



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO – UFMT  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE VÁRZEA GRANDE  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

**Isadora Magosso da Costa**

## **Uma Análise Bibliométrica da Pegada de Carbono da Computação**

Cuiabá  
2023



### **Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.**

C837a Costa, Isadora Magosso da.  
Uma Análise Bibliométrica da Pegada de Carbono da Computação  
[recurso eletrônico] / Isadora Magosso da Costa. -- Dados eletrônicos (1  
arquivo : 54 f., il. color., pdf). -- 2023.

Orientador: Raoni Florentino da Silva Teixeira.  
TCC (graduação em Engenharia de Computação) - Universidade  
Federal de Mato Grosso, Instituto de Engenharia, Várzea Grande, 2023.  
Modo de acesso: World Wide Web: <https://bdm.ufmt.br>.  
Inclui bibliografia.

1. Pegada de carbono. 2. Gases do efeito estufa. 3. Computação. 4.  
Energia. I. Teixeira, Raoni Florentino da Silva, *orientador*. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

**Isadora Magosso da Costa**

**Uma Análise Bibliométrica da Pegada  
de Carbono da Computação**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Engenharia como parte dos requi-  
sitos para a obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia de Computação.

Orientador: Raoni Florentino da Silva Teixeira

Cuiabá

2023



# Uma Análise Bibliométrica da Pegada de Carbono da Computação

Isadora Magosso da Costa

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado em 06 de Junho de 2023 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

---

Prof. Dr. Raoni Florentino da Silva Teixeira ..... FAENG/CUVG/UFMT

---

Prof. Dr. Diogo Henrique Duarte Bezerra ..... FAENG/CUVG/UFMT

---

Profa. Dra. Gracyeli Santos Souza Guarienti ..... FAENG/CUVG/UFMT

*Ao meu pai e à minha mãe; meus amigos e namorado. Sem eles eu não teria  
chegado até aqui.*

---

# Resumo

Costa, Isadora Magosso da. **Uma Análise Bibliométrica da Pegada de Carbono da Computação**. 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Engenharia de Computação, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil, 2023.

Este trabalho apresenta uma análise bibliométrica a respeito da relação entre a pegada de carbono da Computação e os índices mundiais de emissão de CO<sub>2</sub>. Nos últimos anos, o planeta tem sofrido os efeitos do aumento da temperatura global, fenômeno causado principalmente pela emissão de gases do efeito estufa na atmosfera. A área da Computação também contribui para esse efeito, apesar desse fato ser subestimado e pouco difundido. Partindo desse pressuposto, esse estudo buscou coletar dados de artigos prévios sobre o tema e analisá-los sob o viés da pesquisa bibliométrica, a fim de obter resultados quantitativos e interpretá-los no contexto atual. Em conclusão, este estudo destacou que pesquisas no campo ambiental da Computação ainda são urgentes e relevantes, e que as iniciativas já em andamento podem não ser suficiente para impedir um potencial colapso ambiental.

**Palavras-chave:** Pegada de carbono. Gases do efeito estufa. Computação. Energia.





---

# Abstract

Costa, Isadora Magosso da. **A bibliometric Analysis of the Carbon Footprint in Computing**. 52 p. Undergraduate Dissertation – Computing Engineering, Engineering Faculty, Federal University of Mato Grosso, Brazil, 2023.

This work presents a bibliometric analysis of the relationship between the carbon footprint of Computing and the global CO<sub>2</sub> emission indexes. In the past years the planet has suffered the effects of rising global temperature, phenomenon caused mainly by the emission of greenhouse gases into the atmosphere. The Computing field also contributes to this effect, despite this fact being underestimated and not widespread. Based on this assumption, this study collected data from previous related papers and analysed them under the bias of a bibliometric analysis, in order to achieve quantitative results and interpret them under the present context. In conclusion, this study highlighted that researches on the environmental field of Computing remain urgent and relevant, and the ongoing initiatives may not be enough to prevent a potential environmental collapse.

**Keywords:** Carbon footprint. Greenhouse gases. Computing. Energy.



---

## Lista de ilustrações

Figura 1 – Informações Referentes Aos Artigos Seleccionados . . . . .	28
Figura 2 – Mapa de rede de co-citação entre autores. . . . .	32
Figura 3 – Relação de palavras-chave por frequência de termos. . . . .	32
Figura 4 – Número de artigos publicados por ano. . . . .	33
Figura 5 – Porcentagem do total de artigos publicados por periódico. . . . .	35
Figura 6 – Representação da Quantidade de Artigos por País Correspondente. . . . .	36



---

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Número de Artigos Publicados por Periódico . . . . .	34
Tabela 2 – Relação de Países dos Artigos. . . . .	36



---

## Lista de siglas

**DL** Deep Learning

**EUA** Estados Unidos da América

**GEE** gases do efeito estufa

**IA** Inteligência Artificial

**IBGE** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**INPE** Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**IPCC** Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

**NASA** Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço dos EUA

**ONU** Organização das Nações Unidas

**TI** Tecnologia da Informação





---

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>1.1</b>	<b>Problemática . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos Gerais . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivos Específicos . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>1.3</b>	<b>Justificativa . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Pegada de Carbono . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>2.2</b>	<b>Pegada de Carbono da Computação . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>2.3</b>	<b>Pegada de Carbono de Datacenters . . . . .</b>	<b>23</b>
<b>2.4</b>	<b>Pegada de Carbono da Inteligência Artificial . . . . .</b>	<b>24</b>
<b>2.5</b>	<b>Análise bibliométrica, Science Direct e VosViewer . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Método de Busca . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>Análise dos Dados . . . . .</b>	<b>28</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>4.1</b>	<b>Co-citação entre autores . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>4.2</b>	<b>Ocorrência de palavras-chave . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>4.3</b>	<b>Ano de publicação . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>4.4</b>	<b>Principais periódicos . . . . .</b>	<b>33</b>
<b>4.5</b>	<b>Países mais produtivos . . . . .</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>37</b>

6	CONCLUSÃO . . . . .	39
	REFERÊNCIAS . . . . .	41

## CAPÍTULO 1

## Introdução

O mundo tem apenas três anos para evitar que uma catástrofe climática aconteça. É o que afirmaram em 2022 especialistas da Organização das Nações Unidas (ONU) no relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), no qual também foi destacado que os danos causados ao planeta e a população podem ter chegado a níveis irreversíveis. Dessa forma, compreende-se que o aquecimento global não é mais um problema do futuro, afinal, mas sim do agora. (The Nature Conservancy, 2023)

Segundo estudos de Hawkings (2018), o aumento da temperatura média do planeta que vem acontecendo consecutivamente, ano após ano, segue em ritmo acelerado, ocorrendo numa escala de décadas e acompanhando um padrão de concentração de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera. Eventos como furacões, enchentes, queimadas e o aumento do nível do mar, apesar de chamados de desastres naturais, são consequência do aumento contínuo da variação de temperatura global, segundo a Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço dos EUA (NASA). Seu ex-diretor do Instituto de Estudos Espaciais, James Hansen, afirma que o padrão de aquecimento da Terra nos últimos quarenta anos é um reflexo da alta concentração de GEE, que impede que parte do calor absorvido pela atmosfera seja devolvido para o espaço.

Apesar de essencial para a vida na Terra, o efeito estufa gerado por esses gases - dióxido de carbono, metano, entre outros - vem se intensificando de forma desproporcional desde meados do século XX em decorrência de atividade humana e não natural (Hawkins, 2018). E, de fato, a alta concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera é causada principalmente pela queima de combustíveis fósseis para geração de energia e atividades industriais (INPE, 2017).

Numa escala mais local, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em janeiro deste ano a produção industrial brasileira teve uma

alta em relação ao ano passado. O crescimento no setor da indústria tem por consequência um aumento na demanda de energia, e esse é um padrão que tende a continuar no mundo moderno. Quanto maior a demanda por energia e industrialização, maior é a utilização de combustíveis fósseis para tais atividades, impactando diretamente em uma questão citada anteriormente: a emissão dos gases de efeito estufa.

Com o objetivo de quantificar, analisar e mitigar a geração desses GEEs, é utilizado hoje o conceito da "pegada de carbono", um valor que representa a emissão de gás CO<sub>2</sub> na atmosfera relacionada a toda e qualquer atividade humana (Pandey, D., Agrawal e Pandey, J., 2011) Visto que a produção, logística, uso e até descarte de um produto, bem como utilização de um serviço, "deixam" uma pegada de carbono na atmosfera, é de extrema importância o estudo dos ciclos de vida dos mesmos, para que seja possível chegar a uma solução capaz de se impor ao problema que a população mundial enfrenta: o aquecimento global relacionado ao efeito estufa.

O enfoque deste trabalho é na pegada de carbono produzida especificamente pelo ciclo de vida de componentes, estruturas e atividades computacionais, que, assim como qualquer ação humana, deixa sua marca na atmosfera. Segundo Uddin e Rahman (2011), apesar de contribuírem tremendamente com os problemas ambientais, muitos profissionais da área da computação não estão conscientes disso. A fabricação de computadores e seus componentes consome eletricidade, matéria-prima, substâncias químicas e água, o que gera resíduos danosos à saúde e ao meio ambiente. Além disso, como a maioria da eletricidade hoje ainda vem da queima de combustíveis fósseis e óleo, o aumento da necessidade energética na indústria de TI resulta diretamente no aumento das emissões de gases do efeito estufa. O descarte de componentes obsoletos e não mais utilizados também é um problema, já que muitos contêm materiais tóxicos que poluem a terra e contaminam a água.

Baseado no exposto e considerando a onipresença da tecnologia no mundo moderno, este trabalho reúne artigos de diversos autores da área da tecnologia sobre o tema da pegada de carbono e analisa, por meio de revisão bibliométrica, os dados resultantes.

