PRODUTO & PRODUÇÃO, vol. 27, n.3, p. 114-156. 2026[*].

Avaliação da P+L (Produção Mais Limpa) e Priorização de Alternativas Ambientais Sustentáveis por meio do AHP (*Analytic Hierarchy Process*): estudo de caso em uma empresa de *Data Center*

Amanda Aparecida Rocha Ireno
Universidade Federal do ABC (UFABC)
e-mail: amanda.ireno@aluno.ufabc.edu.br
https://orcid.org/0009-0007-4868-8624

Yasmin Silva Camargo Mattos
Universidade Federal do ABC (UFABC)
e-mail: yasmin.mattos@aluno.ufabc.edu.br
https://orcid.org/0009-0006-0086-7124

Márcia Maria Penteado Marchesini
Universidade Federal do ABC (UFABC)
e-mail: marcia.marchesini@ufabc.edu.br
https://orcid.org/0000-0002-4509-347X

[*] RECEBIDO em 08/06/2026. ACEITO em 13/10/2026.

Resumo
A digitalização da sociedade expandiu os *Data Centers*, mas é importante ressaltar que suas operações envolvem aspectos e impactos ambientais relevantes, especialmente o uso intensivo de energia elétrica e água, a geração de resíduos eletrônicos e emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, este artigo avaliou a aplicação do conceito de Produção Mais Limpa (P+L) em um *Data Center* brasileiro e utilizou o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) para priorizar alternativas ambientais ou opções da P+L. A pesquisa, de natureza exploratória e abordagem qualitativa, adotou estudo de caso único (entrevista por meio de questionário semiestruturado e análise documental) e aplicação do AHP. Os dados documentais indicaram PUE de 1,42, WUE de 0 L/kWh e 91,72% dos resíduos desviados de aterros. O AHP priorizou as seguintes práticas ambientais na empresa: logística reversa de equipamentos, compra de hardware com certificações ambientais, virtualização de servidores, uso de energias renováveis e de baixo carbono, *Free-cooling* e sistemas de controle inteligente, reuso de água e otimização de sistemas de resfriamento (como *chillers* de alta eficiência), sistemas de contenção e detecção de vazamentos de água e emissões atmosféricas.

Palavras-chave: Produção Mais Limpa; *Analytic Hierarchy Process*; *Data Centers*; Gestão Ambiental Empresarial; Sustentabilidade.

Abstract
The digitization of society has expanded Data Centers, but it's important to point out that their operations involve significant environmental aspects and impacts, especially the intensive use of electricity and water, the generation of electronic waste, and greenhouse gas emissions. In this context, this article assessed the application of the Cleaner Production (CP) concept in a Brazilian Data Center and used the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to prioritize environmental alternatives or CP options. The research, which is exploratory and qualitative in nature, adopted a single case study (interview via semi-structured questionnaire and document analysis) and applied AHP. The documentary data indicated a PUE of 1.42, WUE of 0 L/kWh, and 91.72% of waste diverted from landfills. AHP prioritized the following environmental practices in the company: reverse logistics for equipment, buying hardware with environmental certifications, server virtualization, using renewable and low-carbon energy, free-cooling and smart control systems, water reuse and optimization of cooling systems (like high-efficiency chillers), and systems for containing and detecting water leaks and air emissions.
Keywords: *Cleaner Production; Analytic Hierarchy Process; Data Centers; Corporate Environmental Management; Sustainability.*

1. Introdução.

A transformação digital tem impulsionado a expansão dos *Data Centers*, que se consolidaram como infraestruturas essenciais para o armazenamento, processamento e transmissão de dados em larga escala, sustentando serviços digitais, financeiros, governamentais e a crescente demanda por Inteligência Artificial (HENNESSY; PATTERSON, 2013; MARCHEZAN; BORTOLUZZI, 2019). Originadas dos antigos Centros de Processamento de Dados (CPDs), essas instalações evoluíram em densidade tecnológica e complexidade operacional, incorporando sistemas avançados de climatização, redundância energética, automação predial e segurança física (FACCIONI FILHO, 2016; RONG et al., 2016).

Do ponto de vista socioeconômico, o setor de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) representa cerca de 6,5% do PIB brasileiro (BRASIL, 2026; BRASSCOM, 2025). Em escala global, estima-se a existência de mais de 12 mil instalações em operação (STACCIARINI et al., 2025). Nesse cenário, o Brasil consolida-se como importante polo de infraestrutura digital da América Latina, concentrando aproximadamente 50% do mercado regional e ocupando a 10ª posição no *ranking* mundial, com mais de mil estruturas em operação e cerca de 162 instalações de grande porte (ABDC, 2025; PORTAL INSIGHTS, s.d.). Apenas na Região Metropolitana de São Paulo, a capacidade instalada atinge 515 MW, sustentando cerca de 40 mil empregos diretos (ABDC, 2025). O setor projeta triplicar sua capacidade instalada no país até 2030, passando de 750 MW para 2,3 GW, impulsionado por investimentos previstos superiores a R$ 1 trilhão e pela formulação de políticas públicas nacionais de incentivo à infraestrutura de dados e inteligência artificial (ABDC, 2025; BRASSCOM, 2024; G1, 2025).

Entretanto, a operação ininterrupta e a expansão acelerada dessas infraestruturas envolvem impactos ambientais expressivos. Os principais aspectos ambientais operacionais incluem o consumo intensivo de energia elétrica, que responde por aproximadamente 1% a 2% da demanda energética global, o uso expressivo de recursos hídricos na dissipação térmica e a substituição acelerada de ativos computacionais (IEA, 2024; PURITE, 2023; ZORMAN, 2024). Como consequências diretas, destacam-se as emissões de gases de efeito estufa (GEE), a poluição térmica e a geração de resíduos eletrônicos (*e-waste*), cuja destinação inadequada pode ocasionar contaminação do solo e da água por substâncias tóxicas e metais pesados (UNU, 2020; SHEHABI et al., 2016).

Nesse contexto, a Gestão Ambiental Empresarial (GAE) oferece o arcabouço necessário para a superação de abordagens puramente reativas (*end-of-pipe*) em direção a estratégias preventivas, nas quais se insere a Produção Mais Limpa (P+L) (BARBIERI, 2020; PEREIRA, 2014). A P+L é definida pelo UNEP (2007) como a aplicação contínua de uma estratégia preventiva e integrada aos processos, produtos e serviços, visando otimizar o uso de insumos e reduzir resíduos e emissões diretamente na fonte. No âmbito dos *Data Centers*, a P+L possibilita estruturar práticas em três níveis hierárquicos: Nível 1, relacionado à prevenção e redução na fonte; Nível 2, relacionado à reciclagem interna; e Nível 3, relacionado à reciclagem externa, sendo este último considerado a alternativa menos prioritária (SENAI/CNTL, 2003b).

Apesar da relevância da temática, a literatura técnica e acadêmica ainda se concentra majoritariamente na eficiência energética de equipamentos e sistemas de climatização, havendo escassez de estudos empíricos que integrem a P+L a métodos formais de apoio à decisão multicritério aplicados ao setor (SHEHABI et al., 2016; VASCONCELOS, 2025; FIGUEIREDO, 2024). Para contribuir com essa lacuna, a seleção do caso específico desta pesquisa justifica-se pela relevância estratégica da Empresa de *Data Center* A, organização de grande porte do setor de infraestrutura digital, que apresenta práticas estruturadas de gestão ambiental e energética, incluindo certificações ISO 14001 e ISO 50001, classificação Tier III e iniciativas de neutralização de carbono (EXAME, 2020; ASCENTY, 2025). O estudo deste caso permite analisar a aplicação da P+L em uma operação de elevada complexidade e identificar alternativas ambientais considerando diferentes perspectivas de decisão.

Diante desse contexto, a pesquisa é norteada pela seguinte questão: "Como a Produção Mais Limpa (P+L) pode ser aplicada às operações de um *Data Center* brasileiro e de que forma o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) pode apoiar a priorização de alternativas ambientais sustentáveis?" O objetivo geral deste artigo é analisar a aplicação da P+L nas operações de um *Data Center*, utilizando o método AHP como ferramenta de apoio à tomada de decisão para priorizar alternativas de melhoria ambiental. Especificamente, busca-se: (i) mapear e analisar os aspectos e impactos ambientais

operacionais relacionados ao consumo de energia, uso de água, geração de resíduos e emissões; (ii) diagnosticar as práticas ambientais existentes na empresa do estudo de caso segundo os níveis hierárquicos da P+L; e (iii) priorizar alternativas de melhoria ambiental na empresa do estudo de caso por meio da aplicação do AHP junto a decisores estratégicos e técnicos, considerando os três critérios selecionados por cada respondente dentre viabilidade técnica, viabilidade econômica, impacto ambiental, facilidade de implantação e aceitação interna/institucional.

A estrutura deste artigo está organizada em cinco seções. A Seção 2 apresenta a fundamentação teórica sobre *Data Centers*, GAE, P+L e o método AHP. A Seção 3 detalha os procedimentos metodológicos do estudo de caso qualitativo-exploratório e a aplicação do AHP. A Seção 4 apresenta os resultados e discussões, contemplando o diagnóstico ambiental, o balanço de massa e energia e a priorização multicritério das alternativas. Por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões, contribuições e recomendações para trabalhos futuros.

2. Revisão de literatura.

Esta seção reúne os principais fundamentos teóricos que embasam a aplicação da Produção Mais Limpa (P+L) em *Data Centers*, contemplando a Gestão Ambiental Empresarial (GAE), a definição, os níveis de aplicação, as etapas de implementação e os benefícios da P+L, além da caracterização dos *Data Centers* quanto a seus aspectos e potenciais impactos ambientais e das principais práticas ambientais adotadas nesse tipo de infraestrutura.

2.1. Gestão Ambiental Empresarial (GAE).

A Gestão Ambiental Empresarial (GAE) consiste em um conjunto de práticas voltadas à integração de preocupações ambientais nos processos organizacionais. Segundo Barbieri (2020), trata-se de uma estratégia capaz de alinhar desempenho econômico e responsabilidade ambiental, fortalecendo a competitividade e a imagem corporativa.

De acordo com Correia *et al.* (2011), a GAE é impulsionada por três *stakeholders* principais: o governo, por meio de legislações e incentivos; a sociedade, que exige transparência e responsabilidade; e o mercado, que valoriza empresas sustentáveis. Segundo Barbieri (2020), os princípios fundamentais da Gestão Ambiental Empresarial (GAE) podem ser organizados em três níveis:

- **Abordagem de Controle da Poluição (nível reativo):** Caracteriza-se pela adoção de tecnologias de tratamento de resíduos, efluentes e emissões somente após a sua geração. Embora reduza impactos, tende a ser mais custosa e menos eficiente, pois não atua na origem do problema.
- **Abordagem de Prevenção da Poluição (nível preventivo):** Busca atuar antes da formação dos resíduos, modificando processos, insumos e práticas operacionais para minimizar o uso de recursos e a geração de impactos. É nesta abordagem que se insere a Produção Mais Limpa (P+L), uma vez que seu foco está na otimização dos fluxos produtivos e na prevenção de desperdícios (SENAI/CNTL, 2003a).
- **Abordagem Estratégica ou Proativa (nível proativo**): Integra a gestão ambiental ao planejamento corporativo de longo prazo, considerando inovação sustentável, economia circular e compromissos institucionais de descarbonização e neutralidade climática (*Net Zero*) (BARBIERI, 2020; BAÊTA et al., 2023).

Dentre essas três abordagens, a Prevenção da Poluição representa o eixo central deste estudo, por ser a base da Produção Mais Limpa (P+L). Diferente das soluções corretivas, a P+L propõe uma revisão sistemática de processos, produtos e rotinas operacionais, privilegiando ações que reduzam perdas de energia, água e insumos já na origem. Esse alinhamento reforça sua pertinência para o setor de *Data Centers,* que apresenta elevado consumo de recursos e impacto ambiental significativo (IEA, 2024; SHEHABI et al., 2016). Portanto, a GAE fornece o arcabouço conceitual que sustenta tanto a análise dos impactos ambientais dos *Data Centers* quanto a aplicação dos princípios da P+L como estratégia preventiva prioritária neste trabalho.

2.2. Produção Mais Limpa (P+L).

Nesta seção, serão apresentados a definição e os 3 níveis de opções de solução da P+L, as etapas e os benefícios de sua implementação.

2.2.1. P+L: definição e 3 níveis de alternativas de soluções.

A metodologia de Produção Mais Limpa (P+L) foi introduzida pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) e, diferentemente das tecnologias "fim de tubo" (*end-of-pipe*), que tratam resíduos e efluentes apenas após sua geração, a P+L propõe uma abordagem proativa, atuando diretamente na fonte dos problemas ambientais, por meio da revisão de processos, produtos e práticas operacionais (SENAI/CNTL, 2003a).

O conceito surgiu nas décadas de 1970 e 1980 como uma resposta à ineficiência das soluções corretivas que predominavam até então. Com o endurecimento das legislações ambientais e o aumento das pressões sociais, tornou-se evidente que prevenir a poluição era não apenas ambientalmente mais eficaz, mas também economicamente vantajoso (SAYLOR ACADEMY, 2021). Em 1989, o UNEP consolidou oficialmente a definição de Produção Mais Limpa como a aplicação contínua de uma estratégia ambiental preventiva e integrada aos processos, produtos e serviços, visando aumentar a eficiência e reduzir riscos ao ser humano e ao meio ambiente (UNEP, 2007).

No Brasil, a disseminação da P+L ganhou força a partir dos anos 2000, impulsionada pela criação do Centro Nacional de Tecnologias Limpas (CNTL) — uma parceria entre o SENAI-RS e o PNUMA — com o objetivo de apoiar empresas na adoção de práticas sustentáveis e no desenvolvimento de soluções tecnológicas ambientalmente adequadas (CNI, 2017). Embora os fundamentos da P+L tenham sido estabelecidos anteriormente, estudos recentes demonstram a permanência e a ampliação de sua relevância diante dos atuais desafios de eficiência no uso de recursos, redução de resíduos e melhoria do desempenho ambiental. Baêta et al. (2023), em uma revisão sistemática da literatura, identificaram a eficiência energética, a gestão da água e a sustentabilidade entre os principais temas associados à P+L. Mais recentemente, Ma et al. (2024) evidenciam a aproximação entre Produção Mais Limpa, digitalização e Economia Circular, destacando o potencial das tecnologias digitais para ampliar a eficiência de recursos e apoiar estratégias de produção mais sustentáveis.

De acordo com o Centro Nacional de Tecnologias Limpas (SENAI/CNTL, 2003b), a P+L estrutura-se em três níveis hierárquicos de aplicação:

● **Nível 1 - Redução na fonte:** nível mais eficaz e prioritário, voltado à eliminação de resíduos e emissões durante o próprio processo produtivo. Redução da Poluição na Fonte tem como objetivo diminuir o peso ou volume dos resíduos e alterar características dos resíduos gerados (periculosidade/toxicidade), por meio da modificação no produto e modificação no processo (Boas Práticas, substituição de matérias-primas, modificação tecnológica). Inclui ações tais como substituição de matérias-primas tóxicas, otimização de processos, manutenção preventiva de equipamentos, capacitação de colaboradores e *redesign* de produtos para reduzir perdas e aumentar durabilidade.

● **Nível 2 - Reciclagem interna:** quando a eliminação na fonte não é completamente possível, busca-se o reaproveitamento de materiais, resíduos e subprodutos dentro da própria organização, reinserindo-os no processo produtivo. Essa etapa reduz custos operacionais e a necessidade de insumos virgens (RENSI; SCHENINI, 2006).

● **Nível 3 - Reciclagem externa:** consiste na destinação de resíduos ou materiais reaproveitáveis a outras empresas ou cadeias produtivas, integrando princípios de economia circular. Apesar de representar ganhos ambientais, é considerada menos eficaz do que a prevenção e a reutilização interna.

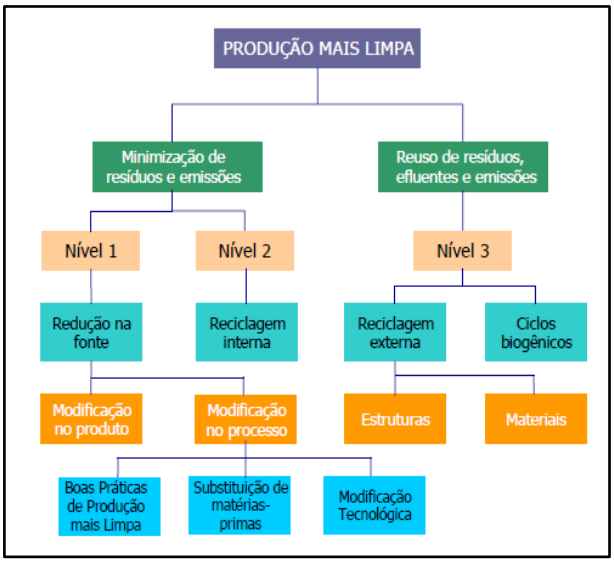


Figura 1 - Estratégias da P+L. Fonte: SENAI/CNTL (2003b, p. 27).

