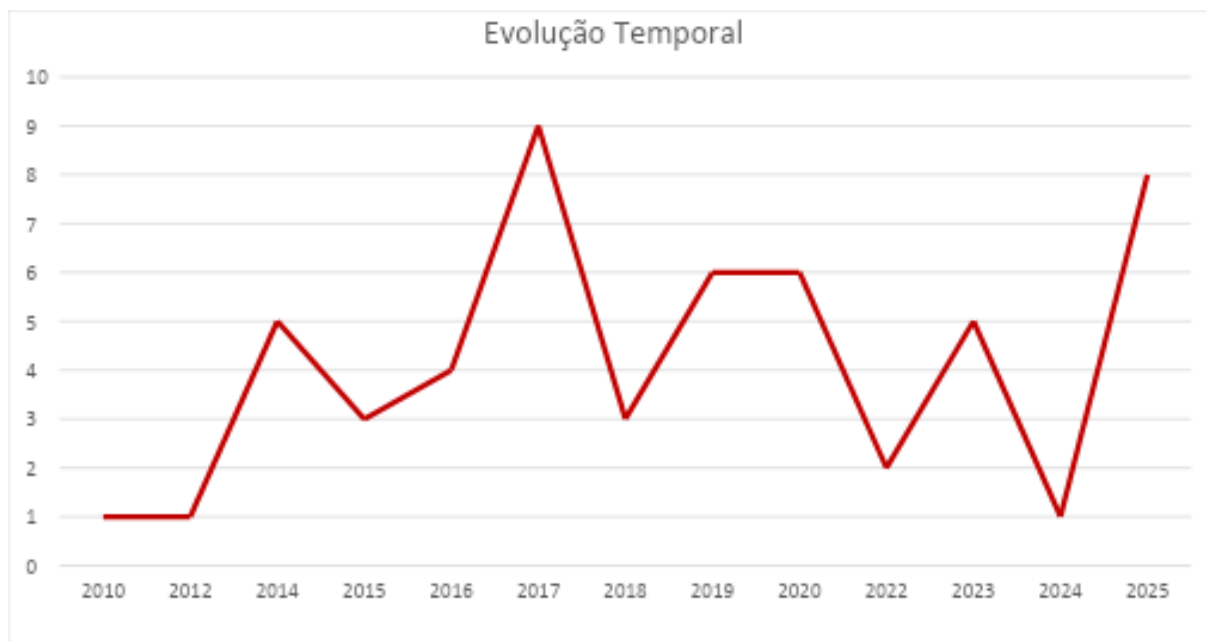
4.1 Panorama Bibliométrico

A análise bibliométrica evidenciou crescimento expressivo das publicações entre 2010 e 2025, com maior concentração em conferências da IEEE e periódicos especializados em *Cloud Computing* e *Sustainable Software Engineering*. Países como Estados Unidos, Alemanha e Brasil aparecem entre os mais produtivos.

As palavras-chave predominantes incluem *cloud computing*, *energy efficiency*, *microservices*, *green software* e *machine learning*, confirmando o foco em arquiteturas distribuídas e automatização inteligente.

A Figura 1 apresenta a evolução temporal das publicações relacionadas à eficiência energética em software no período de 2010 a 2025. Observa-se um crescimento gradual da produção científica, com picos em 2017 e 2025, evidenciando o amadurecimento do tema e a incorporação crescente de abordagens sustentáveis na engenharia de software.