## 1.1 Problemática

Considerando a abrangência dos impactos ambientais causados pela crescente emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera e a sua relação direta com o aumento da pegada de carbono do planeta, o presente trabalho busca compreender de que forma a análise da

pegada de carbono da computação, pode influenciar no controle dos índices mundiais desses indicadores

## 1.2 Objetivos Gerais

Compreender a relação da pegada de carbono de componentes, estruturas e atividades computacionais para com os crescentes índices mundiais de gases do efeito estufa na atmosfera, por meio da busca e análise de dados associados a esse tema e uma discussão dos resultados obtidos. Para isso será utilizada uma abordagem descritiva e método da revisão bibliométrica.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- a) Compreender a literatura científica acerca da pegada de carbono das tecnologias da informação;
- b) Sintetizar os dados obtidos pela revisão da literatura de forma a se obter um panorama geral do assunto;
- c) Observar o crescimento de publicações na área ao longo dos anos;
- d) Identificar tendências de colaborações e citações entre autores;
- e) Analisar a co-ocorrência de palavras-chave;
- f) Verificar em quais periódicos os artigos selecionados mais foram publicados;
- g) Definir os países com mais publicações;

## 1.3 Justificativa

É inegável a influência global que a tecnologia da informação exerce sobre nossas vidas. Recentemente vimos acontecer um crescimento exponencial de dispositivos eletrônicos, bem como sistemas de armazenamento de grandes quantidades de informações. Em 2017 foi calculado que 2,5 quintilhões de bytes de dados eram produzidos diariamente (DOMO, 2017) e a estimativa é que esses números não tenham diminuído desde então. O site de buscas Google, por exemplo, é requisitado a responder às perguntas de seus usuários mais de 100.000 vezes por segundo, o que juntamente com outros serviços como e-mail, por exemplo, gera um tráfego de em média 10 milhões de gigabytes de dados por minuto pela internet. (Internet Live Stats, 2022)

A geração, o trânsito e o armazenamento desta imensa quantidade de dados consome um alto volume de energia elétrica, que é majoritariamente gerada pela queima de combustíveis fósseis, sendo esses relacionados a diversos problemas ambientais. Além disso, o uso de dispositivos como computadores e celulares, sistemas de armazenamento como data centers e da internet em si geram a chamada pegada de carbono, que representa a quantificação da emissão de gases de efeito estufa gerada pelo ciclo de vida de um produto ou serviço, sendo o principal desses gases o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

É justamente nesse contexto da pegada de carbono produzida na área da computação que esse estudo busca se aprofundar. Apesar de cada computador ou pesquisa feita na internet gerar uma pequena pegada de carbono ou se utilizar de pouca energia elétrica, é necessário salientar que, segundo a União Internacional de Telecomunicações da ONU, em 2021 haviam 4,9 bilhões de pessoas conectadas à internet, o que representava mais da metade da população mundial. Desta forma, se considerarmos as emissões geradas por cada uma dessas pessoas e seus dispositivos individualmente, temos ao final que atualmente mais de 4% da emissão global de gases do efeito estufa é de responsabilidade apenas das tecnologias da informação (The Shift Project, 2018). É a mesma pegada de carbono gerada pelo continente africano inteiro. (CDP African Report, 2020).

Porém, apesar de inquietantes, estes números podem ser reduzidos. A presente pesquisa se justifica com base no atual sentido de urgência relacionado ao aumento das emissões de gases do efeito estufa e da sua conexão com as tecnologias da informação, ao mesmo tempo em que propõe uma análise e reflexão sobre possíveis soluções tecnológicas para que a ameaça de um colapso ambiental não venha a se concretizar.

---

## Fundamentação Teórica

### 2.1 Pegada de Carbono

Apesar do grande volume de informações a respeito, há uma lacuna na literatura científica quando se trata de um consenso para se definir o que é a pegada de carbono. Tal falta de concordância demonstra uma disparidade entre o entendimento popular e científico sobre como determinar o conceito da mesma. (EAST, 2008, p. 4)

A afirmação de East torna-se evidente ao se considerar a ausência de consenso quanto à enumeração dos gases que compõem os GEEs, por exemplo. Para Chapagain e James (2013), essa enumeração consiste em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e famílias de gases hidrofluorcarbonetos e perfluorocarbonetos. Já Wiedmann & Minx (2007) consideram apenas o CO<sub>2</sub>.

A especificação mais aceita no entanto é a do Protocolo de Kyoto, um acordo internacional realizado em 1997 que propunha a redução da emissão de carbono e a diminuição dos gases de efeito estufa (GENDRE, 2022). Assim como o trabalho de Chapagain e James (2013), o documento leva em consideração todo um grupo de gases e não apenas o dióxido de carbono.

Destaca-se também o desacordo para a própria definição de “pegada de carbono”. A definição mais amplamente aceita é a de Pandey, D., Agrawal e Pandey, J. (2011), que a descreve como o “total de emissão de GEE para a atmosfera por um indivíduo, organização, processo, produto ou evento”. Essa interpretação difere do ponto de vista de Franchetti e Apul (2013), que em seu trabalho apresentaram a pegada de carbono não como a variável medida, mas sim a própria medição dos processos de origem e emissão de gases do efeito estufa.

Embora não haja consenso quanto ao seu significado, pesquisadores da área po-



dem concordar em relação à importância de se mensurar e controlar a pegada de carbono. O nível da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera é extremamente relevante para que a civilização seja capaz de determinar a extensão dos atuais e futuros impactos disso na Terra (FRANCHETTI e APUL, 2013) e encorajada a tomar decisões mais sustentáveis (GARCÍA-ALAMINOS et al., 2022).

## 2.2 Pegada de Carbono da Computação

Num quadro geral, os números das emissões de gases de efeito estufa deixam evidente a premência de mudanças: a área de Tecnologia da Informação (TI) viu um crescimento de 40% em 10 anos (2002-2012) em suas emissões, apresentando valores maiores que o resto do mundo; já em 2020, a TI teve um aumento estimado entre 1,8% - 2,8% na emissão de GEE, de acordo com as pesquisas de Freitag et al. (2021). No que diz respeito à relação com o total global, as estimativas mais altas são as do pior cenário de Anders e Edler (2015): 6,3% da pegada de carbono mundial teria origem nas emissões causadas pelo setor da tecnologia. Considerando o melhor cenário possível, Belkhir e Elmeligi (2018) estimam que esse valor esteja entre 1,9 - 2,3% e Malmödin e Lundén (2018), 1,9%. Apesar dos números variarem, especialistas da área concordam com uma afirmação: o tráfego de dados continua a crescer e a pegada de carbono de nosso planeta precisa diminuir para evitar uma catástrofe climática.

Segundo Gupta et al. (2020), é preciso repensar o design e passar a planejar sistemas de computadores sustentáveis, visto que nos últimos anos foram feitos pesados investimentos para maximizar a eficiência dos sistemas, o que por sua vez acaba por exigir mais energia e geração de gases do efeito estufa. Por conta da dilatação da necessidade energética da indústria da computação, a pegada de carbono dessa esfera advém principalmente da fabricação de componentes de hardware e da infraestrutura de sistemas, e não mais de atividades operacionais, ou seja, do uso direto da aplicação ou do hardware em si, como era uma década atrás.

Gupta et al. (2022), em ensaio recente, reitera a necessidade de se olhar para além dos avanços na eficiência dos sistemas, e enxergar a ameaça à sustentabilidade que os atuais ciclos de vida de hardware representam. Seu estudo reafirma as ideias de Gupta et al. (2020) de que nas últimas décadas as melhorias de eficiência estavam focadas na redução das emissões de GEE de atividades operacionais; porém, a fonte das emissões de carbono dos componentes computacionais vêm mudando ao longo dos anos, se tornando cada vez mais relacionada a atividades de infraestrutura. É o caso da empresa Apple, por exemplo: quase metade das emissões da empresa vêm da

fabricação de circuitos integrados como processadores e memória. Segundo o relatório da empresa, em 2019 a fabricação do iPhone 11 representou 79% das emissões de GEE do produto, e sua utilização propriamente dita apenas 17%.

Diversos autores propuseram práticas e soluções sustentáveis para a computação com o objetivo de mitigar a geração de CO<sub>2</sub> relacionada à área, tais como Anthony; Kanding e Selvan, (2020), que concentraram-se na pegada de carbono de modelos de Inteligência Artificial (IA), e como Lindberg et al. (2021) e suas novas métricas que se provaram eficazes na redução da pegada de carbono de datacenters. Apesar de possuírem focos em componentes e infraestruturas diferentes, pesquisadores da área apresentam um consenso em relação à sua pegada de carbono: é um problema global, imediato e de grande impacto ambiental.

## 2.3 Pegada de Carbono de Datacenters

Nas últimas décadas a indústria dos datacenters cresceu em um ritmo implacável. Considerando-se que eles são a base de uma variedade de serviços da Internet tais como o e-commerce, redes sociais e web-hosting, essas estruturas estão presentes em praticamente todos os setores da economia. Com a Internet cada vez mais migrando para datacenters com enormes servidores, é inevitável que o poder computacional necessitasse de cada vez mais poder energético, o que por sua vez resulta em desafios no que diz respeito ao consumo de energia e emissões de GEE. A contribuição dos datacenters para a emissão de gases do efeito estufa é substancial: com 100 megatoneladas de CO<sub>2</sub> jogados na atmosfera por ano, sua pegada de carbono é similar à aviação comercial americana (JONES, N, 2018, p.163).

Contudo, geralmente até 30% dos servidores de data centers apenas consomem energia sem serem devidamente utilizados, pois são acessados numa taxa de 5 a 10% de acordo com Uddin e Rahman (2012). Em seu artigo foi estimado que os datacenters dos EUA representavam até 1,5% do consumo total de energia do país. São números alarmantes, que salientam a necessidade de métricas e métodos para otimizar, definir e mensurar a eficiência energética em datacenters, visto que esta pauta não recebe a visibilidade que deveria.

Para Lannelongue, Grealey e Inouye (2021), um dos fatores que mais afeta o aumento da pegada de carbono de um datacenter é a sua localização geográfica, visto que há variação na emissão de CO<sub>2</sub> de um país para o outro ou até mesmo de uma região do país para outra. Levando em conta esse conceito, Shehabi et al. (2016) apresentaram uma solução viável para refrear esse aumento: se 80% dos datacenters

pequenos se agregarem em datacenters de grande escala, o uso de energia poderia ser reduzido a 25%, dado que grandes data centers são energeticamente mais eficientes do que servidores pequenos.

Uma conclusão semelhante foi descrita por Verdecchia, Lago e de Vries (2022): posicionando datacenters mais perto de seus consumidores finais por meio de estratégias de desagregação permite que eles se fixem em locais com pegadas de carbono menores, onde o consumo de energia seria mais eficiente. Em seu artigo foram citados critérios como design voltado para o reuso e softwares de otimização de energia como uma outra forma de se atingir o objetivo da diminuição da pegada de carbono. Já Ren et al. (2012) afirmam em seu artigo que além de se considerar fatores como fornecedores e consumidores, deve-se levar em consideração a construção de datacenters em locais próximos de fontes de energia renováveis.

A evolução de infraestruturas digitais como os datacenters e seus componentes de hardware precisa ocorrer de tal forma a acompanhar a crescente demanda por dados de uma forma sustentável. Verdecchia, Lago e de Vries (2022) destacam que atualmente diversos líderes do setor, como a Microsoft, Google e Amazon, utilizam cada vez mais energia renovável como fonte para seus datacenters de larga escala. Porém, isso é apenas parte da solução, visto que a produção dessa energia não vai satisfazer a demanda dos datacenters num futuro próximo. Assim sendo, é crucial que eles se tornem energeticamente auto suficientes e que soluções inovadoras sejam colocadas em prática.