A adoção da Produção Mais Limpa oferece benefícios múltiplos. Do ponto de vista ambiental, reduz a geração de poluentes, o consumo de energia e de recursos naturais, além de minimizar riscos de contaminação. Sob o aspecto econômico, proporciona redução de custos com matérias-primas, tratamento de efluentes e descarte de resíduos, resultando em maior eficiência operacional (PEREIRA, 2014). Por fim, em termos sociais e estratégicos, fortalece a imagem corporativa, melhora a relação com partes interessadas e contribui para o cumprimento de metas de sustentabilidade e ESG (*Environmental, Social and Governance*). A Figura 1 acima esquematiza a hierarquia da P+L, bem como sintetiza o que cada nível abrange.

Conforme Werner, Bacarji e Hall (2009), a P+L também pode ser integrada a sistemas de gestão ambiental, como a ISO 14001, e ao ciclo PDCA (*Plan–Do–Check–Act*), fortalecendo a cultura de melhoria contínua. Ao atuar de forma preventiva e sistêmica, a metodologia torna-se essencial para o alcance da sustentabilidade industrial e a transição para modelos de produção baseados na eficiência de recursos e na inovação ambiental.

No contexto dos *data centers,* a aplicação da Produção Mais Limpa (P+L) mostra-se especialmente promissora, uma vez que esses ambientes concentram elevado consumo de energia e água, além de gerarem grandes volumes de resíduos eletrônicos. Estratégias como virtualização de servidores, reuso de água de resfriamento, adoção de fontes renováveis de energia e logística reversa de equipamentos podem ser associadas aos princípios da P+L por priorizarem a prevenção e redução dos impactos ambientais na fonte, contribuindo para a construção de uma infraestrutura digital mais sustentável (SENAI/CNTL, 2003a; ZORMAN, 2024).

Segundo Roldão et al. (2023), a aplicação da P+L possibilita a redução de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas, além de promover maior eficiência no uso de energia e água. Os autores destacam ainda que, em diferentes setores produtivos, as organizações tendem a concentrar inicialmente suas ações em práticas de reciclagem externa (Nível 3), enquanto medidas voltadas à prevenção na fonte e ao reaproveitamento interno demandam maior integração operacional e revisão dos processos produtivos. Nesse contexto, a P+L caracteriza-se também como uma ferramenta de melhoria contínua, voltada à identificação progressiva de oportunidades de redução de impactos ambientais e aumento da eficiência operacional.

A evolução recente da discussão sobre Produção Mais Limpa evidencia sua complementaridade com os fundamentos da Economia Circular. Enquanto a P+L prioriza a prevenção da geração de resíduos e a eficiência no uso de recursos nos processos, a Economia Circular amplia essa perspectiva ao buscar manter produtos, componentes e materiais em uso pelo maior tempo possível, por meio de estratégias como reuso, remanufatura e reciclagem. Nesse sentido, a integração dessas abordagens é particularmente relevante em sistemas intensivos em recursos e ativos tecnológicos, nos quais a prevenção de perdas, o prolongamento da vida útil dos equipamentos e o reaproveitamento de materiais

podem contribuir simultaneamente para a eficiência ambiental e a circularidade dos fluxos (MA et al., 2024; SHABANPOUR et al., 2024).

2.2.2. Etapas de implementação da P+L.

A implementação da Produção Mais Limpa (P+L) segue uma sequência estruturada de etapas, conforme ilustrado na Figura 2, que sintetiza o modelo proposto pelo SENAI/CNTL (2003a).



Figura 2 - Etapa de Implementação da P+L. Fonte: CNTL (2003a, p. 8).

Embora a Figura 2 apresente uma representação simplificada do modelo, condensando o processo em cinco blocos principais, o detalhamento metodológico do SENAI/CNTL (2003a) desdobra a implementação da P+L em seis etapas distintas. Nesse sentido, a etapa de Geração de Opções de P+L, não explicitada graficamente na figura, está implicitamente contida entre a Avaliação e o Estudo de Viabilidade, representando o momento em que as oportunidades de melhoria identificadas são sistematizadas em alternativas concretas de intervenção.

As etapas de implementação da P+L são (SENAI/CNTL, 2003a):

1) Planejamento e Organização: é o ponto de partida da implementação da P+L. Ela tem como objetivo estruturar as condições necessárias para que o projeto possa ser conduzido de forma eficiente dentro da organização, bem como estabelecer o compromisso da alta direção e a formação de uma equipe interna (ecotime) responsável por conduzir o projeto.

2) Pré-Avaliação: realiza-se o mapeamento detalhado dos processos por meio de fluxogramas, identificando entradas, saídas e pontos críticos (*hotspots*) de consumo e geração de resíduos.

3) Avaliação ambiental e pontos críticos: são aplicados balanços de massa e energia, inventários de fluxos e ferramentas como matriz de risco e diagrama de causa e efeito, permitindo identificar e analisar as causas dos desperdícios e das ineficiências ambientais. Para apoiar essa análise, o Quadro 1 reúne categorias e causas teóricas associadas à geração de resíduos, auxiliando na identificação de oportunidades de melhoria.

Quadro 1 - Categorias e causas teóricas de geração de resíduos.

Categoria	Causas Teóricas
Operacionais	Consumo de água e energia não conferidos; acionamento desnecessário ou sobrecargas de equipamentos; falta de manutenção preventiva; execução de etapas desnecessárias; ausência de informações técnicas e tecnológicas.
Matérias-primas	Uso de insumos de menor qualidade; falta de especificação técnica; falhas no suprimento; gestão inadequada de compras; armazenagem inadequada.
Produtos	Proporção inadequada entre resíduo e produto; *design* impraticável; embalagens inadequadas; materiais perigosos na composição; dificuldade de desmontagem e reciclagem.
Capital	Falta de recursos para investimento tecnológico; priorização de retorno financeiro imediato sem considerar impactos ambientais; capital de giro insuficiente.
Causas relacionadas aos resíduos	Ausência de segregação de resíduos; desconsideração do potencial de reuso; ausência de recuperação energética dos subprodutos; manuseio inadequado.
Recursos humanos	Qualificação insuficiente; falhas de segurança do trabalho; ausência de treinamentos específicos; execução sob pressão; dependência de mão de obra terceirizada eventual.
Know-how / Processo	Parâmetros de processo mal definidos; uso de tecnologias ultrapassadas.
Fornecedores / Parceiros	Aquisição de materiais sem padronização; baixo intercâmbio com fornecedores; decisões de compra focadas apenas no custo, sem considerar impactos ambientais.

Fonte: Adaptado de CNTL (2003a).

Essas categorias orientaram a identificação das causas de ineficiência ambiental, com destaque para as causas operacionais, de capital e de *know-how*, mais recorrentes no contexto dos *Data Centers*.

4) Geração de opções de Produção Mais Limpa: levantamento e proposição de possíveis soluções de melhoria para reduzir desperdícios, consumo de recursos naturais, geração de resíduos e impactos ambientais no processo analisado. O Quadro 2 apresenta as principais opções de soluções ou estratégias de P+L e seus níveis de aplicação.

Quadro 2 - Opções ou Estratégias da P+L.

Categoria	Descrição	Exemplos práticos	Nível de Aplicação da P+L
Boas práticas operacionais (*Good Housekeeping*)	Ações simples e de baixo custo que evitam perdas e desperdícios.	Controle de derramamentos, manutenção preventiva, capacitação de operadores.	Nível 1 – Prevenção na Fonte
Modificação do produto	Alterações na formulação, composição ou embalagem para reduzir impactos ambientais.	Uso de materiais recicláveis ou biodegradáveis; substituição de embalagens convencionais por alternativas sustentáveis.	Nível 1 – Prevenção na Fonte
Substituição de insumos	Troca de matérias-primas e auxiliares por alternativas menos tóxicas ou poluentes.	Lubrificantes biodegradáveis; substituição de refrigerantes com menor impacto ambiental.	Nível 1 – Prevenção na Fonte
Modificação tecnológica	Redesenho e otimização de equipamentos ou parâmetros produtivos para aumentar eficiência.	Automação de etapas, ajuste de tempo de ciclo, temperatura e pressão.	Nível 1 – Prevenção na Fonte
Reciclagem interna	Reaproveitamento de resíduos e efluentes no próprio processo ou em etapas subsequentes.	Reutilização de aparas, retorno de materiais ao ciclo produtivo.	Nível 2 – Reuso Interno / Reciclagem no Processo
Reciclagem externa	Encaminhamento de resíduos e materiais para reaproveitamento fora da unidade produtiva.	Venda de resíduos para empresas recicladoras; coprocessamento; logística reversa.	Nível 3 – Reciclagem/Tratamento Fora da Fonte

Fonte: Adaptado de SENAI/CNTL (2003b).

5) Estudo de Viabilidade: avalia a viabilidade técnica, econômica e ambiental das opções de P+L geradas na etapa anterior, com o objetivo de selecionar aquelas com maior potencial de benefício e exequibilidade. Essa etapa pode envolver ferramentas de apoio à decisão, como análises de custo-benefício e métodos multicritério.

6) Implementação: corresponde à execução das alternativas priorizadas, envolvendo elaboração de plano de ação, definição de responsáveis, capacitação de colaboradores e monitoramento contínuo dos resultados por meio de indicadores de desempenho ambiental (SENAI/CNTL, 2003a).

O Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável (CEBDS) também apresenta um modelo estruturado de P+L, dividido em cinco fases: Planejamento, Diagnóstico, Identificação de Oportunidades, Implementação e Monitoramento. Esse modelo enfatiza a formação de um ecotime, o uso de fluxogramas qualitativos e tabelas quantitativas, além do alinhamento das ações de P+L aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Entretanto, esse modelo apresenta um enfoque mais estratégico e colaborativo, incentivando a articulação entre empresas e instituições para o desenvolvimento conjunto de soluções. Em contrapartida, o modelo do SENAI/CNTL (2003a) adota uma abordagem mais operacional e detalhada, estruturada em etapas que podem ser aplicadas diretamente aos processos produtivos.

Assim, embora ambos compartilhem o princípio da prevenção da poluição na fonte, esta pesquisa adota o modelo do SENAI/CNTL (2003a) como referência metodológica, por sua maior aplicabilidade prática, estrutura sistematizada e ampla utilização no contexto industrial brasileiro.

2.2.3. Benefícios da implementação da P+L.

A aplicação da Produção Mais Limpa (P+L) resulta em benefícios que se manifestam simultaneamente nas dimensões econômica, ambiental e estratégica, contribuindo para a competitividade e sustentabilidade das organizações (SENAI/CNTL, 2003a). De modo geral, a prevenção da poluição na fonte permite reduzir desperdícios, otimizar o uso de recursos naturais e elevar a eficiência dos processos produtivos, o que se reflete tanto na diminuição de impactos ambientais quanto na melhoria do desempenho operacional (RENSI; SCHENINI, 2006).

- **Benefícios Econômicos:** minimizar perdas de matérias-primas, água e energia, a P+L promove a redução de custos operacionais, diminuindo gastos com insumos, tratamento e destinação de resíduos (LEITE; OLIVEIRA NETO, 2018). A otimização de processos contribui para maior produtividade e eficiência, fortalecendo a competitividade das empresas no mercado (FONSECA, 2013). Além disso, práticas preventivas reduzem riscos ocupacionais e ambientais, favorecem a conformidade com normas legais e evitam despesas com multas e passivos ambientais (SILVA; BARROS, 2020).
- **Benefícios Ambientais:** a P+L contribui para a redução da geração de resíduos, emissões e efluentes na fonte, promovendo o uso eficiente de recursos naturais e energia (SILVA et al., 2017; BAÊTA et al., 2023). Por atuar preventivamente sobre o consumo de recursos e a geração de impactos ambientais, a P+L pode contribuir para estratégias mais amplas de descarbonização e sustentabilidade, embora não constitua, isoladamente, uma estratégia suficiente para o alcance do *Net Zero*. Essa perspectiva é complementar à Economia Circular e aos compromissos globais de sustentabilidade (BAÊTA et al., 2023; GARG et al., 2025).

Em relação às estratégias contemporâneas de descarbonização, a Produção Mais Limpa também pode contribuir para objetivos de *Net Zero* ao atuar preventivamente sobre o consumo de energia e recursos e sobre a geração de resíduos e emissões. Essa contribuição ocorre principalmente por meio da redução da demanda por recursos e da melhoria da eficiência dos processos, devendo ser compreendida como complementar às demais estratégias necessárias para o alcance da neutralidade climática. A literatura recente evidencia a aproximação entre Economia Circular e estratégias de neutralidade de carbono, reforçando a importância de abordagens integradas para a redução de emissões e o uso eficiente de recursos (GARG et al., 2025).

Em suma, a Produção Mais Limpa se consolida como uma estratégia que integra eficiência econômica e responsabilidade ambiental, contribuindo para a melhoria do desempenho organizacional e para a transição para modelos produtivos mais sustentáveis (BAÊTA et al., 2023).

2.3. *Data Centers* e seus aspectos e impactos ambientais potenciais.

Os *Data Centers* são instalações destinadas ao armazenamento, processamento e transmissão de dados, constituindo a base da infraestrutura digital moderna. Representam a base física que sustenta a infraestrutura digital global, permitindo a operação de serviços em nuvem, plataformas digitais e tecnologias emergentes, como a inteligência artificial e a Internet das Coisas (IoT) (AMAZON, 2024a). Segundo Rong *et al.* (2016), essas instalações constituem o núcleo da economia digital contemporânea, conectando empresas, governos e usuários em escala mundial. A Figura 3 ilustra a composição de espaços físicos necessária para o funcionamento desse tipo de infraestrutura tecnológica, evidenciando a complexidade estrutural dessas instalações, que integram subsistemas de telecomunicações, energia, refrigeração e automação, sendo que esta variedade de subsistemas é diretamente responsável pela multiplicidade de aspectos ambientais associados à operação dos *Data Centers.*

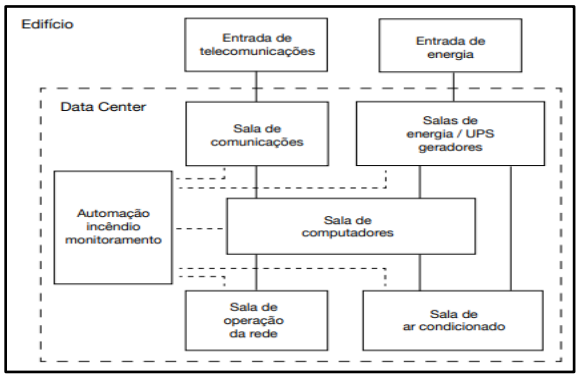


Figura 3 - Espaços e subsistemas que compõem um *Data Center*. Fonte: ABNT NBR 14565 (2013, p. 24).

Historicamente, os *Data Centers* evoluíram a partir dos antigos Centros de Processamento de Dados (CPDs), criados entre as décadas de 1950 e 1960 para abrigar *mainframes* de grande porte, como os desenvolvidos pela IBM (MARCHEZAN; BORTOLUZZI, 2019). Com o avanço das tecnologias de informação e a popularização da internet nos anos 1990, esses espaços tornaram-se cada vez mais complexos, integrando sistemas de climatização, segurança, energia ininterrupta e conectividade. Atualmente, existem mais de 12 mil *Data Centers* distribuídos globalmente (STACCIARINI et al., 2025), consolidando-se como pilares da economia digital.

Apesar de seu papel essencial, os *Data Centers* apresentam impactos ambientais expressivos. Estima-se que essas instalações consumam até 2% da eletricidade mundial — o equivalente ao consumo de países como Espanha e França — e respondam por cerca de 1,5% das emissões globais de gases do efeito estufa (IEA, 2024). A maior parcela desse consumo de energia é destinada à refrigeração, responsável por 40% a 50% do gasto energético total, necessário para manter a temperatura ideal dos equipamentos e evitar falhas (SOARES, 2016).

Além da energia, o consumo de água é outro fator crítico. Segundo Shehabi *et al.* (2016), um *Data Center* típico utiliza entre 1,8 e 2,5 litros de água por quilowatt-hora de energia consumida, devido ao uso de sistemas de resfriamento por torres evaporativas. A empresa Purite (2023) estima que grandes instalações possam consumir de 11 a 18 milhões de litros de água por dia, volume comparável ao abastecimento de uma cidade de 50 mil habitantes.

Os impactos não se limitam ao uso de recursos naturais. A rápida obsolescência dos equipamentos, que possuem vida útil média entre três e cinco anos, gera grandes volumes de resíduos eletrônicos *(e-waste).* Esses resíduos contêm metais pesados, como chumbo, mercúrio e cádmio, que, quando descartados inadequadamente, contaminam o solo e os corpos hídricos (GREEN *DATA CENTER* GUIDE, 2023). Apenas 20% desse material é reciclado formalmente, de acordo com o relatório The Global *E-Waste* Monitor (UNU, 2020).

Nesse sentido, torna-se essencial compreender de forma integrada os fluxos de recursos consumidos e os resíduos e emissões gerados ao longo da operação dessas infraestruturas. Com base em Zorman (2024), o Quadro 3 sintetiza os principais aspectos ambientais (relativos aos *inputs* e *outputs* do sistema de produção dos *Data Centers)*. Além disso, o quadro relaciona esses aspectos aos seus potenciais impactos ambientais e às respectivas medidas de controle e prevenção aplicáveis, evidenciando a necessidade de adoção de práticas de gestão ambiental e Produção Mais Limpa voltadas à redução dos impactos gerados ao longo da operação dessas infraestruturas.

