



## O conceito de Produção Mais Limpa (P+L) aplicado aos resíduos do setor elétrico

Felipe Alves Silveira<sup>1</sup>

Matheus Cavali<sup>2</sup>

Armando Borges de Castilhos Junior<sup>3</sup>

### Resumo

A crescente demanda por práticas sustentáveis no setor elétrico tem impulsionado a adoção de estratégias voltadas à redução de impactos ambientais e ao uso mais eficiente de recursos. Nesse contexto, a Produção Mais Limpa (P+L) apresenta-se como abordagem preventiva aplicável à gestão de resíduos sólidos, alinhada aos princípios ESG e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima). Assim, este estudo avaliou a aplicação do conceito de P+L na gestão de resíduos sólidos no setor elétrico. A metodologia compreendeu revisão bibliográfica sistemática, análise de relatórios de sustentabilidade e um estudo de caso comparativo entre duas organizações do setor. Adicionalmente, foram coletadas informações por meio de questionário estruturado, contendo perguntas objetivas e abertas sobre práticas de gestão de resíduos e estratégias associadas à P+L. Os resultados indicam que, embora o setor disponha de tecnologias consolidadas, como regeneração de óleos isolantes, valorização energética e reaproveitamento de subprodutos, a gestão de resíduos em algumas organizações ainda se concentra predominantemente em soluções de caráter corretivo. A análise corporativa evidenciou avanços na incorporação do ODS 12 e de práticas relacionadas à economia circular, enquanto a integração com o ODS 13 e com o pilar ambiental do ESG ainda apresenta lacunas operacionais. Conclui-se que o setor necessita avançar de abordagens de “fim de tubo” para estratégias preventivas baseadas na P+L, fortalecendo práticas de economia circular e a integração entre gestão ambiental e planejamento estratégico.

**Palavras-chave:** Economia circular; Ecoeficiência; ESG; ODS; Geração de energia.

<sup>1</sup>Felipe Alves Silveira. Graduado em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, [felipe.a.silveira00@gmail.com](mailto:felipe.a.silveira00@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4361-4129>.

<sup>2</sup>Matheus Cavali. Doutor em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, [cavali.matheus@posgrad.ufsc.br](mailto:cavali.matheus@posgrad.ufsc.br), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3764-5078>, Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9422321684587610>.

<sup>3</sup>Armando Borges de Castilhos Junior. Doutor em Gestão e Tratamento de Resíduos Sólidos pelo Institut National Des Sciences Appliquées de Lyon, França, [armando.borges@ufsc.br](mailto:armando.borges@ufsc.br), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0455-2585>, Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7035924592908122>.

## **The Cleaner Production (CP) concept applied to waste management in the electric power sector**

### **Abstract**

Growing demand for sustainable practices in the electrical sector has driven the adoption of strategies aimed at reducing environmental impact and improving resource efficiency. In this context, Cleaner Production (CP) is a preventive approach that can be applied to solid waste management. It is aligned with Environmental, Social, and Governance (ESG) principles and the Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDGs 7 (Affordable and Clean Energy), 12 (Responsible Consumption and Production), and 13 (Climate Action). Therefore, this study evaluated the application of the CP concept in solid waste management within the electrical sector. The methodology comprised a systematic literature review, analysis of sustainability reports, and a comparative case study of two organizations in the sector. Additionally, data were collected through a structured questionnaire containing objective and open-ended questions about waste management practices and CP-associated strategies. The results indicate that, while the sector has developed technologies such as insulating oil regeneration, energy recovery, and the reuse of by-products, waste management in some organizations still predominantly relies on corrective solutions. Corporate analysis revealed progress in the adoption of SDG 12 and practices associated with the circular economy. However, integration with SDG 13 and the environmental pillar of ESG still presents operational challenges. It can be concluded that the sector needs to progress from 'end-of-pipe' approaches to preventive strategies based on CP, thereby strengthening circular economy practices and improving integration between environmental management and strategic planning.