Verdecchia, Lago e de Vries (2022) ressaltam que o impacto das soluções na qualidade do serviço para o usuário final permanece pouco esclarecido, sendo necessário conduzir experimentos para verificar os efeitos. Tal falta de clareza pode gerar resistência à mudança, especialmente por parte de empresas de telecomunicações e provedores de serviços em nuvem.

## 2.4 Pegada de Carbono da Inteligência Artificial

Na atualidade quase todos os aspectos da vida humana foram alterados - ou serão num futuro próximo - pela IA. No entanto, nem todas essas mudanças são benéficas: segundo Tamburrini (2022), a IA vem causando apreensão nos últimos anos por conta da sua crescente pegada de carbono, principalmente àquela relacionada à aprendizagem de máquina. Segundo seu artigo, é necessário que seja feito um mapeamento do impacto ambiental ocasionado pela IA durante seu ciclo de vida, o que envolve tanto a análise de seus hardwares especializados quando sua cadeia de suprimentos,

um conceito que engloba da obtenção de matéria prima até descarte, além de energia elétrica e combustíveis utilizados no decorrer desses processos.

Tamburrini afirma ainda que a importância de se estimar a pegada de carbono da IA e identificar suas fontes reside no fato de que estimativas mais realistas deste número possibilitam o desenvolvimento de métricas e modelos capazes de reduzir a emissão de gases do efeito estufa a níveis aceitáveis.

Anthony, Kanding e Selvan (2020) apresentaram uma forma de mapeamento da pegada de carbono de modelos de Deep Learning (DL) - um ramo da aprendizagem de máquina - que corresponde àquela citada como necessária por Tamburrini. Denominada “Carbontracker”, a ferramenta open source acompanha e prevê o consumo de energia e emissão de CO<sub>2</sub> de modelos de DL, bem como a duração total do treinamento dos mesmos. A intenção é divulgar o fato de que o impacto ambiental de treinamentos de DL podem ser reportados usando o carbon tracker e, a partir da consciência desses dados, é possível tomar medidas que ajudem a reduzir a pegada atrelada a essas atividades.

A apreensão em relação ao consumo de energia de modelos de deep learning também foi reportada por Strubell, Ganesh e McCallum (2019): o alto custo do processamento de hardware especializado reflete no custo ambiental do treinamento desses modelos de DL. Treinar um único modelo de deep learning, por exemplo, pode emitir cinco vezes mais carbono do que um carro emite durante seu ciclo de vida.

## 2.5 Análise bibliométrica, Science Direct e VosViewer

Define-se bibliometria como a mensuração, por meio da técnica quantitativa e estatística, da produção e divulgação do conhecimento obtido por meio de livros ou qualquer outro tipo de documentação. Usada como uma ferramenta para acompanhar o desenvolvimento da produção científica, a análise bibliométrica representa um importante recurso para garantir o reconhecimento dos investigadores junto da comunidade científica (Bufrem e Prates, 2005; Costa et. al, 2012).

Essa análise é realizada por meio de indicadores bibliométricos, que se dividem em indicadores de qualidade, importância e impacto científico. Tais indicadores são utilizados por diversas bases de dados científicas para exibir resultados de pesquisas bibliométricas, como a Science Direct, por exemplo. Operada pela Editora Elsevier, a Science Direct é um repositório com mais de 2600 periódicos e milhões de artigos

científicos (HARNEGIE, 2013). Ela é capaz de extrair itens de sua base de dados e exportar para uma plataforma de análises bibliométricas.

Uma das plataformas mais amplamente utilizadas para este fim é a VosViewer, um “software para construção e visualização de redes bibliométricas. Essas redes podem incluir, por exemplo, periódicos, pesquisadores ou publicações individuais” (LARHUD, 2018). O sistema conta com um recurso de criação de mapas, que permitem uma visualização mais eficiente de informações quando se está lidando com um grande volume de dados.

Os mapas no VosViewer são criados a partir do link entre dois itens, ou seja, da conexão entre dois objetos de interesse de uma pesquisa. Essa conexão é relevante para demonstrar a força de um link, que pode indicar o número de citações em comum entre dois artigos ou trabalhos com co-autoria. Um conjunto de itens, por sua vez, forma um cluster. Quanto à visualização dos mapas, ela pode ser feita por três formatos: rede, usando rótulos em círculos ligados por links; sobreposição, no qual a visualização se difere da de rede apenas pelas cores dos círculos, representando a força do link; e densidade, em que os itens são representados por rótulos em seus clusters (Eck e Waltman, 2014).

---

## Metodologia

### 3.1 Método de Busca

O presente trabalho utiliza como metodologia os princípios da bibliometria e possui abordagem descritiva. Dessa forma, inicialmente foi feita uma pesquisa na base de dados científica da Science Direct, para congregiar os artigos sobre o tema deste trabalho, a pegada de carbono na computação. Para filtrar a pesquisa e garantir que fossem exibidos apenas os artigos que tivessem relação com o tema, foi utilizada a funcionalidade de pesquisa avançada da plataforma, que possui diversos campos nos quais podem ser inseridas informações específicas como palavras-chave presentes nos artigos, autor(es), ano de publicação, entre outros.

Desse modo, para encontrar artigos relacionados à pegada de carbono da computação, foram inseridas as seguintes palavras-chave: (“CARBON FOOTPRINT” AND “OF COMPUTING”) OR (“CARBON FOOTPRINT” AND “DATACENTER”) OR (“CARBON FOOTPRINT” AND “OF AI”) OR (“CARBON FOOTPRINT” AND “OF IT”). As palavras foram colocadas entre aspas para que fosse uma busca específica, e entre parênteses para separar cada pesquisa específica dos conectores de busca. Representados pelos booleanos “AND” e “OR”, os conectivos representam, respectivamente “e” e “ou”, para que em uma única busca pudessem ser pesquisadas quatro frases específicas simultaneamente. Também foi adicionado mais um critério de busca, o de palavras-chave específicas por título, resumo ou autor. As palavras-chave definidas para este fim foram “CARBON FOOTPRINT” AND “OF COMPUTING”.

Essa pesquisa gerou 146 resultados. A partir daí, foi necessário filtrar os artigos exibidos por área de interesse, visto que alguns deles estavam relacionados a outras

áreas que não a computação. Foram excluídos os artigos de ciências ambientais, biológicas, de materiais, sociais, decisoriais, da terra e planetárias, além dos de economia, econometria e finanças. Dessa maneira, restaram as áreas de engenharia, ciência da computação e energia, que somadas apresentaram um total de 103 artigos.

Em seguida, foi preciso realizar uma leitura superficial dos artigos, analisando seus títulos e resumos, para excluir aqueles que mesmo com os filtros de buscas ainda tratassem de temas discrepantes do desejado. Após essa leitura, restaram 51 artigos que se aplicavam ao tema “pegada de carbono da computação”. Estes artigos foram então exportados em formato “.RIS”, para posterior visualização por meio do VosViewer.

## 3.2 Análise dos Dados

Após o agrupamento dos artigos pertinentes ao tema deste estudo, os mesmos foram organizados na tabela exibida na figura 1:

Figura 1 – Informações Referentes Aos Artigos Seleccionados

Título do artigo	Autor(es)	Ano de publicação	Tema principal
Energy-aware load dispatching in geographically located Internet data centers	Xinying Zheng, Yu Cai	2011	Propõe um modelo operacional baseado em realocar o processamento de informações de data center de forma energeticamente eficiente
Waste heat recovery in a data center with an adsorption chiller: Technical and economic analysis	Rohit Gupta, Ishwar K. Puri	2021	Apresenta um material que reduz em até 23% o gasto de energia de um datacenter
Optimizing Cloud providers revenues via energy efficient server allocation	Michele Mazzucco a b, Dmytro Dyachuk	2012	Realocação de servidores de nuvem de forma a diminuir emissão de carbono e uso de energia elétrica
A green energy-aware hybrid virtual network embedding approach	Nizar Triki a, Nadja Kara a, May El Barachi b, Souad Hadjres	2015	Comparação entre 3 modelos de arquitetura de redes para identificar o mais eficiente em questão de utilização de recursos e emissão de CO <sub>2</sub>
MEuS: An efficient scheme for energy management with sustainability of cloud data centers in edge-cloud environment	Gagangeet Singh Aujla, Neeraj Kumar	2018	Modelo de agendamento e realocação de processos de um data center em nuvem
Energy efficiency and renewable energy integration in data centres. Strategies and modelling review	Eduard Oró, Victor Depoorter, Albert Garcia, Jaume Salom	2015	Discussão sobre as atuais arquiteturas de data centers e sua eficiência energética
A System of Systems approach for data centers optimization and integration into smart energy grids	Marcel Antal a, Claudia Pop a, Tudor Cioara a, Ionut Anghel a, Ioan Salomie a, Florin Pop	2020	Propõe um modelo de datacenter de larga escala capaz de reduzir a pegada de carbono relacionada em até 5%
Assessing the environmental impact of data centres part 1: Background, energy use and metrics	Beth Whitehead a 1, Deborah Andrews a, Amip Shah b, Graeme Maidment	2014	Revisão da literatura que analisa a abordagem da indústria de data centers em relação a sustentabilidade do setor
Energy-efficient application assignment in profile-based data center management through a Repairing Genetic Algorithm	Meera Vasudevan a, Yu-Chu Tian a c, Maolin Tang a, Erhan Kozan b, Xueying Zhang	2018	Aplicação de um algoritmo para tornar data centers mais energeticamente eficientes
EMC2: Energy-efficient and multi-resource-fairness virtual machine consolidation in cloud data centres	Saikhshor Jangiti, Shankar Sriram	2020	Propõe a redução de energia de data centers de nuvens por meio de uma abordagem com máquinas virtuais
Energy efficient scheduling strategies in Federated Grids	Katia Leal	2016	Apresentação de métricas e políticas de reagendamento de tarefas para que um software consiga se auto-ajustar e se tornar mais energeticamente eficiente
Fuzzy based energy efficient workload management system for flash crowd	Om Kumar C.U., Ponsy R.K. Sathia Bhama	2019	Proposta de um esquema de gerenciamento de carga de trabalho de servidores “verdes” que melhora a efetividade do consumo de energia em 1.9%
An Integer Linear Programming model and Adaptive Genetic Algorithm approach to minimize energy consumption of Cloud	Huda Ibrahim, Raafat O. Aburukba, Khaled El-Fakih	2018	Desenvolvimento de um algoritmo de organização de tarefas dinâmicas para diminuir pegada de carbono e consumo de energia de servidores em nuvem
Green power aware approaches for scheduling independent tasks on a multi-core machine	Ayham Kassab, Jean-Marc Nicod, Laurent Philippe, Veronika Rehn-Sonigo	2021	Proposta de diferentes algoritmos para o agendamento de tarefas em máquinas multi-core
On the feasibility of collaborative green data center ecosystems	Anna Agusti-Torra a, Frederic Raspall a, David Remondo a, David Rincón a, Giovanni Giuliani	2015	Viabilidade de uma estrutura de datacenter que visa redução da pegada de carbono do mesmo