Quadro 3 - Principais Aspectos (*inputs* e *outputs*) e Impactos Ambientais potenciais de um *Data Center*.

Categoria	**Aspectos Ambientais (*Inputs* / Ativos Internos)**	**Aspectos Ambientais (*Outputs* / Resíduos e Emissões)**	**Impactos Ambientais (Alterações no Meio Ambiente)**	**Medidas de Controle/Prevenção Sugeridas**
Energia	Eletricidade da rede; Geradores de *backup* (diesel); Sistemas UPS e baterias.	Emissões diretas e indiretas de GEE, como CO2 e NO2.	Contribuição para mudanças climáticas; aumento da temperatura local.	Uso de energia renovável; Recuperação de calor; Gestão inteligente da demanda.
Água	Utilização no sistema de resfriamento; embutida na geração de eletricidade.	Vapor (liberado durante a refrigeração); dispersão e descarte.	Alteração do ciclo hídrico; impacto sobre corpos d'água locais.	Reuso de água; Técnicas de resfriamento eficiente (evaporativo controlado, circuito fechado).
Equipamentos de TI	Servidores, roteadores, *switches*, cabos, *racks*, computadores, etc.	Resíduos eletrônicos (*e-waste*), liberação de substâncias tóxicas.	Contaminação do solo e da água; risco à saúde humana.	Reuso / reciclagem responsável; Ciclo de vida estendido.
Infraestrutura predial	Sensores, iluminação, materiais de construção, sistemas de controle (HVAC e UPS).	Emissões ocasionadas pelo processo de refrigeração (GEE e vapor d'água); calor dissipado para o ambiente externo; resíduos de manutenção.	Contribuição para mudanças climáticas; geração de resíduos sólidos.	*Design* térmico eficiente; Sistemas de controle inteligentes.
Materiais diversos	Embalagens, peças de reposição, ferramentas	Resíduos sólidos descartados.	Poluição do solo e aumento de lixo urbano.	Logística reversa; Minimização de embalagens.
Operações logísticas	Transporte de equipamentos e pessoal; consumo de combustível	Emissões de CO_2 derivadas do transporte.	Poluição do solo e aumento de lixo urbano.	Otimização logística e transporte coletivo ou elétrico.

Fonte: Adaptado de ZORMAN (2024).

Diante dos expressivos impactos ambientais associados à operação dos *Data Centers*, torna-se fundamental a adoção de métricas padronizadas pela norma ABNT NBR ISO/IEC 30134 para mensurar sua eficiência operacional e permitir o acompanhamento do desempenho ambiental. O PUE (*Power Usage Effectiveness*) afere a eficiência energética relacionando a energia total da infraestrutura àquela consumida pelos equipamentos de Tecnologia da Informação (BARBOZA, 2024). Embora o valor teórico ideal seja 1,0, levantamentos do Uptime Institute indicam que a média global da indústria foi de 1,58 em 2023, permanecendo relativamente estável nos últimos anos (UPTIME INSTITUTE, 2023). Complementarmente, o WUE (*Water Usage Effectiveness*) relaciona o consumo anual de água à energia consumida pelos equipamentos de TI, constituindo indicador relevante para avaliação da eficiência hídrica dos *Data Centers* (BARBOZA, 2024). Estudos sobre o consumo hídrico dessas instalações demonstram que a demanda de água varia significativamente conforme a tecnologia de resfriamento, as

condições climáticas e a eficiência operacional adotada (SHEHABI et al., 2016). O Quadro 4 sintetiza essas e outras métricas utilizadas no monitoramento da eficiência ambiental dos *Data Centers*.

Quadro 4 - Indicadores de desempenho dos *Data Centers* relacionados aos aspectos ambientais.

Métrica	**Como calcular?**	**Valores típicos**	**Valores ideais**
PUE (*Power Usage Effectiveness*)	Energia Total da Instalação / Energia dos Equipamentos de TI	~1,2 - 1,5	1,0
CER (*Cooling Efficiency Ratio*)	Total de Calor Removido / Energia Consumida pela Climatização	~ 0,3 - 0,5	Valor não fixado (não há consenso do valor ideal)
WUE (*Water Usage Effectiveness*)	Consumo Anual de Água (litros) / Energia dos Equipamentos de TI (kWh)	~ 1,0 - 2,5 (L/kWh)	O mais próximo possível de zero
CUE (*Carbon Usage Effectiveness*)	Emissões Totais de CO2 (kg) / Energia dos Equipamentos de TI (kWh)	≥ 0,5 (kgCO2/kWh)	O mais próximo possível de zero
REF (*Renewable Energy Factor*)	Energia Renovável Consumida / Energia Total Consumida	0 até 1,0	1,0
ERF (*Energy Reuse Factor*)	Energia Reutilizada / Energia Total Consumida	0 até 1 (kWh)	1 (kWh)
ITEEsv (*IT Equipment Energy Efficiency for servers*)	Trabalho Computacional Realizado / Energia Consumida pelo Servidor	Variável, pois é influenciado pela modernidade do servidor.	Valor não fixado (não há consenso do valor ideal)
ITEUsv (*IT Equipment Utilization for servers*)	Somatório das taxas de utilização no momento / Quantidade de servidores	10 - 20% em *Data Centers* tradicionais; 60 - 80% em *Data Centers* virtualizados.	60 - 80%

Fonte: Adaptado de BARBOZA (2024).

No contexto brasileiro, não foi identificada, nas fontes públicas consultadas, uma média nacional consolidada de PUE. Publicações técnicas nacionais tendem a recorrer a *benchmarks* globais; Sousa (2024), em publicação voltada aos *Data Centers* no Brasil, reproduz a série do Uptime Institute com PUE médio global de 1,67 em 2019, 1,57 em 2021 e 1,55 em 2022. Como referência operacional brasileira, o Relatório ESG 2024 da Ascenty informa PUE de 1,42 para as operações no Brasil, abaixo da referência de mercado de 1,6 reportada pela própria empresa (ASCENTY, 2025). Esses valores são utilizados como referências comparativas e não como estimativa de uma média brasileira.

A combinação entre alto consumo energético, uso intensivo de água e geração de resíduos eletrônicos reforça a necessidade de integrar estratégias sustentáveis à operação dos *Data Centers.* Práticas como o uso de energias renováveis, o reuso de água, a modernização de equipamentos e a otimização de processos não devem ser entendidas apenas como ações isoladas, mas como parte da abordagem preventiva de Gestão Ambiental Empresarial, voltada à Prevenção da Poluição, na qual se insere a Produção Mais Limpa (P+L). Essa abordagem busca atuar na causa dos impactos, reduzindo o consumo de recursos e a geração de resíduos antes que eles ocorram, ao invés de tratá-los apenas após a sua formação. Nesse sentido, a aplicação sistemática da P+L em *Data Centers* reforça a necessidade de integrar planejamento tecnológico e gestão ambiental para minimizar impactos e aprimorar o desempenho ambiental dessas infraestruturas críticas.

Nesse contexto, a análise de práticas ambientais adotadas por empresas líderes do setor permite aprofundar a compreensão dos principais vetores de impacto associados à operação de *data centers*. A análise documental dos relatórios de sustentabilidade de empresas do setor, como Google, AWS e IBM, confirmou que quatro vetores concentram a maior parte dos impactos ambientais associados a *data centers*: consumo de energia, consumo de água, emissões atmosféricas e resíduos eletrônicos. Esses elementos, amplamente citados nos relatórios de sustentabilidade das três empresas, fundamentaram a seleção dos aspectos ambientais analisados pelo AHP, garantindo aderência entre literatura, prática corporativa e realidade operacional da empresa estudada.

No que se refere ao consumo energético, os relatórios destacam a energia como principal impacto operacional, com ênfase em eficiência energética, expansão de fontes renováveis e otimização térmica. Esse alinhamento setorial respalda alternativas como uso de energias renováveis, *free-cooling* – isto é, um reaproveitamento das condições climáticas favoráveis do ar externo para realizar o resfriamento – e controles inteligentes de climatização (GOOGLE, 2024; AMAZON, 2024b; IBM, 2024).

Quanto ao consumo de água, as empresas reconhecem o resfriamento como ponto crítico e adotam estratégias de reuso, monitoramento e uso de fontes hídricas alternativas para reduzir a dependência de água potável, reforçando a pertinência de soluções como reuso em sistemas de resfriamento e otimização de *chillers* (equipamentos de refrigeração) (GOOGLE, 2024; AMAZON, 2024b).

Em relação aos resíduos eletrônicos, destacam-se programas de circularidade, incluindo logística reversa, recondicionamento e prolongamento da vida útil dos equipamentos, evidenciando a importância da gestão do ciclo de vida dos ativos tecnológicos (GOOGLE, 2024; AMAZON, 2024b; IBM, 2024).

Por fim, no que diz respeito às emissões atmosféricas, as três empresas apresentam metas de descarbonização, uso de energia de baixo carbono, especialmente de fontes renováveis como hidrelétrica, solar e eólica, e substituição de gases refrigerantes de alto potencial de aquecimento global, orientando a seleção de alternativas voltadas à redução de emissões e controle de vazamentos (GOOGLE, 2024; AMAZON, 2024b; IBM, 2024).

Assim, a convergência das práticas observadas embasou a definição dos critérios e alternativas avaliados no AHP, a fim de garantir coerência com estratégias consolidadas no setor e compatibilidade com a realidade operacional da empresa analisada.

Com o propósito de posicionar esta pesquisa frente ao estado da arte e evidenciar a oportunidade de contribuição acadêmica, o Quadro 5 sintetiza os principais estudos anteriores que investigaram a sustentabilidade e a aplicação de práticas ambientais ou de Produção Mais Limpa no setor de Tecnologia da Informação e *Data Centers*.

Quadro 5 - Síntese de estudos anteriores em sustentabilidade/P+L e identificação da lacuna de pesquisa.

Autores / Ano	Foco Central da Pesquisa	Abordagem Metodológica	Limitações e Lacuna Observada
Rong et al. (2016)	Otimização do consumo de energia e modelagem térmica de servidores.	Simulação computacional e modelagem quantitativa.	Foco restrito à eficiência energética de equipamentos; não aborda resíduos eletrônicos, consumo de água nem métodos de priorização de decisões.
Shehabi et al. (2016)	Mapeamento e projeção do consumo de energia e água em centros de dados.	Balanço macro de dados e projeções estatísticas.	Diagnóstico quantitativo descritivo em nível setorial; não propõe um roteiro sistemático de intervenção preventiva na fonte (P+L).
Vasconcelos (2025)	Estratégias emergentes de sustentabilidade e transição energética em *Data Centers*.	Estudo exploratório setorial descritivo.	Analisa tendências de mercado de forma ampla, sem integrar ferramentas estruturadas de decisão multicritério para avaliar a viabilidade de implantação.
Moreira et al. (2025)	Eficiência de fontes renováveis e o Paradoxo de Jevons na era da Inteligência Artificial.	Ensaio teórico-conceitual.	Discute impactos macro da IA sobre a matriz elétrica, mas não detalha procedimentos operacionais de P+L aplicáveis ao chão de fábrica dos centros de dados.
Presente Artigo (2026)	Aplicação integrada de P+L e priorização multicritério via método AHP em *Data Center* no Brasil.	Estudo de caso empírico, balanço quantitativo de fluxos e modelagem AHP com múltiplos perfis decisores.	Lacuna preenchida: Estrutura um modelo metodológico reprodutível que une o diagnóstico preventivo de P+L (SENAI/CNTL) à priorização matemática via AHP, confrontando percepções estratégicas e técnico-operacionais na tomada de decisão ambiental.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise comparativa demonstra que a literatura existente tende a tratar a sustentabilidade em centros de dados de forma fragmentada, priorizando a eficiência energética isolada ou diagnósticos descritivos. A originalidade e relevância deste estudo residem no preenchimento dessa lacuna por meio da integração sistemática entre a abordagem preventiva da P+L e o método multicritério AHP em uma operação real de grande porte.

3. Metodologia.

A pesquisa caracteriza-se, quanto à natureza, como aplicada e, quanto à abordagem, como qualitativa, com emprego de procedimentos quantitativos na aplicação do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), apresentando objetivos exploratório-descritivos (DEMO, 1987; MIGUEL, 2007). O procedimento técnico adotado foi o estudo de caso único (YIN, 2001), realizado em uma empresa de grande porte do setor de infraestrutura digital no Brasil. A organização foi selecionada por amostragem não probabilística intencional por tipicidade, considerando sua relevância no setor de *Data Centers*, complexidade tecnológica, adoção de práticas de gestão ambiental e energética, certificações ISO 14001 e ISO 50001, classificação Tier III e diretrizes relacionadas à neutralidade de carbono (ASCENTY, 2025; FROST & SULLIVAN, 2024). O Quadro 6 sintetiza o enquadramento metodológico da pesquisa.

Quadro 6 - Classificação e enquadramento metodológico da pesquisa.

Dimensão taxonômica	Classificação adotada	Justificativa e aplicação no estudo
Natureza da pesquisa	Aplicada	Produção de conhecimento direcionado à identificação e priorização de oportunidades de melhoria ambiental e ao apoio à tomada de decisão em infraestrutura de *Data Centers*.
Abordagem do problema	Abordagem qualitativa, com base em estudo de caso único (entrevista por meio de questionário semiestruturado, análise documental e aplicação da ferramenta quantitativa AHP)	Análise qualitativa das práticas operacionais e ambientais e dos aspectos relacionados à P+L, complementada pela aplicação quantitativa do método AHP para a priorização das alternativas.
Objetivos da pesquisa	Exploratório-descritivos	Analisar a aplicação da P+L nas operações de um *Data Center*, utilizando o método AHP como ferramenta de apoio à tomada de decisão para priorizar alternativas de melhoria ambiental
Procedimento técnico	Estudo de caso único	Investigação aprofundada de um fenômeno contemporâneo em seu contexto operacional real, permitindo a análise das práticas ambientais e dos fluxos associados à operação de um *Data Center* (YIN, 2001).
Amostragem	Não probabilística, intencional por tipicidade	Seleção da organização em função de sua relevância no setor de infraestrutura digital, complexidade tecnológica, adoção de práticas ambientais e energéticas, certificações ISO 14001 e ISO 50001 e classificação Tier III.
Instrumentos de coleta	Dados primários e secundários: entrevista por meio de questionário semiestruturado e análise documental	Coleta de dados primários junto aos participantes selecionados por meio de entrevistas, complementada por documentos institucionais, relatórios e normas técnicas pertinentes ao objeto de estudo.
Procedimentos de análise	Análise de conteúdo e AHP	Organização e categorização das informações qualitativas relacionadas às práticas e oportunidades de P+L, seguida da aplicação do AHP para comparação e priorização das alternativas segundo os critérios definidos (BARDIN, 2016; SAATY, 1991).

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A pesquisa foi desenvolvida a partir de revisão bibliográfica, análise documental e coleta de dados primários. As fontes secundárias incluíram relatórios de sustentabilidade, documentos institucionais e publicações técnicas de empresas relevantes do setor, como Google, IBM e Amazon Web Services, utilizadas para identificar práticas e critérios relacionados à gestão ambiental em *Data Centers* e subsidiar a análise do estudo de caso.

A coleta de dados primários ocorreu entre novembro e dezembro de 2025, em duas etapas complementares. A primeira foi realizada em 03 de novembro de 2025, por meio de entrevista semiestruturada remota, via Microsoft Teams, com duração aproximada de 60 minutos, junto ao Gerente Executivo de Vendas (Executive Sales Manager), profissional com 25 anos de experiência no setor e 12 anos na empresa. A seleção ocorreu de forma intencional, considerando seu conhecimento da organização, atuação junto a clientes corporativos e visão estratégica sobre sustentabilidade, governança

e certificações ambientais e energéticas. O roteiro contemplou quatro blocos: (i) comprometimento gerencial e estrutura organizacional para a sustentabilidade; (ii) caracterização da infraestrutura e dos fluxos operacionais; (iii) práticas ambientais e operacionais existentes; e (iv) oportunidades de melhoria e critérios de viabilidade das alternativas sustentáveis.

A segunda etapa foi realizada em dezembro de 2025 com o Coordenador de Projetos de Engenharia, graduado em Engenharia Elétrica, com 16 anos de experiência em sistemas de potência, energias renováveis e infraestrutura de missão crítica e dois anos de atuação na empresa. Sua seleção considerou a experiência técnica e a atuação diretamente relacionada à infraestrutura e aos sistemas de engenharia do *Data Center*. Nessa etapa, foi aplicado instrumento estruturado destinado à obtenção dos julgamentos comparativos necessários à construção das matrizes paritárias do AHP, incorporando à análise uma perspectiva técnico-operacional complementar à visão estratégica obtida na primeira etapa.

