

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
ROMULO RIEDER

**INCORPORAÇÃO DE PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS NO DESENVOLVIMENTO DE
SOFTWARE:** estudo de múltiplos casos

São Paulo
2025

ROMULO RIEDER

**INCORPORAÇÃO DE PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS NO DESENVOLVIMENTO DE
SOFTWARE:** estudo de múltiplos casos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro
Universitário FEI, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de Mestre
em Administração.

Orientadora: Prof.^a Dra. Gabriela Scur.

São Paulo

2025

Rieder, Romulo.

INCORPORAÇÃO DE PRÁTICAS SUSTENTÁVEIS NO
DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE: estudo de múltiplos casos /
Romulo Rieder. São Paulo, 2025.
93 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.
Orientadora: Prof.^a Dra. Gabriela Scur.

1. sustentabilidade em software. 2. engenharia de software sustentável.
3. software verde. 4. desenvolvimento de software. I. Scur, Gabriela,
orient. II. Título.



**APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA JULGADORA**

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Administração

MESTRADO PPGA-10

Aluno: Romulo Rieder

Matrícula: 323107-3

Título do Trabalho: Incorporação de Práticas Sustentáveis no Desenvolvimento de Software: Estudo de Múltiplos Casos

Área de Concentração: GIS - Gestão da Tecnologia e Inovação

Orientador: Prof.^a. Dra. Gabriela Scur Almudi

Data da realização da defesa: 30/ 05 / 2025

Avaliação da Banca Examinadora:

ORIGINAL ASSINADA

São Paulo, 30 de maio de 2025

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof.^a. Dra. Gabriela Scur Almudi

Prof.^a. Dra. Claudia Aparecida de Mattos

Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof^a. Dra. Maria Tereza Saraiva de Souza

Dedico este trabalho à minha companheira, Renata, por seu amor, companheirismo e por ter sido a principal incentivadora desta jornada acadêmica. Aos meus pais, Adelar e Vera, pelo apoio constante, e pelos valores que formaram o meu caráter. E à minha filha, Alicia, por ser a luz que ilumina meus dias e me motiva a melhorar a cada passo.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força nos momentos de incerteza e por me manter com fé para percorrer esta jornada.

À minha esposa, Renata, pelo amor incondicional, por ser minha inspiração, pelo apoio constante, sua sabedoria, paciência nos dias difíceis e por ser meu alicerce, além de ter sido quem me incentivou a iniciar este mestrado.

À minha filha, Alicia, por ser a bênção enviada por Deus, que ilumina meus dias com seu olhar e sorriso, trazendo alegria e sentido a cada passo desta caminhada.

Aos meus pais, pelo carinho, apoio e pelos valores que me transmitiram os quais me acompanham ao longo da vida. A educação e os princípios que me ensinaram sempre me moldaram a acreditar que as conquistas só são possíveis com esforço e dedicação.

À minha orientadora, Profa. Dra. Gabriela Scur, por sua generosidade, disponibilidade, conselhos, contribuições, norteammento, e compreensão, que foram fundamentais na construção deste trabalho.

Ao Centro Universitário FEI, aos docentes e profissionais da Pós-Graduação, pelo ensino de excelência, pelas contribuições à minha formação acadêmica e principalmente por acreditar em minha capacidade e provido a bolsa de estudos que viabilizou este trabalho.

Aos professores da banca avaliadora, Profa. Dra. Claudia Aparecida de Mattos e Prof. Dr. Rodrigo Franco Gonçalves, pelas leituras minuciosas e pelas contribuições valiosas que fortaleceram este trabalho.

RESUMO

A crescente preocupação com a sustentabilidade tem levado diferentes setores a repensar suas práticas, com o objetivo de minimizar impactos ambientais e sociais negativos. No entanto, o setor de desenvolvimento de software ainda se encontra ainda em uma fase inicial nesse processo, em que a integração de práticas sustentáveis não é amplamente difundida. Este estudo visa explorar a incorporação de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software por meio de um estudo de múltiplos casos em empresas de grande porte do segmento no Brasil. A pesquisa foi conduzida com uma abordagem qualitativa, utilizando entrevistas semiestruturadas com gestores e especialistas em desenvolvimento de software, para entender as percepções sobre a sustentabilidade, identificar os principais desafios e barreiras enfrentados, e mapear os facilitadores que podem impulsionar a adoção dessas práticas. Os resultados revelaram barreiras culturais, tecnológicas e econômicas que dificultam a implementação efetiva da sustentabilidade no setor, bem como estratégias e motivações que contribuem para sua integração ao ciclo de vida do software. Observou-se ainda que a pressão de clientes e a existência de políticas institucionais têm papel relevante na consolidação dessas práticas. A pesquisa contribui tanto para o avanço teórico no campo da sustentabilidade aplicada à engenharia de software no contexto brasileiro quanto para oferecer recomendações práticas que orientem empresas e profissionais na adoção de práticas mais sustentáveis. O estudo também poderá servir como base para formulação de políticas e para a realização de novas pesquisas sobre desenvolvimento sustentável na indústria de software.

Palavras-chave: sustentabilidade em software, engenharia de software sustentável, software verde, desenvolvimento de software.

ABSTRACT

The growing concern for sustainability has led different sectors to rethink their practices, with the aim of minimizing negative environmental and social impacts. However, the software development sector is still in an early stage of this process, in which the integration of sustainable practices is not widely disseminated. This study aims to explore the incorporation of sustainable practices in software development through a multiple case study in large companies in the segment in Brazil. The research was conducted with a qualitative approach, using semi-structured interviews with managers and software development experts, to understand perceptions about sustainability, identify the main challenges and barriers faced, and map the facilitators that can drive the adoption of these practices. The results revealed cultural, technological, and economic barriers that hinder the effective implementation of sustainability in the sector, as well as strategies and motivations that contribute to its integration into the software life cycle. It was also observed that pressure from customers and the existence of institutional policies play a relevant role in the consolidation of these practices. The research contributes both to theoretical advancement in the field of sustainability applied to software engineering in the Brazilian context and to offering practical recommendations to guide companies and professionals in adopting more sustainable practices. The study can also serve as a basis for policy formulation and for conducting new research on sustainable development in the software industry.

Keywords: sustainability in software, sustainable software engineering, green software, software development.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Descrição dos princípios do manifesto de Karlskrona	16
Quadro 2 – Princípios do manifesto de Karlskrona em relação às fases do SDLC	17
Figura 1 – Modelo GREENSOFT	20
Figura 2 – Modelo Green Cloud Computing	21
Figura 3 – Modelo Green Software Engineering Process	21
Figura 4 – Modelo Software Design Sustainability Pilot	22
Figura 5 – Modelo SSCF	23
Quadro 3 – Principais Modelos para o Desenvolvimento de Software Sustentável	23
Quadro 4 – Principais Práticas de Sustentabilidade Mapeadas para o Desenvolvimento De Software	29
Quadro 5 – Principais características das empresas selecionadas	33
Quadro 6 – Perfil dos Entrevistados	34
Quadro 7 – Síntese da Estratégia Metodológica da Pesquisa	37
Quadro 8 – Percepção sobre Sustentabilidade no Desenvolvimento de Software dos Casos	60
Quadro 9 – Desafios e Barreiras para Implementação de Práticas Sustentáveis	68
Quadro 10 – Alinhamento das Práticas observadas nas Empresas e os Modelos de Sustentabilidade	74
Quadro 11 – Práticas Sustentáveis por Fase do SDLC com Evidência Empírica	75

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO DA LITERATURA	13
2.1	SUSTENTABILIDADE NO DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE	14
2.2	MODELOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE SUSTENTÁVEL ...	19
2.3	GESTÃO ÁGIL DE PROJETOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE SUSTENTÁVEL.....	26
2.4	CONSOLIDAÇÃO DAS PRINCIPAIS PRÁTICAS	29
3	MÉTODO.....	32
4	CARACTERIZAÇÃO DAS EMPRESAS E ASPECTOS OBSERVADOS	39
4.1	VISÃO GERAL DAS EMPRESAS.....	39
4.2	ASPECTOS OBSERVADOS	44
4.2.1	Empresa Alfa	44
4.2.2	Empresa Beta.....	47
4.2.3	Empresa Gama	49
4.2.4	Empresa Delta	51
4.2.5	Empresa Ômega	53
5	ANÁLISE INTERCRUZADA	56
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	71
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
7.1	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	81
7.2	RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	82
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICE A – ROTEIRO DE ENTREVISTAS	88
	APÊNDICE B – CÓDIGOS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE CONTEÚDO	91

1 INTRODUÇÃO

As gerações presentes e futuras enfrentam o desafio de assegurar uma qualidade de vida adequada em um planeta saudável. No entanto, a humanidade enfrenta desafios globais significativos que impactam o bem-estar social, ambiental e econômico, como mudanças climáticas, escassez de recursos naturais, desigualdade social, poluição e degradação ambiental. Esses problemas são cada vez mais complexos e interconectados, exigindo soluções inovadoras e integradas que abordem simultaneamente múltiplas facetas da sustentabilidade (Sufi *et al.*, 2020).

No contexto empresarial, a sustentabilidade tem sido progressivamente reconhecida como essencial. Empresas de diversos setores estão buscando adaptar suas práticas para se tornarem mais responsáveis ambientalmente e socialmente, o que inclui não apenas mudanças nos processos produtivos, mas também em como produtos são projetados, fabricados e descartados (Mengistu *et al.*, 2024). Contudo, a indústria de software frequentemente permanece à margem dessas discussões. Apesar de sua natureza intangível, o desenvolvimento de software tem implicações ambientais e sociais significativas. A produção e o uso de software podem gerar emissões de carbono através do consumo de energia dos data centers, além de contribuir para a geração de resíduos eletrônicos (Liu *et al.*, 2023).

Ainda assim, muitos desenvolvedores e empresas de software não estão plenamente conscientes dos impactos de suas atividades, em parte devido à falta de regulamentações claras e à inexistência de pressão do mercado para mudanças. Mesmo com um aumento na demanda por produtos sustentáveis, poucas iniciativas são tomadas para integrar considerações de sustentabilidade no desenvolvimento de software de forma estrutural e profunda (Bamiduro *et al.*, 2025).

Este cenário aponta para uma lacuna crítica na literatura e na prática: a integração da sustentabilidade no desenvolvimento de software ainda é emergente e pouco compreendida. Enquanto existem estudos que discutem sustentabilidade em indústrias tradicionais, o campo específico do software ainda carece de uma investigação robusta e direcionada, que examine as práticas atuais, as barreiras à sua implementação e os benefícios potenciais de uma abordagem mais verde e responsável (Venters *et al.*, 2023).

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivos:

- a) identificar e avaliar práticas sustentáveis já adotadas no desenvolvimento de software;
- b) compreender as percepções de gestores e especialistas da área sobre essas práticas;

- c) explorar os principais facilitadores e obstáculos para uma adoção mais ampla e efetiva da sustentabilidade nesse campo.

Assim, este estudo pretende responder à seguinte pergunta de pesquisa: Como as práticas sustentáveis estão sendo incorporadas em projetos de desenvolvimento de software no Brasil, e quais são as barreiras, percepções organizacionais e fatores que favorecem sua adoção? A investigação busca identificar as práticas já adotadas, compreender as percepções dos gestores e especialistas sobre sustentabilidade no desenvolvimento de software, e analisar os principais obstáculos culturais, tecnológicos e econômicos que limitam sua implementação, bem como os elementos que atuam como facilitadores para sua integração.

As contribuições deste trabalho se manifestam tanto no campo teórico quanto prático. No âmbito teórico, a pesquisa amplia a compreensão sobre como os conceitos de sustentabilidade têm sido operacionalizados no desenvolvimento de software, contribuindo para preencher lacunas existentes na literatura sobre o tema. O estudo fornece evidências empíricas a partir de múltiplos casos no contexto brasileiro, revelando práticas concretas, desafios enfrentados e fatores que influenciam a adoção de iniciativas sustentáveis em projetos de software. Do ponto de vista prático, os resultados oferecem subsídios para que empresas, gestores e desenvolvedores compreendam melhor os elementos que dificultam ou favorecem a incorporação da sustentabilidade ao ciclo de vida do software. Além disso, o trabalho apresenta recomendações aplicáveis às organizações interessadas em alinhar suas práticas de desenvolvimento às diretrizes de sustentabilidade, destacando o papel da capacitação interna, das exigências dos clientes e das decisões arquiteturais na promoção da sustentabilidade digital.

A metodologia empregada foi qualitativa, por meio de estudo de casos múltiplos. Os estudos de casos múltiplos seguem uma lógica de replicação, não de amostragem. Em outras palavras, Yin (2015) afirma que estudo de casos múltiplos pode trazer resultados mais robustos, justamente por permitir a replicação literal (casos que confirmam os mesmos achados) ou replicação teórica (casos que mostram resultados diferentes, mas esperados teoricamente). Assim, o estudo de casos múltiplos permitiu uma análise rica e detalhada, fornecendo um entendimento aprofundado das práticas, desafios e potenciais soluções para a sustentabilidade no setor. Para isso, foram realizadas entrevistas com gestores e especialistas atuantes em empresas de desenvolvimento de software no Brasil, permitindo identificar percepções, estratégias e contextos que influenciam a adoção de práticas sustentáveis ao longo do ciclo de vida dos sistemas.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: após esta introdução, o Capítulo 2 revisa a literatura sobre sustentabilidade no desenvolvimento de software. O Capítulo 3

apresenta a metodologia adotada. O Capítulo 4 expõe os resultados obtidos a partir do estudo de múltiplos casos, seguidos pelo Capítulo 5 com a análise comparativa entre as empresas. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e contribuições do trabalho, e o Capítulo 7 aborda as limitações do estudo e sugestões para futuras pesquisas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O software continua a ser um agente transformador nas esferas econômica e social, desempenhando um papel central em todas as indústrias e destacando a importância de considerar a sustentabilidade como um atributo essencial na engenharia de software (Paul *et al.*, 2023). A sustentabilidade em engenharia de software é vital para assegurar que os sistemas não apenas atendam aos requisitos atuais de eficiência e funcionalidade, mas também sejam projetados para evoluir e se adaptar às mudanças futuras, minimizando custos de manutenção e evitando impactos negativos ao meio ambiente (Venters *et al.*, 2023).

O setor de tecnologia de informação e comunicação (ICT) é responsável por aproximadamente 350 a 400 megatons de gases de efeito estufa (CO₂e) anualmente, representando cerca de 2% das emissões globais de gás carbono. Isso equivale a metade das emissões dos setores de aviação ou transporte marítimo. Dispositivos de usuários finais, como laptops e smartphones, são os maiores contribuintes, gerando até duas vezes mais carbono do que data centers corporativos (McKinsey, 2022). Um relatório de sustentabilidade da Ericsson (2023) mostra que a ICT poderia ajudar a reduzir as emissões globais de gases de efeito estufa, além de aumentar a utilização de energias renováveis, melhorando a eficiência energética através da otimização de processos, automação e monitoramento.

Portanto, é importante analisar como reduzir o impacto da ICT sobre o meio ambiente e como a sustentabilidade pode ser incorporada no ciclo de vida de desenvolvimento de software (SDLC). Contudo, as práticas habituais de desenvolvimento de software não fornecem suporte para as preocupações de sustentabilidade. Além disso, a sustentabilidade na engenharia de software não deve se limitar apenas ao consumo de energia, mas também deve incluir todos os outros aspectos (Sriraman; Raghunathan, 2023). Becker *et al.* (2016) argumentam que a sustentabilidade do software transcende esta visão unidimensional e abrange cinco dimensões interdependentes: ambiental, social, econômica, individual e técnica. A sustentabilidade social diz respeito aos impactos nas comunidades e na sociedade, enquanto a sustentabilidade individual diz respeito aos impactos nos seres humanos individuais. A sustentabilidade econômica diz respeito à capacidade de permanecer financeiramente viável durante um período prolongado, enquanto a sustentabilidade técnica refere-se à durabilidade de um sistema e à facilidade de manutenção e adaptação dele (Becker *et al.*, 2016).

Práticas e processos amplamente utilizados na indústria de software, como metodologias ágeis e padrões de desenvolvimento, vem sendo adaptados de forma a considerar desafios de sustentabilidade (Penzenstadler, 2013). Contudo, os profissionais ainda não possuem

conhecimento a cerca dessas práticas para integrar a sustentabilidade de maneira eficiente e eficaz (König, 2024). Os modelos de referência para auxiliar os desenvolvedores de software ainda não estão amplamente difundidos na indústria (Soongpol; Netinant; Rukhiran, 2024). Calero e Piattini (2015) também destacam a necessidade de definir métricas de sustentabilidade e buscar formas de integrá-las aos processos de engenharia de forma mais ampla.

2.1 SUSTENTABILIDADE NO DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE

A sustentabilidade é um dos grandes desafios da nossa civilização devido à sua onipresença. A forma como se projeta e, conseqüentemente, se utiliza intensamente sistemas de software tem um impacto significativo e pode influenciar grandemente as percepções humanas sobre sustentabilidade (Mahaux; Heymans; Saval, 2014).

Existem diversos pontos de referência para pesquisadores e profissionais onde as práticas de sustentabilidade são apresentadas e exemplificadas (Chitchyan; Betz; Duboc, 2015). A percepção dos profissionais sobre sustentabilidade pode afetar a maneira como a sustentabilidade é aplicada no desenvolvimento de software (Groher; Weinreich, 2017). Os diferentes estilos de vida, valores e práticas das pessoas também afetam como a sustentabilidade é tratada (Ilstedt; Eriksson; Hesselgren, 2017).

Além disso, um dos principais problemas para os designers de software é que, mesmo com uma abordagem sistêmica, existem poucas ferramentas existentes que integrem os princípios fundamentais da sustentabilidade (König, 2024). Em vez disso, os desenvolvedores devem aprender a juntar uma série de entendimentos e frameworks de sustentabilidade dispersos, a fim de abordar as diferentes dimensões da sustentabilidade (Shedroff, 2009).

A Organização Internacional para Padronização (ISO) e o Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos (IEEE) os quais proveem uma série de normas de engenharia de software fornecem pouca orientação sobre sustentabilidade. Embora tenha havido um aumento na literatura sobre as dimensões ambientais e sociais da sustentabilidade para sistemas de software, há menos atenção à sustentabilidade no desenvolvimento e uso de software (Malik; Khan, 2018). Os efeitos dos sistemas de software estão recebendo menos atenção e o trabalho para formalizar a sustentabilidade como parte do processo de engenharia de software ainda não é considerado nas normas e modelos oficiais de sistemas de software. O conceito de sustentabilidade para design de software e sua integração no catálogo existente de atributos de qualidade de design é necessário para alcançar software sustentável e a sustentabilidade também

deve ser considerada como uma qualidade de sistemas de software, assim como ocorre com segurança e usabilidade (Lago *et al.*, 2012).

Pesquisadores de diferentes disciplinas tentaram abordar a questão da sustentabilidade por meio de trabalhos colaborativos organizando conferências e workshops interdisciplinares (Becker *et al.*, 2015). Um foco comum é a sustentabilidade em requisitos. Requisitos de sustentabilidade foram tratados como requisitos de qualidade de primeira classe, e como tal, sistematicamente levantados, analisados e documentados com o objetivo de mostrar que pequenos e simples passos durante o requisito podem levar ao design e desenvolvimento de sistemas mais sustentáveis (Sawyer; Paech; Heymans, 2007). Isso é corroborado por outro trabalho de pesquisa (Oyedeki; Seffah; Penzenstadler, 2017) afirmando a necessidade de caracterizar a sustentabilidade do software como um fator de qualidade na elicitação de requisitos. Além disso, uma lista de verificação de requisitos de sustentabilidade e uma abordagem de guia demonstram como incluir o objetivo da sustentabilidade ambiental desde os primeiros passos do desenvolvimento de software (Penzenstadler, 2014). Também mostra como a engenharia de requisitos verdes pode ser conduzida no âmbito da engenharia de requisitos de propósito geral e acomodar o novo objetivo de melhorar a sustentabilidade ambiental (Penzenstadler, 2014).

A sustentabilidade deve ser considerada em modelos de qualidade de software, embora haja menos pesquisa direcionada para isso (Calero; Bertoa; Moraga, 2013). O planejamento e a gestão da sustentabilidade do software como um atributo de qualidade são prejudicados pela falta de medidas práticas aplicadas de forma consistente (Seacord *et al.*, 2003). Sem essas medidas, é impossível determinar o efeito dos esforços para melhorar as práticas de sustentação.

Para endereçar esses pontos abordados nesta seção e alcançar a sustentabilidade do software, a principal conclusão é de que se faz necessário integrar a consideração dos aspectos de sustentabilidade o mais cedo possível nos processos de design. Isso ocorre porque é de conhecimento comum nos processos de software que alterações tardias no design do produto são muito mais caras do que as iniciais (Soongpol; Netinant; Rukhiran, 2024). A incorporação da sustentabilidade durante o design de software reflete de maneira geral em um melhor uso de energia da ICT e a emissão de CO₂, entre outros aspectos (Guldner *et al.*, 2024).

A importância de incorporar considerações ambientais, sociais e econômicas no desenvolvimento de software é enfatizada pelos princípios do Manifesto de Karlskrona (Becker *et al.*, 2016), o qual também promove a colaboração entre os envolvidos no processo de desenvolvimento, buscando incentivar a conscientização sobre a sustentabilidade e fornecer orientações para a criação de softwares mais sustentáveis.

O Manifesto de Karlskrona para o Design Sustentável (KMSD) tem suas raízes no Terceiro Workshop Internacional sobre Engenharia de Requisitos para Sistemas Sustentáveis (RE4SuSy) (Penzenstadler; Martin; Camille, 2013), realizado em Karlskrona, Suécia. O objetivo principal era combinar os diversos aspectos da sustentabilidade para esclarecer seu escopo, objetivos e desafios das percepções de sustentabilidade, levando a uma plataforma interdisciplinar para pesquisar sustentabilidade (Christoph, 2014). O manifesto reúne contribuições de pesquisadores de várias disciplinas na área de engenharia de software com interesses em pesquisa de sustentabilidade como os criadores do manifesto de design (Becker; Chitchyan; Duboc, 2014).

O KMSD inclui nove princípios de design sustentável (Becker; Chitchyan; Duboc, 2014). Esses princípios fornecem a base para criar um ponto de referência que pode ser aplicado durante o design de software por diferentes partes interessadas (Quadro 1). O manifesto está acessível via web (Becker *et al.*, 2014), onde os interessados em apoiar o manifesto podem também assiná-lo.

Quadro 1 – Descrição dos princípios do manifesto de Karlskrona

(continua)

Nro. do Princípio	Princípio	Descrição
P1	A sustentabilidade é sistêmica.	Sustentabilidade deve ser considerada de forma holística, afetando todos os aspectos do sistema.
P2	A sustentabilidade possui múltiplas dimensões.	Enfatiza as dimensões ecológica, social, econômica, técnica e individual da sustentabilidade.
P3	A sustentabilidade transcende múltiplas disciplinas.	A sustentabilidade deve ser incorporada através de várias disciplinas e áreas de conhecimento.
P4	A sustentabilidade é uma preocupação independente do propósito do sistema.	A relevância da sustentabilidade não depende do propósito principal do sistema desenvolvido.
P5	A sustentabilidade aplica-se tanto ao sistema quanto aos seus contextos mais amplos.	Considera tanto os impactos internos do sistema quanto os impactos no ambiente externo mais amplo.
P6	A visibilidade do sistema é uma condição necessária e um facilitador para o design sustentável.	A transparência do sistema promove e facilita práticas de design sustentável.
P7	A sustentabilidade requer ação em múltiplos níveis.	Ações para a sustentabilidade precisam ocorrer em níveis local, regional e global.

Quadro 1 – Descrição dos princípios do manifesto de Karlskrona

(conclusão)		
Nro. do Princípio	Princípio	Descrição
P8	A sustentabilidade requer atender às necessidades das gerações futuras sem comprometer a prosperidade da geração atual.	Enfatiza a responsabilidade de prover para as gerações futuras sem prejudicar as necessidades atuais.
P9	A sustentabilidade requer pensamento de longo prazo.	Decisões e ações devem considerar seus efeitos a longo prazo e duradouros.

Fonte: Becker *et al.* (2014)

A exemplo do manifesto Ágil (Fowler; Highsmith, 2001), os princípios do manifesto de Karlskrona visam ser um guia prático para toda a comunidade, apoiando as partes interessadas na indústria e na academia (empresas, organização de padronização, praticantes de software, pesquisadores e estudantes) para promover e desenvolver design e práticas de sustentabilidade no desenvolvimento de software (Becker; Chitchyan; Duboc, 2014). O manifesto de Karlskrona também serve como um facilitador para pensar sobre os amplos efeitos do software na sociedade e a necessidade de incorporar um pensamento de longo prazo, responsabilidade ética e uma compreensão de como integrar a sustentabilidade ao design de sistemas de software (Becker *et al.*, 2015).

O Quadro 2 mostra como esses princípios de Karlskrona podem ser relacionados às fases de desenvolvimento de software segundo Langer (2016). Relacionar esses princípios às fases de desenvolvimento de software fornecerá um caminho para usar esses princípios especialmente para diferentes sistemas de software.