Online job scheduling scheme for low-carbon data center operation: An information and energy nexus perspective	Wenyu Liu, Yuejun Yan, Yimeng Sun, Hongju Mao, Ming Cheng, Peng Wang, Zhaohao Ding	2023	Elaboração de esquema para data centers operarem com baixa pegada de carbono a partir de uma abordagem de deep learning
Towards high-available and energy-efficient virtual computing environments in the cloud	Altino M. Sampaio a, Jorge G. Barbosa	2014	Propõe um algoritmo para o gerenciamento dinâmico de clusters virtuais visando a execução de tarefas, em conjunto com um mecanismo de otimização de energia.
Benefit-cost model for comparing data center performance from a biomimicry perspective	Sylvain Kubler a b, Éric Rondeau a b, Jean-Philippe Georges a b, Phoebe Lembi Mutua a b, Marta Chinnici	2019	Proposta de modelo projetado através de uma análise de custo benefício para melhorar a sustentabilidade em data centers, utilizando uma técnica de processo de análise hierárquica.
New universal sustainability metrics to assess edge intelligence	Nicola Lenherr, René Pawlitsek, Bruno Michel	2021	Neste artigo, é estabelecida a eficiência de treinamento como uma métrica para avaliar a sustentabilidade do deep learning e realizar uma comparação com métricas semelhantes baseadas em consumo de energia.
Hot water cooled electronics: Exergy analysis and waste heat reuse feasibility	Severin Zimmermann a b, Manish K. Tiwari a, Ingmar Meijer b, Stephan Paredes b, Bruno Michel b, Dimos Poulikakos	2012	Este estudo experimental aborda o resfriamento eletrônico utilizando água quente como uma estratégia para reduzir o consumo de energia e a pegada de carbono.
Multi-objective optimization of 3D printed liquid cooled heat sink with guide vanes for targeting hotspots in high heat flux electronics	Yaman "Mohammad Ali" Manaserh a, Ahmad R. Gharaibeh a, Mohammad I. Tradat a, Srikanth Rangarajan a, Bahgat G. Sammakia a, Husam A. Alissa	2022	Propõe uma nova abordagem de resfriamento com o objetivo de reduzir a tensão térmica do chip e a energia necessária para o processo de resfriamento.
Determining end user computing device Scope 2 GHG emissions with accurate use phase energy consumption measurement	Justin Sutton-Parker	2020	Este estudo tem como objetivo medir o consumo de energia EUC do ambiente de negócios
Development of a cloud-based platform for footprint assessment in green supply chain management	Ke Xing a, Wei Qian b, Atiq Uz Zaman	2016	Este artigo propõe uma plataforma de avaliação de ciclo de vida baseada em nuvem que permite a coleta e troca de dados de ciclo de vida dinâmico e apoia a colaboração da cadeia de suprimentos para avaliação da pegada de carbono.
Carbon footprint and service coverage tradeoffs in geo-diverse sites	Lulu Kong, Zichen Xu, Qiaoying Zhang, Yuhao Wang.	2023	Propõe uma estrutura de replicação de dados entre regiões com o objetivo de reduzir a pegada de carbono e maximizar simultaneamente a cobertura do serviço.
Quantifying greenhouse gas abatement delivered by alternative computer operating system displacement strategies	Justin Sutton-Parker	2022	O objetivo desta pesquisa é testar a hipótese de um sistema operacional alternativo na redução do consumo de energia e quantificando os valores de redução de gases de efeito estufa.
A combined frequency scaling and application elasticity approach for energy-efficient cloud computing	S.K. Tesfatsion, E. Wadbro, J. Tordsson	2014	Apresenta técnicas de gerenciamento para serem utilizadas em data centers com o intuito de reduzir o consumo de energia.
Is sufficient carbon footprint information available to make sustainability focused computer procurement strategies meaningful?	Justin Sutton-Parker	2022	Este estudo investiga se as informações disponíveis sobre a pegada de carbono relacionada à computação são suficientes para melhorar a sustentabilidade.
Using geographic load shifting to reduce carbon emissions	Julia Lindberg, Bernard C. Lesieutre, Line A. Roald	2022	Apresenta um modelo de data center que realiza o deslocamento da carga de computação entre diferentes localizações com o objetivo de reduzir a pegada de carbono.
Dynamic energy-aware scheduling for parallel task-based application in cloud computing	Fredy Juarez a b, Jorge Ejarque a, Rosa M. Badia	2018	Apresenta um algoritmo que combina um conjunto de regras heurísticas e técnicas de alocação de recursos com o objetivo de reduzir a pegada de carbono.
Determining the impact of information technology greenhouse gas abatement at the Royal Borough of Kingston and Sutton Council	Justin Sutton-Parker	2022	Pesquisa indica que as informações disponíveis sobre pegada de carbono na computação são insuficientes e inconsistentes para as metas de redução da pegada de carbono.
EATSVM: Energy-Aware Task Scheduling on Cloud Virtual Machines	Leila Ismail, Huned Materwala	2018	Este artigo propõe um algoritmo de "Energy-Aware Task Scheduling" em Máquinas Virtuais na nuvem com o objetivo de reduzir o consumo de energia.
Dynamic energy efficient data placement and cluster reconfiguration algorithm for MapReduce framework	Nitesh Maheshwari, Radheshyam Nanduri, Vasudeva Varma	2012	Algoritmo que ajuda na conservação de energia em grupos de nós de rede em datacenters e reduz o consumo de energia em 33% em cargas de trabalho médias
Big data cloud computing framework for low carbon supplier selection in the beef supply chain	Akshit Singh, Sushma Kumari, Hanif Malekpoor, Nishikant Mishra	2018	Utilização de um framework baseado em nuvens de big data desenvolvida para seleção ecológica de fornecedores de gado. capaz de medir as emissões de gases de efeito estufa em fazendas e assimilar no processo de seleção de fornecedores
GreenBDT: Renewable-aware scheduling of bulk data transfers for geo-distributed sustainable datacenters	Xingjian Lu, Dongxu Jiang, Gaoqi He, Huiqun Yu.	2018	Este estudo aborda o problema da maximização do uso de energia renovável e minimização do custo de energia da rede durante as transferências de dados em massa entre data centers sustentáveis.
Green Networking: A Simulation of Energy Efficient Methods	Janet Light	2020	Este estudo explora as tecnologias facilitadoras modernas, como virtualização e edge computing, e analisa como esses conceitos distintos podem ser combinados para permitir soluções eficientes.
Forecasting power-efficiency related key performance indicators for modern data centers using LSTMs	Hayk Shoukourian, Dieter Kranzlmueller	2020	Apresenta abordagens baseadas em aprendizado de máquina com o objetivo de modelar consumos de energia e dados de data center
Can cloud computing be labeled as "green"? Insights under an environmental accounting perspective	André L.A. Di Salvo, Feni Agostinho, Cecilia M.V.B. Almeida, Biagio F. Giannetti	2017	Este estudo aborda o tema da computação "verde" em nuvem e discute a importância de estruturas sustentáveis que adotem princípios ambientalmente conscientes
LECC: Location, energy, carbon and cost-aware VM placement model in geo-distributed DCs	Soha Rawas, Ahmed Zekri, Ali El-Zaart.	2022	Este artigo propõe um modelo de nuvem geo-distribuída com o objetivo de reduzir o consumo de energia.
Energy Aware Resource Optimization using Unified Metaheuristic Optimization Algorithm Allocation for Cloud Computing Environment	Fahd N. Al-Wesabi, Marwa Obayya, Manar Ahmed Hamza, Jaber S. Alzahrani, Deepak Gupta, Sachin Kumar.	2022	Utilização de heurística e algoritmos de otimização para realocação de recursos de servidores de data centers



Ensemble learning based predictive framework for virtual machine resource request prediction	Jitendra Kumar, Ashutosh Kumar Singh, Rajkumar Buyya	2020	Uso de machine learning para otimizar a utilização de recursos de servidores de nuvem
Feasibility of using renewable energy to supply data centers in 60° north latitude	Enida SHEME, Simon Holmbacka, Sébastien Lafond, Dražen Lučanin, Neki Frashëri	2018	Viabilidade de um datacenter que utiliza fontes renováveis de energia na latitude 60° N
Estimating the resource intensity of the Internet: A meta-model to account for cloud-based services in LCA	Noel Ullrich, Felix M. Piontek, Constantin Herrmann, Alexandra Saraev, Tobias Vieri	2022	Nova abordagem do ciclo de vida de servidores de nuvem, focando na intensidade energética da internet
Scheduling workloads in a network of datacenters to reduce electricity cost and carbon footprint	Trung Le, David Wright	2015	Agendamento de cargas de trabalho de datacenters para reduzir o consumo de energia e a emissão de carbono
Managing renewable energy and carbon footprint in multi-cloud computing environments	Minxian Xu, Rajkumar Buyya.	2020	Proposta de uma abordagem de redução de até 40% na pegada de carbono de três diferentes datacenters
Power management in virtualized datacenter – A survey	V.K. Mohan Raj, R. Shriram	2016	Pesquisa sobre arquiteturas energeticamente eficientes de sistemas computacionais
Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for Cloud computing	Anton Beloglazov, Jemal Abawajy, Rajkumar Buyya	2012	Definição de uma arquitetura e princípios para uma computação em nuvem que seja eficiente em termos energéticos
An energy-aware service composition algorithm for multiple cloud-based IoT applications	Thar Baker, Muhammad Asim, Hissam Tawfik, Bandar Aldawsari, Rajkumar Buyya	2017	Redução da troca de dados entre dispositivos conectados à Internet das Coisas em prol da redução do consumo de energia e pegada de carbono
Holistic resource management for sustainable and reliable cloud computing: An innovative solution to global challenge	Sukhpal Singh Gill, Peter Garraghan, Vlado Stankovski, Giuliano Casale, Ruppia K. Thulasiram, Soumya K. Ghosh, Kotagiri Ramamohanarao, Rajkumar Buyya	2019	Técnicas de otimização da computação em nuvem que reduzem em até 20% o consumo de energia
An energy and carbon-aware algorithm for renewable energy usage maximization in distributed cloud data centers	Daming Zhao, Jiantao Zhou	2022	Proposta de uma abordagem baseada em máquinas virtuais para redução do uso de energia e da pegada de carbono de data centers
Distributed computing for carbon footprint reduction by exploiting low-footprint energy availability	Ward Van Heddeghem, Willem Vereecken, Didier Colle, Mario Pickavet, Piet Demeester	2012	Utilização de data centers distribuídos de forma a explorar fontes de energia renováveis e com menores pegadas de carbono
Aquasar: A hot water cooled data center with direct energy reuse	Severin Zimmermann, Ingmar Meijer, Manish K. Tiwari, Stephan Paredes, Bruno Michel, Dimos Poulidakos	2012	Protótipo de resfriamento de datacenter capaz de reduzir o uso de energia e a pegada de carbono

Fonte: Elaboração Própria

Em seguida deu-se início a fase de análise de dados. Durante essa etapa, foram examinados as seguintes informações:

- Co-citação entre autores;
- Ocorrência de palavras-chave;
- Ano de publicação;
- Principais periódicos;
- Países mais produtivos.