Figura 1: Evolução Temporal



Fonte: Os autores

Analisando os dados de ano de publicação, observamos que as publicações sobre "arquitetura de software" e "eficiência energética" apresentaram um crescimento gradual ao longo dos anos. Inicialmente, entre 2010 e 2014, o número de publicações foi baixo, com apenas 1 ou 2 publicações por ano. A partir de 2014, no entanto, houve um aumento notável, com um pico de 5 publicações em 2014 e um crescimento contínuo até 2017, que registrou 9 publicações. Os anos de 2019 e 2020 também se destacaram, com 6 publicações. Esse aumento é indicativo de um crescente interesse pela interseção entre arquitetura de software e eficiência energética, refletindo uma maior conscientização sobre a sustentabilidade digital. Em anos mais recentes, como 2023, as publicações mantiveram-se em um nível razoável (5 publicações), com uma projeção de 8 publicações para 2025. A análise sugere que, embora o crescimento tenha se estabilizado em algumas épocas, o interesse pelo tema continua em ascensão, especialmente com o aumento da adoção de tecnologias como microsserviços e *cloud computing*, que possuem grande potencial de impacto na eficiência energética.

O pacote *Bibliometrix*, disponível no software R, foi utilizado para análise bibliométrica. O procedimento seguiu as etapas podemos assim ver na Figura 1 ilustra os termos mais frequentes nos títulos e resumos dos artigos analisados, refletindo os tópicos centrais da literatura. Destacam-se conceitos associados à computação sustentável, como “*GREEN COMPUTING*” e “*ENERGY CONSUMPTION*”, evidenciando o foco da produção científica na eficiência energética e no desempenho em software.

expressiva nas cinco primeiras fontes, que se consolidam como os veículos mais influentes e estratégicos para a disseminação do conhecimento científico no período analisado. Essa concentração indica não apenas a relevância do tema, mas também a existência de núcleos especializados que lideram a produção acadêmica.

Figura 3: Revistas com maior número de publicações



Fonte: Os autores

Entre as dez fontes, destacam-se cinco com maior representatividade (duas publicações cada): *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, *Journal of Systems Architecture*, *Journal of Systems and Software*, *IEEE Software* e o evento *16th IEEE ACM International Conference on Utility and Cloud Computing*.

Esses periódicos e conferências são reconhecidos por abordarem questões críticas relacionadas à eficiência energética, arquitetura de sistemas e computação em nuvem, refletindo tendências como a integração de simuladores e algoritmos para otimização energética em arquiteturas de nuvem (Tourchi Moghaddam et al., 2023), o desenvolvimento de modelos empíricos e aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para previsão de desempenho e consumo energético em sistemas multicore (Gamatié et al., 2019), a proposição de princípios arquiteturais e estratégias voltadas para aplicações em larga escala e data centers sustentáveis (Bashroush et al., 2017), além da realização de revisões sistemáticas sobre eficiência energética em arquiteturas de software em nuvem (Procaccianti et al., 2015).

Além disso, a diversidade de periódicos evidencia uma abordagem interdisciplinar, envolvendo áreas como computação em nuvem, sistemas embarcados, engenharia de software e computação sustentável. Essa pluralidade reforça a maturidade do campo e indica que a eficiência energética deixou de ser um tópico periférico para se tornar um requisito estratégico na concepção de sistemas modernos.

A Figura 4 apresenta a proporção de tipos de publicação encontrados na base analisada. Observa-se predominância de trabalhos de conferência, seguidos por artigos de periódicos e, em menor número, capítulos de livro e revisões. Essa configuração indica a natureza dinâmica da área e a rápida disseminação de avanços por meio de eventos científicos especializados.

Figura 4: Tipos de Publicação



Fonte: Os autores

A maioria dos estudos encontrados são trabalhos de conferência, com 33 publicações, seguidos por 17 artigos, o que destaca a natureza dinâmica e em constante evolução da pesquisa em arquitetura de software e eficiência energética. Essa predominância de conferências reflete o foco da comunidade acadêmica em compartilhar e debater novas abordagens e táticas em eventos especializados, como aqueles voltados para computação verde e sistemas distribuídos.

Além disso, são registrados 3 capítulos de livro e 1 revisão, indicando que, embora os artigos e trabalhos de conferência dominem, também há esforços para consolidar o conhecimento e refletir criticamente sobre os avanços no tema. Essa distribuição sugere uma forte tendência para a disseminação rápida de inovações em eventos de conferências, com um número menor de contribuições mais aprofundadas em livros ou revisões sistemáticas.