**Keywords:** Circular economy; Eco-efficiency; ESG; SDGs; Power generation.

### **1 Introdução**

A geração de energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento econômico mundial, permeando setores industriais, de serviços e o bem-estar social. Embora o cenário global aponte para uma transição energética gradual, fontes não renováveis ainda representam uma parcela significativa da matriz mundial (REN21, 2023). O Brasil, em contraste, destaca-se pela predominância de fontes renováveis, que compõem cerca de 89% da matriz elétrica nacional, liderada pela geração hidrelétrica e pela crescente expansão das fontes eólica e solar (EPE, 2024). Contudo, a sustentabilidade do setor não se resume à matriz de geração; a etapa de operação e manutenção dos sistemas elétricos (geração, transmissão e distribuição) permanece associada a impactos ambientais significativos, especialmente na geração de resíduos sólidos (Ribeiro e Borges, 2021).

Entre os resíduos gerados no setor, destacam-se tanto os não perigosos, como sucatas metálicas e recicláveis gerados em atividades administrativas, quanto os perigosos, incluindo



lâmpadas fluorescentes, baterias e, especialmente, óleos isolantes. A gestão inadequada desses materiais pode acarretar danos ambientais severos e riscos à saúde pública, violando diretrizes estabelecidas na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010). Um desafio particular reside nos equipamentos contendo Bifenilas Policloradas (PCBs), compostos persistentes e tóxicos cuja eliminação controlada é exigida até 2028 pela Lei nº 14.250/2021. Tal regramento legal, vincula-se a eliminação controlada de materiais, de fluidos, de transformadores, de capacitores e de demais equipamentos elétricos contaminados por PCBs e por seus resíduos (Brasil, 2021). Assim, para essa substância, não resta alternativa a não ser a eliminação e o tratamento.

Nesse contexto regulatório e ambiental, a abordagem tradicional de tratamento de resíduos, focada em soluções de "fim de tubo" (*end-of-pipe*), mostra-se insuficiente. Torna-se necessária, portanto, a adoção de estratégias preventivas, alinhadas ao conceito de Produção Mais Limpa (P+L). Definida pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), a P+L consiste na aplicação contínua de uma estratégia ambiental preventiva integrada aos processos, produtos e serviços para aumentar a eficiência e reduzir riscos (PNUMA, 2007). Diferentemente da remediação, a P+L busca a não geração, a minimização e a reutilização de insumos na fonte, promovendo ecoeficiência e redução de custos operacionais (Medeiros *et al.*, 2007).

A aplicação da P+L no setor elétrico dialoga diretamente com paradigmas contemporâneos de gestão corporativa, como os critérios do sistema ESG (*Environmental, Social and Governance*). O pilar ambiental do sistema ESG exige que as empresas mitiguem seus impactos e otimizem o uso de recursos; o pilar social abrange a segurança ocupacional, a saúde dos colaboradores e o engajamento com as comunidades impactadas; enquanto o pilar de governança demanda transparência e conformidade legal (Henisz; Koller; Nuttall, 2019). Simultaneamente, essas práticas contribuem para o cumprimento da Agenda 2030 da ONU, especificamente os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7 (Energia Limpa e Acessível), 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima).

Diante do exposto, este artigo tem como objetivo geral avaliar a aplicação de práticas de P+L voltadas à gestão de resíduos sólidos em empresas do setor elétrico nos ramos de geração, transmissão e distribuição de energia. Nesse sentido, buscou-se (i) pesquisar e avaliar as principais técnicas de P+L no setor elétrico aplicadas no Brasil e no mundo, (ii) discutir como



as práticas de P+L aplicadas à gestão de resíduos sólidos no setor elétrico se relacionam com os princípios de ESG e com os ODS 7, 12 e 13, e, finalmente, (iii) avaliar, por meio de um estudo de caso, como algumas empresas do setor elétrico incorporam práticas alinhadas ao conceito de P+L na gestão de resíduos sólidos. Por meio dessa abordagem, este estudo deve contribuir para fortalecer a compreensão sobre a aplicação prática da P+L no setor elétrico, oferecendo evidências que podem auxiliar gestores e pesquisadores na transição para modelos de gestão de resíduos mais preventivos, circulares e alinhados às agendas ESG e ODS.