Para tanto, os dados dos artigos foram inseridos no VosViewer. O software foi utilizado para a criação de dois mapas: um mapa de rede para visualização de clusters de co-citação e outro de densidade para ocorrência de palavras-chave. Em seguida, os dados dos periódicos nos quais os artigos foram publicados, seus anos e países de publicação foram exportados no Excel para gerar gráficos com essas informações.

## CAPÍTULO 4

---

# Resultados

Depois da configuração dos mapas e gráficos na fase de análise dos dados, foram obtidos os seguintes resultados:

### 4.1 Co-citação entre autores

A relação entre autores que são citados de forma conjunta em um estudo foi verificada a partir de um mapa de rede, no qual cada autor era representado por um círculo e a cluster na qual ele estava inserido, por uma cor. Dos 160 autores, 17 apresentaram links entre eles, como exposto na Figura 1.

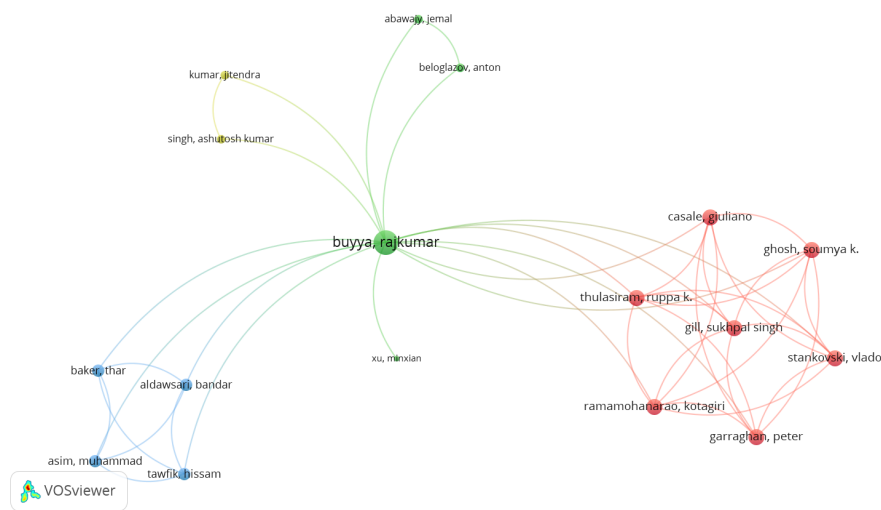
O tamanho do círculo determina quais autores foram mais produtivos e apresentaram mais co-citações. O item principal do mapa, que apresentou link com todas as outras clusters, foi o autor Buyya, Rajkumar, com 16 citações.

### 4.2 Ocorrência de palavras-chave

Para prosseguir à análise da ocorrência das palavras-chave, o mapa criado no VosViewer foi o de densidade. O mesmo foi configurado para exibir termos que tiveram um mínimo de 3 co-ocorrências. Dessa forma, do total de 201 palavras-chave, o número foi reduzido para 11, como mostra a Figura 2.

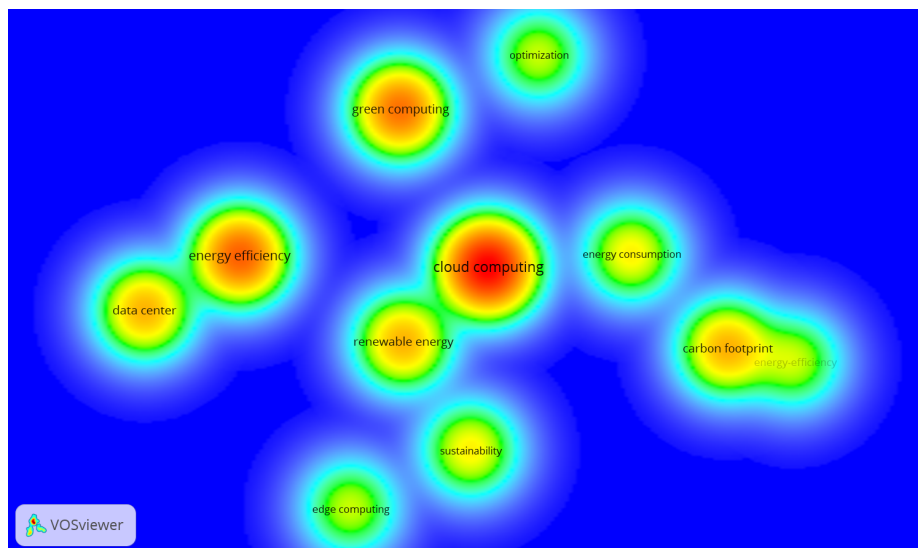
Nesta imagem, cada círculo representa uma palavra-chave, enquanto o esquema de cores corresponde à frequência dos termos. O vermelho indica maior quantidade, seguido pelo laranja, amarelo e, por fim, o verde, que representa um número menor de ocorrências. Assim sendo, observa-se que o termo mais prevalente nos artigos

Figura 2 – Mapa de rede de co-citação entre autores.



Fonte: Elaboração Própria

Figura 3 – Relação de palavras-chave por frequência de termos.



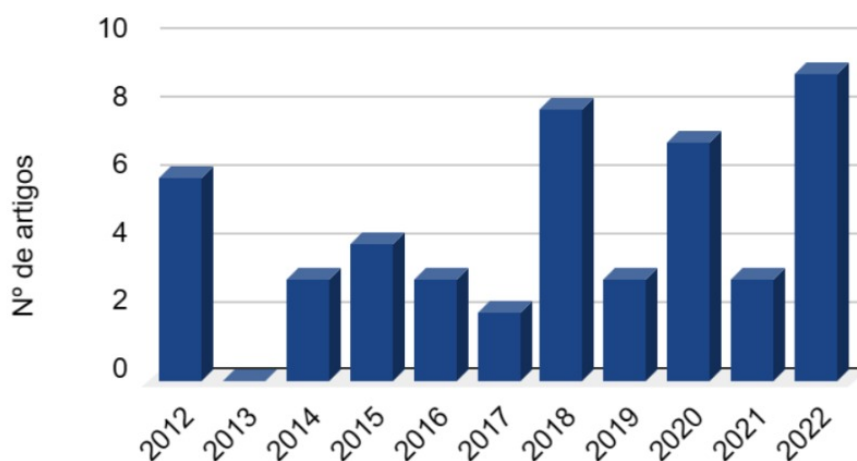
Fonte: Elaboração Própria

analisados foi "cloud computing", com 16 ocorrências, seguido por "energy efficiency", com 10, e "green computing" com 9 ocorrências.

### 4.3 Ano de publicação

Dos 51 artigos selecionados após a análise superficial dos resumos para verificar se eram pertinentes ao tema, 48 deles foram exportados para o Excel, e inseridos numa planilha para avaliação dos padrões dos anos de publicação dos mesmos. Para tanto, foi considerado um intervalo de 10 anos, de 2012 a 2022, excluindo então três artigos da lista: um publicado em 2011 e 2 publicados em 2023. Foi escolhido esse intervalo de tempo para que a visualização dos dados se tornasse mais intuitiva. Isso posto, foi gerado o seguinte gráfico, exibido na Figura 3:

Figura 4 – Número de artigos publicados por ano.



Fonte: Elaboração Própria

Pelo gráfico, tem-se que o ano mais produtivo para o tema “Pegada de carbono da computação” foi o de 2022, com 9 artigos, seguido por 2018, com 8. Além disso, o ano de 2013 foi o menos produtivo, com nenhum artigo publicado considerado nesta análise bibliométrica.

### 4.4 Principais periódicos

Em seguida, ainda no Excel, foi novamente gerado um gráfico, desta vez com todos os 51 artigos selecionados. Para essa análise dos jornais científicos nos quais os

artigos mais foram publicados, os dados foram mais uma vez exportados e inseridos em uma tabela, considerando o título do periódico e a quantidade de artigos da lista nele publicados. Na tabela 1 observa-se a organização da mesma.

Tabela 1 – Número de Artigos Publicados por Periódico.

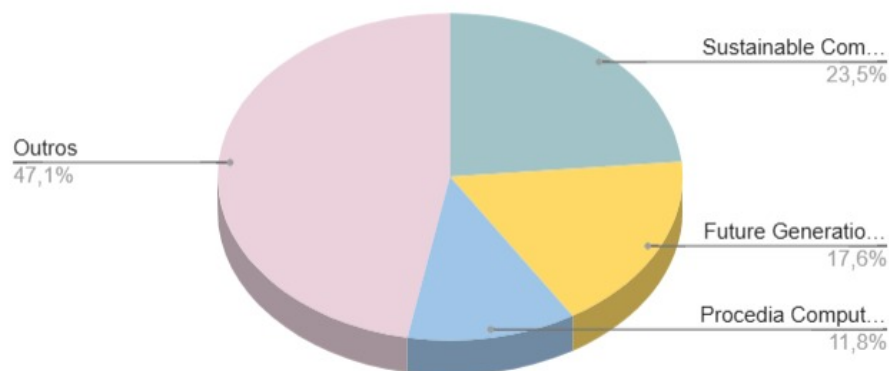
<b>Título do Periódico</b>	<b>Nº de Artigos Publicados</b>
Sustainable Computing: Informatics and Systems	12
Energy Conversion and Management	1
Computer Networks	1
Future Generation Computer Systems	9
Renewable and Sustainable Energy Reviews	2
Building and Environment	1
Applied Soft Computing	1
Computer Communications	1
Computers & Electrical Engineering	1
Ad Hoc Networks	1
Journal of Cleaner Production	3
International Journal of Heat and Mass Transfer	2
Electric Power Systems Research	1
Applied Energy	1
Procedia Computer Science	6
Neurocomputing	1
Procedia CIRP	1
Journal of Network and Computer Applications	2
Journal of Parallel and Distributed Computing	2
Energy	1
Journal of Systems and Software	1

Fonte: Elaboração Própria

A partir da tabela 1, foram considerados os 3 periódicos com maior número de artigos publicados para posteriormente gerar um gráfico: Sustainable Computing: Informatics and Systems, com 12 artigos; Future Generation Computer Systems, com 9; e Procedia Computer Science, com 6 artigos da lista publicados. Todos os outros jornais com menos de 6 artigos foram tidos como como “Outros”, para facilitar a interpretação dos dados. O gráfico da figura 5 exibe o resultado obtido.