A Figura 5 mostra os autores com maior número de publicações sobre arquitetura de software e eficiência energética. Destacam-se Patricia Lago e Giuseppe Procaccianti como os principais expoentes da área, seguidos por Lewis, Bashroush e Moghaddam, o que demonstra a consolidação de grupos de pesquisa ativos e interconectados internacionalmente.

Figura 5: Autores mais produtivos



Fonte: Os autores

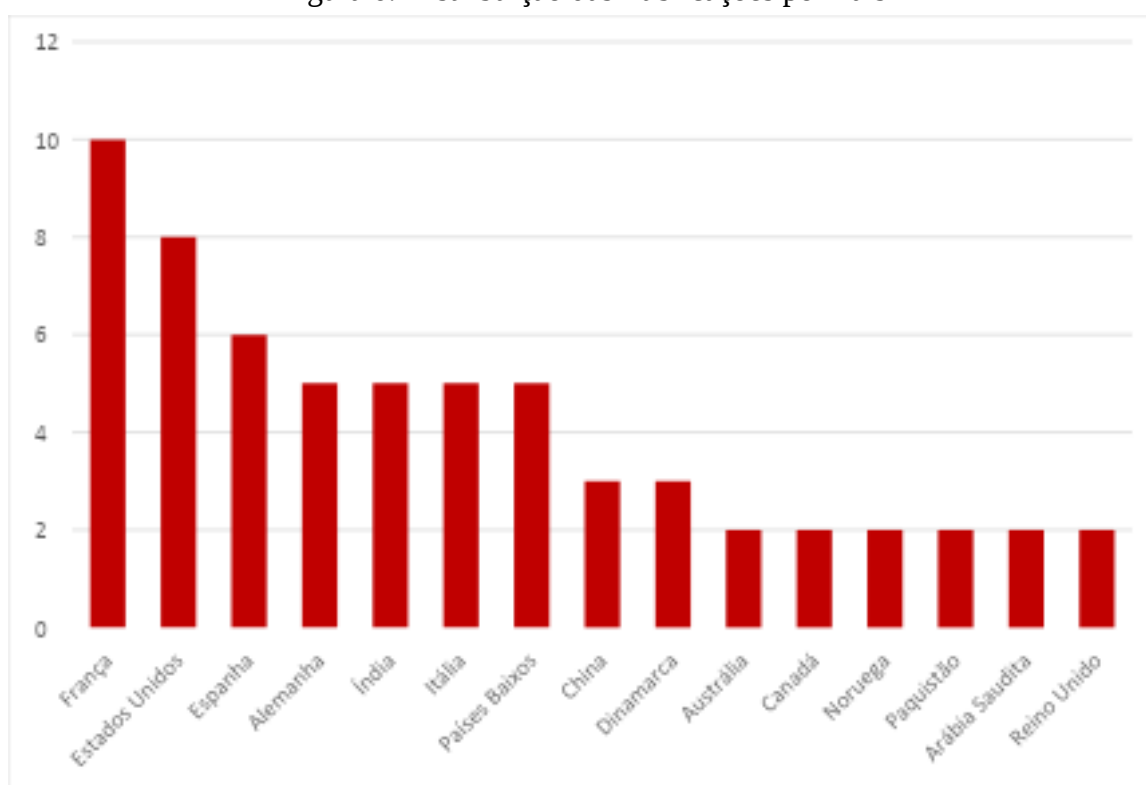
A análise dos autores mais produtivos revela que Lago, P. e Procaccianti, G. se destacam não apenas pelo número de publicações, mas também pela colaboração recorrente em estudos sobre táticas arquiteturais voltadas à eficiência energética. Juntos, publicaram três artigos de destaque na área, sendo que dois deles abordam táticas arquiteturais para *cloud computing* e *cyber-foraging*, explorando a redução do consumo de energia em sistemas distribuídos. O primeiro artigo, intitulado "*Architectural Tactics to Optimize Software for Energy Efficiency in the Public Cloud*" (2022), apresenta um conjunto de táticas reutilizáveis para otimizar a eficiência energética em cargas de trabalho na nuvem pública. Já o segundo, "*Empirical Validation of Cyber-foraging Architectural Tactics for Surrogate Provisioning*" (2018), compara táticas de provisionamento de surrogados no contexto de eficiência energética e resiliência de aplicações móveis e sistemas distribuídos. O terceiro artigo, "*A Systematic Literature Review on Energy Efficiency in Cloud Software Architectures*" (2015), realiza uma revisão sistemática da literatura, investigando as implicações das arquiteturas de software na nuvem para a eficiência energética. Essa colaboração contínua entre os dois autores evidencia um foco constante nas arquiteturas de nuvem e microsserviços, sendo essas as áreas mais exploradas para a melhoria da eficiência energética. Outros autores, como Bashroush, R., Lewis, G.A. e Mayo, R., com duas publicações cada, também contribuem significativamente para a área, embora a maioria dos autores tenha publicado apenas um trabalho sobre o tema, indicando uma diversidade de contribuições individuais ao longo do período analisado.