Os dados qualitativos foram analisados segundo a técnica de Análise de Conteúdo de Bardin (2016), compreendendo as etapas de pré-análise, exploração do material e tratamento dos resultados, inferência e interpretação. Foram analisadas a transcrição da entrevista e as fontes documentais selecionadas, com categorização das evidências segundo os níveis de intervenção da Produção Mais Limpa (P+L): Nível 1 – redução na fonte; Nível 2 – reciclagem interna; e Nível 3 – reciclagem e tratamento externo. As evidências também foram organizadas em quatro eixos de impacto operacional: resíduos eletrônicos (*e-waste*), energia, água e emissões. Os resultados foram confrontados com a literatura e os documentos analisados.

Na sequência, para a análise e priorização das soluções sustentáveis propostas com base nos princípios da Produção Mais Limpa (P+L), foi aplicado o método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), desenvolvido por Thomas L. Saaty, que permite hierarquizar critérios ambientais e econômicos, atribuindo pesos às alternativas com base em comparações paritárias (SAATY, 1991). O método foi empregado como ferramenta de apoio à decisão especificamente na etapa 5 da P+L, referente à avaliação da viabilidade das alternativas, permitindo hierarquizar alternativas e atribuir pesos com base em comparações paritárias realizadas pelos respondentes. Os critérios considerados incluem viabilidade técnica, viabilidade econômica, impacto ambiental, facilidade de implantação e aceitação interna/institucional, definidos com base na revisão de literatura e nas evidências do estudo de caso. A aplicação do método seguiu as etapas estruturadas do AHP conforme Saaty (1991):

- **Estruturação hierárquica do problema:** definição do objetivo central (selecionar as estratégias de P+L mais adequadas), seguido pelos critérios de avaliação e pelas alternativas de solução.
- **Comparações pareadas:** os critérios e alternativas foram comparados entre si utilizando a Escala Fundamental de Saaty, que varia de 1 (igual importância) a 9 (importância extrema), conforme Quadro 7, permitindo quantificar a intensidade da preferência (SAATY, 1990).

Quadro 7 - Escala Fundamental de Saaty.

1	Igual Importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação à outra
5	Importância grande ou essencial	A experiência ou juízo favorece fortemente uma atividade em relação a outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra. Pode ser demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação à outra, com o mais alto grau de segurança
2, 4, 6, 8	Valores Intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições

Fonte: Adaptado de Saaty (1990, p. 15).

Essa escala foi aplicada nas comparações paritárias realizadas pelos dois respondentes, quantificando a intensidade de preferência entre critérios e alternativas ao longo da aplicação do AHP.

● **Normalização das matrizes de comparação paritária:** A matriz é normalizada pelo somatório de cada coluna, seguindo a equação: $n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}}$, onde n_{ij} = elemento não normalizado e n = número de critérios.

● **Cálculo dos pesos relativos:** As comparações foram transformadas em valores numéricos por meio do autovetor principal, resultando na importância relativa de cada critério e alternativa (AZEVEDO, 2019). O peso de cada critério é obtido pela média dos elementos normalizados de cada linha: $w_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} n_{ij}$, onde o vetor w representa as prioridades relativas de cada critério.

● **Verificação da consistência:** Foi calculada a Razão de Consistência (RC), cujo resultado deve ser ≤ 0,10, garantindo coerência nos julgamentos realizados (MONTEIRO, 2000). Primeiro calcula-se o autovalor máximo da matriz: $\lambda_{máx} = \sum_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{n} a_{ij}.w_j\right)\frac{1}{w_i n}$.

Em seguida, obtém-se o Índice de Consistência (CI): $CI = \frac{\lambda_{máx}-n}{n-1}$, onde n representa a ordem da matriz, isto é, o número de elementos comparados. A Razão de Consistência (RC) é calculado por $RC = CI/RI$. O Índice Randômico (RI), proposto por Saaty (1991), corresponde a um valor tabelado que varia de acordo com a ordem da matriz, conforme a Tabela 1:

Tabela 1 - Índice Randômico.

Ordem da Matriz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Adaptado de Saaty (1991).

Como todas as matrizes deste estudo foram construídas com três elementos, adotou-se RI = 0,58 em todas as verificações de consistência realizadas.

● **Síntese e priorização:** Por fim, os pesos finais serão agregados para produzir um *ranking* das alternativas, indicando quais estratégias de P+L apresentam maior potencial de benefício ambiental e viabilidade de implementação no contexto analisado. Dessa forma, o AHP complementa a metodologia da P+L ao permitir uma decisão estruturada, transparente e reprodutível, apoiando a escolha das soluções que maximizam ganhos ambientais sem comprometer a viabilidade técnica e institucional.

Considerando o contexto brasileiro, caracterizado pela limitação no acesso a dados ambientais detalhados e pela presença de incertezas nas informações disponíveis, a aplicação do AHP mostra-se particularmente adequada, uma vez que permite transformar julgamentos qualitativos em escalas numéricas comparáveis, facilitando a análise multicritério mesmo em cenários com dados incompletos (VAIDYA; KUMAR, 2006).

É importante ressaltar que, no contexto do método AHP, a adequação da amostra não deve ser analisada apenas sob uma perspectiva quantitativa, uma vez que a técnica busca captar julgamentos qualificados sobre comparações paritárias entre critérios e alternativas. A literatura aponta que não há exigência de um tamanho mínimo de amostra para sua aplicação, sendo comum o uso de pequenos grupos de especialistas, desde que os participantes possuam conhecimento suficiente sobre o problema e capacidade de realizar julgamentos consistentes (DARKO et al., 2018). Nesse sentido, a validade dos resultados depende principalmente da qualificação dos julgadores, da estruturação do problema e da aderência ao contexto decisório real (SAATY; ÖZDEMIR, 2015). Assim, esta pesquisa priorizou a seleção de respondentes com visão estratégica e técnica complementar, buscando maior consistência analítica na hierarquização das alternativas da Etapa 5 da Produção Mais Limpa (P+L).

Dessa forma, a metodologia adotada permite não apenas a hierarquização das alternativas, mas também a atribuição de pesos relativos que refletem a importância de cada critério no contexto analisado, contribuindo para uma tomada de decisão mais estruturada e fundamentada. A integração entre os princípios da Produção Mais Limpa (P+L) e o método AHP possibilita, portanto, a proposição de diretrizes operacionais sustentáveis alinhadas à realidade do setor de *data centers* no Brasil.

Quanto às limitações metodológicas, destaca-se a realização de um estudo de caso único e a participação de apenas dois informantes-chave, o que restringe a generalização estatística dos resultados para outras organizações do setor. Assim, os achados devem ser interpretados como evidências contextualizadas da organização analisada. Para mitigar possíveis vieses decorrentes do número reduzido de participantes e da concentração da análise em uma única organização, foram utilizadas múltiplas fontes de evidência, incluindo entrevista semiestruturada, instrumento estruturado para aplicação do AHP, análise documental e revisão bibliográfica. Adicionalmente, a seleção de participantes com perspectivas estratégica e técnico-operacional distintas e a verificação da consistência dos julgamentos contribuíram para maior robustez da análise. Dessa forma, os resultados destinam-se à compreensão aprofundada do caso estudado e à proposição de diretrizes aplicáveis a contextos semelhantes, cabendo a estudos futuros ampliar o número de participantes e organizações analisadas.

4. Resultados do estudo de caso.

A presente seção expõe os resultados obtidos por meio de entrevistas, análise documental e referenciais de P+L aplicados ao contexto de *Data Centers*. Inicialmente, apresenta-se a caracterização da empresa e suas práticas ambientais. Em seguida, avalia-se a existência da P+L segundo o modelo SENAI/CNTL (2003a). Por fim, apresentam-se os resultados da priorização das opções da P+L por meio do método AHP, permitindo uma interpretação integrada dos aspectos técnicos, ambientais e estratégicos envolvidos.

4.1. Caracterização e práticas ambientais adotadas pela Empresa A.

As entrevistas realizadas com o Gerente Executivo de Vendas e com o Coordenador de Projetos de Engenharia da 'Empresa de *Data Center* A' forneceram subsídios complementares para compreender a estrutura operacional da empresa no contexto da P+L. A empresa destaca-se como uma das maiores provedoras de *colocation* (modelo no qual fornece o espaço físico, energia, refrigeração e segurança para hospedar servidores de terceiros) e conectividade da América Latina, segundo dados apresentados no Relatório ESG da empresa, operando sob uma *joint venture* entre grupos internacionais do setor de infraestrutura digital, com certificações como ISO 14001, ISO 50001, certificação de carbono neutro e classificação TIER III.

Segundo os entrevistados, a sustentabilidade encontra-se integrada ao modelo de negócios da empresa, sendo conduzida de forma a equilibrar viabilidade técnica, econômica e ambiental. As práticas adotadas incluem a virtualização de servidores, tecnologia que permite executar múltiplos sistemas operacionais e aplicações em um único servidor físico, e o uso de sistemas de *free cooling*, que aproveitam o ar externo para reduzir o consumo energético com climatização, além do reuso de água em sistemas de resfriamento em circuito fechado (*chillers*). Destacam-se ainda a substituição de insumos tóxicos e a utilização de energia elétrica proveniente de fontes renováveis adquiridas no Mercado Livre de Energia, modelo no qual a empresa negocia diretamente com fornecedores, podendo optar por fontes como hidrelétrica, solar e eólica. Adicionalmente, são adotadas estratégias de gestão de resíduos com foco em logística reversa, recondicionamento e política de aterro zero. Sob a perspectiva operacional, o Coordenador de Projetos de Engenharia destacou que a viabilidade técnica e a compatibilidade com a infraestrutura existente são fatores determinantes para a implementação dessas práticas. Nesse sentido, as iniciativas adotadas buscam conciliar exigências ambientais com critérios de eficiência e viabilidade operacional.

Analisando essas práticas conforme a hierarquia da Produção Mais Limpa (P+L), observa-se que as ações adotadas pela empresa se distribuem entre os três níveis da hierarquia, contemplando tanto estratégias de prevenção na fonte quanto iniciativas voltadas ao reuso e à destinação de resíduos. No Nível 1 (redução na fonte), destacam-se práticas como a virtualização de servidores, a otimização e a eficiência dos sistemas de refrigeração, a adoção de energia proveniente de fontes renováveis e a substituição de insumos, por atuarem diretamente na redução do consumo de recursos e das emissões. No Nível 2 (reciclagem interna), identificam-se o reaproveitamento hídrico por meio da recirculação da água nos sistemas de resfriamento em circuito fechado e o recondicionamento de equipamentos, associados ao reuso interno de recursos e ao prolongamento de sua vida útil. Já no Nível 3 (reciclagem externa), enquadram-se práticas como a logística reversa, a recuperação de materiais e o tratamento

controlado de resíduos. Assim, embora haja uma distribuição relativamente equilibrada entre os níveis, observa-se que o Nível 1 assume maior relevância estratégica por atuar diretamente na prevenção dos impactos ambientais na origem, conforme sistematizado no Quadro 8.

Quadro 8 - Classificação das práticas ambientais já implementadas pela Empresa A e classificadas segundo os níveis de P+L.

Prática Identificada (Empresa)	**Classificação**	**Detalhamento**
Uso de energia renovável	Nível 1 – Redução na Fonte/Insumos	Adoção de *inputs* mais limpos, como energia proveniente de fontes hidrelétricas, solares e eólicas, o que reduz as emissões na origem e é uma prática consolidada no setor
Virtualização de servidores	Nível 1 – Redução na Fonte/ Tecnologia	Mudança tecnológica que permite executar múltiplos sistemas operacionais e aplicações em um único servidor físico, minimizando a demanda por *hardware* físico e, consequentemente, reduzindo o consumo de energia e a potencial geração de resíduos
Otimização/eficiência dos sistemas de refrigeração (*chillers*)	Nível 1 – Redução na Fonte/Processo (Ecoeficiência)	Otimização tecnológica e operacional do sistema de resfriamento, contribuindo para a redução do consumo de energia e recursos na origem do processo
Compensação de Carbono	Medida compensatória (não se enquadra na P+L, mas está de acordo com a Abordagem 1 da GAE - Controle da Poluição)	Mecanismo de neutralização das emissões residuais por meio da aquisição de créditos de carbono certificados, provenientes de projetos de redução ou sequestro de emissões (ex.: reflorestamento, energia renovável)
Recondicionamento de peças	Nível 2 – Reuso Interno	Prolongamento da vida útil dos equipamentos de TI, minimizando a necessidade de nova produção de ativos
Recirculação da água em sistemas de resfriamento em circuito fechado	Nível 2 – Reuso Interno	Reaproveitamento contínuo da água dentro do próprio sistema de resfriamento, reduzindo a necessidade de reposição e captação de novos recursos hídricos
Venda de equipamentos recondicionados	Nível 3 – Reuso Externo	Destinação de equipamentos recondicionados para reutilização por terceiros, promovendo economia circular e redução de resíduos eletrônicos
Logística Reversa e Descarte Controlado	Nível 3 – Reciclagem externa	Prática relevante para a recuperação de materiais nobres e o descarte seguro de resíduos eletrônicos, em alinhamento às ações do Programa Aterro Zero
Descarte controlado de gases/fluidos	Nível 3 – Reciclagem externa e Controle da Poluição (Tratamento de Resíduos)	Controle e mitigação da poluição em resíduos que não podem ser totalmente reciclados, como fluidos refrigerantes, utilizados em sistemas de climatização (ex.: HFCs e HCFCs) alinhado à ISO 14001

Fonte: Entrevistas realizadas.

Contudo, algumas limitações merecem atenção analítica. A neutralização das emissões de carbono é realizada predominantemente por meio de créditos de carbono — mecanismo que, sob a ótica

da Gestão Ambiental Empresarial (GAE), aproxima-se da Abordagem de Controle da Poluição (nível reativo), por atuar de forma compensatória após a geração das emissões, e não na prevenção na fonte (BARBIERI, 2020). Nesse sentido, não se caracteriza como prática de Produção Mais Limpa, a qual prioriza a eliminação ou redução das emissões na origem (SENAI/CNTL, 2003a). O recondicionamento interno de equipamentos ainda não está sistematizado de forma estruturada, indicando oportunidade de avanço no Nível 2 (SENAI/CNTL, 2003b). Por fim, não foram evidenciadas metas quantitativas progressivas e formalizadas para redução de resíduos, consumo hídrico ou emissões diretas, elemento esperado em um sistema de gestão ambiental plenamente alinhado à P+L e ao ciclo de melhoria contínua (UNEP, 2007; BARBIERI, 2020).

Em síntese, a sustentabilidade na organização estudada apresenta estrutura formal e práticas preventivas relevantes, mas combina iniciativas proativas com mecanismos compensatórios de caráter reativo. No entanto, a formalização de metas progressivas e a internalização mais robusta do ciclo de vida dos equipamentos representam oportunidades concretas de aprofundamento do alinhamento à P+L.

4.2. Avaliação da existência da P+L na Empresa A segundo o modelo SENAI-RS/CNTL (2003a).

A seguir, avalia-se a existência de práticas relacionadas à Produção Mais Limpa (P+L) na Empresa A com base nas etapas do modelo SENAI-RS/CNTL (2003a), identificando ações já implementadas e oportunidades de aprimoramento. A análise foi realizada a partir das informações obtidas nas entrevistas conduzidas com os profissionais da empresa e dos dados disponibilizados no relatório ESG corporativo referente ao ano de 2024, disponível no site institucional da empresa.

4.2.1. Etapa 1 - Planejamento e organização.

A Empresa A possui estrutura compatível com práticas ambientais sistemáticas: área dedicada à gestão ambiental e *compliance*, certificações ISO 14001, ISO 50001 e carbono neutro, e indicadores internos de consumo de energia e água. A sustentabilidade é fortemente orientada por requisitos de mercado e exigências de clientes corporativos, sem adoção formal explícita da metodologia de P+L. O que pode ser melhorado: a constituição de um ecotime dedicado à P+L e a elaboração de um plano estruturado com objetivos, metas e pessoas responsáveis conforme o modelo de SENAI/CNTL (2003a) permitiriam integrar as iniciativas ambientais dispersas sob uma lógica preventiva sistêmica, fortalecendo a melhoria contínua.

4.2.2. Etapa 2 - Pré-avaliação.

O *Data Center* opera com *inputs* como energia elétrica, equipamentos de TI, sistemas de climatização e água para resfriamento, gerando como *outputs* calor residual, emissões atmosféricas, resíduos eletrônicos e fluidos refrigerantes. A Figura 4 apresenta o fluxo qualitativo interno do processo operacional da Empresa de *Data Center* A, contemplando as principais as entradas (*inputs*) necessárias para o funcionamento da infraestrutura e as saídas (*outputs*) geradas durante sua operação. Entre os principais *inputs* identificados estão energia elétrica, água para resfriamento, equipamentos de TI e sistemas de climatização, essenciais para garantir a continuidade operacional dos serviços prestados.