Quadro 2 – Princípios do manifesto de Karlskrona em relação às fases do SDLC

(continua)	
Fases do SDLC	Princípios do Manifesto de Karlskrona
Fase 1: Definição do Projeto	P1- Isso garante que o início do projeto considere a sustentabilidade na definição geral do projeto desde o início. P2- A sustentabilidade de software possui diferentes dimensões que devem ser consideradas desde o início para uma melhor gestão de projetos com diferentes stakeholders. P3- O projeto de software geralmente envolve stakeholders de diferentes domínios, incorporar suas preocupações de sustentabilidade proporciona uma melhor gestão dessas preocupações a partir de múltiplas perspectivas que podem ajudar na incorporação de sustentabilidade para o software.

Quadro 2 – Princípios do manifesto de Karlskrona em relação às fases do SDLC

(conclusão)

Fases do SDLC	Princípios do Manifesto de Karlskrona
Fase 2: Definição de Requisitos do Usuário	P2- É importante observar os requisitos dos usuários em relação a cada uma das dimensões da sustentabilidade para ter uma melhor análise de sustentabilidade durante a fase de análise e design
Fase 3: Definição de Requisitos do Sistema	P4- Durante a elicitação dos requisitos do sistema, os engenheiros de requisitos devem considerar as preocupações de sustentabilidade do sistema durante a definição dos requisitos, mesmo quando não for uma parte essencial dos requisitos do usuário. P5- Avaliar transversalmente os impactos consequentes dos requisitos de sustentabilidade do sistema e do ambiente em que o sistema irá funcionar.
Fase 4: Análise e Design	P2- A aplicação deste princípio fornece um modelo para avaliação do sistema em todas as dimensões da sustentabilidade (económica, ambiental, social, individual e técnica). P4- Nesta fase, este princípio ajuda a encorajar a análise do desenho do sistema com base na sustentabilidade, a fim de facilitar um sistema melhor sustentável. P6- A aplicação deste princípio permite uma representação visual do sistema, possibilitando um entendimento mais claro e compreensível em diferentes níveis de abstração. P8- Isto proporcionará uma melhor compreensão durante a análise para fazer melhores escolhas que ajudarão os potenciais usuários do sistema no presente e no futuro, quando o sistema evoluir.
Fase 5: Desenvolvimento	P2- Isso incentivará os desenvolvedores durante esta fase a considerar diferentes dimensões da sustentabilidade, especialmente dimensões técnicas, sociais e individuais. P4- Incentivar a busca de melhores caminhos para tornar o sistema sustentável do ponto de vista do desenvolvimento (desenvolvedores) e também das funções do sistema para auxiliar a longevidade.
Fase 6: Integração e Teste	P2- Fornece integração e para que a equipe de teste tenha um modelo de sustentabilidade que pode ser usado para testar o sistema para todas as dimensões de sustentabilidade com base na saída do requisito de sustentabilidade das fases 2, 3 e 4. P4- A aplicação deste princípio ajudará na consideração da sustentabilidade nesta fase, mesmo que o foco principal do sistema não seja a sustentabilidade
Fase 7: Implementação	P5- Fornece raciocínio prévio para a equipe de desenvolvimento considerar a sustentabilidade do sistema, seu ambiente de produção e ao colocá-lo em operação para uso. P7- Com base no princípio 5 (P5), este princípio ajudará na consideração de buscar o envolvimento de diferentes partes interessadas para tornar possível a atualização da sustentabilidade do sistema no ambiente de produção e quando colocado em operação.
Fase 8: Sustentação/ Manutenção	P9- Este princípio nesta fase ajuda a criar a consciência para que quando o sistema estiver em ambiente vivo, haja avaliação contínua para avaliar a sustentabilidade do sistema e pensar em formas de otimizar e melhorar a sustentabilidade do sistema a partir das diferentes dimensões.

Fonte: Oyedeji, Seffah e Penzenstadler (2018)

2.2 MODELOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE SUSTENTÁVEL

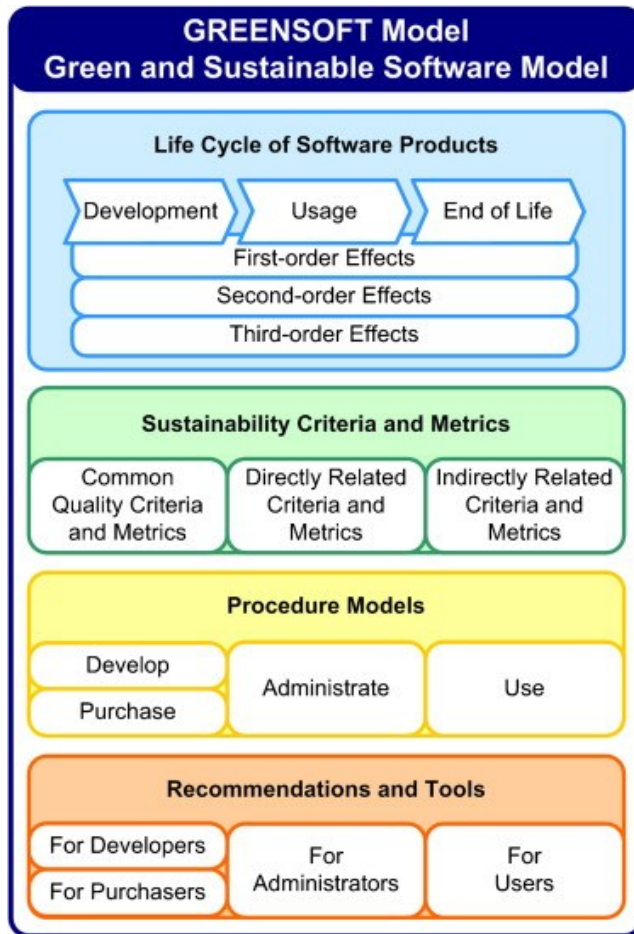
Na literatura há uma série de modelos propostos para apoiar o desenvolvimento de software sustentável, os quais introduzem estruturas de referência que podem ser aplicadas em contextos variados da indústria de software. Esses frameworks reúnem diretrizes, padrões e recomendações já formuladas de forma a orientar a implementação de práticas sustentáveis em software ou mesmo a sua validação. Esses modelos acabam servindo como uma base sólida e estruturada para a implementação de iniciativas de sustentabilidade em software por meio de abordagens estudadas por pesquisadores do tema.

O modelo mais difundido é o de Naumann *et al.* (2011) o qual é denominado GREENSOFT. Ele é um modelo conceitual que tem como objetivo auxiliar desenvolvedores de software, administradores e usuários de software a criar, manter e utilizar software de maneira mais sustentável. Conforme pode ser observado na Figura 1, o modelo abrange um ciclo de vida holístico para produtos de software, critérios e métricas de sustentabilidade para produtos de software, modelos de procedimento para diferentes partes interessadas e recomendações de ação, bem como ferramentas que apoiam as partes interessadas no desenvolvimento, compra, fornecimento e uso de software de forma verde e sustentável.

Esse modelo de referência contém um Ciclo de Vida dos Produtos de Software. Em contraste com os ciclos de vida tradicionais de software, voltados para o Pensamento do Ciclo de Vida (LCT), que segue o lema “do berço ao túmulo”, o LCT tem o objetivo de avaliar a compatibilidade ecológica, social, humana e econômica de um produto durante todo o seu ciclo de vida. Ele começa nas primeiras etapas do desenvolvimento do produto e termina com o descarte e reciclagem do produto. As descobertas obtidas dessas avaliações podem ser usadas para otimizar o produto de maneira equilibrada ou para comparar um produto com seus concorrentes.

Já Chauhan e Saxena (2013) apresentam um framework de nuvem aprimorada, denominado Green Cloud Computing Framework, que oferece uma visão holística do ambiente de nuvem e mapeia oportunidades de economia de energia para vários componentes de nuvem. Os autores ressaltam que frameworks de nuvem verde já foram propostos anteriormente, mas cobriam apenas as operações de virtualização e datacenter. Assim, a estrutura proposta nesse novo framework também abrange o desenvolvimento de software, o que pode melhorar significativamente a eficiência energética em ambientes de nuvem.

Figura 1 – Modelo GREENSOFT



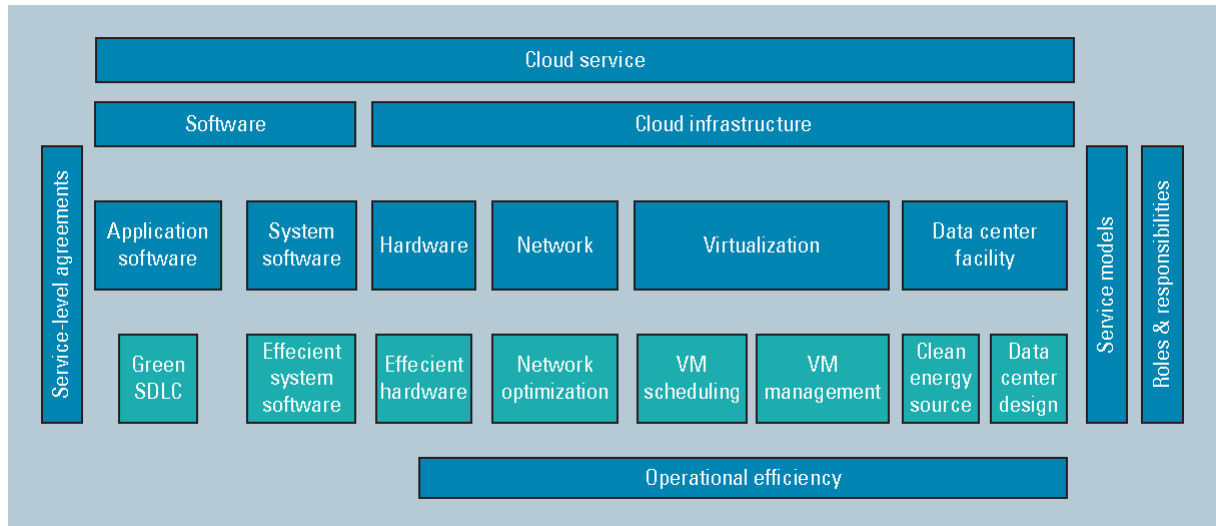
Fonte: Naumann *et al.* (2011)

O modelo aborda duas questões relacionadas à computação em nuvem e eficiência energética. Em primeiro lugar, discute-se a importância dos Acordos de Nível de Serviço (SLAs) para estabelecer o nível de serviço esperado pelos clientes de provedores de serviços em nuvem. Os SLAs podem afetar a qualidade do serviço fornecido pelos provedores de nuvem e influenciar o consumo de energia da nuvem. Em segundo lugar, destaca-se a importância do software, especialmente do software do sistema, para a eficiência energética na computação em nuvem, onde o design e a seleção adequada do software do sistema, como sistemas operacionais e compiladores, podem melhorar significativamente a eficiência energética.

Mahmoud e Ahmad (2013) por sua vez mostram um modelo de como obter um produto de software verde e sustentável cobrindo todo o ciclo de vida de desenvolvimento de software, e foi denominado pelos autores como Green Software Engineering Process Model. Eles ressaltam que o processo popular e genérico de engenharia de software é composto pelas seguintes etapas: Requisitos, Desenho, Teste Unitário, Implementação, Teste Sistemático, Uso, Manutenção e Descarte. Reforçam ainda que existem muitos modelos com diferentes variações

dessas etapas e muitas empresas adotam os seus próprios, mas todos tendem a ter padrões similares.

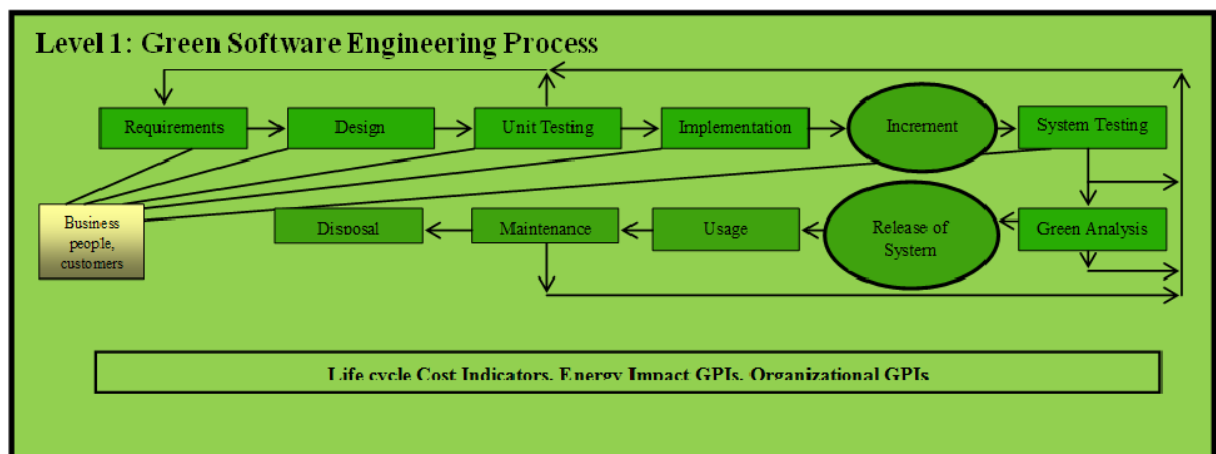
Figura 2 – Modelo Green Cloud Computing Framework



Fonte: Chauhan e Saxena (2013)

O modelo propõe a adição de uma etapa de análise ambiental, chamada de estágio de “Análise Verde”, ao processo de engenharia de software para promover a eficiência energética, onde essa etapa busca considerar novas ideias sobre sustentabilidade ambiental que não foram previamente contempladas no processo de engenharia de software. Esse novo estágio da análise verde avalia o grau de sustentabilidade ambiental de cada incremento do software em desenvolvimento, atuando como uma etapa de teste específica para eficiência energética, e apoiado pela utilização de métricas para realização da análise.

Figura 3 – Modelo Green Software Engineering Process

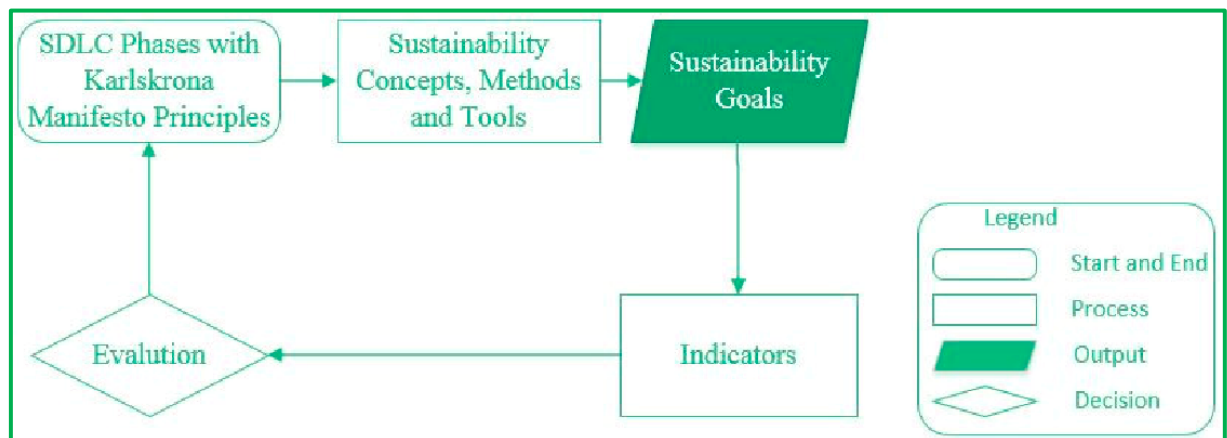


Fonte: Mahmoud e Ahmad (2013)

Oyedeji, Seffah e Penzenstadler (2018) propõem um framework denominado Software Design Sustainability Pilot o qual inclui um conjunto de metas, conceitos e métodos de sustentabilidade. Ele exemplifica como aplicar e quantificar a sustentabilidade. Com base nas fases do ciclo de vida do desenvolvimento de software (SDLC), este framework piloto foi criado com o intuito de orientar as partes interessadas envolvidas no design e desenvolvimento de um sistema de software.

O framework piloto é derivado do SDLC para auxiliar os desenvolvedores a incorporar sustentabilidade durante o design e desenvolvimento do sistema, abrangendo as fases do ciclo de vida do desenvolvimento de software. É importante destacar que os indicadores são influenciados pelos nove princípios do manifesto de Karlskrona.

Figura 4 – Software Design Sustainability Pilot Framework



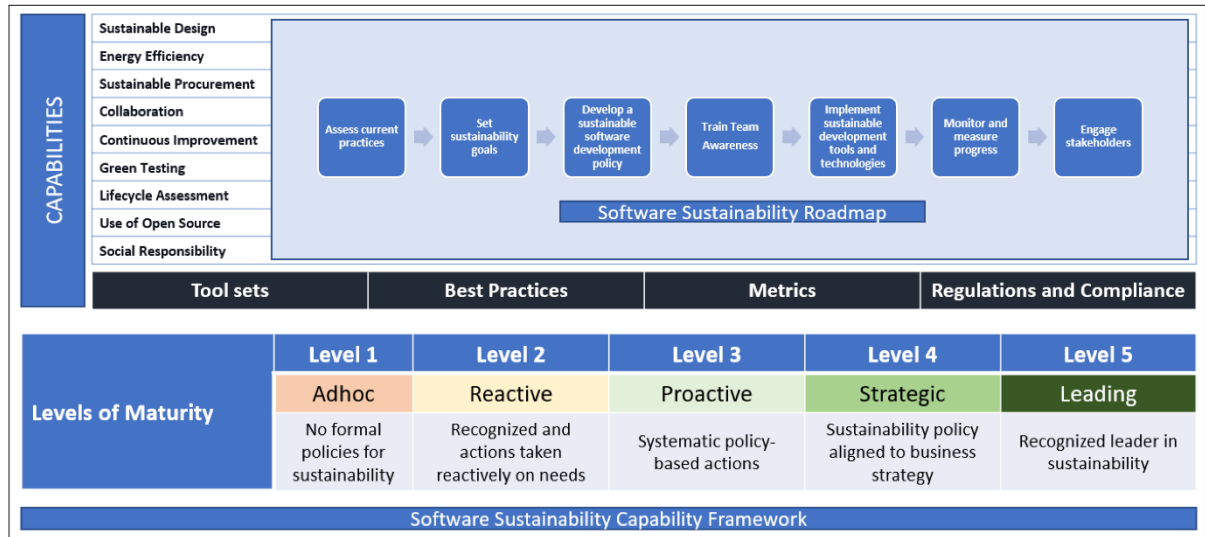
Fonte: Oyedeji, Seffah e Penzenstadler (2018)

Por fim, Sriraman e Raghunatha (2023) apresentam um modelo de maturidade de capacidade, denominado Software Sustainability Capability Framework (SSCF), que é um modelo que define as capacidades principais e práticas que as organizações precisam adotar para desenvolver software de forma sustentável. O modelo engloba uma variedade de métodos e abordagens que ajudam as organizações a reduzir o impacto ambiental do desenvolvimento de software, ao mesmo tempo em que melhoram a sustentabilidade econômica e social. O framework ainda define uma série de níveis de maturidade, desde ad hoc até líder, que as organizações podem usar para avaliar seu nível atual de maturidade na adoção de práticas operacionais de software sustentável.

O framework ainda define as capacidades e práticas essenciais que as organizações devem adotar para operar software de forma sustentável e as relaciona aos diferentes níveis de

maturidade, e prove uma série de métricas de sustentabilidade que as organizações podem usar para medir e acompanhar seu progresso na busca de metas de sustentabilidade. Segundo os autores um roadmap com métricas potenciais permite que as organizações foquem em resultados tangíveis que podem ser medidos.

Figura 5 – Modelo SSCF



Fonte: Sriraman e Raghunatha (2023)

O Quadro 3 foi elaborado para um comparativo entre os cinco modelos apresentados. Cada modelo aborda aspectos específicos da sustentabilidade de software, com diferentes focos e abordagens, refletindo a diversidade de preocupações nessa área. A escolha entre eles dependerá dos objetivos e necessidades específicos da organização ou projeto.

Quadro 3 – Principais Modelos na Literatura para o Desenvolvimento de Software Sustentável

(continua)

Aspectos/ Modelos	GREENSOFT	SSCF	Green Cloud Computing	Green Software Engineering	Software Design Sustainability Pilot	KMSD
Abordagem Geral	Modelo conceitual, ciclo de vida holístico	Framework de capacidade abrangente	Framework abrangente de nuvem verde	Modelo de processo de engenharia verde	Framework piloto para sustentabilidade e do design do sistema	Mapeamento conceitual entre princípios sustentáveis e fases do SDLC

Quadro 3 – Principais Modelos na Literatura para o Desenvolvimento de Software Sustentável

(conclusão)

Aspectos/ Modelos	GREENSOFT	SSCF	Green Cloud Computing	Green Software Engineering	Software Design Sustainability Pilot	KMSD
Objetivo Principal	Sustentabilidade de software	Desenvolver software sustentável	Eficiência energética em ambientes de nuvem	Eficiência energética no desenvolvimen to	Sustentabilida de do design de sistemas de software	Orientar a incorporação da sustentabilida de ao longo do ciclo de vida do software
Ciclo de Vida	Ciclo de vida holístico	Não especificado	Não especificado	Ciclo de vida do desenvolvimen to de software	Ciclo de vida do desenvolvimen to de software	Sim (fases completas do SDLC)
Componentes Principais	Ciclo de Vida dos Produtos de Software	Níveis de Maturidade	Framework de Computação em Nuvem Verde	Análise Verde	Metas, conceitos e métodos de sustentabilidad e	Princípios do Manifesto aplicados ao SDLC
Enfoque em Sustentabilida de	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Medição e Métricas	Critérios e métricas de sustentabilidade	Métricas de sustentabilid ade	Métricas de eficiência energética	Métricas de eficiência energética	Indicadores influenciados pelos princípios do manifesto de Karlskrona	Não define métricas, mas orienta decisões sustentáveis
Aplicações Práticas	Desenvolviment o, compra, fornecimento e uso	Avaliação da sustentabilid ade atual e capacidades	Eficiência energética em ambientes de nuvem	Análise energética durante o desenvolvimen to	Design e desenvolvimen to de sistemas de software	Planejamento, requisitos, arquitetura, codificação, implantação e manutenção
Fases do SDLC Consideradas	Todo o ciclo de vida do software	Não especificado	Não especificado	Análise Verde	Todo o ciclo de vida do software	Todo o ciclo de vida do software
Flexibilidade e Adaptação	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Autor

Este quadro oferece uma visão geral dos diferentes enfoques que cada framework adota para abordar a sustentabilidade no desenvolvimento de software. Enquanto o GREENSOFT e o SSCF focam em oferecer uma estrutura abrangente para avaliação e melhoria contínua da sustentabilidade, os outros modelos apresentam abordagens específicas, como a eficiência

energética na computação em nuvem, a análise verde durante o ciclo de vida do desenvolvimento de software, e a incorporação de sustentabilidade desde o design do software. Cada um contribui de maneira única para o objetivo comum de promover práticas de desenvolvimento de software mais verdes e sustentáveis. Embora o KMSD não seja formalmente apresentado como um modelo no sentido clássico, ele funciona como um guia orientativo que mapeia princípios sustentáveis ao ciclo de vida do software, e dessa forma também foi considerado e incluído nessa visão consolidada.

É possível observar diferentes abordagens e propostas para o desenvolvimento de software verde e sustentável. No geral, esses frameworks possibilitam promover o desenvolvimento de software verde e sustentável, considerando aspectos como ciclo de vida do software, critérios de sustentabilidade, maturidade ágil e integração da sustentabilidade em diferentes fases do processo de desenvolvimento. Contudo observa-se nesses modelos uma certa falta de aprofundamento nos aspectos sociais e humanos do desenvolvimento de software verde e sustentável, como por exemplo:

- a) Impacto na qualidade de vida dos usuários: como o desenvolvimento de software verde pode contribuir para a melhoria da qualidade de vida dos usuários? Isso poderia envolver a consideração de aspectos como usabilidade, acessibilidade, segurança e privacidade dos sistemas de software.
- b) Inclusão social: como garantir que o desenvolvimento de software verde leve em consideração as necessidades e realidades de diferentes grupos sociais, incluindo pessoas com deficiência, comunidades marginalizadas e países em desenvolvimento? Isso pode envolver a adaptação de software para diferentes contextos culturais e socioeconômicos, além de garantir a acessibilidade para todos.
- c) Ética e responsabilidade social: quais são as considerações éticas e responsabilidades sociais dos desenvolvedores de software verde? Isso pode incluir a avaliação dos impactos sociais e éticos do software, como o uso de dados pessoais, vieses algorítmicos e questões relacionadas à segurança cibernética.
- d) Participação e engajamento dos usuários: como envolver os usuários no processo de desenvolvimento de software verde e sustentável? Isso pode incluir a cocriação de soluções, a incorporação de feedback dos usuários e a promoção da conscientização sobre a importância da sustentabilidade no uso de software.

Ao abordar esses aspectos sociais e humanos, os modelos poderiam fornecer uma visão mais abrangente do desenvolvimento de software verde e sustentável, considerando não apenas

os aspectos ambientais e econômicos, mas também seu impacto nas pessoas e na sociedade em geral.