Dos artigos analisados, parte relevante explora táticas arquiteturais verdes, como *autoscaling* energético e *resource pooling*, aplicadas em ambientes de nuvem. As métricas mais

utilizadas envolvem consumo de CPU, memória e energia por requisição. Estudos como o de Procaccianti et al. (2014) destacam ganhos de eficiência superiores a 20% em cenários de *cloud* quando aplicadas políticas de consolidação de carga.

A Figura 6 apresenta a distribuição das publicações por país, evidenciando que França, Estados Unidos e Espanha lideram a produção científica. Essa concentração reflete a presença de instituições consolidadas e o investimento em pesquisa sobre sustentabilidade digital e eficiência energética em ambientes de nuvem.

Figura 6: Distribuição das Publicações por País



Fonte: Os autores

A análise geográfica das publicações sobre arquiteturas de software para eficiência energética revela que a França, os Estados Unidos e a Espanha são os países mais representados na pesquisa. A França lidera com o maior número de publicações (10), o que pode ser atribuído ao significativo investimento em pesquisa sobre sustentabilidade digital e tecnologias ambientais no país. A França tem demonstrado um compromisso substancial em impulsionar a pesquisa ambiental e soluções tecnológicas sustentáveis, refletindo esse foco na quantidade de estudos produzidos sobre o tema.

Os Estados Unidos, com 8 publicações, também se destacam, refletindo o forte envolvimento de instituições de pesquisa e empresas com tecnologias emergentes e eficiência

energética. A Espanha segue de perto, com 6 publicações, evidenciando uma crescente produção científica no campo da computação verde, especialmente relacionada a *cloud computing* e *microserviços*.