O jornal “Sustainable Computing: Informatics and Systems” representa a maior parcela de artigos publicados, com quase 25% da lista, seguido pelo Future Generation Computer Systems e Procedia Computer Science. Todos os outros 18 periódicos juntos publicaram menos da metade dos artigos.

Figura 5 – Porcentagem do total de artigos publicados por periódico.



Fonte: Elaboração Própria

## 4.5 Países mais produtivos

Finalmente, para a obtenção dos dados dos países mais produtivos, foi considerado o número de artigos que continham pelo menos 1 dos autores de determinado país. Para isso, mais uma vez foi feita uma planilha no Excel, contendo o nome do país e a quantidade de artigos ao qual ele estava relacionado. Na tabela 2 é demonstrada essa relação.

Posteriormente, os dados da tabela foram utilizados para a criação de um gráfico que representa um mapa-múndi, no qual cada círculo verde simboliza um ou mais artigos que possuem autor(es) provenientes do país correspondente. Isto é, o tamanho do círculo no gráfico está diretamente relacionado à quantidade de artigos sobre pegada de carbono da Computação que possuem representantes daquele país, ou seja, quanto maior o círculo, maior é o número de artigos disponíveis, como apresentado na Figura 5.

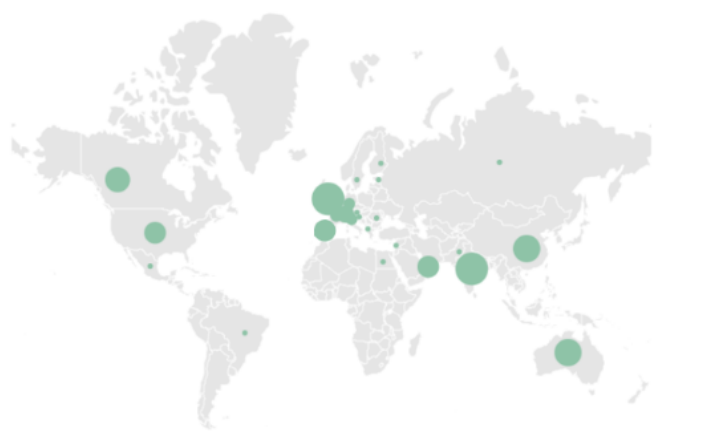
A partir da tabela 2 figura 5 observa-se que a maior concentração de artigos se dá na Europa e na Ásia, e que os países com maior representatividade são Índia e Reino Unido, ambos com 8 artigos, seguidos pela China, com 6. O Brasil também tem uma participação, mesmo que mínima, com apenas 1 artigo contendo um autor brasileiro.

Tabela 2 – Relação de Países dos Artigos.

País	Número de Artigos Relacionados
Albânia	1
Alemanha	2
Austrália	6
Áustria	1
Bélgica	1
Brasil	1
Canadá	5
China	6
Emirados Árabes Unidos	4
Egito	1
Eslovênia	1
Espanha	4
Estados Unidos	4
Estônia	1
Finlândia	1
França	2
Índia	8
Itália	2
Líbano	1
México	1
Paquistão	1
Portugal	1
Reino Unido	8
Romênia	1
Rússia	1
Suécia	1
Suiça	3

Fonte: Elaboração Própria

Figura 6 – Representação da Quantidade de Artigos por País Correspondente.



Fonte: Elaboração Própria

## CAPÍTULO 5

---

## Discussão

Com o objetivo de compreender a relação da pegada de carbono de componentes, estruturas e atividades computacionais para com os crescentes índices mundiais de gases do efeito estufa na atmosfera, e a relevância dessa relação na comunidade literatura científica, foram analisados diversos dados referentes aos artigos selecionados durante a fase de busca.

Inicialmente, é possível notar que a co-citação entre os autores não é um fenômeno tão recorrente. Isso fica evidente levando em consideração que, dos 160 autores da lista de artigos da base de dados da Elsevier, apenas 17 deles se conectaram de alguma forma pelas co-citações. Além disso, um dos autores tinha um número expressivo de citações, sendo assim o autor mais produtivo: Rajkumar Buyya.

Com relação à co-ocorrência de palavras-chave, os termos que mais prevaleceram na pesquisa foram “cloud computing”, seguido por “energy efficiency” e “green computing”, que significam, respectivamente, “computação em nuvem”, “eficiência energética” e “computação ‘verde’”. Esse resultado explicita a tendência dos últimos anos quanto a preocupação sobre impacto ambiental da tecnologia. A crescente demanda por armazenamento, rede e poder computacional tornou-se um problema de energia no planeta, e a consciência dos efeitos negativos dessa demanda influenciaram fortemente trabalhos das últimas duas décadas (Oró et. al, 2015). Assim sendo, verifica-se que os 3 termos com mais co-ocorrências nos artigos tratam de algum tipo de alternativa às atuais infraestruturas computacionais.

No que diz respeito aos anos de publicação dos artigos, a partir da análise da Figura 3, é evidente que o número de publicações exibe consideráveis variações ao longo do tempo. Vale ressaltar a queda na produção no ano de 2013, em contraste com o ano de 2012 que registrou 6 publicações. Além disso, nos anos compreendidos entre 2018 e 2022, pode-se observar um padrão no qual anos com alto número de publicações se



alternam com anos de queda. Por fim, levando em consideração a pandemia de Covid-19 nos anos de 2020 e 2021, a tendência de publicações dos artigos sobre pegada de carbono da Computação vai contra uma tendência global de declínio na área STEM (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática). Segundo Heo et al. (2022), apesar do lado negativo como falta de fundos para pesquisas não relacionadas ao Covid-19 e ausência de equipamento de trabalho, alguns cientistas do campo STEM relataram aumento na produtividade relacionada à literatura científica durante esse momento, o que pode explicar as variações presentes no gráfico da figura 3.

Na análise dos principais periódicos nos quais os artigos foram publicados, sabe-se pela tabela 3 que 21 jornais científicos foram relacionados. Desses 21, porém, quase metade publicou apenas 1 artigo da lista utilizada neste trabalho. A maioria dos artigos, quase 25%, foi publicada em um jornal: o “Sustainable Computing: Informatics and Systems”. A relevância desse valor se baseia no fato de que este jornal publica artigos sobre impactos ecológicos e ambientais de aplicações de computação, uma área de pesquisa que está em rápida expansão (ScienceDirect, 2023). Dessa forma, constata-se que a maioria dos artigos foi publicada em um jornal científico condizente com o escopo desta pesquisa de computação e sustentabilidade.

Ainda sobre a análise dos dados dos artigos, foi considerado o país representado pelos autores dos artigos. Pelo mapa da figura 5, é possível notar um padrão de que as maiores concentrações de artigos por país estão localizadas na Europa e na Ásia. Esse padrão também fica evidente na tabela 3, na qual pode-se verificar que os 3 países com maior número de artigos publicados - Índia, Reino Unido e China - são nações asiáticas e européias. Adicionalmente, é válido de nota que os países representados na figura 5 como mais produtivos são condizentes com a tendência global de publicação de pesquisas científicas. Conforme reportado pela Nature (2019), em 2019 os Estados Unidos era o país com mais artigos, seguidos pela China. O Reino Unido ocupava o 4º lugar e a Austrália, o 10º. O continente europeu era retratado contendo 4 países dentro do grupo dos 10 primeiros colocados.

Por fim, essa análise destacou os principais dados atrelados a artigos científicos sobre o tema deste trabalho sob a ótica da abordagem bibliométrica. A obtenção dos resultados e a posterior discussão acerca dos mesmos permitiu que as informações fossem sintetizadas e reorganizadas de forma a atingir os objetivos específicos deste trabalho e contextualizá-lo dentro do campo de pesquisa sobre pegada de carbono da Computação.

## CAPÍTULO 6

---

# Conclusão

O presente trabalho se utilizou da abordagem descritiva e dos princípios da revisão bibliométrica para coletar dados relativos a pegada de carbono da Computação e compreender de que forma se dá a relação entre a pegada de carbono de componentes e infraestruturas computacionais e os índices mundiais de emissão de CO<sub>2</sub>. levando em conta os resultados obtidos por esta pesquisa, verificou-se que essa relação, apesar de ser relevante e merecedora de atenção, é subestimada. Destaca-se, por exemplo, a informação mencionada anteriormente de que mais de 4% da emissão global de GEE está relacionada à tecnologia da informação. Um número alarmante que não foi adequadamente refletido no número de artigos sobre o tema. Também foi possível concluir que, sendo um dos principais responsáveis pela porcentagem acima, os datacenters também foram os que mais inspiraram soluções. Diversos artigos publicados em diferentes anos e países evidenciaram a atenção dada à redução da pegada de carbono dos datacenters.

Outra importante consideração a ser feita em relação aos dados analisados é quanto ao país de origem dos artigos. Sabe-se que os 3 países mais produtivos em termos de artigos científicos sobre pegada de Carbono da computação estão entre as 4 nações que mais emitem carbono na atmosfera, Essa informação leva à conclusão que apesar haver ciência quanto a urgência de se tomar uma ação efetiva em prol da sustentabilidade do planeta, pouco está sendo efetivamente colocado em prática.

Com base no que foi observado ao longo deste estudo e deste capítulo, pode-se dizer que os objetivos gerais desta pesquisa foram atingidos, a partir dos dados objetivos considerando os objetivos específicos. No entanto, é importante ressaltar que essa análise se limita em relação aos dados utilizados para obtenção dos resultados, visto que os mesmos foram extraídos de uma única base de dados, a da Elsevier, e que foram passados por filtros de título, resumo e palavras-chave para que pudessem ser

utilizados. Sendo assim, alguns artigos relacionados ao tema podem não ter sido considerados no momento da coleta de dados.

Por fim, este trabalho conclui que pesquisas no campo ambiental da Computação ainda são necessárias, urgentes e relevantes, bem como o desenvolvimento de soluções sustentáveis para mitigar os impactos ambientais. Deve ser levado em consideração o fato de que, apesar de algumas ações já terem sido colocadas em prática, estas não são o suficiente para evitar o colapso ambiental previsto pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). A emissão dos gases do efeito estufa segue aumentando, e a importância de pesquisas como esta, assim como muitas outras, torna-se cada vez mais essencial.

---

## Referências

AGUSTÍ-TORRA, Anna; RASPALL, Frederic; REMONDO, David; *et al.* On the feasibility of collaborative green data center ecosystems. **Ad Hoc Networks**, v. 25, p. 565–580, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2014.11.004>>. Acesso em: 12 maio 2023.