2.3 GESTÃO ÁGIL DE PROJETOS PARA O DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE SUSTENTÁVEL

Métodos ágeis são amplamente adaptados pela comunidade de software para atender às necessidades atuais do desenvolvimento de software. O Desenvolvimento de Software Ágil (ASD) visa mudar o paradigma de desenvolvimento com esforços contínuos para revisar os processos integrais para garantir o lançamento de software verde através de incrementos curtos (Ray, 2013). O ASD consiste em princípios centrados no cliente, como trabalho em equipe forte e produtivo, reuniões programadas entre a equipe de desenvolvimento e organizações de negócios, discussões frequentes com clientes ativos para finalizar e refinar os incrementos, compromisso precoce do código funcional e alta flexibilidade para acomodar requisitos dinâmicos (Dingsøyr *et al.*, 2012).

Mahmoud e Ahmad (2013) insistiram no uso de princípios ágeis no ciclo de vida de desenvolvimento de software, para desenvolver software verde. Integrar alguns dos princípios ágeis com processos de engenharia de software pode claramente ajudar em ter processos ambientalmente amigáveis. Dos doze princípios ágeis, como abraçar mudanças mesmo tarde no desenvolvimento de software, estratégia de trabalho combinada de desenvolvedores e clientes, desenvolvimento inicial incremental, desenvolvimento iterativo e teste e avaliação regulares podem explicitamente auxiliar no desenvolvimento de software eficiente em energia, verde e sustentável.

Os princípios ágeis centrais, como desenvolvimento e entrega mais rápidos em incrementos com iterações mais curtas, pequenas construções com apenas o design necessário, e integrações contínuas de código e incrementos, poderiam apoiar o desenvolvimento de software verde (Koontz; Nord, 2012).

Tate (2005) afirmou a entrega de software de qualidade com características verdes incorporadas através de métodos ágeis com uma mentalidade ágil treinada. O refinamento sustentável de software com acomodação das frequentes necessidades dos usuários, entrega mais rápida do código de trabalho, ênfase em projetar o que é necessário e mantê-lo simples, e prevenção automática de defeitos são alguns dos princípios práticos dos métodos ágeis que contribuem para a sustentabilidade do software (Erdelyi, 2013).

Dick *et al.* (2013) contribuíram com um modelo que enfatiza a integração de práticas ágeis com fatores de TI Verde para a sustentabilidade do software. O modelo é baseado em Scrum e foi modificado através de práticas amigáveis ao meio ambiente. No entanto, falta fornecer um módulo para medir precisamente a eficiência energética e a emissão de carbono.

Abdullah *et al.* (2015) destacaram a importância da gestão do conhecimento para o desenvolvimento de software sustentável. Os autores utilizaram a revisão sistemática da literatura (SLR) como metodologia de pesquisa para avaliar a literatura disponível sobre desenvolvimento de software em relação à evolução da computação verde e discutir como a gestão do conhecimento ajuda na gestão de projetos. Os autores discutiram a importância dos métodos ágeis em termos de gestão do conhecimento para o desenvolvimento de software verde e sustentável.

Kern *et al.* (2015) apresentaram um modelo genérico com natureza de suporte aos processos de software, para desenvolver software verde e sustentável. Como o modelo é genérico, pode ser implementado em adição ao SDLC para design de software eficiente em energia e ambientalmente amigável. Os autores demonstram um modelo integrado com o Scrum e o chamam de SDLC ágil para melhor auxiliar os processos de desenvolvimento de software verde. O modelo proposto incorpora alguns princípios apropriados do Scrum, como avaliação de processos, revisão da sustentabilidade em cada fase e documentação das características de sustentabilidade, e liberação de software em incrementos para entrega pontual de software sustentável.

Pankowska (2013) apresenta uma abordagem distinta para o desenvolvimento de software sustentável, bem como uma percepção diferente da sustentabilidade na engenharia de software. O autor conduziu uma pesquisa para a validação de práticas e métodos de desenvolvimento de software considerados importantes para o desenvolvimento de produtos de software sustentáveis. Particularmente, o autor focou em métodos ágeis no contexto de esforços humanos, bem como energia e poder computacional para apoiar o design e desenvolvimento de software sustentável. De acordo com a pesquisa conduzida pelo autor, seguem-se os princípios cruciais dos métodos ágeis que podem ser aplicados para alcançar o desenvolvimento de software sustentável:

- a) Refinamento contínuo do produto e práticas do projeto.
- b) Foco na entrega do produto funcional em todos os momentos.
- c) Ênfase contínua em design de software simples
- d) Detecção e prevenção de defeitos.

Stammel *et al.* (2011) em sua investigação de pesquisa sobre o impacto dos métodos ágeis no desenvolvimento de software sustentável argumentam que as metodologias de software ágil fornecem apenas alguns detalhes de implementação do processo de desenvolvimento de software. Essa abordagem "de baixo nível" pode construir o software que atenda às necessidades imediatas do projeto individual, mas que não necessariamente leve a software sustentável. Suas descobertas revelam que uma falta de ou documentação de sistema insuficiente pode ser um grande obstáculo para alcançar a sustentabilidade em sistemas de software e leva ao aumento da complexidade do sistema, degradada manutenibilidade e falta de familiaridade com o sistema.

Hsieh e Chen (2015) descobriram alguns padrões com alta integração de incrementos em plataformas de desenvolvimento de software variáveis. Os autores documentaram que o desenvolvimento de software multiplataforma enfrenta um desafio crítico no contexto de praticar métodos ágeis, ou seja, a falta de envolvimento direto do cliente no ciclo de vida de desenvolvimento. Na ausência do cliente, as construções de software levam mais tempo para serem completadas e têm mais probabilidade de falhar, portanto têm um impacto negativo no desenvolvimento de software sustentável.

Taina (2011) explica as várias maneiras pelas quais as metodologias ágeis afetam o desenvolvimento de software sustentável. Entre os diferentes fatores, a gestão eficiente do tempo e o uso de recursos de computação são considerados fatores intrínsecos que apoiam o desenvolvimento de software verde. No entanto, enfrentar a sobrecarga de gestão de riscos ao praticar métodos ágeis pode resultar em projetos com orçamento excessivo, atraso de tempo e, eventualmente, o uso máximo de recursos de computação, o que poderia afetar negativamente os processos sustentáveis para desenvolver software verde (Kodali, 2015).

De acordo com Jan (2019), software verde e sustentável é uma necessidade atual e deve ser projetado para a total satisfação do cliente com características ambientalmente amigáveis, em linha com a ICT e outros setores industriais. O autor justifica o desenvolvimento de software verde indicando alguns fatores-chave dos métodos ágeis com práticas industriais relevantes.

Galán *et al.* (2020) argumentam a importância da sustentabilidade no contexto do crescimento organizacional e enfatizam que os processos de desenvolvimento de software devem ser certificados como ambientalmente amigáveis ao implementar as práticas ágeis. Os autores propõem um modelo ágil para o desenvolvimento de software, usando a plataforma de hardware antiga, que poderia ter um uso de longo prazo com uma redução considerável de resíduos eletrônicos.

2.4 CONSOLIDAÇÃO DAS PRINCIPAIS PRÁTICAS

Com base na revisão da literatura realizada foi elaborado o Quadro 4, a qual apresenta as principais práticas de sustentabilidade identificadas em trabalhos de pesquisa já realizados, para cada etapa do ciclo de desenvolvimento de software: análise de requisitos, desenho do sistema, codificação, testes, implantação e manutenção.

Quadro 4 – Principais Práticas de Sustentabilidade Mapeadas para o Desenv. de Software

(continua)

Fase do Ciclo de Desenvolvimento	Prática	Descrição da Prática	Fontes
Análise de Requisitos	Coleta de Requisitos Ecoeficientes	Incluir considerações de impacto ambiental e social nos requisitos	Shenoy e Eeratta (2011); Agarwal, Nath e Chowdhury (2012)
	Engajamento das Partes Interessadas	Envolver as partes interessadas para entender suas expectativas de sustentabilidade e incorporá-las aos requisitos.	Shenoy e Eeratta (2011); Mahmoud e Ahmad (2013)
Design do Sistema	Design Energicamente Eficiente	Projetar o software para ser energeticamente eficiente, minimizando o consumo de recursos.	Naumann <i>et al.</i> (2011); Penzenstadler, Martin e Camille (2013)
	Arquitetura Sustentável	Utilizar arquitetura modular e escalável que possa se adaptar às necessidades futuras sem exigir uma revisão completa.	Naumann <i>et al.</i> (2011); Chauhan e Saxena (2013)
	Reusabilidade e Modularização	Projetar componentes que possam ser reutilizados em diferentes partes do sistema ou em projetos futuros, reduzindo o trabalho redundante	Sriraman e Raghunathan (2023); Oyediji, Seffah e Penzenstadler (2018)
Codificação	Codificação Verde	Escrever código limpo e eficiente para reduzir os recursos computacionais necessários	Naumann <i>et al.</i> (2011); Mahmoud e Ahmad (2013)
	Uso de Ferramentas Sustentáveis	Escolher ferramentas e ambientes de desenvolvimento energeticamente eficientes e com menor impacto ambiental.	Williams, Rubin e Cohn (2010); Raisian <i>et al.</i> (2016)
	Controle de Versão e Documentação	Manter documentação abrangente e controle de versão para suportar a manutenção a longo prazo e reduzir o esforço redundante.	Williams, Rubin e Cohn (2010); Raisian <i>et al.</i> (2016)
Testes	Teste Automatizado	Usar ferramentas de teste automatizado para melhorar a eficiência e reduzir o consumo de recursos associado ao teste manual	Sriraman e Raghunathan (2023); Chauhan e Saxena (2013)

Quadro 4 – Principais Práticas de Sustentabilidade Mapeadas para o Desenv. de Software

(conclusão)

Testes	Teste Energicamente Eficiente	Otimizar os processos de teste para minimizar o uso de energia, como executar testes durante horários de menor demanda ou em servidores energeticamente eficientes.	Naumann <i>et al.</i> (2011); Mahmoud e Ahmad (2013); Sriraman e Raghunathan (2023)
	Teste Abrangente	Garantir testes completos para reduzir a necessidade de retrabalho futuro, que pode consumir recursos adicionais	Chauhan e Saxena (2013); Sriraman e Raghunathan (2023)
Implantação	Implantação Eficiente	Utilizar estratégias de implantação que minimizem o tempo de inatividade e o consumo de energia, como containerização e virtualização	Sriraman e Raghunathan (2023); Mahmoud e Ahmad (2013)
	Soluções Baseadas em Nuvem	Considerar a implantação em plataformas de nuvem que utilizam fontes de energia renovável e oferecem gerenciamento eficiente de recursos	Chauhan e Saxena (2013); Oyediji, Seffah e Penzenstadler (2018)
	Treinamento	Treinar a equipe de desenvolvimento em práticas sustentáveis e a importância de incorporar sustentabilidade em seu trabalho	Naumann <i>et al.</i> (2011); Oyediji, Seffah e Penzenstadler (2018)
Manutenção	Monitoramento Proativo	Implementar ferramentas de monitoramento para detectar e resolver ineficiências cedo, reduzindo a necessidade de manutenção extensiva futura	Mahmoud e Ahmad (2013); Sriraman e Raghunathan (2023)
	Planejamento de Fim de Vida	Planejar a desativação sustentável do software, incluindo a disposição segura ou reciclagem de hardware	Chauhan e Saxena (2013); Penzenstadler, Martin e Camille (2013)
Práticas independentem de fase	Equipe Sustentáveis	Incentivar o trabalho remoto, o uso de ferramentas colaborativas e reuniões virtuais para reduzir viagens e o consumo de energia do espaço de escritório	Dick <i>et al.</i> (2013); Oyediji, Seffah e Penzenstadler (2018)
	Métricas e Relatórios	Acompanhar e relatar métricas de sustentabilidade ao longo do ciclo de vida para identificar áreas de melhoria e demonstrar compromisso com o desenvolvimento sustentável	Dick <i>et al.</i> (2013); Naumann <i>et al.</i> (2011)

Fonte: Autor

É importante destacar que o Quadro 4 foi construído a partir de uma análise integrativa dos principais referenciais apresentados nas seções anteriores. Em especial, ela se inspira nos princípios do Manifesto de Karlskrona (explicitados no Quadro 2, que mapeia tais princípios às fases do SDLC) e nos modelos comparados no Quadro 3, os quais reúnem frameworks amplamente discutidos na literatura. Embora o Quadro 4 não represente uma simples transposição desses quadros anteriores, ela consolida práticas extraídas e recorrentes em

diversos estudos, organizando-as de forma prática segundo as fases do ciclo de vida do desenvolvimento de software.

Além de sintetizar os achados da revisão teórica, o Quadro 4 teve papel central na estruturação da etapa empírica da pesquisa. As práticas listadas serviram de base para a elaboração do roteiro de entrevistas semiestruturadas, permitindo investigar até que ponto essas práticas estão presentes nas organizações estudadas e como são percebidas por gestores e especialistas. Dessa forma, o quadro funcionou como uma ponte entre a fundamentação teórica e a análise dos casos reais, contribuindo para a consistência metodológica do estudo.

Com isso, esta seção não apenas consolida as evidências teóricas sobre sustentabilidade no desenvolvimento de software, mas também estrutura o referencial prático que fundamentou a coleta e a interpretação dos dados apresentados nos capítulos seguintes.

3 MÉTODO

A pesquisa proposta é de natureza qualitativa, pois busca explorar as percepções, atitudes e comportamentos das empresas em relação à adoção de práticas de sustentabilidade no desenvolvimento de software, bem como a compreensão da cultura organizacional em relação a esse tema. A escolha do método qualitativo se justifica pela necessidade de compreender as nuances, valores e culturas organizacionais das empresas em relação à sustentabilidade, o que é melhor explorado através de entrevistas e análise qualitativa (Denzin; Lincoln, 2005).

Adicionalmente, o tipo de estudo foi exploratório e descritivo. Exploratório, pois procura compreender e explorar as práticas de sustentabilidade no contexto de desenvolvimento de software, e descritivo, uma vez que visa descrever as percepções e práticas das empresas.

A estratégia de investigação a ser adotada foi estudo de caso. Essa escolha se justifica pela natureza específica e contextualizada do problema de pesquisa, que busca explorar fenômenos complexos dentro do ambiente real de empresas de desenvolvimento de software. Segundo Yin (2015) o estudo de caso foca na análise aprofundada de um fenômeno específico dentro de seu contexto natural, procurando compreender a complexidade e as particularidades do caso. Assim, ele possibilitará uma análise detalhada e profunda de casos específicos, facilitando a compreensão das práticas sustentáveis em diferentes contextos organizacionais e culturais.

Para seleção dos casos a serem estudados foram consideradas empresas globais que oferecem serviços relacionados ao desenvolvimento de software, e que atuam no Brasil, buscado assim alcançar uma diversidade maior de práticas e culturas organizacionais. Essa abordagem considerando empresas globais visa incluir organizações que implementam práticas inovadoras e sustentáveis em seus processos de desenvolvimento de software, e o fato de serem atuantes no mercado nacional possibilitará uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas e desafios relacionados a sustentabilidade que essas empresas enfrentam na implementação de softwares em um contexto local.

Para escolha dos casos foram selecionadas empresas de portes (número de funcionários) variados do ramo de consultoria de tecnologia. Foram consideradas empresas que possuem áreas de desenvolvimento de software customizável, excluindo, portanto, aquelas que possuem como foco soluções de software de prateleira. Assim almejou-se compreender a aplicabilidade de práticas de sustentabilidade observando-se todo o ciclo de desenvolvimento de software nas empresas selecionadas, não apenas implementações de software por meio de configuração.

Essas organizações foram selecionadas por conveniência, com base na acessibilidade dos entrevistados e na relação direta de seus cargos com áreas de desenvolvimento de software, arquitetura, qualidade e inovação. As empresas variam em porte e estrutura, mas todas têm atuação nacional e internacional, atendendo setores como finanças, telecomunicações, varejo e indústria.

O Quadro 5 apresenta as principais características das empresas que foram alvo para os casos da pesquisa. Importante destacar que os números de funcionários são estimativas com base em dados de mercado disponíveis até 2024. O status de capital (aberto ou fechado) refere-se à situação da matriz ou grupo controlador.

Quadro 5 – Principais características das empresas selecionadas

Empresa	Qtd. Aproximada de Funcionários no Brasil	Principais áreas de Atuação	Início das Atividades no Brasil	Capital	Principais Escritórios
Empresa Alfa	20.000	Consultoria em tecnologia, outsourcing e inovação	1980	Aberto	São Paulo (SP), Recife (PE), Rio de Janeiro (RJ)
Empresa Beta	7.000	Serviços de TI, transformação digital e consultoria	2014	Aberto	São Paulo (SP), Blumenau (SC), Curitiba (PR)
Empresa Gama	5.000	Engenharia de software, modernização e cloud	2005	Aberto	São Paulo (SP), Curitiba (PR), Sorocaba (SP)
Empresa Delta	3.000	Desenvolvimento de software, inovação digital	2011	Fechado	São Paulo (SP), Porto Alegre (RS), Passo Fundo (RS)
Empresa Ômega	800	Qualidade de software, performance, observabilidade	2000	Fechado	São Paulo (SP), Campinas (SP)

Fonte: Autor

O principal instrumento de coleta de dados da pesquisa foi por meio de entrevistas semiestruturadas, realizadas com quinze profissionais distribuídos entre as cinco empresas. O critério de escolha priorizou três profissionais de cada empresa, com ampla visão técnica e estratégica dos processos de desenvolvimento, capazes de relatar a aplicação (ou ausência) de práticas sustentáveis ao longo do ciclo de vida dos sistemas, proporcionando assim uma visão direta das práticas e percepções das empresas. Os entrevistados ocupavam cargos relacionados

a áreas de implementação de software, como gerentes de desenvolvimento, líderes e gerentes de projetos, e também cargos mais técnicos como de especialistas em arquitetura de software ou de soluções, gerentes de arquitetura ou de qualidade.

O Quadro 6 apresenta um resumo do perfil dos profissionais entrevistados, indicando suas funções, tempo de experiência na área de tecnologia e tempo de atuação nas respectivas empresas.

Quadro 6 – Perfil dos Entrevistados

Empresa	Cargo/Função	Tempo de Experiência	Tempo de Empresa
Empresa Alfa	Gerente de Desenvolvimento de Software	18	12
Empresa Alfa	Arquiteto de Soluções de TI	15	7
Empresa Alfa	Gerente de Projetos de TI	16	8
Empresa Beta	Gerente de Desenvolvimento de Software	17	10
Empresa Beta	Arquiteto de Software	14	6
Empresa Beta	Gerente de Projetos de TI	18	10
Empresa Gama	Gerente de Serviços de TI	17	6
Empresa Gama	Arquiteto de Soluções de TI	15	5
Empresa Gama	Líder de Projetos de TI	16	5
Empresa Delta	Head de Inovação	20	8
Empresa Delta	Head de Delivery Management	18	4
Empresa Delta	Líder Técnico de Desenvolvimento	13	5
Empresa Ômega	Gerente de Desenvolvimento de Produtos Digitais	18	4
Empresa Ômega	Gerente de Qualidade de Software	20	6
Empresa Ômega	Gerente de Projetos de TI	15	7

Fonte: Autor

As entrevistas foram conduzidas entre novembro de 2024 e fevereiro de 2025, com duração média de 45 a 60 minutos, por meio de videoconferência. Os participantes foram contatados por meio da rede social LinkedIn e aceitaram voluntariamente contribuir com o estudo, mediante o resguardo da confidencialidade das informações. Para tal fora explicado aos participantes de que em todas as informações fornecidas seria garantido o anonimato dos participantes bem como de suas empresas, e de que os dados seriam utilizados exclusivamente

para fins acadêmicos e divulgados sem nenhuma identificação individual. Não houve uma autorização solicitada para as empresas, motivo pela qual os seus respectivos nomes foram anonimizados no presente estudo.

Para a condução das entrevistas foi utilizado como base um roteiro prévio de entrevistas (Apêndice A) o qual foi elaborado com o intuito de explorar, de forma estruturada e aberta, as percepções, práticas e desafios relacionados à sustentabilidade no desenvolvimento de software em ambientes corporativos. Sua construção foi orientada por uma revisão da literatura científica, considerando especialmente os frameworks GREENSOFT e o Manifesto de Karlskrona, e tendo como principal referência o Quadro 4 (seção 2.4), que consolida as práticas sustentáveis organizadas segundo o ciclo de vida do desenvolvimento de software. Esse quadro foi utilizado como base categorial para estruturação das perguntas e posterior organização dos dados obtidos. O instrumento foi dividido em quatro seções principais: (1) perfil do entrevistado e da empresa, (2) percepção sobre sustentabilidade digital, (3) práticas sustentáveis adotadas ao longo do ciclo de vida do software, e (4) facilitadores, barreiras e fatores críticos à implementação dessas práticas. A estrutura do questionário combinou perguntas fechadas para caracterização dos respondentes com questões abertas e descritivas, que permitiram a livre expressão de experiências e opiniões, respeitando os princípios da abordagem qualitativa e favorecendo a comparação entre os diferentes contextos organizacionais investigados.

As entrevistas qualitativas forma fundamentais para capturar as percepções, experiências e opiniões dos entrevistados, uma vez que este método permite explorar as complexidades subjacentes, os valores e os desafios enfrentados pelos indivíduos, proporcionando insights detalhados sobre o fenômeno estudado (Patton, 2002).

O procedimento para registro dos dados foi a gravação das repostas em formato digital para o formulário de questões, assim como também a gravação digital do áudio e vídeo das entrevistas semiestruturadas que foram conduzidas no formato de vídeo conferência para a coleta dos dados, facilitando assim o acesso e reprodução para uma análise mais minuciosa. As entrevistas foram conduzidas entre novembro de 2024 e fevereiro de 2025, com duração média de 45 a 60 minutos.

Visando garantir a robustez e a validade dos dados coletados, esta pesquisa também adotou a triangulação de dados como parte da estratégia metodológica. A triangulação consiste em utilizar múltiplas fontes de dados para analisar o mesmo fenômeno, permitindo uma compreensão mais abrangente e confiável (Creswell, 2013). Neste estudo, a triangulação de dados foi realizada por meio da combinação de entrevistas semiestruturadas com profissionais das empresas e análise documental disponível publicamente. Foram utilizados documentos

institucionais acessados nos sites oficiais das empresas analisadas, como relatórios de sustentabilidade, comunicados de ESG, materiais institucionais, blogs técnicos e descrições de programas internos voltados à inovação ou eficiência digital. A observação direta foi inicialmente prevista, porém, por limitações de acesso, natureza de trabalho majoritariamente remoto dos profissionais de TI, e tempo, não foi possível realizá-la de forma sistemática nas empresas analisadas. Além disso, a análise de documentos e relatórios disponíveis sobre sustentabilidade proporcionou uma visão adicional das políticas e práticas adotadas. A triangulação de dados não só aumenta a credibilidade dos resultados, mas também permite identificar e explorar divergências ou inconsistências entre as diferentes fontes de informação, enriquecendo a análise e contribuindo para uma compreensão mais profunda das práticas de sustentabilidade no desenvolvimento de software (Denzin; Lincoln, 2005).

A análise de conteúdo foi aplicada tanto aos dados obtidos nas entrevistas quanto à revisão da literatura. Após a análise de conteúdo, seguiu-se para uma fase interpretativa destinada a responder às questões de pesquisa, identificar padrões e tendências entre as empresas estudadas na adoção de práticas de sustentabilidade no desenvolvimento de software, assim como consolidar as impressões observadas.

Os procedimentos de análise e interpretação dos dados seguidos nesta fase da pesquisa foram os elencados abaixo, os quais correspondem aos propostos por Creswell (2010):

- a) Organização e preparação dos dados para análise;
- b) Leitura de todos os dados;
- c) Processo de codificação;
- d) Geração de descrições e temas;
- e) Representação dos dados;
- f) Extração de um significado e aprendizados.

Ainda seguindo as recomendações de Creswell (2010), pretende-se assegurar a confiabilidade e validade dessa pesquisa qualitativa por meio da utilização dos seguintes procedimentos:

- a) Descrições ricas e densas, detalhando as perspectivas sobre o tema, de forma a tornar os resultados mais realistas, e aumentando a validade da pesquisa.
- b) Reflexividade do pesquisador, incluindo na interpretação dos resultados comentários com base em sua experiência na área de forma a enriquecer a análise, permitindo aos leitores uma compreensão melhor do contexto em que os resultados da pesquisa foram gerados.

- c) Informações negativas ou discrepantes, buscando analisar dados que contradizem ou desafiam as interpretações ou conclusões preliminares, de forma a fortalecer a validade dos resultados ao garantir que a análise considera várias perspectivas relevantes.

Um resumo da estratégia metodológica adotada é apresentado no Quadro 7 abaixo.