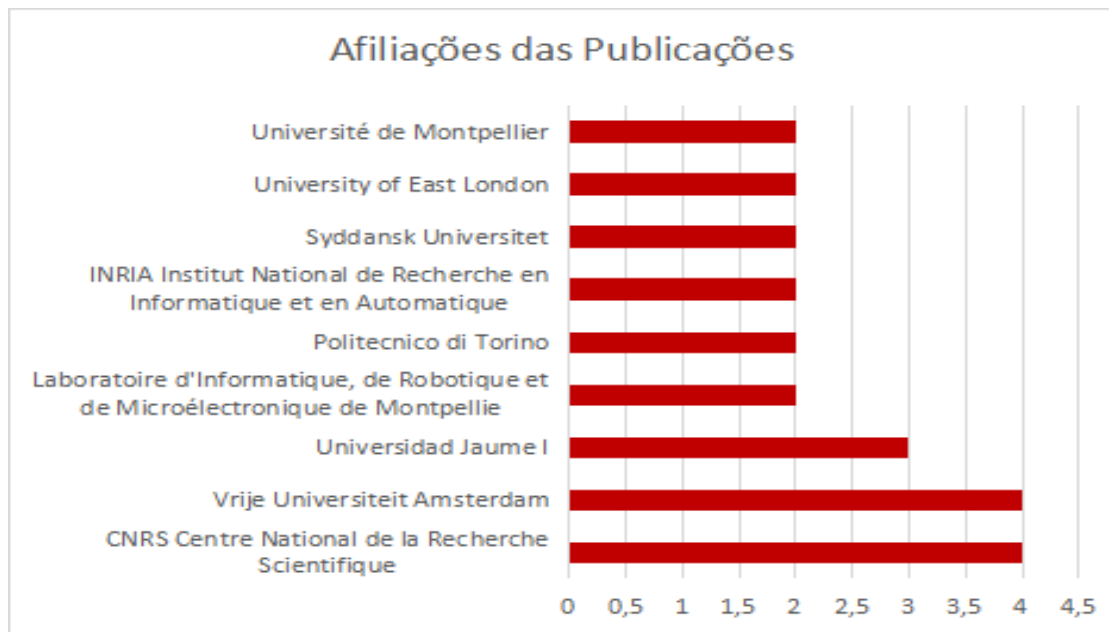
Outros países com um número considerável de publicações incluem Alemanha, Índia, Itália e Países Baixos, todos com 5 publicações cada, sinalizando um interesse global em estudar o impacto da arquitetura de software na eficiência energética e na redução do consumo de energia em sistemas computacionais. Já países como China, Dinamarca, Austrália, Canadá, Noruega, Paquistão, Arábia Saudita e Reino Unido aparecem com 2 publicações, destacando a importância de uma abordagem internacional para a pesquisa em computação verde.

Embora Brasil tenha uma única publicação registrada, o estudo intitulado "*NeurOPar: uma Estratégia de Otimização de EDP Guiada por Rede Neural para Cargas de Trabalho Paralelas*" (2023), apresenta uma contribuição importante ao tema. O artigo propõe uma abordagem inovadora para otimizar a eficiência energética em arquiteturas *multicore* de alta performance por meio de uma rede neural artificial (ANN), alcançando uma melhoria de 42% no *energy-delay product* (EDP) em relação às execuções padrão. Este estudo demonstra o potencial do Brasil em contribuir com soluções de eficiência energética em ambientes de computação de alto desempenho (HPC), o que pode abrir caminho para futuras pesquisas no país.

A concentração de publicações na França, Estados Unidos e Espanha sugere um foco maior da pesquisa acadêmica e industrial em países com forte infraestrutura de pesquisa e investimentos em sustentabilidade. Além disso, a diversidade geográfica das publicações reflete o crescente interesse global por tecnologias que visam melhorar a eficiência energética através de novas arquiteturas de software, com um foco crescente na nuvem e *microserviços*.

A Figura 7 apresenta as instituições com maior número de publicações na área. O destaque recai sobre o CNRS (França) e a *Vrije Universiteit Amsterdam* (Países Baixos), seguidos pela *Universidad Jaume I* (Espanha). A forte presença europeia demonstra o protagonismo do continente na pesquisa em *Green Software Engineering* e *Energy-Aware Architectures*.

Figura 7: Afiliações das publicações



Fonte: Os autores

A análise das afiliações das publicações revela uma forte presença de universidades e centros de pesquisa especializados em computação e sustentabilidade digital, com destaque para o CNRS (*Centre National de la Recherche Scientifique*) da França e a *Vrije Universiteit* Amsterdam dos Países Baixos, ambos com 4 publicações cada. Essas instituições desempenham um papel crucial na promoção de pesquisas avançadas sobre eficiência energética e tecnologias sustentáveis, refletindo seu papel de liderança na pesquisa acadêmica e na inovação em áreas emergentes.