AL-WESABI, Fahd N.; OBAYYA, Marwa; HAMZA, Manar Ahmed; *et al.* Energy Aware Resource Optimization using Unified Metaheuristic Optimization Algorithm Allocation for Cloud Computing Environment. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 35, p. 100686, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100686>>. Acesso em: 7 maio 2023.

ANDRAE, A.; EDLER, T. **On Global Electricity Usage of Communication Technology:Trends to 2030**. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/challe6010117>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

ANTAL, Marcel; POP, Claudia; CIOARA, Tudor; *et al.* A System of Systems approach for data centers optimization and integration into smart energy grids. **Future Generation Computer Systems**, v. 105, p. 948–963, 2020. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.future.2017.05.021>>. Acesso em: 2 maio 2023.

ANTHONY, L. F. W.; KANDING, B.; RAGHAVENDRA SELVAN. **Carbontracker:Tracking and Predicting the Carbon Footprint of Training Deep Learning Models**. Disponível em: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.03051>>. Acesso em: 6 mar. 2023.

AUJLA, Gagangeet Singh ; KUMAR, Neeraj. MEnSuS: An efficient scheme for energy management with sustainability of cloud data centers in edge–cloud environment. **Future Generation Computer Systems**, v. 86, p. 1279–1300, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167739X17321581?via%3Dihub>>. Acesso em: 9 maio 2023.

BAKER, Thar ; ASIM, Muhammad ; TAWFIK, Hissam ; *et al.* An energy-aware service composition algorithm for multiple cloud-based IoT applications. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 89, p. 96–108, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1084804517301108?via%3Dihub>>. Acesso em: 1 maio 2023.

BELOGLAZOV, Anton; ABAWAJY, Jemal ; BUYYA, Rajkumar. Energy-aware resource allocation heuristics for efficient management of data centers for Cloud computing. **Future Generation Computer Systems**, v. 28, n. 5, p. 755–768, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.future.2011.04.017>>. Acesso em: 15 maio 2023.

C.U., Om Kumar ; SATHIA BHAMA, Ponsy R.K. Fuzzy based energy efficient workload management system for flash crowd. **Computer Communications**, v. 147, p. 225–234, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.08.020>>. Acesso em: 1 maio 2023.

CDP. **Africa Report - CDP**. Disponível em: <<https://www.cdp.net/en/research/global-reports/africa-report>>. Acesso em: 27 mar. 2023.

DI SALVO, A. L. A. *et al.* Can cloud computing be labeled as “green”? Insights under an environmental accounting perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.69, p. 514–526, mar. 2017.

DICK, M. *et al.* **Green software engineering with agile methods**. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/greens.2013.6606425>>. Acesso em: 6 mar. 2023.

DOMO.COM. **Data Never Sleeps 5.0 | Domo**. Disponível em: <<https://www.domo.com/learn/infographic/data-never-sleeps-5>>. Acesso em: 25 mar. 2023.

**Efeito Estufa e Mudanças Climáticas.** Disponível em: <[https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/educacaoambiental/conceitos/efeitoestufa\\_e\\_mudancasclimaticas/](https://www.wwf.org.br/nossosconteudos/educacaoambiental/conceitos/efeitoestufa_e_mudancasclimaticas/)>. Acesso em: 24 abr. 2023.

FABIANA ALVES. **Relatório IPCC: a crise do clima já apresenta consequências irreversíveis.** Disponível em: <<https://www.greenpeace.org/brasil/blog/relatorio-ipcc-a-crise-do-clima-ja-apresenta-consequencias-irreversiveis>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

FERREBOEUF, H.; KAHRAMAN, Z. **Towards Digital Sobriety The Shift Project.** [s.l:s.n.]. Disponível em: <[https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/03/Lean-ICT-Report\\_The-Shift-Project\\_2019.pdf](https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/03/Lean-ICT-Report_The-Shift-Project_2019.pdf)>. Acesso em: 25 abr. 2023.

FRANCHETTI, M. J.; APUL, D. **Carbon Footprint Analysis: Concepts, Methods, Implementation, and Case Studies.** [s.l.] CRC Press, 2012.

FREITAG, C. *et al.* **The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations.** Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100340>>. Acesso em: 6 mar. 2023.

GARCÍA-ALAMINOS, Á. *et al.* **Measuring a university's environmental performance: A standardized proposal for carbon footprint assessment.** Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131783>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

GARG, S. K.; YEO, C. S.; BUYYA, R. **Green Cloud Framework for Improving Carbon Efficiency of Clouds.** Disponível em: <[https://doi.org/10.1007/978-3-642-23400-2\\_45](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23400-2_45)>. Acesso em: 7 mar. 2023.

GILL, S. S. *et al.* Holistic resource management for sustainable and reliable cloud computing: An innovative solution to global challenge. **Journal of Systems and Software**, v. 155, p. 104–129, set. 2019.

GILL, S. S.; BUYYA, R. **A Taxonomy and Future Directions for Sustainable Cloud Computing: 360 Degree View**. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1712.02899>>. Acesso em: 6 mar. 2023.

GRIMM, D.; EREK, K.; ZARNEKOW, R.; **Carbon Footprint of IT-Services – a Comparative Study of Energy Consumption for Offline and Online Storage Usage**. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/259828238\\_Carbon\\_Footprint\\_of\\_IT-Services\\_-\\_A\\_comparative\\_Study\\_of\\_Energy\\_Consumption\\_for\\_Offline\\_and\\_Online\\_Storage\\_Usage](https://www.researchgate.net/publication/259828238_Carbon_Footprint_of_IT-Services_-_A_comparative_Study_of_Energy_Consumption_for_Offline_and_Online_Storage_Usage)>. Acesso em: 6 mar. 2023.

GUPTA, R.; PURI, I. K.; Waste heat recovery in a data center with an adsorption chiller: Technical and economic analysis. **Energy Conversion and Management**, v. 245, 1 out. 2021.

GUPTA, U.; *et al.* **Chasing Carbon: The Elusive Environmental Footprint of Computing**. Disponível em:<<https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.02839>>. Acesso em: 4 mar. 2023.

GUPTA, U.; *et al.* **ACT Designing Sustainable Computer Systems with an Architectural Carbon Modeling Tool**. Disponível em:<<https://doi.org/10.1145/3470496.3527408>>. Acesso em: 4 mar. 2023.

HEO, S.; *et al.* **Impacts of the COVID-19 pandemic on scientists' productivity in science, technology, engineering, mathematics (STEM), and medicine fields**. Disponível em:<<https://www.nature.com/articles/s41599-022-01466-0>>. Acesso em: 26 abr. 2023.

IBRAHIM, H.; ABURUKBA, R. O.; EL-FAKIH, K.; An Integer Linear Programming model and Adaptive Genetic Algorithm approach to minimize energy consumption of Cloud computing data centers. **Computers & Electrical Engineering**, v. 67, p. 551–565, abr. 2018.

INES GENDRE.; **Kyoto Protocol: All You Need to Know**. Disponível em:<<https://greenly.earth/en-gb/blog/ecology-news/kyoto-protocol-all-you-need-to-know>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

ISMAIL, L.; MATERWALA, H. EATSVM; EATSVM: Energy-Aware Task Scheduling on Cloud Virtual Machines. **Procedia Computer Science**, v. 135, p. 248–258, 2018.

JANGITI, S.; VS, S. S.; EMC2: Energy-efficient and multi-resource- fairness virtual machine consolidation in cloud data centres. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 27, set. 2020.

JOHN EAST , A. ; **What is a Carbon Footprint? An overview of definitions and methodologies Vegetable Climate**. [s.l: s.n.]. Disponível em:<[http://www.vegetableclimate.com/wp-content/uploads/2013/11/Discussion-Paper-1\\_What-is-a-carbon-footprint.pdf](http://www.vegetableclimate.com/wp-content/uploads/2013/11/Discussion-Paper-1_What-is-a-carbon-footprint.pdf)>. Acesso em: 30 abr. 2023.

JUAREZ, F.; EJARQUE, J.; BADIA, R. M.; Dynamic energy-aware scheduling for parallel task-based application in cloud computing. **Future Generation Computer Systems**, v. 78, p. 257–271, jan. 2018.

KASSAB, A.; *et al.* Green power aware approaches for scheduling independent tasks on a multi-core machine. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 31, p. 100590–100590, 1 set. 2021.

KHOSRAVI, A.; GARG, S. K.; BUYYA, R. ; **Energy and Carbon-Efficient Placement of Virtual Machines in Distributed Cloud Data Centers**. Disponível em:<[https://doi.org/10.1007/978-3-642-40047-6\\_33](https://doi.org/10.1007/978-3-642-40047-6_33)>. Acesso em: 13 mar. 2023.

KONG, L.; *et al.* Carbon footprint and service coverage tradeoffs in geo-diverse sites. **Future Generation Computer Systems**, v. 143, p. 1–14, 1 jan. 2023.

KUBLER, S. ; *et al.* Benefit-cost model for comparing data center performance from a biomimicry perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 817–834, set. 2019.

KUMAR, J.; SINGH, A. K.; BUYYA, R. ; Ensemble Learning based Predictive Framework for Virtual Machine Resource Request Prediction. **Neurocomputing**, v. 397, p. 20–30, fev. 2020.



LANNELONGUE, L. ; **Carbon footprint, the (not so) Hidden Cost of High Performance Computing | BCS**. Disponível em:<<https://www.bcs.org/articles-opinion-and-research/carbon-footprint-the-not-so-hidden-cost-of-high-performance-computing/#:~:text=Article->>. Acesso em: 7 mar. 2023.

LANNELONGUE, L.; GREALEY, J.; INOUE, M.; **Green Algorithms: Quantifying the Carbon Footprint of Computation**. Disponível em:<<https://doi.org/10.1002/advs.202100707>>. Acesso em: 4 mar. 2023.

LE, T.; WRIGHT, D.; Scheduling workloads in a network of datacentres to reduce electricity cost and carbon footprint. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 5, p. 31–40, mar. 2015.

LEAL, K.; Energy efficient scheduling strategies in Federated Grids. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 9, p. 33–41, mar. 2016.

LENHERR, N.; PAWLITZEK, R.; MICHEL, B. ; New universal sustainability metrics to assess edge intelligence. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 31, p. 100580, set. 2021.

LIGHT, J. ; Green Networking: A Simulation of Energy Efficient Methods. **Procedia Computer Science**, v. 171, p. 1489–1497, 2020.

LINDBERG, J.; *et al.* **A Guide to Reducing Carbon Emissions through Data Center Geographical Load Shifting**. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/3447555.3466582>>. Acesso em: 6 mar. 2023.