Quadro 7 – Síntese da Estratégia Metodológica da Pesquisa

Etapa	Descrição
Tipo de Estudo	Pesquisa qualitativa exploratória com múltiplos casos
Técnica de Coleta	Entrevistas semiestruturadas com profissionais das empresas selecionadas
Número de Empresas	5 empresas do setor de TI (3 multinacionais, 2 nacionais)
Critério de Seleção	Amostragem por conveniência e acessibilidade de contato
Técnica de Análise	Análise de conteúdo com codificação indutiva
Instrumento	Roteiro de entrevista elaborado a partir da literatura sobre sustentabilidade no desenvolvimento de software
Etapa de Triangulação	Análise cruzada entre entrevistas, informações públicas e literatura existente

Fonte: Autor

Após a transcrição e reprodução das entrevistas, foi realizada uma análise de conteúdo com abordagem indutiva, conforme proposto por Bardin (2011). Os códigos temáticos emergiram diretamente dos dados empíricos, ou seja, a partir das falas dos participantes. Para apoiar a estruturação linguística, organização e agrupamento conceitual dos códigos, utilizou-se de forma complementar o modelo de linguagem ChatGPT (OpenAI, 2023), como ferramenta auxiliar de apoio à pesquisa qualitativa.

A ferramenta foi utilizada como instrumento de apoio e aceleração ao processo de codificação, sugerir nomes mais objetivos e descritivos para os códigos, bem como auxiliar na organização dos temas em categorias coerentes com os dados coletados, mantendo-se fiel à abordagem empírica indutiva. Os prompts utilizados buscaram manter a neutralidade interpretativa, atuando apenas como apoio na sistematização da análise. Abaixo, seguem alguns prompts de entrada que foram utilizados na ferramenta:

- a) “A partir da seguinte lista de trechos transcritos de entrevistas com profissionais de TI, identifique temas recorrentes que podem ser transformados em códigos de análise qualitativa.”

- b) “Sugira nomes curtos, descritivos e academicamente apropriados para os códigos temáticos abaixo, extraídos de entrevistas sobre sustentabilidade no desenvolvimento de software.”
- c) “Reformule os nomes dos seguintes códigos para torná-los mais claros e coerentes com uma pesquisa qualitativa acadêmica.”
- d) “Agrupe os seguintes códigos emergentes de entrevistas em categorias mais amplas, quando houver similaridade conceitual, mantendo foco em sustentabilidade em projetos de software.”
- e) “Sugira descrições curtas e objetivas para os seguintes códigos temáticos usados em análise de conteúdo qualitativa.”

Todas as sugestões geradas foram posteriormente revisadas e validadas manualmente pelo pesquisador, garantindo a coerência com os dados e com os objetivos da pesquisa. O Apêndice B apresenta os códigos temáticos emergentes identificados na análise de conteúdo das entrevistas semiestruturadas realizadas com os profissionais das empresas participantes do estudo.

Os códigos apresentados foram utilizados para organizar e interpretar os dados qualitativos, orientando a construção dos resultados e a discussão das evidências empíricas em diálogo com os referenciais teóricos previamente apresentados. Cada código representa um tema central associado à incorporação de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software, seja no âmbito técnico, organizacional ou estratégico.

4 CARACTERIZAÇÃO DAS EMPRESAS E ASPECTOS OBSERVADOS

Esta seção apresenta um panorama das empresas participantes da pesquisa, contextualizando suas características institucionais e operacionais, bem como as percepções iniciais a partir dos relatos dos seus colaboradores entrevistados sobre sustentabilidade no desenvolvimento de software. Essa caracterização é essencial para compreender a diversidade de contextos organizacionais que possam influenciar a adoção ou ausência de práticas sustentáveis.

4.1 VISÃO GERAL DAS EMPRESAS

A primeira empresa abordada, para o estudo denominada Empresa Alfa, é uma multinacional líder global em serviços profissionais, oferecendo soluções nas áreas de estratégia, consultoria, tecnologia, operações e marketing digital, ou seja, tem uma atuação que vai além de serviços de TI. Com presença em mais de 120 países e uma equipe global de mais de 700 mil colaboradores, a empresa tem como missão auxiliar organizações a se reinventarem por meio da combinação de tecnologia e criatividade humana. No Brasil, ela iniciou suas operações na década de 1980 e, desde então, passou a atender diversos setores da economia. A empresa possui escritórios em várias cidades brasileiras, incluindo São Paulo, Rio de Janeiro, Recife, Brasília e Belo Horizonte. Além disso, a empresa tem investido em centros de inovação e fábricas de software, incluindo um centro de inovação na região nordeste, que emprega cerca de 3 mil profissionais. Com um compromisso contínuo com a diversidade, inclusão e sustentabilidade, a empresa em sua missão busca não apenas impulsionar o desempenho de seus clientes, mas também gerar valor para a sociedade como um todo.

Com base nas entrevistas realizadas com profissionais da Empresa Alfa, foram coletados dados ricos e diversos sobre a forma como a sustentabilidade tem sido incorporada nos processos de desenvolvimento de software dentro da organização. Os entrevistados foram três profissionais: um Gerente de Desenvolvimento de Software, com 18 anos de experiência na área de TI, um Arquiteto de Soluções de TI, com 15 anos de atuação, e um Gerente de Projetos de TI, com 16 anos de experiência, todos envolvidos diretamente em projetos de transformação digital, arquitetura de sistemas e soluções cloud para grandes clientes nos setores financeiro, varejista e industrial. A seleção desses profissionais ocorreu de maneira intencional e por conveniência, dado seu perfil técnico e estratégico, assegurando contribuições relevantes para os objetivos da pesquisa.

A segunda empresa selecionada, denominada Empresa Beta, é uma multinacional japonesa de tecnologia da informação e consultoria, pertencente a um dos maiores conglomerados de telecomunicações do mundo. Fundada em 1988 como uma divisão especializada em comunicações de dados, a empresa expandiu-se globalmente e hoje está presente em mais de 50 países, com uma força de trabalho superior a 190 mil profissionais. No Brasil, consolidou sua presença por meio da aquisição de uma outra empresa de consultoria e de investimentos estratégicos em inovação, destacando-se por sua atuação em projetos de transformação digital, soluções em nuvem, inteligência artificial e sistemas corporativos. A empresa possui escritórios em diversas cidades brasileiras, incluindo São Paulo, Curitiba, Porto Alegre, Joinville, Recife e Florianópolis, além de hubs de inovação como o recém-inaugurado centro no Porto Digital, em Recife, que visa fomentar a pesquisa e o desenvolvimento em tecnologias emergentes. Comprometida com a sustentabilidade e a responsabilidade social, a EMPRESA BETA investe em práticas ESG. Publicamente, a empresa foi reconhecida pelo S&P Global Sustainability Rating como uma das provedoras de serviços de TI em termos de desempenho ambiental e social. Com uma abordagem centrada no cliente e foco em inovação contínua, a EMPRESA BETA se posiciona como uma parceira estratégica para organizações que buscam excelência tecnológica e transformação digital sustentável.

As entrevistas realizadas na Empresa Beta envolveram três profissionais com sólida experiência no setor de tecnologia da informação, permitindo uma visão abrangente e consistente sobre a adoção de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software dentro da organização. Participaram da pesquisa um Gerente da Área de Desenvolvimento de Software, com 17 anos de atuação na área de TI e experiência consolidada na liderança de times multidisciplinares em projetos de inovação e sustentabilidade; um Arquiteto de Software, com 14 anos de experiência focada nos últimos anos em engenharia de software sustentável, modernização de sistemas legados e cloud computing; e um Gerente de Projetos de TI, com 18 anos de trajetória profissional, atuando na condução de iniciativas de desenvolvimento de software, integração de plataformas digitais e transformação digital, tanto em ambientes públicos quanto privados. A escolha desses entrevistados ocorreu de maneira estratégica, priorizando profissionais que exercem papéis centrais nas decisões técnicas e de gestão de projetos, assegurando informações qualificadas e aderentes aos objetivos da pesquisa.

A terceira empresa selecionada foi a Empresa Gama que é uma multinacional alemã especializada em consultoria e desenvolvimento de soluções digitais, com forte presença nos setores financeiro, de seguros e industrial. Fundada em 1987, a matriz global está sediada em Stuttgart, Alemanha, e desde 1999 está listada na Bolsa de Valores de Frankfurt, integrando o

índice SDAX desde 2021. Ao longo de sua trajetória, a Empresa Gama expandiu sua atuação globalmente, estabelecendo operações em mais de 20 países, incluindo Alemanha, Suíça, Polônia, Bélgica, França, Itália, Espanha, Brasil, Costa Rica, Canadá, México, Estados Unidos, Singapura, Reino Unido e Hong Kong. No Brasil, a Empresa Gama iniciou suas atividades em 2005, consolidando-se como um dos principais mercados da empresa, representando 15% da receita global no primeiro semestre de 2024, com um crescimento de 12% em relação ao mesmo período do ano anterior.

Com uma equipe global de mais de 12.000 especialistas em tecnologia, a Empresa Gama oferece soluções inovadoras em áreas como computação em nuvem, inteligência artificial, modernização de sistemas legados, blockchain e Internet das Coisas (IoT). A empresa mantém parcerias estratégicas com líderes do setor, como AWS, Google Cloud, Microsoft Azure e Thought Machine, garantindo a entrega de soluções escaláveis, seguras e de alto desempenho.

A Empresa Gama também é reconhecida por seu compromisso com a sustentabilidade e a responsabilidade social corporativa. A empresa adota práticas de "Green Coding", visando desenvolver softwares energeticamente eficientes, e promove iniciativas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Além disso, a Empresa Gama investe em programas de diversidade e inclusão, sendo reconhecida como um excelente local para se trabalhar, conforme evidenciado por prêmios como o "Great Place to Work".

Em termos financeiros, a Empresa Gama apresentou um desempenho sólido, com uma receita de €429,63 milhões no primeiro semestre de 2024, representando um crescimento de 11% em relação ao ano anterior. Esse crescimento foi impulsionado principalmente pelos setores bancário e industrial, que registraram taxas de crescimento de vendas de dois dígitos. A empresa continua a expandir suas operações e a investir em novas tecnologias.

As entrevistas realizadas na Empresa Gama contaram com a participação de três profissionais experientes, diretamente envolvidos nas áreas de arquitetura de soluções, desenvolvimento de software e gestão de projetos estratégicos. Os entrevistados foram um Gerente de Serviços de TI, com mais de 17 anos de experiência na área de tecnologia, atuando nos últimos anos na liderança de projetos de transformação digital e modernização de plataformas; um Arquiteto de Soluções de TI, com 15 anos de atuação em tecnologia, especializado em arquitetura escalável, cloud computing e engenharia orientada a dados; e um Líder de Projetos de TI, com 16 anos de carreira na área de desenvolvimento e integração de sistemas, atualmente focado em conduzir squads ágeis e projetos de modernização em ambientes cloud. A escolha desses profissionais assegurou uma diversidade de perspectivas, desde o planejamento estratégico até a definição técnica e a execução operacional dos projetos,

compondo um quadro abrangente e representativo da prática da sustentabilidade em software na organização.

A quarta empresa selecionada é a Empresa Delta, uma empresa global de tecnologia da informação que integra um grupo empresarial como foco estratégico em soluções desenvolvidas de forma assistida por ferramentas de automação baseadas em Inteligência Artificial (IA), IA Generativa e tecnologias digitais avançadas. Fundada originalmente em 1995, no Rio Grande do Sul, a empresa passou por uma trajetória de evolução estratégica, incluindo reestruturações e expansão internacional. Em 2013, passou por um processo de aquisição por um grupo de mídia, marcando uma nova fase voltada à inovação digital e internacionalização de seus serviços.

Atualmente com sede global em San Francisco, Califórnia, e presença em diversas cidades brasileiras, como Porto Alegre, Passo Fundo e São Paulo, a Empresa Delta emprega entre aproximadamente 3.000 profissionais no Brasil. A empresa é especializada em outsourcing, integração, implementação, desenvolvimento, consultoria, e-commerce, cloud computing, DevOps, desenvolvimento ágil, gestão de ambientes, testes automatizados e inteligência artificial. Nos últimos anos, a Empresa Delta expandiu sua atuação global por meio da aquisição de diversas empresas, consolidando sua presença nos mercados norte-americano e europeu.

A empresa destaca-se por projetar e construir plataformas digitais nativas utilizando tecnologias de ponta, se propondo a auxiliar empresas a inovar, transformar seus negócios e alcançar sucesso em seus mercados. Com foco na atração e desenvolvimento de talentos, a Empresa Delta desenvolve oportunidades que visam gerar impacto positivo das tecnologias disruptivas na sociedade.

A Empresa Delta também é reconhecida por seu compromisso com a sustentabilidade e a responsabilidade social corporativa. A empresa adota práticas de "Green Coding", visando desenvolver softwares energeticamente eficientes, e promove iniciativas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Além disso, a Empresa Delta investe em programas de diversidade e inclusão, sendo reconhecida como um excelente local para se trabalhar, conforme evidenciado por prêmios como o "Great Place to Work".

Em termos financeiros, a Empresa Delta apresentou um desempenho sólido nos últimos anos, com crescimento contínuo impulsionado pela demanda por soluções digitais inovadoras. A empresa continua a expandir suas operações e a investir em novas tecnologias, buscando consolidar sua atuação em nível global na prestação de serviços de transformação digital.

A pesquisa realizada com profissionais da Empresa Delta contou com a participação de três entrevistados que ocupam cargos estratégicos e técnicos na organização, oferecendo visões complementares e aprofundadas sobre a sustentabilidade no desenvolvimento de software. Os participantes foram um Head de Inovação, um Head de Delivery Management e um Líder Técnico de Desenvolvimento (Tech Lead). O primeiro entrevistado atua há 20 anos na área de tecnologia, com foco em inovação aberta, aplicação de inteligência artificial (IA) e modernização digital sustentável. O segundo profissional possui mais de 18 anos de experiência em desenvolvimento de software e gestão de projetos de missão crítica, com atuação voltada à governança e entrega de valor em projetos estratégicos. Já o terceiro, com 13 anos de trajetória em TI, atua como líder técnico na condução de squads ágeis e decisões arquiteturais voltadas para performance, qualidade e sustentabilidade. A diversidade de experiências desses entrevistados enriqueceu substancialmente os dados da pesquisa, fornecendo uma visão sistêmica e integrada da abordagem da Empresa Delta em relação à sustentabilidade digital.

As entrevistas revelaram que a Empresa Delta adota diretrizes institucionais formais alinhadas aos princípios ESG, refletindo um compromisso com a construção de soluções digitais sustentáveis, eficientes e socialmente responsáveis. Os entrevistados destacaram que essa política está integrada às práticas do dia a dia, especialmente no âmbito do Innovation Studio, unidade da empresa dedicada à modernização de sistemas, desenvolvimento de novos produtos e aplicação de tecnologias emergentes, como IA generativa. Um marco relevante citado foi o reconhecimento pela certificação internacional EcoVadis, que reforça a conformidade da empresa com boas práticas em meio ambiente, ética, compras responsáveis e direitos humanos. A sustentabilidade, segundo os relatos, é tratada como um driver técnico e estratégico – não apenas como um valor corporativo, mas como um diferencial competitivo e um critério de qualidade de produto.

Por fim, a quinta empresa selecionada é a Empresa Ômega, uma empresa brasileira de tecnologia da informação fundada em 2002, com sede em Barueri, São Paulo, que busca um posicionamento ao mercado de referência em Eficiência Digital na América Latina. Com um portfólio abrangente de serviços, a empresa atua nas áreas de engenharia de qualidade de software, desenvolvimento de produtos digitais, observabilidade, cloud computing, FinOps, automação de testes, práticas DevOps e inteligência artificial, oferecendo soluções que aliam inovação tecnológica, excelência operacional e foco em desempenho. A organização conta com cerca de aproximadamente mil colaboradores onde além do Brasil também há uma pequena atuação em alguns países da América Latina, como Chile, Colômbia e República Dominicana, mantendo parcerias estratégicas com os principais provedores de serviços em nuvem, como

Amazon Web Services, Google Cloud, Microsoft Azure e Oracle Cloud. Essa estrutura permite à Empresa Ômega entregar soluções modernas e escaláveis a clientes de diversos setores, como financeiro, varejo e telecomunicações. A empresa também tem se destacado por sua atuação em IA generativa, com o lançamento do LIEV – uma plataforma própria que integra modelos como OpenAI, Bard e Claude de forma unificada, segura e em conformidade com a LGPD. Além disso, a Empresa Ômega adota práticas de Green Coding, promove iniciativas alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, investe em programas de diversidade e inclusão, e já foi reconhecida como um dos melhores lugares para se trabalhar pelo selo Great Place to Work. Com base nesses atributos, a empresa posiciona-se como uma consultoria brasileira de médio porte que articula tecnologia, inovação e sustentabilidade em sua proposta de valor, buscando competitividade e comprometimento social diante de um cenário digital em constante transformação.

A participação da Empresa Ômega nesta pesquisa qualitativa foi composta por três entrevistados que ocupam cargos de liderança técnica e gerencial, com amplo histórico de atuação em engenharia de software, qualidade e gestão de projetos. Foram eles: um Gerente de Desenvolvimento de Produtos Digitais, um Gerente de Qualidade de Software e um Gerente de Projetos de TI. Esses profissionais possuem, em média, mais de 15 anos de experiência em suas respectivas áreas, o que conferiu à pesquisa um conteúdo substancialmente qualificado. Todos estão diretamente envolvidos na execução e coordenação de iniciativas de modernização tecnológica, automação de processos, testes e integração de sistemas em ambientes complexos – características que os tornam interlocutores particularmente adequados para discutir a presença (ou ausência) de práticas sustentáveis no SDLC.

4.2 ASPECTOS OBSERVADOS

Esta subseção reúne e descreve aspectos observados nos relatos dos entrevistados de cada empresa, com base nas entrevistas conduzidas. Os dados são apresentados separadamente por organização, permitindo identificar padrões, singularidades e o nível de conscientização sobre a sustentabilidade ao longo do ciclo de desenvolvimento de software.

4.2.1 Empresa Alfa

Na Empresa Alfa, a sustentabilidade está fortemente integrada às estratégias corporativas e práticas operacionais, refletindo uma abordagem estruturada que abrange

aspectos ambientais, sociais e de governança (ESG). Os profissionais entrevistados destacaram uma política corporativa clara e ativa em torno da sustentabilidade. Essa política é materializada por meio de frameworks como o “Sustainability by Design” e o “Sustainability Value Framework”, que guiam tanto operações internas quanto projetos com clientes.

Os dados coletados abrangem informações sobre diretrizes institucionais da Empresa Alfa, percepção dos entrevistados sobre sustentabilidade digital, práticas adotadas ao longo do ciclo de vida do software, barreiras para implementação dessas práticas e o impacto das metodologias ágeis. Todos os entrevistados apontaram que a Empresa Alfa possui políticas globais formais de sustentabilidade, materializadas por meio da estratégia “Sustainability by Design” e da metodologia “Sustainability Value Framework”, que incluem compromissos como utilizar 100% de energia renovável nas operações. Segundo os relatos, essas diretrizes têm reflexos diretos na prática, como a preferência por nuvens sustentáveis, arquiteturas serverless, uso de componentes reutilizáveis, incentivos à otimização de código, trabalho remoto e ações voltadas à acessibilidade digital.

Em termos de aplicação prática, a Empresa Alfa incentiva o uso de cloud computing com certificações de energia renovável, arquitetura sustentável (como serverless e microserviços), otimização de código e uso de ferramentas que promovam eficiência computacional. Os entrevistados relataram a aplicação de diversas práticas sustentáveis ao longo do ciclo de vida do software, com destaque para planejamento, design, desenvolvimento e implantação. A preocupação com o impacto ambiental e social é incorporada desde fases iniciais dos projetos, com destaque para decisões arquitetônicas que priorizam desempenho, modularidade e baixo consumo energético.

Durante as entrevistas, chamou atenção a clareza com que os profissionais conectaram sustentabilidade a aspectos técnicos do desenvolvimento de software, superando o discurso meramente corporativo e apresentando iniciativas práticas. Foram descritas ações como o uso de ferramentas de observabilidade, a exemplo do Prometheus e do Cloud Carbon Footprint, para monitorar o consumo energético e orientar decisões técnicas em direção a menores impactos ambientais. Práticas como o uso de containers e ambientes elásticos na nuvem, execução condicional de testes em pipelines CI/CD, automação de testes com foco em eficiência energética e o design voltado para acessibilidade digital também foram mencionadas. A documentação dos processos de desligamento de sistemas legados e o planejamento do fim de vida desses sistemas surgem como ações relevantes nesse contexto, ao lado da adoção de equipes remotas para reduzir deslocamentos e emissões associadas. Embora nem todas essas práticas estejam institucionalizadas de maneira homogênea entre os times, nota-se um ambiente

favorável à sua disseminação, especialmente entre squads com maior maturidade técnica. As campanhas internas de capacitação, como as trilhas de “Green Software Engineering”, reforçam essa cultura e mostram um esforço consistente para consolidar a sustentabilidade como uma dimensão integrada ao desenvolvimento de software.

A empresa também se mostrou sensível às pressões externas. Os três profissionais relataram que clientes – especialmente empresas multinacionais europeias – têm exigido evidências concretas de que os projetos seguem diretrizes sustentáveis, incluindo uso de infraestrutura carbono neutro e relatórios periódicos de sustentabilidade digital. Isso tem influenciado diretamente decisões técnicas e requisitos contratuais.

Por outro lado, os entrevistados reconhecem desafios significativos para a adoção plena dessas práticas. A principal barreira apontada foi de ordem cultural, com resistência tanto de gestores quanto de desenvolvedores, que frequentemente percebem a sustentabilidade como um “custo adicional” ou uma “carga extra” de trabalho. Em contextos de prazos apertados e foco exclusivo em entrega, práticas sustentáveis tendem a ser preteridas. Fatores técnicos também foram destacados, como a ausência de ferramentas integradas para medir o consumo energético de forma granular no ciclo DevOps, o que dificulta a visibilidade do impacto real de decisões técnicas.

A questão metodológica também foi discutida. Os três entrevistados concordaram que metodologias ágeis, quando bem aplicadas, podem ser aliadas poderosas para a introdução de práticas sustentáveis, permitindo ajustes incrementais, experimentação e inspeção contínua. No entanto, alertam que a agilidade mal compreendida – focada apenas em entregas rápidas – pode resultar na negligência de aspectos sustentáveis, especialmente aqueles que não são explicitamente valorizados por métricas tradicionais de sucesso.

Como elemento adicional, foi recorrente a menção à acessibilidade digital como parte integrante da sustentabilidade na Empresa Alfa. A empresa busca garantir que suas soluções sejam inclusivas, com suporte a diferentes públicos e dispositivos, e que o impacto social positivo esteja no centro das decisões de projeto.

Ao comparar as respostas dos três profissionais entrevistados na Empresa Alfa – o Gerente de Desenvolvimento de Software, o Arquiteto de Soluções de TI e o Gerente de Projetos de TI – observa-se uma forte convergência quanto à importância da sustentabilidade no desenvolvimento de software, embora cada um tenha aportado perspectivas complementares em função de suas áreas de atuação. O gerente de desenvolvimento destacou com maior ênfase as diretrizes institucionais da Empresa Alfa e como elas se desdobram em práticas aplicáveis aos projetos, enquanto o arquiteto aprofundou a análise técnica, descrevendo decisões

arquiteturais específicas, como a adoção de estruturas assíncronas, cache distribuído e uso de containers otimizados para reduzir o consumo computacional. Já o gerente de projetos trouxe uma visão de gestão estratégica, relatando como aspectos de sustentabilidade são incorporados ao planejamento e monitoramento de projetos, especialmente em iniciativas com foco ESG. Em comum, os três entrevistados reconheceram desafios técnicos, culturais e financeiros para a adoção plena dessas práticas, como a ausência de ferramentas integradas de medição de impacto e a resistência organizacional quando práticas sustentáveis não estão claramente associadas a KPIs de negócio. Ainda assim, todos descreveram a Empresa Alfa como uma empresa que promove ativamente a sustentabilidade como parte da qualidade técnica e do valor agregado de suas soluções, demonstrando um alinhamento consistente entre discurso institucional e práticas de desenvolvimento.

4.2.2 Empresa Beta

Os dados coletados nas entrevistas revelaram que a Empresa Beta possui uma política formal de sustentabilidade amplamente integrada à estratégia corporativa, alicerçada no conceito de "Green Innovation". Essa política prevê metas ambiciosas, como a neutralidade de carbono até 2040 e o uso exclusivo de energia renovável em todos os data centers até 2030. A sustentabilidade é entendida como um pilar fundamental tanto nas operações internas quanto na entrega de soluções tecnológicas para clientes. As diretrizes corporativas demandam práticas específicas no ciclo de desenvolvimento de software, incluindo o uso de infraestrutura cloud sustentável, adoção de princípios de Green IT, otimização arquitetural e definição de indicadores ESG como parte dos entregáveis de projetos.

No que tange às práticas sustentáveis efetivamente adotadas, os relatos convergiram na descrição de diversas iniciativas concretas. No planejamento e análise, destaca-se a prática de engajar stakeholders desde as fases iniciais para incorporar requisitos de impacto ambiental e social, além de considerar restrições técnicas ligadas à eficiência computacional. Durante o design e arquitetura, é aplicada uma abordagem sistemática baseada em modularização, desacoplamento de componentes, uso de arquiteturas orientadas a eventos e elasticidade computacional, com o objetivo de minimizar a latência, reduzir o consumo energético e aumentar a reusabilidade de soluções. No desenvolvimento, os entrevistados enfatizaram práticas de codificação verde, com foco em algoritmos eficientes, compactação de payloads, racionalização de loops e otimização do uso de memória e processamento. Já na implantação e operação, foi relatado o uso extensivo de containers Kubernetes com autoescalabilidade em

ambientes de cloud certificados como carbono neutro, como AWS, Azure e GCP, priorizando regiões de menor impacto ambiental.