Além dessas duas instituições, outras universidades e centros de pesquisa também se destacam pela sua contribuição significativa ao tema. A Universidade Jaume I, da Espanha, com 3 publicações, é outro exemplo de um centro de excelência na pesquisa em arquitetura de software e computação verde. Também têm se destacado na pesquisa sobre eficiência energética a *Université de Montpellier* (França), o *Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier* (França), o *Politecnico di Torino* (Itália), e o INRIA (*Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique*), que contribuíram com 2 publicações cada.

Essas instituições estão na vanguarda da pesquisa sobre arquiteturas de software para redução do consumo de energia, refletindo a crescente colaboração entre engenharia de software e ciências ambientais. A predominância dessas afiliações destaca a importância de combinar expertise em computação e sustentabilidade para enfrentar os desafios de eficiência

energética em sistemas de grande escala, como *cloud computing* e microsserviços, embora outras instituições também contribuam com publicações, ainda que somente com um trabalho e por isso não figuram no gráfico.

Os resultados indicam que as decisões de arquitetura de alto nível têm impacto direto na sustentabilidade computacional. As táticas de elasticidade e alocação inteligente destacam-se por reduzir consumo em data centers, enquanto a adoção de *machine learning* para previsão de carga representa uma tendência crescente.

Persistem lacunas relevantes, como a ausência de métricas padronizadas e a falta de estudos empíricos em *IoT* e *Edge Computing*. Também se observa o desafio de equilibrar eficiência energética e desempenho, especialmente em sistemas com altos requisitos de disponibilidade.

4.2 Discussão Crítica

A análise bibliométrica revela uma evolução significativa na pesquisa sobre arquitetura de software para eficiência energética, com um aumento notável nas publicações a partir de 2014. Esse crescimento está vinculado à consolidação de áreas emergentes, como computação em nuvem, microsserviços e aprendizado de máquina, que buscam alinhar inovação tecnológica com sustentabilidade. No entanto, embora o campo tenha amadurecido, ainda existem lacunas importantes, como a falta de métricas padronizadas para avaliar a eficiência energética em software, o que dificulta a comparação entre soluções arquiteturais.

Outro ponto crítico identificado foi a predominância de publicações em conferências, o que reflete a natureza dinâmica da área, mas também contribui para a dispersão do conhecimento. Embora eventos científicos permitam uma rápida troca de ideias, a ênfase em conferências impede a consolidação de uma base teórica robusta, com um número reduzido de artigos revisados por pares e capítulos de livros, o que limita a reflexão crítica e a sistematização do conhecimento na área. Essa abordagem mais fragmentada pode prejudicar o desenvolvimento de diretrizes práticas amplamente aceitas.

A concentração de publicações em países como França, Estados Unidos e Espanha levanta questões sobre a distribuição global do conhecimento. Embora esses países liderem a pesquisa, a ausência de maior representatividade de nações com infraestruturas emergentes, como Brasil e Índia, limita a diversidade de abordagens e restringe a aplicabilidade dos resultados em contextos tecnológicos e econômicos variados. Além disso, áreas como Internet

das Coisas (IoT) e *Edge Computing*, que apresentam desafios específicos de eficiência energética, ainda carecem de exploração empírica e teórica.