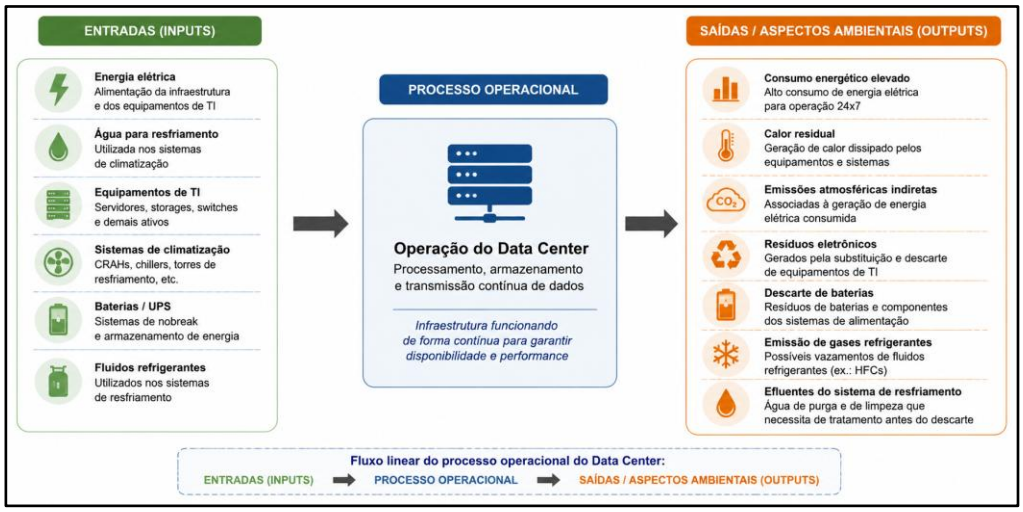


Figura 4 - Fluxograma qualitativo dos aspectos ambientais do processo operacional do *data center* (Empresa A). Fonte: Entrevistas realizadas.

Durante a operação do *data center*, caracterizada pelo processamento e armazenamento contínuo de dados, ocorre elevado consumo energético e utilização intensiva de sistemas de resfriamento, resultando em diferentes impactos ambientais. Entre os principais *outputs* identificados destacam-se a geração de calor residual, emissões atmosféricas indiretas associadas ao consumo de eletricidade, resíduos eletrônicos provenientes da substituição de equipamentos de TI, descarte de baterias e potenciais vazamentos de gases refrigerantes. Além disso, o uso de água nos sistemas de resfriamento pode gerar efluentes que necessitam de tratamento adequado antes de sua destinação.

Não foi possível a elaboração de um fluxograma quantitativo detalhado do processo produtivo, devido à uma limitação de dados operacionais disponibilizados pelo entrevistado, bem como o caráter confidencial das informações. Entretanto, com base no relatório ESG da empresa, disponibilizado em 2025, foi possível mitigar essa limitação por meio das informações ali disponibilizadas sobre gestão de resíduos, consumo energético, emissão de carbono e sustentabilidade.

Quanto à emissão dos GEE, segundo a Empresa de *Data Center* A, em 2024, 100% das emissões dos Escopos 1 e 3 foram compensadas por meio da aquisição de créditos de carbono, enquanto 100% das emissões do Escopo 2 foram neutralizadas por meio de I-RECs (Certificado Internacional de Energia Renovável); os mecanismos compensatórios foram enquadrados no nível reativo da GAE. Além disso, toda a energia elétrica consumida possui origem renovável comprovada, e a empresa participa do Programa Aterro Zero, iniciativa voltada ao reaproveitamento, recuperação e reciclagem de resíduos, evitando o envio de materiais para aterros sanitários. Complementarmente, todos os efluentes gerados passam por tratamento adequado antes de sua destinação, e os *data centers* da organização possuem certificação ISO 50001, evidenciando o compromisso com práticas estruturadas de gestão energética e melhoria contínua da eficiência no consumo de energia.

Quadro 9 - Indicadores quantitativos de desempenho ambiental da Empresa A (2024).

Indicador	Resultado em 2024	Leitura para o estudo
PUE – operações no Brasil	1,42	Abaixo da referência de mercado de 1,6 informada pela empresa.
WUE	0	Associado ao uso de sistemas de resfriamento com circuitos fechados e estratégias de eficiência hídrica.
Energia elétrica	100% renovável certificada por I-RECs	Mantém a neutralização das emissões de Escopo 2 pelo critério baseado em mercado.
Variação do consumo de energia	+7,5% em relação a 2023	Crescimento associado à expansão das operações e da demanda; não deve ser interpretado isoladamente como perda de eficiência.
Melhorias de eficiência energética	118 iniciativas	Medidas implementadas em 2024 para otimização do consumo e redução da pegada ambiental.
Emissões – Escopo 1	23.257 tCO2e	100% compensadas por créditos de carbono.
Emissões – Escopo 2	47.479 tCO2e antes da neutralização	100% neutralizadas por I-RECs; no inventário pelo método baseado em mercado, a aquisição de energia elétrica resulta em emissão líquida zero.
Emissões – Escopo 3	433 tCO2e	100% compensadas por créditos de carbono.
Resíduos desviados de aterro	91,72%	Resultado superior à meta interna de 90% para 2024.

Fonte: Elaborado a partir do Relatório ESG 2024 da Empresa A.

Os indicadores do Quadro 9 são utilizados como linha de base documental para caracterizar o desempenho ambiental existente da organização e não representam efeitos causais da aplicação do AHP ou de uma implementação de P+L conduzida por esta pesquisa. Como não foram disponibilizados custos unitários nem séries de desempenho antes e depois da adoção de cada alternativa, não foram estimadas economias financeiras ou reduções percentuais atribuíveis às opções priorizadas, evitando extrapolações não sustentadas pelos dados disponíveis.

Assim, a utilização desses dados institucionais permitiu a análise dos principais aspectos ambientais do processo produtivo, contribuindo para a identificação dos principais pontos críticos. A partir dessa análise, foram definidos como focos prioritários de avaliação os aspectos relacionados ao consumo energético, consumo hídrico, geração de resíduos eletrônicos e emissões atmosféricas, por concentrarem os impactos mais relevantes no contexto dos *data centers*.

4.2.3. Etapa 3 - Avaliação ambiental e pontos críticos.

Os principais pontos críticos identificados concentram-se na operação contínua dos servidores, nos sistemas de refrigeração, na gestão de resíduos eletrônicos e nas emissões atmosféricas associadas aos fluidos refrigerantes utilizados nos sistemas de climatização e resfriamento do *data center*, que podem apresentar elevado potencial de impacto ambiental em casos de vazamento, além das emissões provenientes dos geradores de emergência movidos a diesel. Impactos relevantes também estão relacionados à cadeia de suprimentos, especialmente à fabricação, substituição e descarte de equipamentos de TI. A partir das entrevistas realizadas e das informações disponibilizadas no relatório ESG 2024 da Empresa de *Data Center* A, foi possível identificar práticas ambientais já adotadas pela organização e relacioná-las aos princípios da Produção Mais Limpa (P+L). O Quadro 10 apresenta uma síntese dos principais aspectos ambientais, impactos associados e práticas identificadas na empresa A.

Quadro 10 - Síntese dos aspectos e impactos ambientais e opções de Produção Mais Limpa (P+L).

Etapa do processo	Aspectos ambientais (*inputs*/*outputs*)	Foco da P+L (impactos principais)	Opções de P+L identificadas na Empresa A
Operação de servidores	Alto consumo de energia; geração de calor	Principal fonte de consumo energético e emissões indiretas de GEE	Virtualização de servidores; uso de energia renovável; otimização do PUE
Sistemas de refrigeração	Consumo de água; energia; gases refrigerantes	Alto uso de recursos hídricos e emissões atmosféricas	*Free-cooling*; reuso de água; controle/substituição de refrigerantes
Substituição de equipamentos	Geração de resíduos eletrônicos e perigosos	Risco de contaminação e descarte inadequado	Logística reversa; reuso/recondicionamento; compras sustentáveis
Energia de *backup*	Uso de diesel e baterias	Emissões atmosféricas e resíduos perigosos	Redução do uso de diesel; monitoramento; alternativas energéticas

Fonte: Entrevistas realizadas e relatório ESG 2024 da Empresa A.

As principais causas de geração de resíduos e ineficiências ambientais foram identificadas a partir da análise qualitativa das entrevistas realizadas com os profissionais da empresa e das informações disponibilizadas no relatório ESG 2024. Entre os fatores identificados destacam-se a obsolescência acelerada dos equipamentos de TI, característica inerente ao setor de tecnologia; o elevado consumo energético necessário para garantir a operação contínua dos servidores e sistemas de climatização; a utilização intensiva de sistemas de refrigeração para controle térmico da infraestrutura; e a necessidade de substituição periódica de equipamentos e baterias, gerando resíduos eletrônicos e resíduos classificados como perigosos. Além disso, verificou-se que parte da gestão dos resíduos eletrônicos depende de empresas terceirizadas responsáveis pelos processos de logística reversa, reaproveitamento e reciclagem, o que reforça a importância do monitoramento e rastreabilidade do fluxo reverso desses materiais. Também foram identificadas oportunidades de aprimoramento relacionadas à ampliação de critérios ambientais na gestão de fornecedores e ao monitoramento mais detalhado do consumo energético em diferentes áreas operacionais do *data center*, especialmente em servidores e sistemas de refrigeração.

Embora a Empresa A apresente práticas alinhadas aos princípios da Produção Mais Limpa, como uso de energia renovável, gestão energética estruturada, reaproveitamento de resíduos e participação no Programa Aterro Zero, a análise realizada demonstra que ainda existem oportunidades para ampliar o controle preventivo dos impactos ambientais ao longo do ciclo operacional do *data center*.

4.2.4. Etapa 4 – Geração de opções de P+L: práticas existentes e oportunidades de melhoria.

As práticas identificadas foram analisadas com base na hierarquia da Produção Mais Limpa, evidenciando ações relacionadas aos três níveis da metodologia. No Nível 1 (redução na fonte), destacam-se iniciativas voltadas à prevenção dos impactos ambientais diretamente no processo operacional, como o uso de energia elétrica proveniente de fontes renováveis, práticas de eficiência energética e a otimização tecnológica dos sistemas de refrigeração. No Nível 2 (reciclagem interna), observam-se práticas associadas ao reaproveitamento interno de recursos e ao prolongamento da vida útil dos equipamentos, incluindo a recirculação da água em sistemas de resfriamento em circuito fechado e o recondicionamento de equipamentos. Já no Nível 3 (reciclagem externa), destacam-se ações relacionadas à logística reversa, reciclagem de resíduos eletrônicos e participação no Programa Aterro Zero.

Embora tenham sido identificadas ações nos três níveis da P+L, observa-se maior relevância estratégica das práticas associadas ao Nível 1, uma vez que atuam diretamente na prevenção e redução dos impactos ambientais na origem do processo, especialmente em relação ao elevado consumo energético característico dos *data centers*. Os níveis 2 e 3 concentram-se principalmente na mitigação, reaproveitamento e destinação adequada dos resíduos e impactos já gerados durante a operação.

Com base nos pontos críticos identificados na etapa de diagnóstico ambiental, nas entrevistas realizadas com os profissionais da empresa e nas informações disponibilizadas no relatório ESG 2024 da Empresa A, foram identificadas oportunidades de aprimoramento alinhadas aos princípios da P+L. As propostas foram elaboradas considerando os principais impactos ambientais observados — como consumo energético, sistemas de refrigeração, geração de resíduos eletrônicos e emissões atmosféricas —, além dos critérios de viabilidade técnica e aderência à infraestrutura operacional destacados pelo Gerente de Vendas e pelo Coordenador de Projetos de Engenharia entrevistados.

Entre as oportunidades relacionadas ao Nível 1 destacam-se o fortalecimento das práticas de eficiência energética, o aprimoramento dos sistemas de monitoramento operacional e a ampliação de critérios ambientais na gestão de fornecedores e aquisição de equipamentos de TI. No Nível 2, identificaram-se oportunidades associadas ao aumento do reaproveitamento e rastreabilidade de equipamentos e componentes ao longo de seu ciclo de vida útil. Já no Nível 3, destacam-se possibilidades de ampliação das práticas de logística reversa e fortalecimento do controle sobre a destinação ambientalmente adequada dos resíduos eletrônicos gerados pela operação do *data center*. Conforme destacado pelos entrevistados, também foram identificadas oportunidades relacionadas à exigência de certificados de destruição segura de dados e de reciclagem para os equipamentos descartados, visando maior rastreabilidade e segurança no processo de destinação final. Adicionalmente, observou-se potencial para ampliação das parcerias com empresas recicladoras certificadas, contribuindo para o reaproveitamento de materiais presentes nos resíduos eletrônicos (SENAI/CNTL, 2003a, 2003b; BARBIERI, 2020; UNU, 2020).

4.2.5. Etapa 5 – Estudo de Viabilidade.

Com base nos pontos críticos identificados, foram propostas alternativas de P+L e, posteriormente, aplicado o AHP como ferramenta de apoio à decisão (detalhamento feito na seção 4.3). O método foi utilizado por permitir a comparação e priorização de diferentes alternativas a partir de múltiplos critérios, reduzindo a subjetividade no processo decisório. Assim, foi possível ranquear soluções relacionadas a resíduos eletrônicos, consumo energético, uso de água e emissões atmosféricas, considerando os três critérios selecionados por cada respondente, conforme seu perfil decisório. O ranqueamento obtido refletiu a adequação das alternativas à realidade operacional da empresa.

4.2.6. Etapa 6 – Implementação.

A empresa utiliza indicadores ambientais, auditorias periódicas e certificações para monitorar o desempenho ambiental. Indicadores como PUE e WUE permitem quantificar o consumo de energia e água, identificar ineficiências e orientar ações de melhoria. As auditorias periódicas verificam a conformidade com normas e metas internas, além de avaliarem a eficácia das práticas adotadas, enquanto certificações como a ISO 14001 estruturam o Sistema de Gestão Ambiental (SGA), exigindo o controle de aspectos e impactos e promovendo a melhoria contínua.

Assim, a sustentabilidade encontra-se integrada à estratégia operacional da organização. A etapa de estudo de viabilidade das alternativas foi operacionalizada por meio do método AHP, descrito na metodologia e detalhado na próxima seção, a fim de integrar critérios selecionados pelos respondentes, contemplando dimensões técnicas, econômicas, ambientais e institucionais em um processo decisório estruturado, transparente e reprodutível (SAATY, 1991).

4.3. Priorização das alternativas sustentáveis (opções da P+L) por meio do AHP.

No desenvolvimento deste estudo, verificou-se a inviabilidade prática de estruturar um modelo decisório que contemplasse todos os aspectos ambientais inicialmente mapeados, devido à complexidade inerente ao processo de comparação paritária do método AHP. Dessa forma, optou-se por sintetizar esses aspectos e selecionar aqueles que representam, simultaneamente, os principais desafios ambientais dos *data centers* e oportunidades factíveis de intervenção alinhadas à P+L, a partir dos quais foram definidas as alternativas de P+L a serem priorizadas. Assim, os aspectos ambientais foram reorganizados em quatro grandes grupos amplamente reconhecidos na literatura: (i) resíduos eletrônicos (*e-waste*), (ii) consumo energético, (iii) consumo de água e (iv) emissões atmosféricas.

Para fins de estruturação do modelo decisório, o problema foi organizado a partir da relação entre três dimensões principais: (i) quatro grupos de aspectos ambientais; (ii) três alternativas de P+L associadas a cada aspecto; e (iii) três critérios de decisão. Dessa forma, o modelo adotado configura uma estrutura analítica do tipo 4 × 3 × 3, na qual cada aspecto ambiental é avaliado por meio de três alternativas de P+L, comparadas com base em três critérios de decisão, permitindo a aplicação do AHP de forma segmentada, consistente e operacionalmente viável.

Os critérios de decisão foram definidos a partir da abordagem do SENAI/CNTL (2003a), sendo solicitado aos entrevistados que selecionassem os três mais relevantes entre: viabilidade técnica, viabilidade econômica, impacto ambiental, facilidade de implantação e aceitação interna. Na primeira entrevista, foram selecionados: viabilidade técnica, viabilidade econômica e impacto ambiental. Na segunda entrevista, foram selecionadas viabilidade técnica, viabilidade econômica e aceitação interna/institucional.

As alternativas ambientais de P+L avaliadas para cada aspecto ambiental foram:

● **Resíduos eletrônicos:** (A1) Logística reversa de equipamentos; (A2) Programas de recondicionamento/reuso de peças; (A3) Compra de *hardware* com certificações ambientais.

● **Consumo de energia:** (B1) Consolidação/virtualização de servidores; (B2) Uso de energias renováveis; (B3) *Free-cooling* e sistemas de controle inteligente.

● **Consumo de água:** (C1) Reuso de água em sistemas de resfriamento; (C2) Otimização de sistemas de arrefecimento (como *chillers* de alta eficiência); (C3) Monitoramento e detecção de vazamentos.

● **Emissões atmosféricas:** (D1) Substituição de gases refrigerantes por alternativas de baixo impacto; (D2) Migração para energia de baixo carbono (solar, eólica, etc.); (D3) Sistemas de contenção e detecção de vazamentos de gases.

Cada conjunto de alternativas foi avaliado de forma independente no AHP, em relação aos três critérios selecionados por cada respondente, garantindo comparabilidade interna entre as opções de um mesmo aspecto ambiental.

A etapa de avaliação de viabilidade das alternativas, conforme proposta pelo SENAI/CNTL (2003a), foi operacionalizada por meio do método AHP, devido à sua capacidade de integrar critérios selecionados pelos respondentes, abrangendo dimensões técnicas, econômicas, ambientais e institucionais em um único processo estruturado de decisão.