Além disso, as equipes da Empresa Beta vêm incorporando práticas de monitoramento ativo da eficiência energética, utilizando ferramentas como Prometheus, Cloud Carbon Footprint e Kepler, o que permite não apenas detectar excessos de consumo, mas também alimentar dashboards de indicadores ESG correlacionados aos KPIs técnicos dos projetos. Uma característica particularmente interessante relatada foi a inclusão de “Green SLAs” em contratos, estabelecendo metas explícitas de eficiência computacional como parte dos compromissos de entrega, e a prática de racionalização de dependências técnicas para reduzir o footprint de execução das soluções. Outro ponto recorrente nas entrevistas foi o incentivo a práticas de capacitação interna, com formações específicas em Green Software Development, oferecidas pela Empresa Beta University, reforçando a cultura de sustentabilidade técnica entre arquitetos, desenvolvedores e gerentes.

Entretanto, apesar dos avanços significativos, as entrevistas também evidenciaram desafios relevantes para a consolidação plena dessas práticas. Os profissionais relataram que, em muitos casos, o trade-off entre time-to-market e sustentabilidade ainda pesa contra práticas mais eficientes, especialmente em projetos com prazos agressivos. Fatores técnicos também foram destacados, como a carência de ferramentas nativas que integrem métricas ambientais ao ciclo DevOps tradicional, dificultando a mensuração contínua do impacto energético durante o desenvolvimento e operação dos sistemas. Do ponto de vista cultural, ainda persiste uma percepção em parte dos stakeholders de que práticas sustentáveis representam um “custo adicional” ou um “incremento não essencial”, o que gera resistência à sua priorização frente a metas convencionais de prazo e custo.

As impressões dos entrevistados também abordaram a influência das metodologias ágeis nesse contexto. Todos concordaram que, quando bem compreendida, a agilidade pode ser uma forte aliada da sustentabilidade, ao permitir entregas incrementais que viabilizam a introdução gradual de melhorias técnicas voltadas à eficiência energética, modularidade e reuso. Contudo, alertaram que, em organizações ou projetos onde o foco da agilidade é distorcido para enfatizar apenas a velocidade de entrega, a sustentabilidade tende a ser negligenciada. Assim, destacaram a importância de que Product Owners e Scrum Masters estejam sensibilizados para incorporar critérios de eficiência e impacto ambiental na priorização de backlogs e na definição do “Definition of Done” dos produtos.

As entrevistas também trouxeram impressões importantes sobre a maturidade da Empresa Beta na condução de práticas sustentáveis. De forma consistente, os profissionais

apontaram que, apesar dos avanços institucionais e técnicos, ainda há desafios significativos. Entre os principais obstáculos relatados estão a pressão por entregas rápidas, que dificulta a priorização de práticas sustentáveis em projetos de alta criticidade, a ausência de métricas nativas de sustentabilidade nos frameworks tradicionais de desenvolvimento, e a percepção cultural, ainda presente em alguns setores da empresa, de que sustentabilidade representa um custo ou um requisito acessório. Mesmo assim, a empresa tem investido fortemente em programas de capacitação, como as trilhas internas de "Green Software Development" e "Green Software Engineering", visando reforçar a conscientização e transformar a sustentabilidade em parte intrínseca da qualidade técnica.

Ao analisar comparativamente as respostas dos três entrevistados da Empresa Beta, nota-se uma convergência significativa na compreensão dos princípios de desenvolvimento sustentável, embora cada profissional tenha aportado nuances específicas de acordo com sua área de atuação. O gerente de desenvolvimento enfatizou a sustentabilidade como diferencial estratégico, vinculada ao portfólio de inovação e transformação digital; o arquiteto de software destacou o papel da arquitetura sustentável na redução do impacto computacional, trazendo exemplos concretos de decisões técnicas orientadas à eficiência energética e modularidade; já o gerente de projetos enfatizou o planejamento sustentável desde a análise de viabilidade até o gerenciamento de operações, apontando a necessidade de inclusão de métricas ambientais nos contratos e dashboards de projetos. Em comum, os três entrevistados ressaltaram que, embora desafios persistam, a Empresa Beta caminha de forma estruturada para consolidar a sustentabilidade como um requisito de excelência técnica, alinhado às exigências de clientes internacionais e às novas demandas do mercado por soluções digitais responsáveis.

4.2.3 Empresa Gama

Os dados coletados nas entrevistas revelaram que a Empresa Gama possui uma política formal de sustentabilidade, alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU e estruturada em três pilares principais: digital sustentável para os clientes, operações com neutralidade climática até 2040, e compromisso social e ético com diversidade e bem-estar. Essas diretrizes permeiam não apenas as operações administrativas da empresa, mas também os processos de desenvolvimento de software, orientando a adoção de práticas de "Green IT", codificação eficiente, arquitetura sustentável e uso consciente de recursos computacionais. De acordo com os relatos, essas práticas estão incorporadas tanto na estratégia corporativa quanto

no modelo de entrega técnica da Empresa Gama, reforçando a sustentabilidade como elemento intrínseco da qualidade e da inovação.

Em termos de práticas sustentáveis específicas, os entrevistados detalharam um conjunto robusto de iniciativas aplicadas ao longo de todas as fases do ciclo de vida do software. No planejamento e análise, é comum a realização de sessões de engajamento de stakeholders focadas em discutir requisitos ESG e impacto social, especialmente em projetos para clientes europeus e multinacionais. Durante o design arquitetural, destaca-se a priorização de arquiteturas modulares, event-driven, reativas e serverless, visando a redução do consumo energético, o aumento da escalabilidade e a facilidade de manutenção. No desenvolvimento, práticas de green coding são disseminadas através de guidelines internos, code reviews voltados para otimização de algoritmos, compressão de payloads, minimização de chamadas de rede e uso de linguagens de melhor desempenho energético. A implantação e a operação ocorrem majoritariamente em nuvens públicas sustentáveis (AWS, Azure, GCP), com uso de containers otimizados, autoscaling e práticas de desligamento automático de ambientes ociosos. Além disso, foram citadas práticas emergentes como o carbon-aware computing – aplicadas em alguns projetos para ajustar execuções intensivas a horários com menor emissão da matriz energética – e o uso pontual de telemetria energética em tempo real, principalmente em ambientes controlados, com o objetivo de ampliar a visibilidade do impacto computacional e apoiar decisões técnicas mais sustentáveis.

Durante as entrevistas, foram identificados tanto facilitadores quanto dificultadores para a implementação de práticas sustentáveis. Entre os principais facilitadores, destacou-se o apoio da alta liderança da Empresa Gama para iniciativas de Green IT, a existência de políticas formais incorporadas aos processos técnicos, e a pressão de clientes internacionais – principalmente do setor financeiro europeu – que exigem critérios ESG nos contratos e projetos. A cultura organizacional de incentivo à inovação e à excelência técnica também foi apontada como um fator que favorece a integração da sustentabilidade às entregas digitais. Por outro lado, os principais dificultadores relatados foram a pressão por prazos agressivos, que em muitos casos inviabiliza a priorização de práticas sustentáveis no curto prazo; a falta de métricas integradas no ciclo DevOps que permitam visualizar o impacto ambiental de forma direta; e a resistência cultural de alguns desenvolvedores e gestores, que ainda veem a sustentabilidade como um custo adicional ou uma prioridade secundária frente às métricas tradicionais de prazo e orçamento.

As impressões extraídas das respostas indicam que, apesar das barreiras, existe um avanço claro na conscientização e na prática da sustentabilidade na Empresa Gama. Em todos

os relatos, ficou evidente que as práticas sustentáveis deixaram de ser iniciativas isoladas e passaram a integrar a engenharia de software como parte das boas práticas técnicas e estratégicas da empresa. Os entrevistados também ressaltaram a importância da capacitação contínua, com treinamentos internos focados em Green Software Engineering, Cloud Optimization e boas práticas de desenvolvimento eficiente, reforçando a necessidade de formar times conscientes e tecnicamente preparados para incorporar sustentabilidade em todos os níveis dos projetos.

Ao comparar as respostas dos três profissionais entrevistados, percebe-se uma grande convergência na percepção de que a sustentabilidade é, ao mesmo tempo, um diferencial competitivo e uma responsabilidade técnica. Cada entrevistado, no entanto, trouxe ênfases distintas: o Gerente de Serviços de TI destacou a estratégia organizacional e a pressão do mercado como vetores para a transformação sustentável; o Arquiteto de Soluções detalhou com profundidade as decisões arquiteturais e práticas de engenharia que otimizam o consumo computacional e promovem a longevidade das soluções; enquanto o Líder de Projetos focou na integração da sustentabilidade aos processos ágeis de gestão e governança de entregas. Em comum, todos defenderam que, para que práticas sustentáveis sejam efetivamente incorporadas e mantidas, é fundamental tratá-las como dimensão essencial da qualidade do software, e não apenas como iniciativas pontuais ou complementares. Assim, a Empresa Gama apresenta-se como uma empresa que, embora enfrente desafios típicos do setor, caminha de maneira consistente na consolidação da sustentabilidade como valor organizacional e como elemento de excelência técnica em seu portfólio de soluções digitais.

4.2.4 Empresa Delta

Durante as entrevistas realizadas com os profissionais da Empresa Delta, foram descritas diversas práticas sustentáveis aplicadas ao longo do ciclo de vida do software. No planejamento, há engajamento ativo de stakeholders para discussão de impacto ambiental e social, com direcionamentos claros para designs inclusivos e arquiteturas eficientes. No design e arquitetura, há priorização de soluções modulares, microsserviços reutilizáveis, arquitetura baseada em eventos, cache distribuído e uso de infraestrutura serverless. Tais escolhas buscam minimizar o consumo de recursos computacionais, aumentar a escalabilidade e prolongar o ciclo de vida dos sistemas. No desenvolvimento, destacam-se práticas como codificação verde, uso de refatoração assistida por IA, controle de latência, compressão de payloads e otimização de algoritmos. A fase de testes é conduzida com pipelines inteligentes que evitam execuções

desnecessárias, enquanto a implantação ocorre em ambientes cloud com autoescalabilidade e menor PUE (Power Usage Effectiveness), priorizando regiões com energia renovável. Também foram mencionadas práticas específicas de monitoramento contínuo, com uso de ferramentas como Dynatrace, Grafana, Kepler e Cloud Carbon Footprint para mensuração de consumo e performance, além de indicadores de footprint digital e eficiência computacional incorporados a dashboards executivos.

Os entrevistados relataram ainda diversas iniciativas formativas, como trilhas internas em Green Software Engineering, refatoração verde e otimização de cloud, além da promoção de hackathons com temáticas ESG. A empresa também estimula fortemente o trabalho remoto e a gestão de equipes distribuídas, com o objetivo de reduzir deslocamentos e ampliar a inclusão regional, prática vista como fator de sustentabilidade social. Além disso, é notável o esforço da empresa em promover reutilização de ativos digitais entre squads e projetos, mantendo bibliotecas compartilhadas de componentes e APIs. A utilização de IA generativa para otimização de código também foi apontada como uma inovação recente com potencial direto sobre a eficiência energética e a redução do retrabalho técnico.

No entanto, os relatos também trouxeram à tona diversos dificultadores para a implementação ampla dessas práticas. Entre os principais desafios técnicos estão a falta de ferramentas integradas ao ciclo DevOps que permitam mensurar de forma nativa o impacto ambiental do software e a ausência de métricas padronizadas de sustentabilidade no nível dos projetos. Culturalmente, os entrevistados apontaram que ainda existe resistência de parte dos desenvolvedores e gestores, sobretudo quando os benefícios da sustentabilidade não estão associados a KPIs diretos ou não são exigidos pelos clientes. A pressão por entregas rápidas e o foco em escopos funcionais frequentemente levam à priorização de soluções convencionais em detrimento de alternativas mais sustentáveis. Ainda assim, foram relatadas ações internas para contornar essas barreiras, como a divulgação de cases de sucesso, incentivo a protótipos sustentáveis, uso do selo EcoVadis como mobilizador institucional e inclusão do tema sustentabilidade nas cerimônias ágeis e reports de projeto.

As percepções sobre a relação entre metodologias ágeis e sustentabilidade também convergiram em uma visão equilibrada. Os entrevistados consideraram que, quando bem aplicadas, as metodologias ágeis são facilitadoras da sustentabilidade, ao permitir ciclos incrementais que favorecem a introdução gradual de melhorias técnicas, como modularizações, reuso e refatorações. Contudo, alertaram que, quando mal interpretadas, as práticas ágeis podem reforçar o foco exclusivo em velocidade e entrega funcional, dificultando a adoção de abordagens sustentáveis, especialmente aquelas de impacto sistêmico e de longo prazo.

Ao comparar as respostas dos três entrevistados, percebe-se alta coerência nos discursos e uma visão madura da sustentabilidade como parte da excelência técnica e do valor entregue aos clientes. O Head de Inovação destacou principalmente o papel das arquiteturas inteligentes, refatoração com IA e reuso de ativos como pilares da sustentabilidade no desenvolvimento. O Head de Delivery Management trouxe uma leitura mais estratégica, centrada na governança e nos indicadores de eficiência aplicados a projetos sob demanda do mercado. Já o Tech Lead apresentou uma visão operacional robusta, conectando práticas concretas – como modularização, configuração otimizada de CI/CD, uso de cache e balanceamento de carga – com decisões de sustentabilidade no nível do código. Em comum, todos os entrevistados reconhecem que a Empresa Delta avançou consideravelmente na integração da sustentabilidade ao desenvolvimento de software, mas que há um caminho contínuo de amadurecimento cultural, instrumental e metodológico para que essa prática se torne padrão em todas as frentes da empresa.

4.2.5 Empresa Ômega

Ao longo das entrevistas com os profissionais da Empresa Ômega ficou evidente que embora ainda não possua uma política institucional formalizada com foco específico na sustentabilidade digital, adota um conjunto de práticas técnicas e operacionais que convergem com os princípios fundamentais da sustentabilidade em software. Essas práticas, muitas vezes incorporadas ao cotidiano sem a rotulagem explícita de “sustentáveis”, foram desenvolvidas como respostas naturais às demandas por qualidade, performance e otimização de recursos, especialmente em projetos para clientes exigentes nos setores financeiro, varejista e de telecomunicações. Entre os exemplos mencionados, destacam-se a adoção de pipelines CI/CD otimizados, com execuções condicionais e por tags; a reutilização de componentes internos entre diferentes squads e projetos; o monitoramento constante de uso de infraestrutura, por meio de ferramentas como Grafana, JMeter e Kepler; e a aplicação de padrões arquiteturais mais leves e desacoplados, com foco em modularidade e elasticidade.

Os entrevistados relataram que essas práticas estão presentes ao longo de todo o ciclo de vida do software, ainda que com intensidades e formas diferentes. Durante a fase de planejamento, embora a sustentabilidade nem sempre seja considerada explicitamente como critério de análise, há uma cultura de questionamento técnico sobre consumo de recursos, custo de manutenção e impactos sobre a infraestrutura, o que muitas vezes leva à adoção de soluções mais enxutas. No design e desenvolvimento, há esforços concretos para evitar complexidade

desnecessária, minimizar a latência e o tráfego de rede, e construir sistemas mais performáticos e resilientes. O Gerente de Desenvolvimento, por exemplo, destacou que sua equipe busca projetar soluções que evitem execuções redundantes, reduzam o uso de memória e otimizem ciclos computacionais – ações que, embora motivadas inicialmente por performance, têm efeitos diretos sobre o consumo energético e a sustentabilidade técnica dos sistemas.

No que se refere à qualidade de software, o Gerente de QA explicou que a área atua como promotora indireta de sustentabilidade ao evitar retrabalho, eliminar testes obsoletos, priorizar automações de alta relevância e implementar validações que economizam recursos computacionais. A cultura de testes eficiente, segundo o entrevistado, se traduz em práticas como execução seletiva de testes (com base em critérios de criticidade e cobertura), uso de ambientes virtualizados sob demanda, e desativação programada de instâncias de teste quando não estão em uso – estratégias que resultam não apenas em ganho de tempo, mas também na redução do impacto ambiental associado ao uso contínuo de infraestrutura. Durante a implantação e operação, os profissionais relataram a adoção de containers com ajustes de autoscaling, uso de cache, balanceamento de carga e mecanismos de desligamento automático de ambientes de homologação fora do horário comercial, como práticas já consolidadas.

Em relação aos facilitadores para a consolidação dessas práticas, os entrevistados apontaram como principais elementos a cultura técnica voltada à performance, que naturalmente favorece decisões de arquitetura enxuta e reuso; o modelo de trabalho híbrido/remoto, que além de ser mais sustentável em termos de mobilidade, permite melhor distribuição de recursos computacionais entre as equipes; e a flexibilidade organizacional proporcionada pelo porte da empresa, que permite experimentações técnicas em menor escala e com maior agilidade. Outro ponto positivo foi o fato de que algumas práticas sustentáveis surgiram de iniciativas internas de equipes técnicas e foram gradualmente absorvidas como boas práticas dentro da empresa – mesmo na ausência de uma diretriz corporativa explícita sobre sustentabilidade.

Por outro lado, os entrevistados também foram unânimes em apontar dificultadores importantes. Um dos principais obstáculos está relacionado à ausência de ferramentas nativas e integradas ao DevOps que permitam mensurar de maneira contínua e granular o consumo energético ou o impacto ambiental digital das soluções desenvolvidas. Essa lacuna técnica dificulta o estabelecimento de métricas objetivas e o monitoramento sistemático do impacto ambiental ao longo do ciclo de desenvolvimento. Outro fator limitante é a priorização de indicadores de desempenho tradicionais, como prazo de entrega, custos e produtividade, que acabam suprimindo a atenção a aspectos menos tangíveis, como eficiência energética ou

modularidade técnica. Em termos culturais, ainda persiste uma percepção de que a sustentabilidade implica maior esforço ou custo, especialmente entre equipes que não visualizam impacto direto sobre o valor percebido pelo cliente final. Esse comportamento se acentua em projetos com prazos apertados ou escopo inflexível, nos quais a priorização recai quase exclusivamente sobre entregas funcionais.

As impressões coletadas também revelaram um cenário de transição e amadurecimento. Todos os entrevistados demonstraram sensibilidade ao tema e reconheceram que a sustentabilidade deve ser integrada à qualidade de software como um de seus pilares. Relataram experiências concretas em que tentativas de adoção de práticas sustentáveis não foram implementadas, seja por restrições técnicas ou pela percepção de baixo retorno imediato. Contudo, também relataram casos bem-sucedidos, como projetos em que a modularização e o reuso permitiram acelerar entregas e reduzir significativamente a carga computacional. Os entrevistados sugeriram, inclusive, a criação de indicadores internos específicos para medir eficiência técnica com viés sustentável, como taxa de reaproveitamento de componentes, tempo médio de uso de ambientes de homologação, e indicadores de “custo computacional por funcionalidade entregue”.

Ao comparar as respostas dos três profissionais entrevistados, observa-se uma convergência conceitual significativa, com ênfase diferenciada conforme a área de atuação. O Gerente de Desenvolvimento abordou a sustentabilidade sob a ótica arquitetural e de performance, ressaltando a importância da engenharia de software orientada à eficiência e ao reuso como caminhos viáveis e escaláveis. O Gerente de Qualidade ressaltou o papel do QA como agente redutor de consumo desnecessário, promovendo automações otimizadas e estratégias de testes sustentáveis. Já o Gerente de Projetos trouxe uma perspectiva de governança, apontando que a integração da sustentabilidade ao escopo de planejamento, gestão de backlog e análise de viabilidade técnica seria o próximo passo para a consolidação dessa cultura. Apesar das barreiras, ficou evidente que a Empresa Ômega possui uma base técnica e cultural propícia à evolução para um modelo mais consciente e sustentável de desenvolvimento, especialmente se houver incentivos estratégicos e a institucionalização de diretrizes específicas. Em suma, mesmo sem uma política explícita, a Empresa Ômega demonstra uma prática sustentável “em estado latente”, com potencial de maturação e formalização nos próximos ciclos de evolução organizacional.

5 ANÁLISE INTERCRUZADA

As entrevistas revelaram que, no que diz respeito à existência de diretrizes formais de sustentabilidade e suas implicações no desenvolvimento de software, houve diferentes níveis de institucionalização do tema entre as empresas analisadas. De modo geral, empresas com atuação global estruturada, como Empresa Alfa, Empresa Beta e Empresa Gama, apresentaram políticas internas claras e consolidadas, enquanto Empresa Delta e Empresa Ômega demonstraram práticas relevantes, embora com graus variados de formalização.

Na Empresa Alfa, por exemplo, os entrevistados relataram a aplicação de frameworks como o Sustainability by Design e o Sustainability Value Framework, integrados às diretrizes globais da empresa. Tais políticas não apenas existem formalmente, mas são ativamente implementadas no ciclo de desenvolvimento, exigindo dos times técnicos práticas como a adoção de arquitetura serverless, o uso de infraestrutura em nuvem alimentada por energia renovável e a utilização de ferramentas para mensuração do consumo energético, como Prometheus. O compromisso com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU foi citado como parte do posicionamento institucional da empresa, o que reforça a percepção de que, na Empresa Alfa, a sustentabilidade está intrinsecamente ligada à qualidade técnica e à entrega de valor.

De maneira semelhante, a Empresa Beta demonstrou uma estrutura política sólida voltada à sustentabilidade digital, pautada nas diretrizes Green of ICT (redução do impacto ambiental das soluções de TI) e Green by ICT (uso da tecnologia como meio para mitigar impactos ambientais em outros setores). Os entrevistados indicaram que essas diretrizes se traduzem em metas específicas, como alcançar carbono neutro até 2040 e migrar integralmente para fontes de energia renovável até 2030. No desenvolvimento de software, isso se reflete em práticas exigidas, como desenho modular, reutilização de código, observabilidade técnica com análise de footprint computacional, e até em decisões arquiteturais orientadas por dados de emissão de carbono – como o uso de carbon-aware computing.

A Empresa Gama também se destaca pela presença explícita de políticas de sustentabilidade ligadas aos ODS, sustentadas por um tripé que combina compromissos ambientais, inovação digital responsável e responsabilidade social. O termo Sustainable Software Engineering foi amplamente utilizado pelos entrevistados para descrever o conjunto de práticas adotadas, que incluem revisões de código com foco em eficiência energética, uso de infraestrutura elástica, componentes desacoplados e reutilizáveis e desligamento de ambientes não utilizados. A Empresa Gama reforça a percepção de que clientes europeus têm exercido

papel ativo como vetores de pressão positiva para adoção dessas políticas, fazendo com que práticas sustentáveis se tornem não apenas exigência interna, mas também diferencial competitivo.

Já na Empresa Delta, a percepção sobre políticas formais de sustentabilidade é mais difusa. Os entrevistados não citaram uma diretriz global estruturada, mas relataram diversas ações sistematizadas em torno de sustentabilidade técnica, especialmente no contexto do Innovation Studio. O fato de a empresa ter recebido a certificação internacional EcoVadis reforça a existência de parâmetros institucionais de sustentabilidade, ainda que não sejam percebidos pelos times como diretrizes centralizadas e normativas. Apesar disso, os entrevistados descreveram um conjunto robusto de práticas técnicas que decorrem dessas orientações, como refatoração de código assistida por IA, desenvolvimento modular, cloud com auto escalabilidade inteligente e iniciativas voltadas à inclusão digital por meio do modelo híbrido de trabalho. Nesse caso, a sustentabilidade aparece mais como um valor incorporado à cultura de inovação, do que como um manual ou política escrita com imposição formal.

Por fim, a Empresa Ômega foi a única empresa cujo conjunto de entrevistados reconheceu que não há atualmente uma política formal de sustentabilidade digital. Ainda assim, todos os profissionais relataram um ambiente técnico no qual práticas alinhadas à sustentabilidade emergem espontaneamente, impulsionadas por uma cultura orientada à performance e à racionalização de recursos. Práticas como uso de pipelines otimizados, execução seletiva de testes automatizados, desligamento automático de ambientes ociosos e monitoramento contínuo com ferramentas como Grafana e Kepler foram citadas como estratégias aplicadas de forma consistente. Embora não institucionalizadas por uma diretriz específica, essas ações revelam uma maturidade técnica que, na prática, aproxima a empresa de iniciativas sustentáveis. A ausência de uma política escrita não impede a adoção de comportamentos sustentáveis, mas, segundo os próprios entrevistados, dificulta sua padronização e expansão para todos os projetos.

A comparação dos cinco casos mostra que a existência de diretrizes formais contribui significativamente para a consolidação e disseminação de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software, especialmente quando essas diretrizes são integradas aos sistemas de governança técnica e acompanhadas por indicadores específicos. No entanto, o caso da Empresa Ômega – e em certa medida, da Empresa Delta – demonstra que a formalização institucional não é a única via para promover a sustentabilidade digital. A cultura técnica, a pressão de clientes, a autonomia dos squads e a experimentação com boas práticas podem gerar impactos significativos, mesmo na ausência de imposições normativas.