As decisões arquiteturais também têm um papel crucial na eficiência energética, com táticas como *resource pooling* e *workload consolidation* mostrando potencial para otimizar o consumo em ambientes de nuvem. Contudo, o desafio de equilibrar eficiência energética com requisitos de desempenho, especialmente em sistemas de alta disponibilidade e escalabilidade, continua sendo um ponto de tensão. A aplicação de aprendizado de máquina para previsão de carga energética é uma tendência promissora, mas sua adoção ampla enfrenta obstáculos, como a necessidade de grandes volumes de dados e uma infraestrutura escalável. A interdisciplinaridade do campo, envolvendo engenharia de software, ciências ambientais e tecnologias emergentes, é essencial para o desenvolvimento de soluções eficazes, exigindo uma maior integração entre as diversas áreas de pesquisa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão bibliométrica evidenciou a consolidação e o crescimento da pesquisa sobre eficiência energética associada à arquitetura de software, especialmente a partir de 2014, com concentração temática em computação em nuvem, microserviços, computação sustentável e aprendizado de máquina. Os resultados indicam que as decisões arquiteturais vêm assumindo papel estratégico na busca por sistemas mais eficientes, uma vez que aspectos como elasticidade, alocação de recursos, consolidação de cargas e distribuição de processamento podem influenciar o consumo energético ao longo da execução do software. Nesse sentido, a eficiência energética tende a se consolidar não apenas como uma preocupação ambiental, mas também como um atributo relacionado à qualidade, ao desempenho e à eficiência operacional dos sistemas.

Ao mapear autores, instituições, países, fontes de publicação e principais temas, o estudo também identificou lacunas que limitam a consolidação do campo. Destacam-se a ausência de métricas padronizadas para mensuração e comparação da eficiência energética, a predominância de trabalhos publicados em conferências e a limitada quantidade de estudos empíricos voltados a contextos como Internet das Coisas (IoT) e *Edge Computing*. A crescente utilização de técnicas de aprendizado de máquina para previsão de carga e otimização de recursos constitui uma tendência relevante, porém sua efetividade ainda demanda maior validação experimental e comparação entre diferentes contextos arquiteturais.

Como implicação, os resultados sugerem a necessidade de aproximar o conhecimento produzido na academia das demandas práticas de organizações que utilizam ou desenvolvem soluções digitais. Essa aproximação é particularmente relevante para micro e pequenas empresas, que podem se beneficiar de soluções arquiteturais capazes de reduzir o uso desnecessário de recursos computacionais, melhorar a eficiência operacional e incorporar princípios de sustentabilidade aos seus produtos e processos digitais. Entretanto, a adoção dessas práticas deve considerar as restrições de recursos financeiros, humanos e tecnológicos características desse segmento, reforçando a importância de soluções acessíveis, métodos simplificados de avaliação energética e ferramentas de apoio à tomada de decisão arquitetural.

Como perspectivas futuras, recomenda-se ampliar a revisão para bases como *IEEE Xplore*, *ACM Digital Library* e *Web of Science*, bem como realizar estudos experimentais e comparativos em *IoT*, *Edge Computing* e ambientes de nuvem. Também se mostra relevante desenvolver ferramentas de apoio à arquitetura sustentável que permitam mensurar o consumo energético e recomendar alternativas arquiteturais considerando simultaneamente eficiência, desempenho e custos de implementação. Para o contexto das micro e pequenas empresas, futuras pesquisas podem investigar a viabilidade econômica e operacional dessas soluções, identificando estratégias de eficiência energética que sejam tecnicamente aplicáveis, economicamente acessíveis e capazes de contribuir para inovação, competitividade e sustentabilidade empresarial.

6. REFERÊNCIAS

- ALRESHIDI, Abdulrahman et al. Software architecture for mobile cloud computing systems. **Future Internet**, v. 11, n. 11, p. 238, 2019.
- BASHROUSH, Rabih; WOODS, Eoin. Architectural principles for energy-aware internet-scale applications. **IEEE Software**, v. 34, n. 3, p. 14-17, 2017.
- CAPRA, E.; FRANCALANCI, C.; SLAUGHTER, S. A. Is software “green”? Application development environments and energy efficiency in open source applications. **Information and Software Technology**, v. 54, n. 1, p. 60–71, 2012.
- GAMATIÉ, Abdoulaye et al. Empirical model-based performance prediction for application mapping on multicore architectures. **Journal of Systems Architecture**, v. 98, p. 1-16, 2019.
- HASSAN, Mahmood Ul et al. Smart resource allocation in mobile cloud next-generation network (NGN) orchestration with context-aware data and machine learning for the cost optimization of microservice applications. **Sensors**, v. 24, n. 3, p. 865, 2024.
- HERSEN, A; SANTOS, C. L. Uma investigação para redução de custo da energia elétrica: estudo de caso para uma indústria madeireira de pequeno porte. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 18, n. 2, p. 21-38, 2024.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World Energy Outlook 2024**. Paris: IEA, 2024.

Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2024> . Acesso em: 11 jun. 2025.

JÄRVENPÄÄ, Heli et al. A synthesis of green architectural tactics for ml-enabled systems. In: **Proceedings of the 46th International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Society**. 2024. p. 130-141.

KAUTISH, S.; GURUNG, D. Advancing sustainable computing: a systematic literature review of software, hardware, and algorithmic innovations. **Transactions on Sustainable Computing**, v. 1, n. 1, p. 1–19, maio 2025. DOI: 10.62762/TSC.2025.767094.

KAWAI JR, Mikio; PEDROSO, Marcelo Caldeira. Energy as a Service no Brasil: inovação no modelo de negócio tradicional de comercialização de energia. **Revista da Micro e Pequena Empresa**, v. 18, n. 3, p. 23-39, 2024.

LAGO, S.; SHALOM, D. E.; SIGMAN, M.; LAU, E. F.; PHILLIPS, C. Agreement attraction in Spanish comprehension. **Journal of Memory and Language**, v. 82, p. 133–149, 2015.

MÜLLER, Michael et al. He..ro DB: a concept for parallel data processing on heterogeneous hardware. In: **International Conference on Architecture of Computing Systems**. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 82–96.

PAZIENZA, Andrea et al. A holistic approach to environmentally sustainable computing. **Innovations in Systems and Software Engineering**, v. 20, n. 3, p. 347–371, 2024.

PROCACCIANTI, Giuseppe; LAGO, Patricia; LEWIS, Grace A. A catalogue of green architectural tactics for the cloud. In: **IEEE 8th International Symposium on the Maintenance and Evolution of Service-Oriented and Cloud-Based Systems**. IEEE, 2014. p. 29–36.

PROCACCIANTI, Giuseppe; LAGO, Patricia; BEVINI, Stefano. A systematic literature review on energy efficiency in cloud software architectures. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 7, p. 2-10, 2015.

SCHAFFERNAK, H. Towards sustainable software quality in use: a review of energy efficiency and maintainability aspects in green ICT. **Journal of Systems and Software**, 2025. Disponível em: ScienceDirect.

STOKKE, Kristoffer Robin et al. Load balancing of multimedia workloads for energy efficiency on the Tegra K1 multicore architecture. In: **Proceedings of the 8th ACM on Multimedia Systems Conference**. 2017. p. 124–135.

TOURCHI MOGHADDAM, Mahyar; MØLLER HANSEN, Mads. Architecting cloud solutions for improved consulting practices: leveraging simulation for cost, performance, and energy efficiency. In: **Proceedings of the IEEE/ACM 16th International Conference on Utility and Cloud Computing**. 2023. p. 1–8.

TOURCHI MOGHADDAM, Mahyar; OSMANOVIC, Admir; ENROTH, Max. Energy efficient cloud architecture solutions: a real case. In: **Proceedings of the IEEE/ACM 16th International Conference on Utility and Cloud Computing**. 2023. p. 1–6.

WYSOCKI, W.; MICIUŁA, I.; PLECKA, P. Methods of improving software energy efficiency: a systematic literature review and the current state of applied methods in practice. **Electronics**, v. 14, n. 7, p. 1331, 2025. DOI: 10.3390/electronics14071331.

ZANFARDINO, Gennaro; MEMON, Mashal Afzal; TUCCI, Michele. Enhancing energy efficiency with reusable software ecosystems and persona-based UI/UX. In: **Proceedings of**

the 33rd ACM International Conference on the Foundations of Software Engineering.
2025. p. 1449–1452.