O problema foi estruturado em três níveis hierárquicos:

1) **Nível 1 – Objetivo:** priorizar as alternativas de Produção Mais Limpa (P+L) mais adequadas para *data centers*;

2) **Nível 2 – Critérios:** três critérios selecionados por cada respondente dentre viabilidade técnica, viabilidade econômica, impacto ambiental, facilidade de implantação e aceitação interna/institucional;

3) **Nível 3 – Alternativas:** práticas de P+L associadas aos principais aspectos ambientais identificados.

A aplicação do AHP foi realizada por meio de duas entrevistas com perfis distintos: um gestor de vendas e um coordenador de projetos de engenharia. Essa abordagem permitiu comparar diferentes perspectivas decisórias, considerando que, em contextos organizacionais complexos, a priorização de soluções ambientais pode variar conforme o nível de proximidade com a operação e a tomada de decisão técnica.

A redução da variedade de aspectos ambientais e das alternativas analisadas configura uma limitação da pesquisa, porém foi necessária para viabilizar a aplicação do método em ambiente real, garantindo consistência nos julgamentos e maior confiabilidade dos resultados.

4.3.1. Aplicação do AHP – Entrevista 1 (Gerente Executivo de Vendas).

Na primeira entrevista, realizada com o Gerente Executivo de Vendas, os critérios selecionados como mais relevantes foram Viabilidade técnica, Viabilidade econômica e Impactos ambientais. Contudo, observou-se uma percepção mais equilibrada entre os critérios, com forte tendência a julgar alternativas de forma semelhante entre diferentes dimensões de análise.

● **Comparação entre critérios:** Na comparação entre critérios, o entrevistado atribuiu intensidade 1 em todas as comparações, indicando que os três critérios eram percebidos como igualmente importantes, a Tabela 2 consolida essas respostas. A matriz resultante apresentou pesos equilibrados.

Tabela 2 - Matriz de comparação paritária entre critérios (Entrevista 1).

Critérios	Viabilidade técnica	Viabilidade econômica	Impactos ambientais
Viabilidade técnica	1,00	1,00	1,00
Viabilidade econômica	1,00	1,00	1,00
Impactos ambientais	1,00	1,00	1,00
Soma	3,00	3,00	3,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

● **Normalização:** Após a construção da matriz, procedeu-se à normalização, dividindo-se cada elemento da matriz pela soma da respectiva coluna, conforme a seguir: $n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} a_{ij}} \rightarrow n_{ij} = \frac{1}{1+1+1} = \frac{1}{3} = 0{,}333\ldots$

Como todos os elementos da matriz possuem valor 1, todos os elementos normalizados apresentam o mesmo resultado (0,333…).

● **Vetor de prioridade:** Após a construção da matriz, procedeu-se à normalização, dividindo-se cada elemento da matriz pela soma da respectiva coluna, conforme a equação a seguir: $w_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} n_{ij} \rightarrow \frac{0{,}3333 + 0{,}3333 + 0{,}3333}{3} = 0{,}333\ldots$

Os resultados da matriz normalizada e do vetor de prioridade estão apresentados na Tabela 3, evidenciando a distribuição uniforme dos pesos entre os critérios analisados.

Tabela 3 - Matriz normalizada e vetor de prioridade dos critérios.

Critérios	Normalizado Viabilidade técnica	Normalizado Viabilidade econômica	Normalizado Impacto ambiental	Vetor prioridade (W)
Viabilidade técnica	0,33	0,33	0,33	0,33
Viabilidade econômica	0,33	0,33	0,33	0,33
Impacto ambiental	0,33	0,33	0,33	0,33
Soma	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

● **Consistência:** Após o cálculo dos pesos, foi realizada a análise de consistência, a fim de verificar se os julgamentos do entrevistado apresentavam coerência lógica.

i) **Vetor soma ponderada:** Primeiramente, multiplicou-se a matriz original de comparação paritária pelo vetor de prioridades, a fim de obter-se $a_{ij}.w_j$. Para este caso específico, a operação resultou em um vetor de três linhas com valores unitários (1);

ii) **Autovalor máximo:** $\lambda_{máx}: \sum_{i=1}^{n} \left(\sum_{j=1}^{n} a_{ij}.w_j\right)\frac{1}{w_i n} = \frac{1}{0{,}33\ldots} = 3{,}00$

iii) **Índice de consistência:** $CI = \frac{\lambda_{máx} - n}{n-1} = \frac{3-3}{3-1} = 0$

iv) **Razão de Consistência (RC):** Para matrizes de ordem 3 × 3, adotou-se RI = 0,58, conforme o índice randômico proposto por Saaty (1991). Então RC = 0 / 0,58 = 0 ≤ 0,10, portanto a matriz é consistente.

Assim, os valores consolidados na etapa de consistência podem ser observados na Tabela 4:

Tabela 4 - Resultados da verificação de consistência da matriz de critérios (Entrevista 1).

Autovalor ($\lambda_{máx}$)	Índice de Consistência (CI)	RI (n = 3)	Razão de Consistência (CI/RI)
3,00	0,00	0,58	0,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Após a análise dos critérios, o mesmo procedimento foi aplicado às alternativas de solução associadas a cada aspecto ambiental analisado — **resíduos eletrônicos (*e-waste*), consumo energético, consumo de água e emissões atmosféricas**. Em todos os casos, seguiram-se as mesmas etapas do método AHP: construção da matriz de comparação paritária, normalização dos valores, cálculo do vetor de prioridade local e verificação da consistência dos julgamentos por meio do autovalor máximo (λmax), do Índice de Consistência (CI) e da Razão de Consistência (RC). Como esse procedimento matemático se repete de forma idêntica para todos os grupos de alternativas, optou-se por não detalhar integralmente cada cálculo no corpo do texto, a fim de evitar redundâncias. Observa-se que todas as matrizes apresentaram consistência satisfatória (RC ≤ 0,10), o que confirma a confiabilidade dos julgamentos fornecidos pelo entrevistado. Os resultados foram consolidados na Tabela 5 a seguir, preservando a clareza metodológica e a objetividade da análise.

Tabela 5 - Consolidação das etapas do AHP e dos resultados obtidos (Entrevista 1).

Aspecto ambiental	Matriz de comparação	Soma das colunas	w_i	$\lambda_{máx}$	CI	RC
Resíduos eletrônicos (*e-waste)*	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1/3 \\ 3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$	(5,00; 5,00; 1,67)	(0,20; 0,20; 0,60)	3,00	0,00	0,00
Consumo energético	$\begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/5 \\ 5 & 1 & 1 \\ 5 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	(11,00; 2,20; 2,20)	(0,10; 0,45; 0,45)	3,00	0,00	0,00
Consumo de água	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	(3,00; 3,00; 3,00)	(0,33; 0,33; 0,33)	3,00	0,00	0,00
Emissões atmosféricas	$\begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 1 & 3 \\ 3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$	(9,00; 1,53; 4,33)	(0,11; 0,63; 0,26)	3,04	0,02	0,03

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na sequência, calculou-se a prioridade global, que no método AHP corresponde à combinação entre os pesos dos critérios e as prioridades locais das alternativas. Em termos gerais, a prioridade global é obtida pela multiplicação do vetor de prioridades locais das alternativas pelo vetor de pesos dos critérios, seguida da soma ponderada dos resultados. Entretanto, nesta entrevista, os três critérios — Viabilidade técnica, Viabilidade econômica e Impactos ambientais — receberam pesos idênticos (0,333 cada), o que significa que nenhum critério exerceu influência maior que outro sobre o resultado final. Por esse motivo, as prioridades globais coincidiram com as prioridades locais (w_i), não havendo alteração no *ranking* final das alternativas. Dessa forma, como todos os critérios apresentaram a mesma importância relativa, o peso final de cada alternativa permaneceu igual aos valores previamente obtidos no vetor de prioridade local, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Prioridade global das alternativas (Entrevista 1).

Alternativas	1	2	3
A	20,00%	20,00%	60,00%
B	9,09%	45,45%	45,45%
C	33,33%	33,33%	33,33%
D	10,62%	63,33%	26,05%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Com base na priorização global, foi possível identificar as alternativas mais adequadas para cada aspecto ambiental. Para resíduos eletrônicos, a alternativa de maior prioridade foi A3 – Compra de *hardware* com certificações ambientais (60,00%), enquanto A1 e A2 obtiveram pesos iguais (20,00% cada), indicando que a aquisição responsável de equipamentos é percebida como a estratégia mais eficaz por atuar preventivamente na fonte do problema. Para consumo energético, houve empate entre B2 – Uso de energias renováveis e B3 – *Free-cooling*/controles inteligentes (45,45% cada), com B1 em posição inferior (9,09%), possivelmente por já existir grau de virtualização implantado na empresa. Para consumo de água, o empate entre C1, C2 e C3 (33,33% cada) pode indicar que o respondente percebe as três alternativas como igualmente necessárias e complementares. Para emissões atmosféricas, D2 – Migração para energia de baixo carbono obteve maior prioridade (63,33%), resultado coerente com o perfil estratégico e comercial do respondente, que tende a valorizar soluções de maior visibilidade institucional e alinhamento a metas ESG.

4.3.2. Aplicação do AHP – Entrevista 2 (Coordenador de Projetos de Engenharia).

Na segunda entrevista, conduzida com o Coordenador de Projetos de Engenharia, os critérios selecionados foram viabilidade técnica, viabilidade econômica e aceitação interna/institucional. Diferentemente da primeira aplicação, observou-se uma estrutura decisória mais hierarquizada, compatível com o perfil técnico-operacional do respondente e mais sensível à exequibilidade prática, à aderência organizacional e às restrições reais de implementação das alternativas.

- Viabilidade técnica foi considerada fortemente mais importante do que Viabilidade econômica, com intensidade 7;
- Viabilidade técnica foi considerada moderadamente a fortemente mais importante do que Aceitação interna/institucional, com intensidade 4;
- Aceitação interna/institucional foi considerada fortemente mais importante do que Viabilidade econômica, com intensidade 4.

Com base nessas respostas, foi construída a matriz de comparação paritária apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Matriz de comparação paritária entre critérios (Entrevista 2).

Critérios	Viabilidade técnica	Viabilidade econômica	Aceitação interna
Viabilidade técnica	1,00	7,00	4,00
Viabilidade econômica	0,14	1,00	0,25
Aceitação interna	0,25	4,00	1,00
Soma	1,39	12,00	5,25

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na sequência, a matriz foi normalizada, dividindo-se cada elemento pela soma de sua respectiva coluna. Essa etapa tem como objetivo transformar os julgamentos em valores proporcionais comparáveis, de forma que a soma de cada coluna seja igual a 1. A normalização foi realizada conforme a seguinte expressão: $n_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^{n} a_{ij}$ e podem ser observados no exemplo abaixo:

- **Exemplo de normalização da coluna "Viabilidade técnica"**

  i) Viabilidade técnica: $n_{ij} = \frac{1}{1{,}00+0{,}14+0{,}25} = \frac{1}{1{,}39} = 0{,}72\ldots$

  ii) Viabilidade econômica: $n_{ij} = \frac{0{,}14}{1{,}00+0{,}14+0{,}25} = \frac{0{,}14}{1{,}39} = 0{,}10\ldots$

  iii) Aceitação interna: $n_{ij} = \frac{0{,}25}{1{,}00+0{,}14+0{,}25} = \frac{0{,}25}{1{,}39} = 0{,}18\ldots$

Após a normalização, foi calculado o vetor de prioridades, que representa o peso relativo de cada critério dentro da estrutura decisória. Esse vetor foi obtido por meio da média aritmética dos valores normalizados em cada linha. Abaixo, segue o exemplo do cálculo do vetor prioridade do critério de "Viabilidade técnica":

$$w_{VT} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} n_{ij} \rightarrow \frac{0{,}72 + 0{,}58 + 0{,}76}{3} = 0{,}69$$

Tanto os cálculos de normalização quanto o de vetor prioridade foram reaplicados para os demais critérios. A Tabela 8 sintetiza os resultados obtidos.

Tabela 8 - Matriz normalizada e vetor prioridade dos critérios (Entrevista 2).

Critérios	Viabilidade técnica	Viabilidade econômica	Aceitação interna	Vetor prioridade (W)
Viabilidade técnica	0,72	0,58	0,76	0,69
Viabilidade econômica	0,10	0,08	0,05	0,08
Aceitação interna	0,18	0,33	0,19	0,23
Soma	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na sequência, foi realizada a análise de consistência, com o objetivo de verificar se os julgamentos fornecidos pelo entrevistado apresentavam coerência lógica interna. Inicialmente, multiplicou-se a matriz original de comparação paritária pelo vetor de prioridades dos critérios (A × W) e, em seguida, calcularam-se as razões $\lambda_i = AW_i/w_i$. Esses resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do cálculo das razões λ_i da matriz de critérios (Entrevista 2).

Critério	Vetor soma ponderada (AW)	Prioridade local (w_i)	$\lambda_i = \frac{AW}{w_i}$
Viabilidade técnica	2,17	0,69	≃3,16
Viabilidade econômica	0,23	0,08	≃3,02
Aceitação interna / institucional	0,72	0,23	≃3,07

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Após a obtenção das razões individuais λ_i, procedeu-se ao cálculo do autovalor máximo e dos índices de consistência da matriz de critérios:

- **Autovalor máximo:** $\lambda_{máx} = \frac{3{,}156\ldots + 3{,}015\ldots + 3{,}062\ldots}{3} \simeq 3{,}07$

● **Índice de Consistência (CI):** $CI = \frac{\lambda_{máx} - n}{n-1} = \frac{3{,}07\ldots - 3}{3-1} \simeq 0{,}04$

● **Razão de Consistência (RC):** Como a matriz analisada é de ordem 3 × 3, adotou-se RI = 0,58, conforme o índice randômico de Saaty (1991). Assim: $RC = \frac{CI}{RI} = \frac{0{,}04\ldots}{0{,}58} \simeq 0{,}07$. Como RC ≤ 0,10, conclui-se que a matriz apresenta consistência satisfatória, sendo adequada para a continuidade da análise.

Após a análise da matriz de critérios, o mesmo procedimento de verificação da consistência foi aplicado às matrizes de comparação paritária das alternativas associadas aos quatro aspectos ambientais analisados — resíduos eletrônicos, consumo energético, consumo de água e emissões atmosféricas. Como a reprodução integral dos cálculos de λmáx, CI e RC para cada matriz tornaria a apresentação excessivamente repetitiva, os valores de RC das duas aplicações do AHP foram consolidados na Tabela 10. Todos os valores permaneceram inferiores ao limite de 0,10 adotado no estudo, indicando consistência satisfatória dos julgamentos utilizados na obtenção das prioridades.

Tabela 10 - Síntese da Razão de Consistência (RC) das matrizes AHP.

Entrevista	Matriz / aspecto ambiental	Critério de avaliação	RC
Entrevista 1	Matriz de critérios	—	0,0000
Entrevista 1	Resíduos eletrônicos	Matriz única de alternativas	0,0000
Entrevista 1	Consumo energético	Matriz única de alternativas	0,0000
Entrevista 1	Consumo de água	Matriz única de alternativas	0,0000
Entrevista 1	Emissões atmosféricas	Matriz única de alternativas	0,0334
Entrevista 2	Matriz de critérios	—	0,0668
Entrevista 2	Resíduos eletrônicos	Viabilidade técnica	0,0565
Entrevista 2	Resíduos eletrônicos	Viabilidade econômica	0,0565
Entrevista 2	Resíduos eletrônicos	Aceitação interna/institucional	0,0334
Entrevista 2	Consumo energético	Viabilidade técnica	0,0334
Entrevista 2	Consumo energético	Viabilidade econômica	0,0281
Entrevista 2	Consumo energético	Aceitação interna/institucional	0,0565
Entrevista 2	Consumo de água	Viabilidade técnica	0,0334
Entrevista 2	Consumo de água	Viabilidade econômica	0,0334
Entrevista 2	Consumo de água	Aceitação interna/institucional	0,0567
Entrevista 2	Emissões atmosféricas	Viabilidade técnica	0,0565
Entrevista 2	Emissões atmosféricas	Viabilidade econômica	0,0747
Entrevista 2	Emissões atmosféricas	Aceitação interna/institucional	0,0567

Fonte: Elaborado pelos autores (2026) com base nas matrizes de comparação paritária das Entrevistas 1 e 2.

Diferentemente da Entrevista 1, nesta segunda aplicação os critérios apresentaram pesos distintos, o que exigiu o cálculo da prioridade global das alternativas por meio da ponderação entre os pesos dos critérios e as prioridades locais. No AHP, a prioridade global é obtida por meio da ponderação das prioridades locais das alternativas pelos pesos dos critérios, conforme a expressão geral: $P_i = \Sigma(w_j \cdot p_{ji})$, onde P_i é a prioridade global da alternativa i, w_j é o peso do critério j e p_{ji} é a prioridade local da alternativa i em relação ao critério j.

No presente estudo, como foi adotada uma matriz síntese de alternativas por aspecto ambiental, a prioridade global foi interpretada como o resultado final ponderado pela estrutura de importância dos critérios, refletindo, portanto, o peso relativo da decisão segundo o perfil do entrevistado. Assim, os *rankings* finais obtidos para cada grupo de alternativas são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Prioridade global das alternativas (Entrevista 2).