Essa constatação indica que a noção de que a sustentabilidade pode ser institucionalizada tanto por meios normativos (formais e declarados) quanto por caminhos pragmáticos (experimentais e culturais). O que distingue as empresas mais maduras nesse aspecto é sua capacidade de traduzir valores institucionais em decisões técnicas concretas, mobilizando a sustentabilidade como critério real de arquitetura, codificação e operação de sistemas. Assim, as entrevistas revelam um espectro de atuação, no qual as empresas se distribuem conforme sua capacidade de alinhar estratégia, cultura e execução técnica em torno do desenvolvimento de software sustentável.

O próximo aspecto analisado é a percepção sobre sustentabilidade no desenvolvimento de software. Entre as empresas analisadas, há uma consistência geral na associação do conceito de desenvolvimento de software sustentável a processos técnicos específicos, ainda que com variações no grau de formalização e na abrangência com que o tema é incorporado. Empresa Alfa, Empresa Beta e Empresa Gama demonstraram maior maturidade e sistematização, associando o conceito diretamente a processos como arquitetura de soluções, design energético, monitoramento em produção e engenharia de performance. Essas organizações relataram o uso de frameworks internos ou abordagens consolidadas, como “Sustainability by Design”, “Green Innovation” e “Sustainable Software Engineering”, que orientam desde o levantamento de requisitos até a operação contínua das aplicações. Já na Empresa Delta e na Empresa Ômega, o conceito também está presente, porém de forma mais pragmática e emergente, sendo tratado como parte da cultura técnica e inovação – especialmente por meio de práticas como refatoração orientada por IA, modularidade e observabilidade contínua.

Sobre os impactos ambientais, as cinco empresas demonstraram um alto grau de consciência em relação ao consumo energético excessivo de sistemas ineficientes, especialmente em ambientes cloud ou data centers. Foram citadas, com frequência, consequências como a emissão de carbono, uso contínuo e desnecessário de instâncias computacionais, execução redundante de pipelines e builds, e pouca governança sobre os ciclos de processamento. A Empresa Alfa, por exemplo, ressaltou que execuções mal dimensionadas de testes automatizados ou arquiteturas pouco otimizadas podem gerar desperdício significativo de energia. A Empresa Gama e a Empresa Beta enfatizaram a importância de migrar de arquiteturas monolíticas para modelos serverless e baseados em eventos, a fim de reduzir o consumo computacional de recursos. A Empresa Delta, por sua vez, associou explicitamente eficiência técnica à redução da carga ambiental dos sistemas, destacando a escolha de regiões cloud com baixa emissão e infraestrutura otimizada.

No que se refere aos impactos sociais, as empresas reconhecem que softwares mal desenhados podem reforçar desigualdades e acentuar a exclusão digital. Houve convergência nas respostas quanto ao risco de se projetar soluções que demandam dispositivos de ponta, internet de alta velocidade ou que desconsideram padrões de acessibilidade. A Empresa Delta e a Empresa Beta foram além ao destacar o potencial dos algoritmos enviesados, especialmente no uso de IA, para reproduzir injustiças sociais – por exemplo, em sistemas de crédito, educação ou saúde. A Empresa Ômega chamou atenção para a dificuldade de manutenção de sistemas pouco eficientes e mal documentados, o que também gera impacto social ao dificultar a inclusão de novos profissionais e elevar os custos de operação em setores críticos.

Quanto à pressão de clientes e do mercado, o cenário se mostra bastante contrastante. Empresa Alfa, Empresa Beta e Empresa Gama relataram experiências concretas de exigências contratuais formais por parte de clientes – em especial multinacionais dos setores financeiro, energia e automotivo – solicitando métricas de eficiência energética, uso de cloud com certificação de carbono neutro e comprovação de práticas sustentáveis ao longo do desenvolvimento. Os relatos incluem, por exemplo, a exigência de avaliação do “carbon footprint” das soluções propostas, ou mesmo a inclusão de indicadores técnicos de consumo computacional como parte dos entregáveis. Essas exigências vêm ganhando força em licitações e RFPs, o que demonstra que a sustentabilidade está se tornando um diferencial competitivo tangível para essas organizações.

Em contraste, a Empresa Ômega afirmou que ainda não enfrentou pressões formais diretas por parte de clientes, embora já tenha participado de discussões iniciais que tocavam em temas relacionados, como eficiência computacional e footprint digital. A empresa reconhece que o tema tem avançado no discurso técnico, mas ainda carece de exigência sistematizada do mercado. A Empresa Delta apresenta um cenário intermediário: embora sem relatos de exigências contratuais formais com grande frequência, já lidou com clientes – especialmente de setores regulados – que demandaram comprovações de baixo impacto ambiental, uso de componentes reaproveitados e eficiência arquitetural como parte das entregas. Isso mostra que a pressão de mercado existe e tem influenciado decisões técnicas, mesmo que não esteja formalmente institucionalizada em todos os contextos.

No conjunto das respostas, destaca-se que as empresas entrevistadas, embora em diferentes estágios de maturidade, reconhecem que o desenvolvimento de software sustentável não é apenas uma tendência, mas uma necessidade estratégica e técnica. A percepção de que sustentabilidade digital está fortemente associada à excelência arquitetural, à eficiência de recursos e à responsabilidade social já é amplamente compartilhada. Ainda assim, o nível de

apropriação do conceito varia conforme fatores como atuação global, exigências de clientes internacionais, cultura organizacional e autonomia técnica das equipes. Em empresas com diretrizes mais estruturadas, a sustentabilidade se manifesta como parte da engenharia de valor; em empresas mais enxutas ou em transição, ela aparece como extensão natural de uma cultura de eficiência. O Quadro 8 abaixo apresenta um quadro comparativo, que resume a percepção sobre sustentabilidade no desenvolvimento de software nas cinco empresas analisadas.

Essa análise revela que a sustentabilidade no desenvolvimento de software demonstra deixar de ser um discurso abstrato para se tornar uma dimensão mais concreta da engenharia, com impactos em decisões de arquitetura, uso de tecnologia, relação com clientes e responsabilidade social das soluções digitais. Percebe-se, portanto, de uma percepção que está em processo de consolidação, impulsionada tanto por pressões externas quanto por uma nova consciência técnica e organizacional.

Quadro 8 – Percepção sobre Sustentabilidade no Desenvolvimento de Software dos Casos

(continua)

Empresa	Percepção sobre Sustentabilidade	Reconhecimento de Impactos Ambientais	Reconhecimento de Impactos Sociais	Pressão de Clientes/Mercado
Empresa Alfa	Alto grau de formalização; sustentabilidade tratada como componente técnico e estratégico com frameworks aplicados (ex.: Sustainability by Design).	Sim – menciona consumo energético, builds redundantes e impacto em cloud sem governança.	Sim – enfatiza acessibilidade e inclusão como parte da responsabilidade digital.	Alta – clientes exigem comprovação técnica de práticas sustentáveis e uso de energia limpa.
Empresa Beta	Política institucionalizada com metas de carbono neutro e práticas técnicas exigidas desde a concepção dos sistemas; visão integrada aos processos de TI.	Sim – destaca footprint computacional, energia em data centers e execução otimizada.	Sim – alerta para algoritmos enviesados e inclusão em interfaces e conectividade.	Alta – contratos com multinacionais já pedem footprint computacional e eficiência ambiental.

Quadro 8 – Percepção sobre Sustentabilidade no Desenvolvimento de Software dos Casos

(conclusão)

Empresa	Percepção sobre Sustentabilidade	Reconhecimento de Impactos Ambientais	Reconhecimento de Impactos Sociais	Pressão de Clientes/Mercado
Empresa Gama	Sustentabilidade associada à engenharia eficiente; uso de práticas como modularidade e cloud otimizada como parte da abordagem Sustainable Software Engineering.	Sim – aborda eficiência energética em arquitetura e práticas de desligamento automático.	Sim – reconhece riscos sociais em soluções mal projetadas ou com pouca acessibilidade.	Alta – clientes europeus exigem métricas de sustentabilidade nos projetos.
Empresa Delta	Percepção pragmática e orientada à inovação; sem política formal, mas práticas sustentáveis são amplamente disseminadas em squads e projetos modernos.	Sim – relaciona arquitetura técnica à redução de impacto computacional e consumo de nuvem.	Sim – vincula sustentabilidade à inclusão regional e impacto social positivo de modelos híbridos.	Média – pressão pontual, especialmente em clientes regulados e projetos com foco ESG.
Empresa Ômega	Conceito reconhecido tecnicamente, mas não formalizado; práticas sustentáveis emergem de forma espontânea por cultura de performance e racionalização de recursos.	Sim – destaca racionalização de testes e observabilidade para evitar uso desnecessário de infraestrutura.	Sim – ressalta manutenção difícil como barreira à inclusão de novos profissionais.	Baixa – sem exigências formais, mas com indícios de interesse crescente em eficiência digital.

Fonte: Autor

No que diz o respeito ao aspecto das práticas sustentáveis adotadas, observou-se que as práticas sustentáveis no ciclo de vida do desenvolvimento de software têm sido incorporadas de forma progressiva pelas organizações, com diferentes níveis de institucionalização, abrangência e aplicação técnica. A análise das respostas das cinco empresas entrevistadas (Empresa Alfa, Empresa Beta, Empresa Gama, Empresa Delta e Empresa Ômega) revela não apenas a diversidade de iniciativas adotadas, mas também os caminhos distintos que cada

organização trilhou para incluir a sustentabilidade como critério técnico em suas rotinas de engenharia de software. Apesar das variações, o panorama geral indica um movimento comum de amadurecimento em relação à responsabilidade ambiental e social no desenvolvimento de soluções digitais.

Na Empresa Alfa, os entrevistados descreveram um conjunto de práticas sustentáveis implementadas de forma transversal e estruturada ao longo de todas as fases do ciclo de vida do software. Desde a concepção de soluções até a operação em ambiente produtivo, a sustentabilidade é considerada um critério que orienta decisões técnicas. A empresa adota com frequência arquiteturas baseadas em microsserviços, serverless e orientadas a eventos, que favorecem a escalabilidade e o uso racional de recursos computacionais. Além disso, destacam-se práticas como o uso de APIs reutilizáveis, o design modular com foco em reuso, a adoção de containers otimizados e pipelines CI/CD com execução condicional e paralelismo controlado. Ferramentas como Grafana, Prometheus e Kepler são utilizadas para monitorar consumo, carga computacional e footprint energético dos sistemas, permitindo ações corretivas baseadas em dados concretos. Os entrevistados relataram ainda que há incentivo institucional à refatoração contínua, com revisões técnicas pautadas não apenas pela funcionalidade, mas também pelo desempenho energético e pela redução da complexidade estrutural do código.

A Empresa Beta apresenta uma abordagem igualmente robusta, com foco em práticas sustentáveis integradas a um modelo global de entrega. A empresa adota, de forma sistemática, soluções técnicas sustentáveis como instâncias spot, balanceamento de carga inteligente, uso de cloud computing com indicadores ambientais certificados e arquiteturas distribuídas com cache e failover resiliente. A governança técnica incorpora a sustentabilidade como um dos eixos avaliativos, o que significa que os times são orientados a considerar impacto ambiental na especificação de requisitos, escolha de componentes e definição de arquiteturas. Um dos aspectos mais destacados pelos entrevistados da Empresa Beta foi a existência de acordos de nível de serviço (SLAs) que incorporam métricas de sustentabilidade, o que vincula diretamente a entrega técnica a compromissos ambientais assumidos com clientes. Isso confere às práticas sustentáveis um grau elevado de formalização e exigibilidade interna. Além disso, os profissionais relataram a co-criação de dashboards ambientais em colaboração com clientes e stakeholders, permitindo maior visibilidade e rastreabilidade dos impactos computacionais ao longo dos projetos.

A Empresa Gama, por sua vez, demonstrou uma cultura organizacional profundamente alinhada ao conceito de sustentabilidade digital, com práticas técnicas avançadas aplicadas em escala nos projetos. Os entrevistados explicaram que o conceito de Sustainable Software

Engineering é tratado como parte da identidade técnica da empresa, integrando decisões sobre design, desenvolvimento, testes e implantação. São adotadas práticas como green coding, com uso de padrões de codificação voltados à performance e baixo consumo; execução seletiva e modular de testes automatizados; uso de containers leves com configuração mínima de recursos; desligamento automático de ambientes não utilizados; e uso intensivo de infraestrutura como código (IaC) para controle e rastreabilidade do uso de recursos. A Empresa Gama também promove campanhas internas de conscientização como o “Green Tech Mindset” e incentiva a prática de carbon-aware computing, programando tarefas de alta carga para horários ou regiões de menor emissão. Essas práticas demonstram não só uma adesão técnica ao conceito de sustentabilidade, mas também uma estratégia de engajamento cultural interno, que reforça a perenidade dessas ações no cotidiano dos projetos.

Na Empresa Delta, os entrevistados relataram práticas sustentáveis amplamente disseminadas entre as squads, embora com menor formalização do ponto de vista institucional. As ações são guiadas por uma cultura técnica fortemente voltada à modernização digital e à inovação orientada por valor. Entre as práticas mencionadas, destacam-se a refatoração assistida por inteligência artificial, o design modular, o uso de cloud em regiões com baixa emissão de carbono, e pipelines CI/CD otimizados com paralelismo ajustado à criticidade e complexidade dos testes. A empresa também se diferencia pelo uso de dashboards visuais que permitem o acompanhamento em tempo real de métricas relacionadas ao consumo computacional e ao desempenho dos serviços. Os entrevistados mencionaram ainda que a empresa promove hackathons com foco ESG, que estimulam a criação de soluções com baixo impacto ambiental e impacto social positivo, envolvendo não apenas times de desenvolvimento, mas também áreas de produto e inovação. Embora não haja uma política formal de sustentabilidade digital, as práticas relatadas mostram uma apropriação profunda do conceito de sustentabilidade como parte da entrega de valor e da cultura de excelência técnica.

Já a Empresa Ômega apresentou um perfil distinto, caracterizado por uma ausência de diretrizes formais, mas com forte presença de práticas sustentáveis derivadas da cultura de performance e racionalização de recursos. Os entrevistados indicaram que as ações são muitas vezes adotadas espontaneamente pelas equipes, como forma de otimizar entregas, melhorar desempenho e reduzir custos operacionais. Entre as práticas mais citadas estão a execução seletiva de testes automatizados, o uso racional de ambientes cloud, o desligamento programado de recursos ociosos e a refatoração contínua para modularização e reaproveitamento de componentes. As ferramentas utilizadas incluem Grafana, Kepler, JMeter e K6, com foco em monitoramento de desempenho e rastreamento de consumo computacional. A empresa também

demonstrou preocupação com a eficiência na manutenção de sistemas legados, aplicando práticas de clean code, versionamento controlado e padronização técnica. Embora essas ações não estejam oficialmente rotuladas como “práticas sustentáveis”, sua convergência com os princípios da sustentabilidade digital é evidente. O caso da Empresa Ômega mostra que, mesmo em ambientes sem diretrizes formais, a sustentabilidade pode emergir como subproduto legítimo da excelência técnica e da busca contínua por eficiência.

Comparativamente, é possível observar que as cinco empresas adotam práticas sustentáveis em diferentes etapas do ciclo de vida do software, com destaque para as fases de design, desenvolvimento e testes. A formalização varia, mas há um elemento comum em todas elas: a adoção de práticas técnicas que visam reduzir o consumo de recursos, aumentar a eficiência computacional e melhorar a manutenibilidade das soluções. Empresas como Empresa Alfa, Empresa Beta e Empresa Gama se destacam pela capacidade de institucionalizar essas práticas como parte de seus modelos de engenharia e de seus compromissos contratuais com clientes. Já Empresa Delta e Empresa Ômega mostram que a sustentabilidade também pode florescer a partir de culturas técnicas maduras, mesmo sem normatização explícita.

Outro ponto relevante é a diversidade de ferramentas e abordagens adotadas: desde refatoração com suporte de IA até a criação de dashboards e SLAs verdes, passando por automações seletivas, reuso de componentes, desligamento automatizado de ambientes e escolha consciente de regiões cloud com menor impacto ambiental. Esses exemplos reforçam que o desenvolvimento sustentável de software está se consolidando como um campo técnico multidimensional, no qual práticas de engenharia, estratégias organizacionais e compromissos sociais se entrelaçam.

Em síntese, a análise das práticas sustentáveis nas empresas revela um ecossistema em evolução, onde eficiência técnica, responsabilidade ambiental e inovação digital caminham lado a lado. A sustentabilidade deixou de ser um conceito periférico e passou a integrar o centro das discussões técnicas e estratégicas sobre qualidade de software e entrega de valor. Esse cenário aponta para um futuro no qual o desenvolvimento sustentável não será apenas uma opção desejável, mas uma condição necessária para a competitividade, escalabilidade e legitimidade das soluções digitais.

A partir da análise dos dados coletados a partir das entrevistas realizadas foi possível também identificar diversos elementos que, mesmo não sendo diretamente apresentados como facilitadores formais, emergiram nas falas dos entrevistados como fatores que contribuem significativamente para a implementação de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software.

Um dos principais facilitadores mencionados diz respeito ao engajamento das lideranças técnicas e executivas. Nas entrevistas da Empresa Delta, por exemplo, tanto o Head de Inovação quanto o Head de Delivery Management demonstraram alinhamento com os princípios da sustentabilidade e relataram como têm incentivado suas equipes a adotarem arquiteturas mais eficientes, uso de componentes reutilizáveis, cloud computing com menor pegada de carbono, além da disseminação de práticas de desenvolvimento modulares e escaláveis. Essa liderança proativa atua como ponte entre os objetivos organizacionais e as ações cotidianas das equipes, facilitando a tradução de valores institucionais em práticas técnicas concretas.

A presença de ações de capacitação e conscientização internas também surgiu como um elemento chave. A Empresa Gama, por exemplo, relatou programas internos como o “Green Tech Mindset”, enquanto a Empresa Delta mencionou suas academias internas – como a DevTech, AI School e Agile School – nas quais a sustentabilidade é trabalhada em conjunto com práticas de engenharia e inovação. Esses ambientes de aprendizado contínuo não apenas promovem conhecimento técnico, mas também ajudam a consolidar uma cultura organizacional favorável à sustentabilidade.

Outro ponto favorável identificado foi o reconhecimento de benefícios colaterais da sustentabilidade, como aumento de performance, redução de custos operacionais e melhoria na experiência do usuário. Esse aspecto foi especialmente destacado pela Empresa Delta e pela Empresa Beta, que mencionaram ganhos significativos em eficiência computacional e longevidade dos sistemas ao adotar práticas sustentáveis. Quando esses benefícios são percebidos pelos stakeholders como valor agregado ao negócio, a resistência à adoção tende a diminuir, tornando mais fluida a implementação dessas práticas.

Por fim, o modelo de trabalho remoto e híbrido, adotado em larga escala pelas empresas analisadas, foi frequentemente citado como uma prática que, embora tenha surgido por razões logísticas e sanitárias, contribui de maneira indireta mas significativa para a sustentabilidade. Redução de deslocamentos, uso eficiente de infraestrutura física e maior inclusão geográfica foram apontados como efeitos positivos desse modelo, como exemplificado nas respostas da Empresa Ômega, Empresa Gama e Empresa Delta.

Em síntese, a análise indica que a existência de políticas institucionais consistentes, liderança engajada, capacitação técnica, uso de ferramentas de apoio e percepção de valor agregado formam um ecossistema favorável para a promoção de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software. A percepção é de que esses elementos, quando combinados, criam um ambiente organizacional propício à internalização da sustentabilidade como um valor

técnico e estratégico, indo além do cumprimento de diretrizes e figurando-se como um diferencial competitivo e de inovação.

Por outro lado, no que diz respeito aos desafios e barreiras enfrentados, a análise com base nos dados coletados das entrevistas revelaram que, embora as empresas tenham avançado na adoção de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software, há uma série de obstáculos persistentes que dificultam a disseminação e a consolidação dessas práticas. As barreiras se distribuem em três eixos principais: técnicos, culturais e operacionais/financeiros, sendo frequentemente interdependentes.

Do ponto de vista técnico, um ponto comum entre todas as organizações foi a falta de ferramentas integradas e acessíveis para mensuração do impacto ambiental das decisões de engenharia. Os entrevistados da Empresa Alfa destacaram a ausência de soluções DevOps que permitam visualizar, em tempo real, o consumo energético ou a pegada de carbono de um pipeline, o que dificulta a tomada de decisão orientada por dados. A Empresa Beta, por sua vez, mencionou limitações de bibliotecas e frameworks que não oferecem suporte nativo à medição de sustentabilidade, além da falta de padronização sobre como essas métricas deveriam ser integradas aos dashboards técnicos. A Empresa Gama relatou a mesma carência no mercado de ferramentas, observando que poucas plataformas de desenvolvimento oferecem indicadores ambientais de forma embarcada. Na Empresa Delta, o desafio técnico se manifesta na dificuldade de incorporar métricas de eficiência energética nos fluxos de entrega ágil, especialmente porque muitos times operam com pipelines contínuos e modularizados, nos quais os dados de consumo são fragmentados ou inexistentes. A Empresa Ômega também confirmou essa limitação, apontando que, apesar de usar ferramentas como Grafana e Kepler, elas não oferecem dados refinados sobre o impacto ambiental específico de cada prática de codificação ou decisão arquitetural.

As barreiras culturais revelam-se como um obstáculo igualmente complexo. Em empresas como a Empresa Alfa e a Empresa Beta, mesmo com políticas institucionais bem estabelecidas, os entrevistados reconheceram que a sustentabilidade muitas vezes é vista por desenvolvedores e gestores como um custo extra, ou ainda como uma demanda associada à área de compliance e não à engenharia. Essa dissociação dificulta o engajamento ativo das equipes técnicas. A Empresa Gama apontou que há pouca clareza entre desenvolvedores sobre o impacto que suas decisões de codificação podem ter na eficiência energética, o que limita a iniciativa em adotar práticas mais sustentáveis. Já na Empresa Delta, os entrevistados relataram que muitas squads enxergam a sustentabilidade como uma preocupação secundária, especialmente quando há pressão por entregas rápidas ou quando os KPIs estabelecidos não

incluem métricas ambientais. A Empresa Ômega indicou que, embora exista uma cultura de performance consolidada, há ainda falta de familiaridade dos profissionais com os impactos ambientais das práticas cotidianas, como o uso excessivo de logs, execuções redundantes ou manutenção de ambientes ociosos, o que contribui para o distanciamento entre intenção e prática.

No eixo operacional e financeiro, emergem desafios relacionados ao trade-off entre sustentabilidade e velocidade de entrega. Os entrevistados da Empresa Alfa relataram que a pressão por time-to-market e a ausência de KPIs claros de sustentabilidade tornam difícil justificar, em termos de negócio, o esforço extra necessário para adotar práticas sustentáveis, especialmente quando o retorno não é imediato. Na Empresa Beta, essa tensão também foi mencionada, com destaque para projetos em que as decisões técnicas sustentáveis foram preteridas por conta de cronogramas apertados e escopo inflexível. A Empresa Gama apontou que, mesmo com o interesse técnico, clientes nem sempre estão dispostos a arcar com os custos ou a esperar pelo tempo adicional necessário para implementar arquiteturas mais sustentáveis, o que frequentemente força a empresa a adiar práticas como uso de cloud functions ou refatoração extensiva. A Empresa Delta reforçou esse ponto, relatando que a modularização e o reuso, embora tecnicamente desejáveis, são frequentemente substituídos por entregas pontuais e imediatas em função das prioridades comerciais. Na Empresa Ômega, as práticas sustentáveis são muitas vezes consideradas não prioritárias, especialmente em projetos de manutenção corretiva ou de resposta rápida, nos quais o foco está em restaurar a operação e não em reestruturar componentes para torná-los mais eficientes.

As entrevistas também revelaram exemplos concretos de práticas sustentáveis que foram planejadas, mas não implementadas, justamente devido às barreiras acima descritas. Um entrevistado da Empresa Alfa citou que a proposta de adoção de uma arquitetura serverless em um grande projeto bancário foi descartada por resistência da equipe do cliente, que não possuía familiaridade com esse modelo. Situação semelhante foi relatada pela Empresa Beta, em que a proposta de adoção de funções serverless em um projeto de varejo foi recusada pela governança técnica interna devido a riscos percebidos. A Empresa Gama compartilhou que uma arquitetura com cloud functions planejada para um cliente do setor financeiro foi postergada porque a equipe do cliente receava perder controle sobre o processamento em nuvem. Na Empresa Delta, um projeto que inicialmente previa o uso de edge computing foi redesenhado por desconhecimento técnico dos decisores do cliente. Por fim, a Empresa Ômega relatou que a proposta de adotar eventos assíncronos com serverless em um sistema de back-end foi abandonada devido à curva de aprendizado e à necessidade de previsibilidade operacional.

O Quadro 9 apresenta um resumo dos principais desafios e barreiras enfrentados por cada uma das cinco empresas analisadas para a implementação de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software.

De forma geral, a análise aponta que, embora o discurso sobre sustentabilidade esteja avançado, sua materialização em práticas cotidianas ainda enfrenta obstáculos significativos. Há uma convergência entre as empresas no reconhecimento de que ferramentas inadequadas, cultura técnica resistente e prioridades comerciais tradicionais são barreiras recorrentes à sustentabilidade digital. A superação desses desafios requer não apenas soluções tecnológicas, mas também ajustes na cultura organizacional, nos modelos de incentivo e nas estruturas contratuais com clientes. O alinhamento entre valor técnico, valor de negócio e responsabilidade socioambiental ainda é uma jornada em construção – e os exemplos analisados oferecem um retrato significativo dessa transição.