LINDBERG, J.; LESIEUTRE, B. C.; ROALD, L. A.; Using geographic load shifting to reduce carbon emissions.**Electric Power Systems Research**, v. 212, p. 108586, nov. 2022.

LIU, W.; *et al.* Online job scheduling scheme for low-carbon data center operation: An information and energy nexus perspective.**Applied Energy**, v. 338, p. 120918–120918, 1 maio 2023.

LOPES, S.; *et al.***A Bibliometria e a Avaliação da Produção Científica: indi-**

**cadres e ferramentas.** n. 11, p. 1–7, 18 out. 2012.

LU, X.; *et al.* GreenBDT: Renewable-aware scheduling of bulk data transfers for geodistributed sustainable datacenters. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 20, p. 120–129, dez. 2018.

MAHESHWARI, N.; NANDURI, R.; VARMA, V.; Dynamic energy efficient data placement and cluster reconfiguration algorithm for MapReduce framework. **Future Generation Computer Systems**, v. 28, n. 1, p. 119–127, jan. 2012.

MANASERH, Y. A.; *et al.* Multi-objective optimization of 3D printed liquid cooled heat sink with guide vanes for targeting hotspots in high heat flux electronics. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 184, p. 122287, 1 mar. 2022.

MARTINS LACERDA, F.; *et al.* Os “ditos” bibliométricos: uma atualização na análise dos trabalhos caracterizados como bibliométricos publicados no EnANPAD no triênio de 2012 a 2014. **SINGEP**, v. IV, p. 1–18, nov. 2015.

MAZZUCCO, M.; DYACHUK, D.; Optimizing Cloud providers revenues via energy efficient server allocation. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 2, n. 1, p. 1–12, mar. 2012.

MEI COUTINHO; DAIANE M. TEIXEIRA.; **Um pouco sobre Revisão Bibliométrica e Revisão Sistemática.** Disponível em: <<https://lapei.face.ufg.br/p/42358-um-pouco-sobre-revisao-bibliometrica-e-revisao-sistemica>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

METSUL.; **Gráfico mostra temperatura no planeta do nascimento de Cristo a 2021.** Disponível em: <<https://metsul.com/grafico-mostra-temperatura-no-planeta-do-nascimento-de-cristo-a-2021/>>. Acesso em: 25 abr. 2023.

NASA.; **The Causes of Climate Change.** Disponível em: <<https://climate.nasa.gov/causes/>>. Acesso em: 26 abr. 2023.

NASA EARTH OBSERVATORY.; **World of Change: Global Temperatures.**

Disponível em: <<https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures#:~:text=The%20majority%20of%20the%20warming>>. Acesso em: 24 abr. 2023.

NATURE INDEX.; **The ten leading countries in natural-sciences research.** Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/d41586-020-01231-w>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

ORÓ, E.; *et al.* Energy efficiency and renewable energy integration in data centres. Strategies and modelling review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 429–445, fev. 2015.

PANDEY, D.; AGRAWAL, M.; PANDEY, J. S. **Carbon footprint: current methods of estimation.** Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10661-010-1678-y>>. Acesso em: 26 abr. 2023.

PATTERSON, D.; *et al.* **The Carbon Footprint of Machine Learning Training Will Plateau, Then Shrink.** Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9810097>>. Acesso em: 6 mar. 2023.

PAULO, A.-A. C. DE S.; **Temas em Análise 324: Atividade Industrial Inicia 2023 com Leve Aumento Anual | ACSP - Associação Comercial de São Paulo.** Disponível em: <<https://acsp.com.br/publicacao/s/temas-em-analise-324-atividade-industrial-inicia-2023-com-leve-aumento-anual#:~:text=ATIVIDADE%20INDUSTRIAL%20INICIA%202023%20COM%20LEVE%20AUMENTO%20ANUAL>>. Acesso em: 26 abr. 2023.

PIRSON, T.; BOL, D. **Assessing the embodied carbon footprint of IoT edge devices with a bottom-up life-cycle approach.** Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128966>>. Acesso em: 7 mar. 2023.

RAJ, V. K. M.; SHRIRAM, R.; Power management in virtualized datacenter – A survey. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 69, p. 117–133, jul. 2016.

RAWAS, S.; ZEKRI, A.; EL-ZAART, A.; LECC: Location, energy, carbon and cost-aware VM placement model in geo-distributed DCs. **Sustainable Computing:**

**Informatics and Systems**, v. 33, p. 100649, jan. 2022.

REN, C.; *et al.* **Carbon-Aware Energy Capacity Planning for Datacenters**. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6298199>>. Acesso em: 6 mar. 2023.

RITCHIE, H. ; ROSER, M. ; ROSADO, P; **CO2 and Greenhouse Gas Emissions**. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions>>. Acesso em: 20 maio. 2023.

SAMPAIO, A. M. ; BARBOSA, J. G.; Towards high-available and energy-efficient virtual computing environments in the cloud. **Future Generation Computer Systems**, v. 40, p. 30–43, nov. 2014.

SHEHABI ARMAN *et al.* **United States Data Center Energy Usage Report | Energy Technologies Area**. Disponível em: <<https://eta.lbl.gov/publications/united-states-data-center-energy>>. Acesso em: 26 abr. 2023.

SHEME, E. *et al.* Feasibility of using renewable energy to supply data centers in 60°north latitude. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 17, p. 96–106, mar. 2018.

SHOUKOURIAN, H. ; KRANZLMÜLLER, D. Forecasting power-efficiency related key performance indicators for modern data centers using LSTMs. **Future Generation Computer Systems**, v. 112, p. 362–382, maio 2020.

SINGH, A. *et al.* Big data cloud computing framework for low carbon supplier selection in the beef supply chain. **Journal of Cleaner Production**, v. 202, p. 139–149, nov. 2018.

STOLL, C. ; KLAASSEN, L. ; GALLERSDÖRFER, U. **The Carbon Footprint of Bitcoin**. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.05.012>>. Acesso em: 4 mar. 2023.

SUTTON-PARKER, J. ; Determining end user computing device Scope 2 GHG emissions with accurate use phase energy consumption measurement. **Procedia Com-**

**puter Science**, v. 175, p. 484–491, 2020.

SUTTON-PARKER, J. ; Is sufficient carbon footprint information available to make sustainability focused computer procurement strategies meaningful? **Procedia Computer Science**, v. 203, p. 280–289, 2022a.

SUTTON-PARKER, J. Determining the impact of information technology greenhouse gas abatement at the Royal Borough of Kingston and Sutton Council. **Procedia Computer Science**, v. 203, p. 300–309, 2022b.

SUTTON-PARKER, J. Quantifying greenhouse gas abatement delivered by alternative computer operating system displacement strategies. **Procedia Computer Science**, v. 203, p. 254–263, 1 jan. 2022c.

TAMBURRINI, G. **The AI Carbon Footprint and Responsibilities of AI Scientists**. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/philosophies7010004>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

TESFATSION, S. K. ; WADBRO, E. ; TORDSSON, J. A combined frequency scaling and application elasticity approach for energy-efficient cloud computing. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 4, n. 4, p. 205–214, dez. 2014.

THAKUR, S. ; CHAURASIA, A. **Towards Green Cloud Computing: Impact of carbon footprint on environment**. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/7508115>>. Acesso em: 7 mar. 2023.

THE NATURE CONSERVANCY. **O último relatório do IPCC: O que é e por que ele é importante?** Disponível em: <[https://www.tnc.org.br/conecte-se/comunicacao/noticias/ipcc-report-climate-change/?utm\\_source=google&utm\\_medium=cpc&utm\\_campaign=ipcc&gclid=CjwKCAjwvdajBhBEEiwAeMh1U4GjCjpeb2B6UYxV0B6oo9N45UPeCTuzyYUDehZoQv1bNmTVG0p4qhoCH9oQAvD\\_BwE](https://www.tnc.org.br/conecte-se/comunicacao/noticias/ipcc-report-climate-change/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=ipcc&gclid=CjwKCAjwvdajBhBEEiwAeMh1U4GjCjpeb2B6UYxV0B6oo9N45UPeCTuzyYUDehZoQv1bNmTVG0p4qhoCH9oQAvD_BwE)>. Acesso em: 27 abr. 2023.

TRIKI, N. *et al.* A green energy-aware hybrid virtual network embedding approach. **Computer Networks**, v. 91, p. 712–737, nov. 2015.

UDDIN, M. ; RAHMAN, A. A. **Energy efficiency and low carbon enabler green IT framework for data centers considering green metrics.** Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.014>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

ULLRICH, N. *et al.* Estimating the resource intensity of the Internet: A meta-model to account for cloud-based services in LCA. **Procedia CIRP**, v. 105, p. 80–85, 2022.

VAN ECK, N. J. ; WALTMAN, L. **Visualizing Bibliometric Networks.** Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-10377-8\\_13](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-10377-8_13)>. Acesso em: 27 abr. 2023.

VAN HEDDEGHEM, W. *et al.* Distributed computing for carbon footprint reduction by exploiting low-footprint energy availability. **Future Generation Computer Systems**, v. 28, n. 2, p. 405–414, fev. 2012.

VASUDEVAN, M. *et al.* Energy-efficient application assignment in profile-based data center management through a Repairing Genetic Algorithm. **Applied Soft Computing**, v. 67, p. 399–408, 1 jun. 2018.

VERDECCHIA, R. ; LAGO, P. ; DE VRIES, C. **The future of sustainable digital infrastructures: A landscape of solutions, adoption factors, impediments, open problems, and scenarios.** Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.suscom.2022.100767>>. Acesso em: 5 mar. 2023.

WHITEHEAD, B. *et al.* Assessing the environmental impact of data centres part 1: Background, energy use and metrics. **Building and Environment**, v. 82, p. 151–159, dez. 2014.

XING, K. ; QIAN, W. ; ZAMAN, A. U. Development of a cloud-based platform for footprint assessment in green supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 139, p. 191–203, dez. 2016.

XU, M. ; BUYYA, R. Managing renewable energy and carbon footprint in multi-cloud computing environments. **Journal of Parallel and Distributed Computing**, v. 135, p. 191–202, jan. 2020.

ZHAO, D. ; ZHOU, J. An energy and carbon-aware algorithm for renewable energy usage maximization in distributed cloud data centers. **Journal of Parallel and Distributed Computing**, v. 165, p. 156–166, jul. 2022.

ZHENG, X. ; CAI, Y. Energy-aware load dispatching in geographically located Internet data centers. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 1, n. 4, p. 275–285, 1 jul. 2011.

ZIMMERMANN, S. *et al.* Aquasar: A hot water cooled data center with direct energy reuse. **Energy**, v. 43, n. 1, p. 237–245, jul. 2012a.

ZIMMERMANN, S. *et al.* Hot water cooled electronics: Exergy analysis and waste heat reuse feasibility. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 23, p. 6391–6399, 1 nov. 2012b.