Alternativas	1	2	3
A (*e-waste*)	61,30%	26,95%	11,75%
B (Consumo energético)	50,75%	23,05%	26,21%
C (Consumo de água)	25,09%	50,11%	24,80%
D (Emissões atmosféricas)	38,63%	10,35%	51,02%

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Com base nos resultados da prioridade global das alternativas obtidos na Entrevista 2, observou-se que as alternativas de maior prioridade foram: A1 – Logística reversa de equipamentos, para o aspecto de resíduos eletrônicos (*e-waste*), com 61,30%; B1 – Consolidação/virtualização de servidores, para consumo energético, com 50,75%; C2 – Otimização de sistemas de arrefecimento, para consumo de água, com 50,11%; e D3 – Sistemas de contenção e detecção de vazamentos de gases, para emissões atmosféricas, com 51,02%. De modo geral, observa-se que o entrevistado priorizou alternativas mais diretamente relacionadas à eficiência operacional, viabilidade técnica e ao controle e à mitigação dos impactos ambientais, o que reforça a aderência dos resultados ao perfil técnico do respondente.

4.3.3. Comparação entre os resultados obtidos.

A comparação entre os resultados das duas entrevistas evidenciou que a priorização das alternativas variou de forma significativa conforme o perfil do respondente, reforçando a relevância de incorporar múltiplas perspectivas na aplicação do AHP. Na Entrevista 1, conduzida com o Gerente Executivo de Vendas, observou-se uma estrutura decisória mais equilibrada, com pesos idênticos entre os critérios e tendência à priorização de soluções mais amplas, estratégicas e institucionalmente valorizadas. Já na Entrevista 2, realizada com o *Coordenador de Projetos de Engenharia*, a priorização mostrou-se mais objetiva e tecnicamente orientada, favorecendo alternativas com maior viabilidade prática, controle operacional e aderência à infraestrutura existente. Esses resultados indicam que o perfil do decisor influencia o *ranking* final das alternativas. As duas perspectivas, entretanto, são complementares: a primeira evidencia direcionadores estratégicos e institucionais, enquanto a segunda oferece maior ênfase sobre restrições técnico-operacionais.

A divergência entre os *rankings* não deve ser interpretada, por si só, como inconsistência do método. No AHP, os pesos expressam julgamentos relativos dos decisores e podem variar conforme experiência, posição organizacional e critérios selecionados; a coerência é verificada internamente em cada matriz por meio da Razão de Consistência (RC), e não pela concordância entre diferentes respondentes (VAIDYA; KUMAR, 2006; SAATY; ÖZDEMIR, 2015). Nesse sentido, a literatura destaca que pequenos grupos de especialistas podem produzir prioridades distintas e ainda assim metodologicamente válidas, desde que os julgamentos sejam qualificados e consistentes (DARKO et al., 2018).

Sob a ótica da P+L, as duas perspectivas também evidenciam dimensões complementares da decisão ambiental. O perfil técnico favoreceu alternativas associadas à eficiência operacional e ao controle dos impactos, como virtualização, otimização do arrefecimento e sistemas de contenção e detecção de vazamentos, enquanto o perfil estratégico atribuiu maior peso a soluções de caráter preventivo e com aderência institucional e ESG, como compra de *hardware* com certificações ambientais e energia de baixo carbono. Essa complementaridade é coerente com a literatura recente de P+L e Economia Circular, que associa a melhoria do desempenho ambiental tanto à eficiência de recursos e prevenção de perdas quanto à incorporação de critérios ambientais ao ciclo de vida e à cadeia de suprimentos (BAÊTA et al., 2023; SHABANPOUR et al., 2024).

Por fim, em uma visão global dos resultados do estudo de caso, o Quadro 11 apresenta uma síntese com as práticas ambientais já implementadas pela Empresa A, as alternativas de melhoria ambiental de P+L propostas e avaliadas por meio do AHP, o resultado da priorização por cada entrevistado e o enquadramento de todas as práticas segundo os três níveis hierárquicos da P+L. Salienta-se que as alternativas priorizadas pelo AHP não correspondem apenas a práticas já implementadas pela empresa (em algum grau não revelado pelos entrevistados), mas também oportunidades de implementação de novas práticas levantadas a partir da revisão da literatura (aplicáveis ao contexto de *Data Centers* e já aplicadas por grandes empresas do setor - dados secundários). Nesta segunda situação de oportunidade de implementação de novas práticas ambientais, encontram-se as práticas ambientais A3 – Compra de *hardware* com certificações ambientais, (B3) *Free-cooling* e sistemas de controle inteligente, (C2) Otimização de sistemas de arrefecimento (como *chillers* de alta eficiência), C3 – Monitoramento e detecção de vazamento de água, (D1) Substituição de gases refrigerantes por alternativas de baixo impacto e D3 – Sistemas de contenção e detecção de vazamentos de emissões. No quadro 1, se observa o predomínio de práticas de P+L de nível 1 de Redução na Fonte, conforme o grau de prioridade estabelecido pelo conceito de P+L.

Quadro 11 - Síntese comparativa das práticas ambientais (implementadas e/ou oportunidades), priorização AHP e enquadramento em P+L.

Aspecto ambiental	Prática ambiental identificada na Empresa A	Evidências de implementação/ desenvolvimento	Alternativa AHP	Fonte da alternativa	AHP – E1	AHP – E2	Nível P+L
Resíduos eletrônicos	Logística reversa, recuperação/recondicionamento e destinação adequada	Práticas identificadas; iniciativas de recuperação e desvio de aterros	**A1 – Logística reversa de equipamentos**	Relatórios de sustentabilidade de Google, Amazon e IBM	**20,00%**	**61,30%**	Nível 3
			A2 – Recondicionamento e reuso de peças	Relatórios de sustentabilidade de Google, Amazon e IBM	**20,00%**	**26,95%**	Nível 2
			A3 – Compra de *hardware* com certificações ambientais	Relatórios de sustentabilidade de Google, Amazon e IBM	**60,00%**	**11,75%**	Nível 1
Consumo energético	Energia renovável; virtualização; sistemas eficientes de refrigeração	PUE = 1,42; práticas de eficiência energética identificadas	**B1 – Consolidação / virtualização de servidores**	Relatórios de sustentabilidade de Google, Amazon e IBM	**45,45%**	**23,65%**	Nível 1
			B2 – Uso de energias renováveis	Relatórios de sustentabilidade de Google, Amazon e IBM	**9,09%**	**50,75%**	Nível 1

Aspecto ambiental	Prática ambiental identificada na Empresa A	Evidências de implementação/ desenvolvimento	Alternativa AHP	Fonte da alternativa	AHP – E1	AHP – E2	Nível P+L
			B3 – *Free-cooling* e sistemas de controle inteligente	Relatórios de sustentabilidade de Google, Amazon e IBM	**45,45%**	**25,60%**	Nível 1
Consumo de água	Recirculação/reuso de água e sistemas eficientes de resfriamento	WUE = 0 L/kWh; práticas de recirculação identificadas	**C1 – Reuso de água em sistemas de resfriamento**	Relatórios de sustentabilidade de Google, Amazon e IBM	**33,33%**	**25,09%**	Nível 2
			C2 – Otimização de sistemas de arrefecimento (como *chillers* de alta eficiência)	Relatórios de sustentabilidade de Google, Amazon e IBM	**33,33%**	**50,11%**	Nível 1
			C3 – Monitoramento e detecção de vazamentos	Relatórios de sustentabilidade de Google, Amazon e IBM	**33,33%**	**24,80%**	Nível 1
Emissões	Energia renovável e gestão de gases refrigerantes	Práticas de gestão identificadas; indicadores de emissões e energia renovável, conforme Relatório ESG de 2025	**D1 – Substituição de gases refrigerantes por alternativas de baixo impacto**	Relatórios de sustentabilidade de Google, Amazon e IBM	**10,62%**	**38,63%**	Nível 1

Aspecto ambiental	Prática ambiental identificada na Empresa A	Evidências de implementação/ desenvolvimento	Alternativa AHP	Fonte da alternativa	AHP – E1	AHP – E2	Nível P+L
		(100% das emissões diretas e indiretas compensadas por créditos de carbono e 100% de energia renovável certificada por I-RECs)	**D2 – Energia de baixo carbono**	Relatórios de sustentabilidade de Google, Amazon e IBM	**63,33%**	**10,35%**	Nível 1
			D3 – Sistemas de contenção e detecção de vazamentos	Relatórios de sustentabilidade de Google, Amazon e IBM	**26,05%**	**51,02%**	Nível 1

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

5. Conclusão.

Este estudo buscou avaliar a aplicação da P+L nas operações de um *Data Center* - identificando os aspectos ambientais (*inputs* e *outputs* do sistema de produção) e potenciais impactos ambientais relacionados ao consumo de energia, uso de água, geração de resíduos e emissões atmosféricas, bem como levantando as práticas ambientais já implementadas e/ou propostas segundo os níveis hierárquicos da P+L - e priorizar alternativas ambientais sustentáveis/práticas ambientais da P+L, por meio da ferramenta AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Observa-se que, embora os *Data Centers* sejam essenciais para a sustentação da sociedade digital, suas operações envolvem impactos ambientais relevantes, especialmente no consumo intensivo de energia elétrica e água, na geração de resíduos eletrônicos e nas emissões de gases de efeito estufa.

Nesse contexto, a P+L mostrou-se uma abordagem adequada para estruturar ações preventivas voltadas à redução dos impactos ambientais na fonte, à eficiência no uso de recursos e à melhoria do desempenho ambiental do setor.

O estudo de caso evidenciou que a Empresa A já adota práticas alinhadas aos três níveis da P+L. No Nível 1 (redução na fonte), destacam-se ações relacionadas ao uso de energia proveniente de fontes renováveis, às práticas de eficiência energética e à otimização tecnológica dos sistemas de refrigeração. A predominância estratégica desse nível pode estar relacionada ao fato de que o consumo energético representa um dos principais impactos ambientais e econômicos dos *Data Centers*, tornando prioritárias as ações voltadas à redução do consumo e ao aumento da eficiência operacional. No Nível 2 (reciclagem interna), foram identificadas práticas relacionadas à recirculação e ao reaproveitamento da água nos sistemas de resfriamento em circuito fechado e ao recondicionamento de equipamentos, contribuindo para o uso mais eficiente dos recursos dentro da própria operação e para a ampliação da vida útil dos ativos. Já no Nível 3 (reciclagem externa), destacam-se as práticas de logística reversa de resíduos eletrônicos e as ações vinculadas ao Programa Aterro Zero, voltadas ao reaproveitamento, reciclagem e destinação ambientalmente adequada dos resíduos gerados.

A aplicação do método AHP evidenciou que diferentes perfis decisórios influenciam a hierarquização das alternativas ou opções de melhoria de práticas ambientais. Na Entrevista 1, destacaram-se a compra de *hardware* com certificações ambientais para o aspecto ambiental dos resíduos eletrônicos (A3 = 60,00%), o uso de energias renováveis e o *free-cooling*/controles inteligentes para o aspecto ambiental da energia (B2 e B3 = 45,45% cada), a equivalência entre as alternativas para o aspecto ambiental da água relativas ao reuso de água, à otimização de sistemas de resfriamento (como chillers de alta eficiência) e ao monitoramento e detecção de vazamentos de água (33,33% = C1, C2 e C3) e a migração para energia de baixo carbono para o aspecto das emissões atmosféricas (D2 = 63,33%). Na Entrevista 2, as maiores prioridades foram logística reversa (A1 = 61,30%), virtualização de servidores (B1 = 50,75%), otimização dos sistemas de arrefecimento (C2 = 50,11%) e sistemas de contenção e detecção de vazamentos de gases (D3 = 51,02%). A diferença observada, especialmente no aspecto de emissões atmosféricas, reforça que a posição funcional e os critérios selecionados influenciam o *ranking*, sem representar inconsistência do método.

Nesse sentido, os resultados evidenciaram diferenças de perspectiva entre os entrevistados. Enquanto o Gerente de Vendas (entrevistado 1) atribuiu maior relevância às alternativas associadas ao posicionamento estratégico, reputacional e aderência às metas ESG da organização, o Coordenador de Projetos de Engenharia (entrevistado 2) priorizou aspectos relacionados à viabilidade técnica, operacional e integração das soluções à infraestrutura existente do *data center*. Apesar dessas diferenças de perfil decisório, os resultados apresentaram coerência metodológica e reforçaram a utilidade do AHP como ferramenta de apoio à tomada de decisão em contextos organizacionais complexos.

Em uma visão geral, a Empresa A apresenta estrutura formalizada de Gestão Ambiental Empresarial, existindo área/função de Gestão Ambiental e Compliance dentro da estrutura organizacional dela, certificações ISO 14001, ISO 50001 e carbono neutro, e indicadores internos de consumo de energia e água. Especificamente sobre o conceito de GAE relativo à P+L, não se pode afirmar que Empresa A tenha alto grau de desenvolvimento em tal conceito, mesmo sendo possível identificar nela práticas de nível 1, 2 e 3 deste conceito de GAE. Apesar de a Empresa A já adotar práticas ambientais dos três níveis da P+L, ressalta-se que os entrevistados não avaliaram ou divulgaram, no momento das entrevistas, em quais graus de desenvolvimento interno se encontravam tais práticas.

Além disso foram identificadas oportunidades de melhoria na empresa, sendo elas: a) não há adoção formal e explícita do conceito de P+L; b) das emissões de GEE, a empresa A utiliza a compra de Créditos de Carbono para a neutralização ou compensação das emissões, que é um mecanismo de transferência da responsabilidade da GAE para outras empresas externas, ou então que se aproxima da 1ª abordagem de GAE relativa ao Controle da Poluição (nível reativo e não preventivo em que a P+L se enquadra); c) nesse sentido, ausência da prevenção na geração de emissões; d) necessidade de maior estruturação do recondicionamento interno de peças e máquinas; e) ausência de metas quantitativas progressivas formalizadas para redução de resíduos e emissões atmosféricas e consumo de água visando a melhoria contínua proposta pela P+L. Sendo assim, são necessárias mais evidências para afirmar qual grau de desenvolvimento da Empresa A no que tange ao conceito de P+L.

Como contribuição teórico-metodológica, o artigo articula o diagnóstico preventivo da P+L segundo o modelo SENAI/CNTL (2003a) à ferramenta quantitativa AHP na etapa de avaliação de viabilidade das Opções da P+L, estruturando a comparação de alternativas ambientais sob diferentes critérios e evidenciando empiricamente como o perfil do decisor altera a priorização. No plano prático, essa integração fornece à organização um processo transparente e reprodutível para transformar o diagnóstico ambiental qualitativo em uma tomada de decisão fundamentada em dados quantitativos.

Como recomendações acionáveis, as prioridades devem ser interpretadas dentro de cada aspecto ambiental, pois o AHP não produziu um *ranking* único entre os quatro grupos. Para resíduos eletrônicos, recomenda-se combinar o fortalecimento da logística reversa e da rastreabilidade (A1 = 61,30% na perspectiva técnica) com critérios ambientais na compra de *hardware* (A3 = 60,00% na perspectiva estratégica). Para energia, a prioridade técnico-operacional recai sobre virtualização de servidores (B1 = 50,75%), enquanto a perspectiva estratégica favorece energia renovável e eficiência térmica (B2 e B3 = 45,45% cada). Para água, destaca-se a otimização dos sistemas de arrefecimento (C2 = 50,11% na perspectiva técnica), complementada por reuso e monitoramento. Para emissões, a perspectiva técnica priorizou sistemas de contenção e detecção de vazamentos (D3 = 51,02%), enquanto a perspectiva estratégica priorizou a migração para energia de baixo carbono (D2 = 63,33%). Como D3 atua predominantemente no controle do impacto, sua priorização deve ser combinada, sempre que técnica e economicamente viável, com medidas preventivas na fonte, em consonância com a hierarquia da P+L. Essas ações devem ser acompanhadas por metas progressivas, indicadores PUE/WUE e certificados de destruição e reciclagem, reforçando rastreabilidade e melhoria contínua.

Como limitações, destacam-se a realização de um estudo de caso único, a participação de apenas dois informantes-chave, a restrição do conjunto de alternativas de práticas ambientais avaliadas e a ausência de observação direta da operação. Além disso, a indisponibilidade de dados desagregados de custos e de séries antes/depois por alternativa impede estimar ganhos financeiros ou atribuir causalmente variações de PUE, WUE, consumo ou emissões às opções priorizadas. Assim, os achados devem ser interpretados como evidências contextualizadas à empresa do estudo de caso e analiticamente transferíveis a situações semelhantes, e não como resultados estatisticamente generalizáveis ao conjunto de *Data Centers* brasileiros.