Quadro 9 – Desafios e Barreiras para Implementação de Práticas Sustentáveis

(continua)

Empresa	Desafios Técnicos	Desafios Culturais	Desafios Operacionais / Financeiros	Exemplo de Prática Não Implementada
Empresa Alfa	Falta de ferramentas DevOps integradas para medição de consumo energético.	Sustentabilidade vista como custo extra ou tema de compliance.	Pressão por time-to-market e falta de KPIs sustentáveis.	Arquitetura serverless abandonada por falta de experiência do cliente.
Empresa Beta	Limitações de bibliotecas e frameworks para medir impacto ambiental.	Associada mais à conformidade do que à engenharia técnica.	Trade-off entre otimização técnica e prazos rígidos de entrega.	Funções serverless recusadas por riscos de governança técnica.
Empresa Gama	Falta de ferramentas com métricas ambientais integradas às plataformas.	Pouca clareza sobre o impacto do código na eficiência energética.	Escopo fechado e prazos curtos limitam refatorações sustentáveis.	Cloud functions postergadas por receio de perda de controle.
Empresa Delta	Dificuldade de integrar métricas energéticas nos pipelines contínuos.	Percepção de que sustentabilidade é secundária aos KPIs.	Entrega funcional imediata pretere modularização e reuso.	Uso de edge computing descartado por desconhecimento técnico do cliente.

Quadro 9 – Desafios e Barreiras para Implementação de Práticas Sustentáveis

(conclusão)

Empresa	Desafios Técnicos	Desafios Culturais	Desafios Operacionais / Financeiros	Exemplo de Prática Não Implementada
Empresa Ômega	Falta de ferramentas específicas para rastrear o impacto digital do código.	Desconhecimento sobre implicações ambientais das decisões técnicas.	Falta de priorização por retorno não imediato das práticas sustentáveis.	Serverless com eventos assíncronos não adotado por curva de aprendizado.

Fonte: Autor

No que tange a influência das metodologias ágeis na adoção de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software, observou-se uma percepção amplamente positiva por parte dos entrevistados quanto à capacidade das metodologias ágeis de favorecer a introdução de práticas sustentáveis ao longo do ciclo de desenvolvimento de software. A maioria dos profissionais destacou que a natureza iterativa e incremental da agilidade, com ciclos curtos de entrega e espaço para revisões constantes, cria oportunidades para inserir melhorias técnicas relacionadas à eficiência computacional, modularidade e reuso de código. Isso se alinha diretamente à proposta das práticas sustentáveis, que requerem ajustes contínuos e decisões orientadas ao impacto técnico e ambiental.

A Empresa Alfa, por exemplo, destacou que o mindset ágil permite inspeção e adaptação contínua, o que favorece a incorporação de requisitos não funcionais como sustentabilidade nas entregas. Contudo, os entrevistados alertaram que isso só é efetivo quando a cultura ágil está bem sedimentada e o propósito de valor do produto está claramente conectado com o impacto social e ambiental. A ausência dessa maturidade pode levar à priorização exclusiva de entregas rápidas, prejudicando práticas sustentáveis que exigem mais tempo ou refatorações complexas.

De forma semelhante, os profissionais da Empresa Beta afirmaram que as metodologias ágeis influenciam positivamente desde que a sustentabilidade seja entendida como um valor de negócio e critério de qualidade técnica. Essa visão é reforçada pela prática da empresa em inserir histórias técnicas no backlog que contemplam refatorações sustentáveis ou ajustes de arquitetura orientados à eficiência. A organização também tem buscado sensibilizar os Product Owners e Scrum Masters para que a sustentabilidade seja incluída nas definições de pronto ("definition of done") dos produtos digitais.

A Empresa Gama também compartilha essa perspectiva, ao considerar que a agilidade, quando bem aplicada, cria espaço para evolução contínua e introdução de melhorias

sustentáveis em cada sprint. No entanto, os entrevistados ressaltaram que há risco de mau uso da metodologia, especialmente em cenários em que a velocidade de entrega é priorizada em detrimento da qualidade estrutural do código. O papel da liderança técnica é, portanto, decisivo para equilibrar entregas incrementais com ações de longo prazo, como modularização, eficiência energética e reuso arquitetural.

Na Empresa Delta, a agilidade é considerada uma alavanca importante para disseminar práticas sustentáveis, sobretudo porque a empresa atua com estruturas de times autônomos e inovação contínua. Os entrevistados relataram que refatorações e melhorias de performance são tratadas como entregas de valor, e que há um esforço deliberado para incluir sustentabilidade como dimensão da qualidade técnica. Ainda assim, reconhecem que o mindset ágil pode ser mal interpretado por algumas lideranças, resultando em sprints voltados apenas ao "funcional", o que dificulta a priorização de práticas mais estruturantes.

Já na Empresa Ômega, os profissionais também veem as metodologias ágeis como potencializadoras da sustentabilidade, desde que os times tenham maturidade suficiente para encaixar essas preocupações no backlog e nas prioridades de entrega. A empresa relatou casos em que histórias técnicas foram criadas com o objetivo de reorganizar pipelines de integração contínua para reduzir builds redundantes – uma ação de impacto direto na sustentabilidade digital. Por outro lado, reforçaram que quando o ágil é reduzido a "só entregar rápido", os impactos negativos se acumulam, tanto em termos de consumo de recursos quanto em débitos técnicos difíceis de mitigar posteriormente.

Em síntese, os relatos convergem para a ideia de que a agilidade pode ser uma aliada da sustentabilidade, mas isso depende fortemente da forma como é aplicada. Em contextos com baixa maturidade ágil, a pressão por entregas imediatas pode gerar negligência com aspectos estruturais do software. Já em ambientes que compreendem o papel estratégico das metodologias ágeis, há espaço para planejar e executar ações sustentáveis com consistência, sem comprometer a entrega de valor. O papel da liderança, dos POs e da governança de times é decisivo para consolidar essa integração entre agilidade e responsabilidade ambiental no desenvolvimento de software.

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Referente as práticas sustentáveis propostas para o desenvolvimento de software, foi possível observar ao avaliar os modelos existentes diferentes abordagens e propostas para o desenvolvimento de software verde e sustentável. No geral, esses frameworks possibilitam promover o desenvolvimento de software verde e sustentável, considerando aspectos como ciclo de vida do software, critérios de sustentabilidade, maturidade ágil e integração da sustentabilidade em diferentes fases do processo de desenvolvimento. Contudo observa-se nesses modelos uma certa falta de aprofundamento nos aspectos sociais e humanos do desenvolvimento de software verde e sustentável, como por exemplo:

- a) Impacto na qualidade de vida dos usuários: como o desenvolvimento de software verde pode contribuir para a melhoria da qualidade de vida dos usuários? Isso poderia envolver a consideração de aspectos como usabilidade, acessibilidade, segurança e privacidade dos sistemas de software.
- b) Inclusão social: como garantir que o desenvolvimento de software verde leve em consideração as necessidades e realidades de diferentes grupos sociais, incluindo pessoas com deficiência, comunidades marginalizadas e países em desenvolvimento? Isso pode envolver a adaptação de software para diferentes contextos culturais e socioeconômicos, além de garantir a acessibilidade para todos.
- c) Ética e responsabilidade social: quais são as considerações éticas e responsabilidades sociais dos desenvolvedores de software verde? Isso pode incluir a avaliação dos impactos sociais e éticos do software, como o uso de dados pessoais, vieses algorítmicos e questões relacionadas à segurança cibernética.
- d) Participação e engajamento dos usuários: como envolver os usuários no processo de desenvolvimento de software verde e sustentável? Isso pode incluir a cocriação de soluções, a incorporação de feedback dos usuários e a promoção da conscientização sobre a importância da sustentabilidade no uso de software.

Ao abordar esses aspectos sociais e humanos, os modelos poderiam fornecer uma visão mais abrangente do desenvolvimento de software verde e sustentável, considerando não apenas os aspectos ambientais e econômicos, mas também seu impacto nas pessoas e na sociedade em geral.

A literatura destaca que a institucionalização de práticas sustentáveis está fortemente associada à existência de diretrizes claras e alinhamento entre governança organizacional e engenharia de software (Naumann *et al.*, 2011; Calero *et al.*, 2013). Os resultados desta

pesquisa confirmam esse ponto, uma vez que as empresas Alfa, Beta e Gama demonstraram elevada integração entre políticas institucionais e a aplicação de práticas sustentáveis. Tal alinhamento foi menos evidente nas empresas Delta e Ômega, que apesar da ausência de diretrizes formais, demonstraram comportamentos alinhados com os princípios da sustentabilidade.

Com base nas práticas sustentáveis identificadas nas cinco empresas analisadas (Empresa Alfa, Empresa Beta, Empresa Gama, Empresa Delta e Empresa Ômega), é possível estabelecer um paralelo interpretativo entre essas práticas e os principais modelos teóricos para desenvolvimento de software sustentável, conforme discutido na literatura.

As práticas adotadas pela Empresa Alfa, com sua abordagem formalizada e transversal à sustentabilidade, demonstram um grau elevado de alinhamento com o modelo GREENSOFT, especialmente no que tange ao tratamento do ciclo de vida de forma holística. A empresa aplica práticas sustentáveis desde o design até a operação, como o uso de APIs reutilizáveis, containers otimizados e observabilidade contínua, o que dialoga diretamente com a proposta do GREENSOFT de pensar a sustentabilidade “do berço ao túmulo”. Além disso, o uso de métricas e ferramentas de monitoramento energético (como Kepler e Prometheus) reflete a preocupação com indicadores técnicos de sustentabilidade, outro ponto forte do modelo de Naumann *et al.* (2011). Da mesma forma, a aplicação de práticas técnicas guiadas por diretrizes institucionais demonstra uma abordagem compatível com os níveis avançados de maturidade previstos no modelo SSCF (Sustainable Software Capability Framework), evidenciando a Empresa Alfa como uma organização em estágio de liderança em sustentabilidade digital.

A Empresa Beta também apresenta práticas que se alinham fortemente ao GREENSOFT, com ações distribuídas ao longo de todo o ciclo de vida e foco explícito em sustentabilidade desde o planejamento. Sua ênfase na arquitetura modular, uso de instâncias spot, cache distribuído e políticas de cloud sustentável permite traçar paralelos com o Green Cloud Framework, de Chauhan e Saxena, que aponta a importância do design técnico aliado à escolha de infraestrutura cloud para redução do consumo energético. O uso de SLAs que incluem parâmetros ambientais – os chamados green SLAs – é uma aplicação prática direta da proposta desse modelo, que enfatiza a relação entre contrato de serviço e eficiência energética. A co-criação de dashboards ambientais, mencionada pelos entrevistados, remete à abordagem participativa do Sustainability Framework de Oyedele, Seffah e Penzenstadler (2018), pois busca envolver diferentes partes interessadas na mensuração e melhoria da sustentabilidade ao longo do SDLC.

A Empresa Gama, por sua vez, adota uma abordagem que se encaixa de maneira particularmente clara na proposta de Análise Verde, conforme sugerida por Mahmoud e Ahmad. A empresa aplica a execução seletiva de testes, green coding, desligamento de ambientes ociosos e automação consciente com base no footprint computacional. Tais práticas ilustram a ideia de avaliar a eficiência energética de cada incremento do software, o que caracteriza o estágio de “análise verde” dentro do ciclo de vida. A adoção de práticas como carbon-aware computing – ou seja, decisões sobre quando e onde executar determinadas cargas – é um exemplo claro de como o impacto ambiental é levado em consideração em decisões técnicas de baixo nível. Além disso, campanhas como “Green Tech Mindset” refletem uma preocupação em internalizar o pensamento sustentável, conectando-se ao aspecto educacional e cultural presente em frameworks como o GREENSOFT e o SSCF.

Já a Empresa Delta, mesmo não possuindo uma política formal estruturada, apresenta práticas sustentáveis que demonstram um alinhamento natural com componentes dos cinco modelos teóricos, ainda que de maneira não sistematizada. O uso de refatoração assistida por IA, design modular, otimização de pipelines e escolha consciente de infraestrutura cloud se aproxima do enfoque do Green Cloud Framework e da Análise Verde, mesmo sem formalização explícita. Os hackathons com foco ESG e a criação de dashboards de consumo sugerem uma abertura à incorporação de metas, conceitos e métodos sustentáveis, tal como preconizado pelo Sustainability Framework derivado do SDLC. O caso da Compass reforça que, mesmo sem estrutura formal, empresas com forte cultura de inovação e modernização técnica podem atingir resultados compatíveis com os frameworks de sustentabilidade, especialmente nos níveis intermediários do modelo SSCF.

A Empresa Ômega representa um caso interessante de aderência parcial aos modelos, sem a mediação de políticas institucionais. As práticas adotadas – como execução seletiva de testes, desligamento automatizado de ambientes e foco em observabilidade com ferramentas como Grafana e Kepler – são coerentes com as recomendações do modelo GREENSOFT, especialmente no que se refere ao uso e operação de software de maneira racional. Embora a Empresa Ômega não possua um estágio explícito de Análise Verde, o ciclo de refatoração continua adotado pelos times revela uma sensibilidade à eficiência energética. A empresa também se aproxima das camadas iniciais do modelo de maturidade SSCF, operando práticas sustentáveis de forma ad hoc, mas com alto potencial de estruturação e escalonamento. A adoção espontânea dessas práticas indica que a cultura técnica, mesmo sem diretriz formal, pode convergir para os princípios preconizados nos modelos acadêmicos.

Em relação ao uso de métricas e indicadores, todas as empresas relataram algum tipo de monitoramento técnico, embora apenas Empresa Alfa, Empresa Beta e Empresa Gama tenham relatado o uso sistemático de ferramentas para mensuração de consumo e eficiência, como proposto pelos modelos GREENSOFT, SSCF e Green Cloud. Esses três casos demonstram maior alinhamento com frameworks que enfatizam não apenas as práticas, mas também a quantificação dos impactos ambientais das decisões de engenharia. Isso é particularmente importante quando se considera que, na literatura, a mensuração é um dos pilares para evolução da maturidade e para a prestação de contas junto a stakeholders internos e externos.

O Quadro 10 abaixo apresenta um quadro comparativo relacionando as práticas sustentáveis observadas nas cinco empresas com os modelos teóricos de desenvolvimento de software sustentável abordados nessa pesquisa.

Quadro 10 – Alinhamento das Práticas observadas nas Empresas e os Modelos de Sustentabilidade

Empresa	Modelos com Maior Alinhamento	Práticas Correspondentes
Empresa Alfa	GREENSOFT, SSCF	Ciclo de vida completo, modularidade, APIs reutilizáveis, containers otimizados, monitoramento energético.
Empresa Beta	GREENSOFT, Green Cloud Framework, SSCF	Arquitetura modular, instâncias spot, SLAs verdes, dashboards ambientais, co-criação com stakeholders.
Empresa Gama	Análise Verde, GREENSOFT	Green coding, execução seletiva de testes, containers leves, carbon-aware computing, desligamento automático.
Empresa Delta	Green Cloud Framework, Sustainability Framework	Refatoração por IA, pipelines otimizados, cloud com baixa emissão, hackathons ESG, dashboards de consumo.
Empresa Ômega	GREENSOFT, SSCF (nível inicial)	Execução seletiva de testes, desligamento automático, observabilidade, automação orientada à performance.

Fonte: Autor

A Empresa Gama destacou-se ainda por adotar práticas relacionadas à Análise Verde (Green Analysis), conforme proposto por Mahmoud e Ahmad (2013), com decisões técnicas orientadas por footprint computacional e carbon-aware computing. As práticas emergentes de Delta e Ômega se alinham parcialmente ao Green Cloud Framework, demonstrando que mesmo sem diretrizes formais é possível operar com valores sustentáveis.

Podemos concluir de forma geral que ao confrontar as práticas observadas com os modelos teóricos, nota-se elevada convergência com o GREENSOFT Model (Naumann *et al.*,

2011), principalmente nas organizações Alfa, Beta e Gama. Essas empresas adotam uma visão holística do ciclo de vida, com monitoramento técnico e uso de ferramentas como Grafana, Prometheus e Kepler, alinhando-se aos princípios de mensuração e controle do impacto ambiental. Também se percebe aderência ao SSCF (Sustainable Software Capability Framework), nos estágios mais avançados de maturidade.

O Quadro 4, originalmente desenvolvida com base na literatura, foi expandida para incorporar os achados empíricos obtidos nas entrevistas com os profissionais das cinco empresas analisadas, resultando no Quadro 11 apresentada abaixo. Através dela conseguimos consolidar uma visão de como as práticas sustentáveis são percebidas e aplicadas em cada fase do ciclo de vida do desenvolvimento de software pelos casos estudados, integrando assim teoria e prática organizacional.

Quadro 11 – Práticas Sustentáveis por Fase do SDLC com Evidência Empírica

(continua)

Fase do Ciclo de Desenvolvimento	Prática	Fontes	Empresas que Adotam	Nível de Adoção
Análise de Requisitos	Coleta de Requisitos Ecoeficientes	Shenoy e Eeratta (2011); Agarwal, Nath e Chowdhury (2012)	Beta	Média
Análise de Requisitos	Engajamento das Partes Interessadas	Shenoy e Eeratta (2011); Mahmoud e Ahmad (2013)	Delta	Baixa
Design do Sistema	Design Energicamente Eficiente	Naumann <i>et al.</i> (2011); Penzenstadler <i>et al.</i> (2013)	Alfa, Beta, Delta	Alta
Design do Sistema	Arquitetura Sustentável	Naumann <i>et al.</i> (2011); Chauhan e Saxena (2013)	Alfa, Beta	Alta
Design do Sistema	Reusabilidade e Modularização	Sriraman e Raghunathan (2023); Oyediji, Seffah e Penzenstadler (2018)	Delta, Ômega	Média
Codificação	Codificação Verde	Naumann <i>et al.</i> (2011); Mahmoud e Ahmad (2013)	Alfa, Delta, Ômega	Alta
Codificação	Uso de Ferramentas Sustentáveis	Williams, Rubin e Cohn (2010); Raisian <i>et al.</i> (2016)	Beta, Gama	Média
Codificação	Controle de Versão e Documentação	Williams, Rubin e Cohn (2010); Raisian <i>et al.</i> (2016)	Ômega	Baixa
Testes	Teste Automatizado	Sriraman e Raghunathan (2023); Chauhan e Saxena (2013)	Gama, Ômega	Alta

Quadro 11 – Práticas Sustentáveis por Fase do SDLC com Evidência Empírica

(conclusão)				
Fase do Ciclo de Desenvolvimento	Prática	Fontes	Empresas que Adotam	Nível de Adoção
Testes	Teste Energicamente Eficiente	Naumann <i>et al.</i> (2011); Mahmoud e Ahmad (2013); Sriraman e Raghunathan (2023)	Gama, Ômega	Alta
Testes	Teste Abrangente	Chauhan e Saxena (2013); Sriraman e Raghunathan (2023)	Beta	Média
Implantação	Implantação Eficiente	Sriraman e Raghunathan (2023); Mahmoud e Ahmad (2013)	Beta, Gama	Média
Implantação	Soluções Baseadas em Nuvem	Chauhan e Saxena (2013); Oyedeji, Seffah e Penzenstadler (2018)	Alfa, Gama	Média
Implantação	Treinamento	Naumann <i>et al.</i> (2011); Oyedeji, Seffah e Penzenstadler (2018)	Delta	Baixa
Manutenção	Monitoramento Proativo	Mahmoud e Ahmad (2013); Sriraman e Raghunathan (2023)	Alfa, Beta, Gama	Alta
Manutenção	Planejamento de Fim de Vida	Chauhan e Saxena (2013); Penzenstadler <i>et al.</i> (2013)	Não verificado	Baixa
Práticas independentem de fase	Equipes Sustentáveis	Dick <i>et al.</i> (2013); Oyedeji, Seffah e Penzenstadler (2018)	Gama, Ômega	Média
Práticas independentem de fase	Métricas e Relatórios	Dick <i>et al.</i> (2013); Naumann <i>et al.</i> (2011)	Alfa, Beta, Gama	Alta

Fonte: Autor

Essa integração entre os modelos teóricos e a realidade organizacional revela que, apesar de muitas práticas sustentáveis estarem sendo aplicadas, sua distribuição não é homogênea entre as fases do ciclo de vida. O maior foco está nas fases técnicas (desenvolvimento, testes e operação), com menor incidência em requisitos e design participativo, o que sugere oportunidades de avanço na incorporação plena dos princípios da sustentabilidade desde os estágios iniciais do SDLC.

Embora os modelos teóricos reconheçam a importância da sustentabilidade social (Oyedeji; Seffah; Penzenstadler, 2022), a maioria das práticas observadas nas empresas está centrada na eficiência energética e na performance técnica. Acessibilidade, inclusão e ética

computacional são abordadas de forma marginal, indicando que a dimensão humana da sustentabilidade ainda é pouco operacionalizada nas organizações analisadas. Essa lacuna também é apontada por Calero *et al.* (2013), que defendem a ampliação dos frameworks para incorporar aspectos sociais. A maioria das práticas relatadas está centrada na eficiência energética e na modularidade técnica, com poucas menções diretas a questões como acessibilidade, ética no uso de dados, inclusão digital ou participação ativa dos usuários no processo de design sustentável. Nesse sentido, os modelos teóricos também demonstram essa carência, como apontado na literatura: apesar de robustos do ponto de vista técnico-ambiental, ainda carecem de aprofundamento quanto às dimensões humanas da sustentabilidade. A exceção parcial é o Sustainability Framework de Oyediji, Seffah e Penzenstadler (2018), que propõe maior engajamento dos usuários e incorporação de princípios do manifesto de Karlskrona, mas cuja aplicação prática não foi observada com ênfase nos casos estudados.

Essa análise revela, portanto, que há um nível significativo de convergência entre a prática organizacional e os modelos acadêmicos, especialmente nas dimensões técnicas e ambientais do desenvolvimento de software sustentável. No entanto, também evidencia que a adoção plena dos frameworks teóricos requer um amadurecimento adicional das empresas no tratamento das dimensões sociais da sustentabilidade, como ética, inclusão, acessibilidade e participação dos usuários no design dos sistemas. Tais dimensões representam a próxima fronteira para a evolução da sustentabilidade no desenvolvimento de software, e devem ser contempladas tanto em futuras práticas organizacionais quanto em revisões e extensões dos modelos existentes.

A literatura sugere que a liderança técnica, a capacitação interna e a percepção de valor são elementos críticos para a consolidação de uma cultura de sustentabilidade (Penzenstadler *et al.*, 2014; Becker *et al.*, 2016). Os dados desta pesquisa confirmam esses achados: os programas "Green Tech Mindset" (Gama) e academias internas (Delta) exemplificam os mecanismos de formação cultural, enquanto a liderança proativa das empresas se mostrou decisiva para traduzi-los em prática.

A existência de barreiras técnicas, culturais e operacionais é amplamente documentada (Calero *et al.*, 2013; Dick *et al.*, 2010). Os resultados empíricos confirmam essas barreiras: desde a falta de ferramentas para medição ambiental (GREENSOFT), passando pela resistência cultural a mudanças, até a dificuldade de justificar o investimento em sustentabilidade frente à pressão por entregas rápidas. A própria rejeição de propostas de arquitetura serverless, relatada por Alfa e Beta, reforça esse ponto.

Penzenstadler *et al.* (2013) e Calero *et al.* (2013) sugerem que a agilidade pode ser compatível com sustentabilidade, desde que haja alinhamento de propósito. As empresas entrevistadas confirmam esse ponto ao relatar que metodologias ágeis facilitam a inserção incremental de melhorias sustentáveis, especialmente quando há maturidade nos times e visão de longo prazo. No entanto, o uso inadequado da agilidade também pode reforçar práticas insustentáveis, como entregas técnicas apressadas e código de baixa qualidade, se os valores da sustentabilidade não estiverem integrados à cultura do time.

O confronto entre os achados empíricos e a literatura mostra que há avanços significativos na incorporação de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software, em especial nas dimensões técnica e ambiental. As empresas que adotam frameworks institucionais e instrumentos de medição têm maior maturidade e capacidade de evoluir nessas práticas. Por outro lado, persiste a necessidade de evoluir no tratamento da sustentabilidade social e de superar barreiras operacionais que dificultam a institucionalização plena da sustentabilidade como valor estratégico, técnico e organizacional.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou investigar, a partir de uma abordagem qualitativa de múltiplos casos, os principais desafios, barreiras e facilitadores para a incorporação de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software em organizações atuantes no Brasil. A motivação para esta pesquisa surgiu diante da crescente urgência global em torno da sustentabilidade, que vem exigindo mudanças estruturais em diversos setores produtivos, incluindo o setor de tecnologia da informação e, mais especificamente, a engenharia de software. Reconhecendo que o software é, ao mesmo tempo, um produto e um processo que impacta dimensões ambientais, sociais e econômicas, este trabalho procurou lançar luz sobre como as empresas vêm lidando com a inclusão desses valores em seus processos de desenvolvimento.