Para pesquisas futuras, recomenda-se: (i) aprofundar a descrição e avaliação de como ocorre cada prática ambiental ou opção da P+L e em que grau de desenvolvimento dentro da empresa do estudo de caso; (ii) aprofundar como ocorre a Logística Reversa na empresa, os canais de pós-venda e pós-uso de que participa, quais *stakeholders* envolvidos, quais estratégias de destinação (reuso, remanufatura, reciclagem) já utilizadas e oportunidades de ampliação, dificuldades e benefícios ambientais, econômicos e sociais advindos; (iii) ampliar a análise para estudos multicasos, comparando organizações com diferentes portes, tecnologias de resfriamento e matrizes energéticas; (iv) incorporar múltiplos *stakeholders*, incluindo especialistas, fornecedores, clientes empresariais, consumidores finais, entidades do governo, profissionais de outras áreas internas da empresa; (v) realizar estudos longitudinais com indicadores antes/depois utilizando o método de Pesquisa-Ação, permitindo mensurar efeitos sobre PUE, WUE, resíduos, emissões e custos; (vi) aprofundar a integração entre P+L, Economia Circular, *Green Supply Chain Management* e políticas públicas aplicáveis à expansão dos *Data Centers* no Brasil.

Referências.

AMAZON. **O que é um datacenter?** – Explicação sobre datacenter na nuvem. 2024a. Disponível em: https://aws.amazon.com/pt/what-is/data-center/. Acesso em: 9 nov. 2025.

AMAZON. ***Amazon Sustainability Report*** – *AWS Summary*. 2024b. Disponível em: https://sustainability.aboutamazon.com/2024-amazon-sustainability-report-aws-summary.pdf. Acesso em: 22 nov. 2025.

ASCENTY. **Relatório ESG 2024**. [S. l.]: Ascenty, 2025. Disponível em: https://ascenty.com/wp-content/uploads/2025/06/Relatorio-ESG-2024-PT.pdf. Acesso em: 25 jan. 2026.

ASCENTY. **Relatório ESG 2025**. [S. l.]: Ascenty, 2025. Disponível em: https://ascenty.com/wp-content/uploads/2026/06/Relatorio-ESG_2025.pdf. Acesso em: 10 set. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DATA CENTERS (ABDC). **Mercado**. São Paulo, 2025. Disponível em: https://datacenter.org.br/mercado/. Acesso em: 10 abr. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 14565**: cabeamento de telecomunicações para edifícios comerciais – especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO/IEC 30134 (série)**: tecnologia da informação — instalações e infraestruturas de *data centers* — indicadores-chave de desempenho. Rio de Janeiro: ABNT.

AZEVEDO, J. P. L. **Aplicação do método multicritério AHP com objetivo de suporte à tomada de decisão em gerência de portfólios**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/49765/1/2019_tcc_jplazevedo.pdf. Acesso em: 13 jul. 2025.

BAÊTA, D. G.; OLIVEIRA, U. R.; HERNÁNDEZ, C. T.; GUABIROBA, R. C. S.; JACOBI, P. R. Produção mais limpa: contribuições, barreiras, tendências e oportunidades. **Revista Pretexto**, Belo Horizonte, v. 24, n. 4, p. 72–96, 2023. Disponível em: https://revista.fumec.br/index.php/pretexto/article/view/9501. Acesso em: 14 ago. 2026.

BARBIERI, J. C. **Gestão ambiental empresarial**: conceitos, modelos e instrumentos. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 2020.

BARBOZA, M. **Gestão de eficiência energética e hídrica em *Data Centers***. São Paulo: Senac, 2024.

BARDIN, Laurence. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.

BRASIL. Ministério das Comunicações. ***Data centers*** **devem receber US$ 3 trilhões em investimentos e Brasil desponta na América Latina**. Brasília, DF, 13 jan. 2026. Disponível em: https://www.gov.br/mcom/pt-br/noticias/2026/janeiro/data-centers-devem-receber-us-3-trilhoes-em-investimentos-e-brasil-desponta-na-america-latina. Acesso em: 16 fev. 2026.

BRASSCOM. **Mercado brasileiro projeta investimento superior a US$ 2 bilhões no aluguel de *Data Centers* em 2024**. São Paulo, 31 out. 2024. Disponível em: https://brasscom.org.br/mercado-brasileiro-projeta-investimento-superior-a-us-2-bilhoes-no-aluguel-de-data-centers-em-2024/. Acesso em: 8 abr. 2026.

BRASSCOM. **Relatório inédito da Brasscom aponta crescimento do setor de TIC, que representa 6,5% do PIB brasileiro**. São Paulo, 5 ago. 2025. Disponível em: https://brasscom.org.br/relatorio-

inedito-da-brasscom-aponta-crescimento-do-setor-de-tic-que-representa-65-do-pib-brasileiro/. Acesso em: 23 ago. 2026.

CNI – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Centro Nacional de Tecnologias Limpas – CNTL/SENAI-RS**. Brasília, 2017.

CORREIA, M. L.; SILVA, G. C.; FERREIRA, A. A. Gestão ambiental empresarial e sustentabilidade. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 15, n. 3, p. 473–489, 2011.

DARKO, Amos; CHAN, Albert P. C.; AMEYAW, Ernest Effah; OWUSU, Emmanuel Kingsford; PÄRN, Erika; EDWARDS, David John. *Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction*. ***International Journal of Construction Management***, [S. l.], v. 19, n. 5, p. 436–452, 2018. DOI: 10.1080/15623599.2018.14520982. Disponível em: https://ira.lib.polyu.edu.hk/bitstream/10397/77343/1/TJCM-2017-0095_R2.pdf. Acesso em: 4 abr. 2026.

DEMO, P. **Metodologia científica em ciências sociais**. São Paulo: Atlas, 1987.

EXAME. **Ascenty atinge a liderança e mostra fôlego para crescer após aquisição**. 7 dez. 2020. Disponível em: https://exame.com/tecnologia/ascenty-atinge-a-lideranca-e-mostra-folego-para-crescer-apos-aquisicao/. Acesso em: 25 jan. 2026.

FACCIÓNI FILHO, Mauro. **Conceitos e infraestrutura de *data centers***. Palhoça, SC: Unisul Virtual - Universidade do Sul de Santa Catarina, 2016.

FERNANDES, L. Políticas de sustentabilidade em *Data Centers* no Brasil. **Revista Energia & Meio Ambiente**, v. 12, n. 1, p. 14–27, 2025.

FIGUEIREDO, Marcus. Crescimento rápido dos *data centers* pode resultar na escassez de energia e aumento das emissões de CO_2. **Manufatura Digital**, 26 nov. 2024. Disponível em: https://www.manufaturadigital.com/data-centers-escassez-de-energia/. Acesso em: 7 set. 2025.

FONSECA, Reinaldo Aparecida. **Produção mais limpa**: uma nova estratégia de produção. AEDB, 2013. Disponível em: https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos13/39018395.pdf. Acesso em: 13 jul. 2025.

FROST & SULLIVAN. ***Latin American data center colocation services***: *growth opportunities and forecasts*. Mountain View, CA: Frost & Sullivan, 2024. Disponível em: https://store.frost.com/latin-american-data-center-colocation-services-growth-opportunities-1724.html. Acesso em: 27 jan. 2026.

G1. **Governo terá política nacional para *data centers*; entenda o que são – e por que são considerados importantes**. [S. l.], 24 maio 2025. Disponível em: https://g1.globo.com/economia/noticia/2025/05/24/governo-tera-politica-nacional-para-data-centers-entenda-o-que-sao-e-por-que-sao-considerados-importantes.ghtml. Acesso em: 26 jun. 2025.

GARG, A.; RAUT, R. D.; KUMAR, M.; ZHANG, C.; GOKHALE, R. S. *Does the circular economy transition aid to carbon neutrality? Examining net-zero policy and stakeholder impact from the environmental justice viewpoint*. ***Journal of Cleaner Production***, v. 491, 144851, 2025. DOI: 10.1016/j.jclepro.2025.144851.

GOOGLE. ***Data Center Best Practices*** – *Google Sustainability*. 2024. Disponível em: https://sustainability.google/reports/dc-best-practices-google/. Acesso em: 22 nov. 2025.

GOOGLE. ***Energy Efficiency in Google Data Centers***. 2024. Disponível em: https://datacenters.google/intl/pt-BR_ALL/energy/. Acesso em: 22 nov. 2025.

GOOGLE. ***Operating Sustainably in Google Data Centers***. 2024. Disponível em: https://datacenters.google/operating-sustainably/. Acesso em: 22 nov. 2025.

GREEN DATA CENTER GUIDE. ***Best Practices for Sustainable Data Center Design and Operation***. 2023. Disponível em: https://www.greendatacenterguide.com/. Acesso em: 5 out. 2025.

HENNESSY, John L.; PATTERSON, David A. ***Computer Organization and Design***: *The Hardware/Software Interface*. 5. ed. Waltham: Morgan Kaufmann, 2013. Disponível em: https://www.cse.iitd.ac.in/~rijurekha/col216/edition5.pdf. Acesso em: 29 jun. 2025.

IBM. ***History of Sustainability at IBM***. 2024. Disponível em: https://www.ibm.com/history/sustainability. Acesso em: 22 nov. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. ***World Energy Outlook 2024***. Paris: IEA Publications, 2024.

LEITE, Roberto Rodrigues; OLIVEIRA NETO, Geraldo Cardoso de. Avaliação econômica da aplicação da produção mais limpa em uma estação de tratamento de efluentes: estudo de caso em uma empresa metal mecânico. **Revista Produção Online**, Florianópolis, v. 18, n. 4, p. 1445–1469, 2018. DOI: 10.14488/1676-1901.v18i4.3076. Disponível em: https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/view/3076. Acesso em: 13 jul. 2025.

MA, S.; DING, W.; LIU, Y.; ZHANG, Y.; REN, S.; KONG, X.; LENG, J. *Industry 4.0 and cleaner production: A comprehensive review of sustainable and intelligent manufacturing for energy-intensive manufacturing industries*. ***Journal of Cleaner Production***, v. 467, 142879, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142879. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142879. Acesso em: 14 ago. 2026.

MARCHEZAN, L.; BORTOLUZZI, P. História e evolução dos centros de processamento de dados. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 7, n. 1, p. 32–40, 2019.

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Produção**, São Paulo, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007. DOI: 10.1590/S0103-65132007000100015. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-65132007000100015. Acesso em: 29 jun. 2025.

MONTEIRO, L.; GRANEMANN, S. R.; GARTNER, I.; et al. Escolha de um programa de controle da qualidade da água para consumo humano: aplicação do Método AHP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 257–262, 2000. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/ggmSPmBW8fwVr9qtmy3SkDC/?format=html&lang=pt. Acesso em: 21 nov. 2025.

MOREIRA, Vescijudith Fernandes; LEAL, Yanara Pessoa; PAZ. *The Jevons Paradox and the energy efficiency of renewable sources*. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 12, n. 30, p. 109–112, 2025. Disponível em: https://revista.ecogestaobrasil.net/v12n30/v12n30a07a.html. Acesso em: 30 mar. 2026.

PEREIRA, G. R. **Subsídios para implantação da Produção Mais Limpa no Brasil**. 2014. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/130958. Acesso em: 13 jul. 2025.

PEREIRA, T. **Aplicação da Produção Mais Limpa na indústria brasileira**. Brasília: CNI, 2014.

PORTAL INSIGHTS. **Quantos *data centers* tem no Brasil?** [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.portalinsights.com.br/perguntas-frequentes/quantos-data-centers-tem-no-brasil. Acesso em: 5 out. 2025.

PURITE. ***Water Use in Data Centers***: *Sustainability Report 2023*. Londres: Purite Ltd., 2023.

RENSI, M.; SCHENINI, P. **Produção mais limpa e sustentabilidade empresarial**. Florianópolis: UFSC, 2006.

ROLDÃO, A. N.; NICELATCHI, J.; MARCHESINI, M. M. P. Proposta de Produção mais Limpa (P+L) em uma indústria têxtil. **Produto & Produção**, Porto Alegre, v. 24, n. 1, p. 95–113, 2023. Disponível em: https://seer.ufrgs.br/index.php/ProdutoProducao/article/view/130921. Acesso em: 16 fev. 2026.

RONG, C. et al. ***Green Data Centers***. Boca Raton: CRC Press, 2016.

ROOS, Carine. IA não pode ser sustentável se o impacto dos *data centers* não for reconhecido. **Bússola – Exame**, São Paulo, 24 jan. 2025. Disponível em: https://exame.com/bussola/ia-nao-pode-ser-sustentavel-se-o-impacto-dos-data-centers-nao-for-reconhecido/. Acesso em: 7 set. 2025.

SAATY, Thomas L. *How to make a decision: the analytic hierarchy process*. ***European Journal of Operational Research***, Amsterdam, v. 48, n. 1, p. 9-26, 1990.

SAATY, Thomas L. ***The Analytic Hierarchy Process***. New York: McGraw-Hill, 1991.

SAATY, Thomas L.; ÖZDEMIR, Müjgan Sağır. *How many judges should there be in a group?* ***Annals of Data Science***, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 49–54, 2015. DOI: 10.1007/s40745-014-0026-4. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/270891405_How_Many_Judges_Should_There_Be_in_a_Group. Acesso em: 4 abr. 2026.

SAYLOR ACADEMY. ***Sustainability, Innovation and Entrepreneurship***: *Pollution Prevention*. [S. l.]: Saylor Academy, 2021. Disponível em: https://saylordotorg.github.io/text_sustainability-innovation-and-entrepreneurship/s05-history.html. Acesso em: 13 jul. 2025.

SENAI – SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. Centro Nacional de Tecnologias Limpas (CNTL). **Cinco fases da implantação de técnicas de Produção mais Limpa**. Porto Alegre: CNTL SENAI, 2003a.

SENAI – SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. Centro Nacional de Tecnologias Limpas (CNTL). **Implementação de Programas de Produção Mais Limpa**. Porto Alegre: SENAI-RS, 2003b.

SHABANPOUR, H.; DARGUSCH, P.; WADLEY, D.; FARZIPOOR SAEN, R. *A breakthrough in circular economy: Using a closed-loop framework to assess the circularity of supply chains*. ***Journal of Cleaner Production***, v. 444, 141265, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141265. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141265. Acesso em: 16 ago. 2026.

SHEHABI, A. et al. ***United States Data Center Energy Usage Report***. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2016.

SILVA, Renato Cader da; BARROS, Gustavo Filice de. **Produção mais limpa (P+L) no Brasil**: vantagens e limitações. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/346510273_PRODUCAO_MAIS_LIMPA_PL_NO_BRASIL_VANTAGENS_E_LIMITACOES_Co-autor. Acesso em: 13 jul. 2025.

SILVA, Rosa Adeyse et al. A produção mais limpa e seus impactos na ambiência da construção civil. **ENEGEP**, 2017. Disponível em: https://engemausp.submissao.com.br/19/anais/arquivos/128.pdf. Acesso em: 13 jul. 2025.

SOARES, J. Eficiência energética em *Data Centers*: práticas e desafios. **Revista Eletrônica de Engenharia**, v. 12, n. 2, p. 51–63, 2016.

SOUSA, Roberto. Eficiência energética em *Data Centers* no Brasil. **Bravo Tecnologia**, 14 jun. 2024. Disponível em: https://bravotecnologia.com.br/eficiencia-energetica-em-data-centers-no-brasil/. Acesso em: 23 ago. 2026.

SRIVASTAVA, S. K. *Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review*. ***International Journal of Management Review***, v. 9, n. 1, p. 53–80, 2007. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-2370.2007.00202. Acesso em: 13 jul. 2025.

STACCIARINI, Santana; JUNIOR, Ricardo. *Data Centers*, Minerais Críticos, Energia e Geopolítica: as bases da Inteligência Artificial. **Sociedade & Natureza**, v. 37, n. 1, 2025. Disponível em: https://www.scielo.br/j/sn/a/LC65bzyhKgVBL4zjk7p5Skm/?format=html&lang=pt. Acesso em: 30 mar. 2026.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. ***Cleaner Production***: *Key Elements and Case Studies*. Paris: UNEP, 2007.

UNU – UNITED NATIONS UNIVERSITY. ***The Global E-waste Monitor 2020***. Bonn: UNU, 2020.

UPTIME INSTITUTE. ***Uptime Institute Global Data Center Survey 2023***. 2023.

VAIDYA, O. S.; KUMAR, S. *Analytic Hierarchy Process: an overview of applications*. ***European Journal of Operational Research***, v. 169, n. 1, p. 1–29, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/223714691_Analytic_Hierarchy_Process_An_Overview_of_Applications. Acesso em: 14 jul. 2025.

VASCONCELOS, Yuri. As estratégias para tornar os *data centers* mais sustentáveis. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, ed. 349, mar. 2025. Disponível em: https://revistapesquisa.fapesp.br/as-estrategias-para-tornar-os-data-centers-mais-sustentaveis/. Acesso em: 7 set. 2025.

WERNER, R.; BACARJI, A. G.; HALL, R. Produção mais limpa e o ciclo PDCA na gestão ambiental. **Revista Brasileira de Engenharia de Produção**, v. 15, n. 2, p. 73–82, 2009.

YIN, R. K. **Estudo de caso**: planejamento e métodos. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZORMAN, Hillary. ***The Environmental Impact of Data Centers*** – *Concerns and Solutions to Become Greener*. Park Place Technologies, 2024. Disponível em: https://www.parkplacetechnologies.com/blog/environmental-impact-data-centers/. Acesso em: 9 ago. 2025.