Com base na análise aprofundada dos dados empíricos e na triangulação com os modelos teóricos, pode-se afirmar que os objetivos propostos nesta pesquisa foram plenamente atingidos. A investigação permitiu identificar e compreender os principais desafios enfrentados pelas organizações na incorporação de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software, respondendo de forma substancial à questão de pesquisa proposta. Os resultados obtidos oferecem uma visão abrangente e detalhada do fenômeno, contemplando tanto os entraves que limitam o avanço da sustentabilidade nas empresas quanto os elementos que a favorecem, além de identificar práticas já em uso que contribuem direta ou indiretamente para esse propósito.

A análise dos casos estudados revelou que a incorporação da sustentabilidade ao desenvolvimento de software ainda ocorre de forma não homogênea e, em muitos contextos, desarticulada. Embora todas as empresas participantes tenham reconhecido a importância do tema e relatado iniciativas pontuais ou estruturadas relacionadas à sustentabilidade, os níveis de maturidade variaram substancialmente. Enquanto algumas organizações demonstraram ações mais sistemáticas e alinhadas a diretrizes institucionais, outras apresentaram um estágio mais inicial, com práticas isoladas e dependentes do engajamento de indivíduos ou equipes específicas. Tal heterogeneidade reforça a natureza emergente da sustentabilidade no campo da engenharia de software e evidencia a ausência de uma abordagem consolidada e universalmente adotada pelas organizações brasileiras.

As empresas com forte atuação global, como Empresa Alfa, Empresa Beta e Empresa Gama, mostraram-se mais avançadas na adoção de políticas corporativas de ESG, refletindo compromissos assumidos em suas matrizes internacionais. Essas organizações relataram a existência de metas de sustentabilidade vinculadas a indicadores de desempenho, uso de ferramentas para mensuração de consumo energético, metodologias internas voltadas para o

design sustentável de sistemas, e iniciativas voltadas à eficiência computacional de soluções digitais, especialmente em contextos de cloud computing. As respostas obtidas sugerem que, nesses casos, há uma articulação mais clara entre os objetivos institucionais e as práticas operacionais, mesmo que nem sempre tais práticas estejam diretamente vinculadas a frameworks específicos da engenharia de software sustentável.

Por outro lado, organizações como a Empresa Delta e a Empresa Ômega, apesar de não possuírem políticas formais tão estruturadas quanto as multinacionais, apresentaram importantes esforços autônomos, baseados na cultura técnica, na inovação descentralizada e na autonomia dos times. Nessas empresas, a sustentabilidade aparece como atributo técnico associado à qualidade do código, à eficiência dos sistemas e à busca por redução de desperdícios operacionais, mesmo que muitas dessas ações não estejam institucionalizadas ou formalmente reconhecidas como “práticas sustentáveis”. Isso demonstra que, mesmo na ausência de diretrizes organizacionais formais, é possível avançar na construção de soluções mais eficientes e alinhadas a valores sustentáveis, desde que existam espaço para experimentação, apoio das lideranças e uma cultura de melhoria contínua.

Um dos principais méritos desta pesquisa foi a identificação de um conjunto amplo de práticas já utilizadas pelas empresas que contribuem, direta ou indiretamente, para a sustentabilidade no desenvolvimento de software. Entre essas práticas, destacam-se: modularização e reutilização de componentes; desligamento programado de ambientes ociosos; uso de arquiteturas escaláveis (como microsserviços e serverless); otimização de pipelines e automação de testes; refatoração contínua com foco em eficiência; uso de ferramentas de observabilidade para análise de consumo computacional; e aproveitamento da elasticidade da nuvem para alocar recursos conforme demanda. Muitas dessas práticas estão alinhadas com os princípios dos frameworks GREENSOFT, Green Cloud Framework e SSCF, mesmo que as empresas não os referenciem diretamente.

Em contrapartida, a pesquisa também evidenciou barreiras significativas que dificultam a consolidação da sustentabilidade como valor transversal nas organizações. A primeira delas é de natureza técnica: a ausência de métricas padronizadas, a dificuldade de quantificação do impacto ambiental do software, a escassez de ferramentas integradas às esteiras DevOps que permitam capturar indicadores sustentáveis em tempo real e a baixa oferta de plataformas educacionais que ofereçam formação em sustentabilidade para profissionais técnicos. Tais lacunas revelam a necessidade de avanços tanto na pesquisa científica quanto na indústria, a fim de tornar a sustentabilidade mais mensurável e operacionalizável nos ciclos de desenvolvimento.

A segunda barreira diz respeito à cultura organizacional. Observou-se que muitas equipes ainda compreendem a sustentabilidade como um tema alheio às suas responsabilidades diretas, delegando-a a áreas ambientais ou institucionais. Essa visão fragmentada impede que a sustentabilidade seja integrada como um requisito não funcional, ao lado de atributos como desempenho, segurança, manutenibilidade ou escalabilidade. A superação dessa limitação exige um trabalho de conscientização contínuo, aliado à reformulação das métricas de sucesso em projetos de software, de forma a incluir impactos ambientais e sociais entre os critérios de aceitação.

A terceira barreira refere-se aos fatores operacionais e comerciais. A pressão por entregas rápidas, o conservadorismo de alguns clientes e a ausência de SLAs voltados à sustentabilidade reduzem o incentivo das empresas para investir em práticas sustentáveis no curto prazo. Além disso, a percepção equivocada de que a sustentabilidade acarreta aumento de custos precisa ser desconstruída por meio de estudos de caso, indicadores de eficiência e demonstrações de que práticas sustentáveis podem gerar economias e agregar valor à solução.

Diante desse cenário, esta pesquisa conclui que a incorporação de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software é um processo ainda em construção nas empresas brasileiras, permeado por avanços importantes, mas também por lacunas significativas. Para que a sustentabilidade deixe de ser um diferencial e passe a ser tratada como padrão de qualidade, é necessário o fortalecimento de políticas organizacionais, a capacitação contínua de profissionais, o incentivo à experimentação técnica e o desenvolvimento de frameworks de apoio que sejam flexíveis e adaptáveis à realidade de diferentes tipos de organizações.

Como contribuição prática, esta dissertação oferece um mapeamento detalhado de práticas, barreiras e facilitadores, podendo servir como guia de referência para outras empresas que desejem iniciar ou consolidar sua jornada rumo ao desenvolvimento de software sustentável. Do ponto de vista teórico, o trabalho reforça a importância de aproximar os modelos acadêmicos da realidade da indústria, valorizando abordagens híbridas e contextuais, capazes de responder às dinâmicas de times ágeis, ambientes de inovação e limitações técnicas cotidianas.

7.1 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Esta pesquisa apresenta algumas limitações inerentes ao seu desenho metodológico. Em primeiro lugar, por se tratar de um estudo qualitativo com múltiplos casos, os resultados não podem ser generalizados para todo o setor de desenvolvimento de software. A amostragem por

conveniência, ainda que estratégica, também pode introduzir vieses relacionados à disponibilidade dos participantes.

Além disso, apesar da proposta inicial de triangulação com observação direta, essa técnica não foi aplicada de maneira sistemática nas empresas, limitando a riqueza da análise comparativa. Também cabe destacar que a análise dos dados ficou concentrada na percepção dos entrevistados, o que reforça a necessidade de estudos quantitativos ou mistos para aprofundar os achados aqui apresentados.

7.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Este trabalho se propõe como ponto de partida para pesquisas futuras que ampliem o escopo metodológico, incluindo a realização de estudos quantitativos e abordagens de métodos mistos que permitam mensurar com maior precisão o impacto das práticas sustentáveis em indicadores de desempenho, eficiência operacional e retorno sobre investimento. Além disso, são recomendadas investigações longitudinais que acompanhem a evolução da maturidade organizacional em sustentabilidade ao longo do tempo, de modo a compreender os fatores que contribuem para a consolidação ou retrocesso dessas práticas. Também se mostram promissoras as pesquisas que aprofundem o papel dos usuários finais no estímulo à sustentabilidade, bem como estudos sobre ética digital, justiça algorítmica e inclusão social no desenvolvimento de soluções tecnológicas. Outra linha emergente e de grande relevância diz respeito à exploração do potencial da Inteligência Artificial para facilitar a adoção de práticas sustentáveis na indústria de software brasileira, seja por meio da automação de decisões que minimizem impactos ambientais, da otimização de recursos computacionais em tempo real, ou da geração de recomendações baseadas em dados para o desenvolvimento sustentável de sistemas. Essas vertentes poderão fortalecer ainda mais o campo da engenharia de software sustentável, ampliando sua aplicabilidade e impacto na transformação digital responsável das organizações

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, R.; ABDULLAH, S.; DIN, J.; TEE, M. A systematic literature review of green software development in collaborative knowledge management environment. **International Journal of Advanced Computer Technology**, v. 9, n. 11, p. 136, out. 2015.
- AGARWAL, S.; NATH, A.; CHOWDHURY, D. Sustainable approaches and good practices in green software engineering. **International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS)**, v. 3, n. 1, fev. 2012.
- BAMIDURO, M.; FATIMA, I.; LAGO, P.; VOS, S. Challenges in incorporating sustainability practices in the software lifecycle. In: PAPTATHEOCHAROUS, E. *et al.* (Org.). **Software Business: 15th International Conference, ICSOB 2024, Utrecht, The Netherlands, November 18–20, 2024. Proceedings**. Cham: Springer Nature, 2025. p. 284–290. (Lecture Notes in Business Information Processing, v. 539).
- BECKER, C.; BETZ, S.; CHITCHYAN, R.; DUBOC, L.; EASTERBROOK, S. M.; PENZENSTADLER, B.; SEYFF, N.; VENTERS, C. C. Requirements: the key to sustainability. **IEEE Software**, v. 33, n. 1, p. 56–65, jan./fev. 2016.
- BECKER, C.; CHITCHYAN, R.; DUBOC, L.; EASTERBROOK, S.; MAHAUX, M.; PENZENSTADLER, B.; RODRIGUEZ-NAVAS, G.; SALINESI, C.; SEYFF, N.; VENTERS, C.; CALERO, C.; KOÇAK, S. A.; BETZ, S. **The Karlskrona manifesto for sustainability design**. [S.l.]: [s.n.], 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/2.1.2195.4565>. Acesso em: 10 abr. 2024
- BECKER, C.; CHITCHYAN, R.; DUBOC, L.; EASTERBROOK, S.; PENZENSTADLER, B.; SEYFF, N.; VENTERS, C. C. Sustainability design and software: the Karlskrona manifesto. In: IEEE/ACM INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE ENGINEERING, 37., 2015, Florença. **Anais...** [S.l.]: IEEE, mai. 2015. p. 467–476.
- CALERO, C.; PIATTINI, M. Introduction to green in software engineering. In: CALERO, C.; PIATTINI, M. (Org.). **Green in software engineering**. Cham: Springer, 2015. p. 3–27.
- CHAUHAN, N. S.; SAXENA, A. A green software development life cycle for cloud computing. **IT Professional**, v. 15, n. 1, p. 28–34, jan./fev. 2013.
- CHITCHYAN, R.; BETZ, S.; DUBOC, L.; PENZENSTADLER, B.; PONSARD, C.; VENTERS, C. Evidencing sustainability design through examples. In: WORKSHOP ON GREEN AND SUSTAINABLE SOFTWARE (GREENS), 2015, Florença. CEUR Workshop **Anais**, v. 1416, p. 45–54. [S.l.]: [s.n.], 2015.
- CRESWELL, J. W. **Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches**. 3. ed. Thousand Oaks: Sage, 2010.
- CRESWELL, J. W. **Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing Among Five Approaches**. 3rd ed. Los Angeles: SAGE Publications, 2013.
- DENZIN, N. K.; LINCOLN, Y. S. **The SAGE Handbook of Qualitative Research**. 3. ed. Thousand Oaks: Sage, 2005.

DICK, M.; DRANGMEISTER, J.; KERN, E.; NAUMANN, S. Green software engineering with agile methods. *In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON GREEN AND SUSTAINABLE SOFTWARE – GREENS*, 2., 2013, San Francisco. **Anais...** [S.l.]: IEEE, 2013. p. 78–85.

DINGSØYR, T.; NERUR, S.; BALIJEPALLY, V.; MOE, N. B. A decade of agile methodologies: Towards explaining agile software development. **Journal of Systems and Software**, v. 85, n. 6, p. 1213–1221, jun. 2012.

ERDELYI, K. Special factors of development of green software supporting eco sustainability. *In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INTELLIGENT SYSTEMS AND INFORMATICS – SISY*, 11., 2013, Subotica. **Anais...** [S.l.]: IEEE, 2013. p. 337–340.

ERICSSON. **Sustainability and Corporate Responsibility Report**, 2023. Disponível em: <https://www.ericsson.com/4933e6/assets/local/investors/documents/2023/sustainability-and-corporate-responsibility-report-2023-en.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2024.

GALÁN, O. A.; VALDÉZ, J. L.; MEDINA, H. F.; CONTRERAS, G. A.; SUMUANO, J. L. Proposal of a sustainable agile model for software development. **Development**, v. 11, n. 1, p. 1–8, 2020.

GROHER, I.; WEINREICH, R. An interview study on sustainability concerns in software development projects. *In: EUROMICRO CONFERENCE ON SOFTWARE ENGINEERING AND ADVANCED APPLICATIONS – SEAA*, 43., 2017, Viena. **Anais...** [S.l.]: IEEE, 2017. p. 350–358.

GULDNER, A. *et al.* Development and evaluation of a reference measurement model for assessing the resource and energy efficiency of software products and components – Green Software Measurement Model (GSMM). **Future Generation Computer Systems**, v. 155, p. 402–418, 2024.

HSIEH, C.-Y.; CHEN, C.-T. Patterns for continuous integration builds in cross-platform agile software development. **Journal of Information Science and Engineering**, v. 31, n. 3, p. 897–924, 2015.

ILSTEDT, S.; ERIKSSON, E.; HESSELGREN, M. Sustainable lifestyles: how values affect sustainable practises. *In: STUEDAHL, D.; MORRISON, A. (Org.). Nordes 2017: Design + Power*, 15–17 jun. 2017, Oslo. Oslo: Oslo School of Architecture and Design, 2017.

JAN, S. U. **Framework for the development of sustainable green software**. Chakdara: University of Malakand, 2019. (Technical Report 133-221).

KERN, E.; NAUMANN, S.; DICK, M. Processes for green and sustainable software engineering. *In: CALERO, C.; PIATTINI, M. (Org.). Green in software engineering*. New York: Springer, 2015. p. 61–81.

KÖNIG, C. Sustainable software engineering: visions and perspectives beyond energy efficiency. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE ENGINEERING – ICSE: COMPANION PROCEEDINGS*, 46., 2024, Lisboa. **Anais...** New York: Association for Computing Machinery, 2024. p. 231–233.

KOONTZ, R. J.; NORD, R. L. **Architecting for sustainable software delivery**. Pittsburgh: Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 2012. (Technical Report FA8721-05-C-0003).

KODALI, M. **Traceability of requirements in scrum software development process**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Inovação, Design e Engenharia) – Malardalen University, Västerås, 2015.

LAGO, P.; KOÇAK, S. A.; CRNKOVIC, I.; PENZENSTADLER, B. Framing sustainability as a property of software quality. **Communications of the ACM**, v. 55, n. 5, p. 56–64, maio 2012.

LIU, K.; TAN, Q.; YU, J.; WANG, M. A global perspective on e-waste recycling. **Circular Economy**, v. 2, n. 1, art. 100028, 2023.

MAHAUX, M.; HEYMANS, P.; SAVAL, G. Discovering sustainability requirements: an experience report. *In*: BERRY, D.; FRANCH, X. (Org.). **Requirements engineering: foundation for software quality – REFSQ 2011**. Berlin: Springer, 2011. p. 19–33. (Lecture Notes in Computer Science, v. 6606).

MAHMOUD, S. S.; AHMAD, I. A green model for sustainable software engineering. **International Journal of Software Engineering and Applications**, v. 7, n. 4, p. 55–74, 2013.

MENGISTU, A. T.; DIESTE, M.; PANIZZOLO, R.; BIAZZO, S. Sustainable product design factors: a comprehensive analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 463, art. 142260, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.142260>. Acesso em: 15 maio 2024.

MCKINSEY. **The green IT revolution: a blueprint for CIOs to combat climate change**. [S.l.]: [s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-green-it-revolution-a-blueprint-for-cios-to-combat-climate-change>. Acesso em: 15 maio 2024.

NAUMANN, S.; DICK, M.; KERN, E.; JOHANN, T. The GREENSOFT model: a reference model for green and sustainable software and its engineering. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, v. 1, n. 4, p. 294–304, 2011.

NOMAN, H.; MAHOTO, N.; BHATTI, S.; RAJAB, A.; SHAIKH, A. Towards sustainable software systems: A software sustainability analysis framework. **Information and Software Technology**, v. 169, art. 107411, 2024.

OPENAI. **ChatGPT**. [S.l.]: [s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.chatgpt.com/>. Acesso em: 22 jan. 2025.

OYEDEJI, S.; SEFFAH, A.; PENZENSTADLER, B. Sustainability quantification in requirements informing design. *In*: INTERNATIONAL WORKSHOP ON REQUIREMENTS ENGINEERING FOR SUSTAINABLE SYSTEMS, 6., 2017, Lisboa. **Anais...** [S.l.]: [s.n.], 2017. p. 1–10.

OYEDEJI, S.; SEFFAH, A.; PENZENSTADLER, B. A catalogue supporting software sustainability design. **Sustainability**, v. 10, n. 7, art. 2296, 2018.

- PANKOWSKA, M. Sustainable software: a study of software product sustainable development. *In: LUO, Z. (Org.). Mechanism design for sustainability*. Dordrecht: Springer, 2013. p. 265–281.
- PAUL, S. G.; SAHA, A.; AREFIN, M. S.; BHUIYAN, T.; BISWAS, A. A.; REZA, A. W.; ALOTAIBI, N. M.; ALYAMI, S. A.; MONI, M. A. A comprehensive review of green computing: past, present, and future research. **IEEE Access**, v. 11, p. 87445–87494, 2023.
- PATTON, M. Q. **Qualitative Research & Evaluation Methods**. 3. ed. Thousand Oaks: Sage, 2002.
- PENZENSTADLER, B.; FEMMER, H. A generic model for sustainability with process-and product-specific instances. *In: WORKSHOP ON GREEN IN/BY SOFTWARE ENGINEERING – GIBSE*, 2013, Fukuoka. **Anais...** New York: ACM, 2013. p. 3–7.
- PENZENSTADLER, B.; MARTIN, M.; CAMILLE, S. RE4SuSy: requirements engineering for sustainable systems. **Journal of Systems and Software**, v. 86, n. 4, p. 995–1002, abr. 2013.
- RAY, S. Green software engineering process: Moving towards sustainable software product design. **Journal of Global Research in Computer Science**, v. 4, n. 1, p. 25–29, 2013.
- RAISIAN, K.; YAHAYA, J.; DERAMAN, A.; HAMDAN, A. R.; RAIS, I. A.; YAHAYA, N. Z. A model for environmental quarry system based on particles, vibration and noise components. **Journal of Environmental Management & Tourism**, v. 7, n. 2, p. 185–194, jul. 2016.
- SHENOY, S. S.; EERATTA, R. Green software development model: An approach towards sustainable software development. *In: Annual IEEE India Conference (INDICON)*, 2011, Hyderabad. **Anais...** Hyderabad: IEEE, 2011. p. 1–6.
- SOONGPOL, B.; NETINANT, P.; RUKHIRAN, M. Practical sustainable software development in architectural flexibility for energy efficiency using the extended agile framework. **Sustainability**, v. 16, n. 13, art. 5738, 2024.
- SUFI, S. et al. **Report on the Workshop on Sustainable Software Sustainability 2019 (WOSSS19)**. Versão 1.0.0. [S.l.]: Zenodo, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.3922155>. Acesso em: 15 maio 2024.
- SRIRAMAN, G.; RAGHUNATHAN, S. A systems thinking approach to improve sustainability in software engineering: a grounded capability maturity framework. **Sustainability**, v. 15, n. 4, art. 3297, 2023.
- STAMMEL, J.; DURDIK, Z.; KROGMANN, K.; WEISS, R.; KOZIOLEK, H. **Software evolution for industrial automation systems: literature overview**. Munich: KIT, [s.n.], 2011.
- TAINA, J. Good, bad, and beautiful software – In search of green software quality factors. **Cepis Upgrade**, v. 12, n. 4, p. 22–27, 2011.
- TATE, K. **Sustainable Software Development: An Agile Perspective**. Reading, MA: Addison-Wesley, 2005.

VENTERS, C. C. et al. Sustainable software engineering: reflections on advances in research and practice. **Information and Software Technology**, v. 164, art. 107316, 2023.

WILLIAMS, L.; RUBIN, K.; COHN, M. Driving process improvement via comparative agility assessment. *In*: AGILE CONFERENCE, 2010, Orlando. **Anais...** Orlando: IEEE, 2010. p. 3–10.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

APÊNDICE A – ROTEIRO DE ENTREVISTAS

1. Perfil do Entrevistado

1.1. Qual é o seu cargo atual na empresa?

1.2. Há quanto tempo você trabalha na área de desenvolvimento de software ou em áreas correlatas de tecnologia da informação?

2. Diretrizes e Políticas de Sustentabilidade

2.1. Sua empresa possui alguma diretriz interna ou política formal relacionada à sustentabilidade? Caso sim, por favor, descreva.

2.2. Essa diretriz demanda a adoção de alguma prática para os processos de desenvolvimento de software? Quais?

3. Percepção sobre Sustentabilidade no Desenvolvimento de Software

3.1. Na sua empresa, o conceito de “desenvolvimento de software sustentável” está associado a algum processo específico? Se sim, poderia detalhar?

3.2. Na sua visão, quais são os principais impactos ambientais ou sociais que podem ser causados (direta ou indiretamente) durante o uso de softwares ou como consequência do uso de softwares?

3.3. Na sua experiência, sua empresa já enfrentou algum tipo de pressão do mercado ou de cliente(s) para adotar práticas sustentáveis no desenvolvimento de software? Caso sim, por favor, descreva.

4. Práticas Sustentáveis na Empresa

4.1. Dentre as práticas listadas a seguir, você reconhece a adoção de alguma delas durante etapas do ciclo de vida de um software (Planejamento, Análise, Design, Desenvolvimento, Testes, Implantação, Manutenção)?

(Obs.: nesta etapa, houve uma discussão apresentando as práticas consolidadas no Quadro 4.)

4.2. Poderia descrever quais delas são aplicadas na sua empresa?

4.3. Há alguma outra prática sustentável que sua empresa adota e que não foi mencionada anteriormente?

5. Barreiras, Facilitadores e Experiências

5.1. Quais fatores dificultam a adoção de práticas sustentáveis na sua empresa? Você percebe desafios técnicos, financeiros ou culturais? Poderia dar exemplos?

5.2. Você percebe algum tipo de resistência por parte dos desenvolvedores ou gestores em relação a essas práticas? Se sim, quais você acredita que seriam as principais razões?

5.3. Você se recorda de algum cenário em que alguma dessas práticas já foi considerada, porém não implementada? Caso sim, por favor, descreva.

5.4 Na sua visão, quais fatores ou condições facilitam ou incentivam a adoção de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software em sua empresa?

5.5 Você acredita que metodologias ágeis influenciam positiva ou negativamente a adoção de práticas sustentáveis no desenvolvimento de software? Justifique.

APÊNDICE B – CÓDIGOS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE CONTEÚDO

Código	Descrição
Design energeticamente eficiente	Decisões arquiteturais e técnicas voltadas à otimização do uso de energia e recursos computacionais.
Reaproveitamento de componentes	Utilização de módulos, APIs e bibliotecas reutilizáveis para reduzir redundância e retrabalho.
Codificação verde	Práticas de escrita de código com foco em performance, eficiência de chamadas e uso racional de memória e CPU.
Arquitetura sustentável	Uso de microsserviços, serverless, containers otimizados e soluções escaláveis.
Implantação sustentável	Adoção de infraestrutura em nuvem verde, autoescalável e com desligamento automático de recursos.
Coleta de requisitos ecoeficiente	Discussão de requisitos considerando impactos ambientais e sociais.
Planejamento de fim de vida do software	Desativação planejada de sistemas legados e redução de obsolescência.
Uso de equipes sustentáveis	Modelos de trabalho remoto ou híbrido para reduzir deslocamentos e ampliar a inclusão.
Métricas e indicadores de sustentabilidade	Uso de KPIs ambientais, consumo computacional e relatórios de impacto digital.
Pressão externa por ESG	Exigências de clientes ou mercado para adoção de práticas sustentáveis.
Desafios técnicos	Limitações de ferramentas ou infraestrutura para medir e implementar sustentabilidade.
Desafios culturais	Resistência de gestores ou desenvolvedores por desconhecimento, custo ou falta de prioridade.
Treinamento e conscientização	Capacitação interna, campanhas educativas e trilhas sobre desenvolvimento sustentável.
Inclusão digital e acessibilidade	Preocupações com usabilidade, acessibilidade e equidade no uso de soluções.

Automação e pipelines eficientes	Uso de CI/CD e testes automatizados otimizados para reduzir consumo desnecessário.
Observabilidade e telemetria energética	Monitoramento em tempo real do uso de recursos para ajustes sustentáveis.
Algoritmos eficientes e IA sustentável	Uso de machine learning com datasets balanceados e execução controlada.