## 2 Métodos

A pesquisa e avaliação das principais técnicas de P+L no setor elétrico aplicadas no Brasil e no mundo foi realizada por meio de um levantamento sistemático da literatura disponível e publicada a partir do ano 2020; porém, admitiu-se a inclusão de literaturas mais antigas no caso de escassez de resultados atuais ou de estudos que fossem de significativa relevância para o presente artigo. A busca foi feita na base de dados *SCOPUS* (*Elsevier*) utilizando a ferramenta de *Advanced document search*. Nesta etapa, foram empregados operadores booleanos, como “AND” e “OR”, com palavras-chave sinônimas entre si para ampliar o alcance da busca e refinar o filtro de trabalhos relevantes. Inicialmente, utilizaram-se combinações entre palavras-chave como, por exemplo, “*cleaner production*”, “*energy*”, “*electric industry*”, “*power sector*”, “*electricity generation*” e “*solid waste management*”. Em seguida, a estratégia de busca foi ajustada para incluir termos diretamente associados aos resíduos característicos do setor elétrico como, por exemplo, “*transformer oil*”, “*insulating oil*”, “*soil*” e “*gravel*”. Para complementar a revisão incorporando publicações nacionais não presentes na *SCOPUS*, também foi utilizada a base de dados Google Acadêmico. Após a seleção dos trabalhos, os materiais foram acessados e analisados integralmente a fim de garantir maior profundidade na avaliação das técnicas abordadas.

Para discutir a relação das práticas de P+L no setor elétrico relacionadas ao gerenciamento de resíduos sólidos com os princípios de ESG e os ODS 7, 12 e 13, foram analisados os Relatórios de Sustentabilidade de 10 empresas do setor elétrico, nacionais e internacionais. Esses documentos são publicados anualmente nos sites institucionais das próprias empresas, e registram de forma estruturada os resultados, impactos e iniciativas das empresas no âmbito da sustentabilidade, oferecendo transparência quanto ao atendimento às diretrizes de ESG e aos compromissos associados aos ODS (Pereira *et al.*, 2015). A seleção das



empresas considerou a necessidade de examinar organizações de grande ou médio porte e consolidadas no setor, excluindo-se micro e pequenas empresas devido à limitação de informações públicas disponíveis. O porte organizacional foi definido com base no número de empregados, conforme os critérios estabelecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE), da seguinte forma: microempresa (até 19 colaboradores), pequena empresa (de 20 a 99 colaboradores) e média empresa (de 100 a 499 colaboradores). Assim, os relatórios foram selecionados de forma aleatória, desde que cumprissem com os requisitos estabelecidos.

Quanto à avaliação por meio de estudo de caso sobre como empresas do setor elétrico incorporam práticas alinhadas ao conceito de P+L na gestão de resíduos sólidos, foi realizado contato com dez grandes empresas do setor elétrico atuantes no Brasil. O contato inicial ocorreu por meio de telefone e e-mail, utilizando os canais disponibilizados nos sites institucionais das empresas. A comunicação foi direcionada, sempre que possível, aos setores relacionados à gestão ambiental ou à sustentabilidade das organizações. Juntamente com o e-mail solicitando a participação, foi encaminhado um questionário virtual elaborado na plataforma *Google Forms*. O instrumento de coleta de dados foi composto por dezoito perguntas (Quadro 3), estruturadas em formato misto, incluindo questões objetivas de múltipla escolha e perguntas abertas, com o objetivo de permitir tanto a quantificação das práticas adotadas quanto a obtenção de informações qualitativas sobre a gestão de resíduos sólidos.

O questionário teve como principal finalidade identificar práticas adotadas pelas empresas que estejam alinhadas aos princípios da P+L, bem como compreender as principais barreiras e desafios operacionais percebidos pelas organizações na implementação dessas estratégias.

### **3 Resultados e Discussão**

#### **3.1 P+L no setor elétrico**

Observou-se uma escassez de estudos que utilizem explicitamente o termo “P+L” ao descrever práticas de gerenciamento dos resíduos do setor elétrico. Tal fato justifica-se pela transição conceitual na literatura e no mercado: os princípios preventivos da P+L foram progressivamente absorvidos por conceitos emergentes e mais abrangentes, servindo hoje como

a base operacional para a aplicação da Economia Circular e para o cumprimento das métricas do pilar ambiental do ESG (Ghisellini; Cialani; Ulgiati, 2016).

O Quadro 1 apresenta as práticas identificadas e, conforme descrito na Seção 3.2, já implementadas por empresas do setor com base nos relatórios de sustentabilidade analisados. Tais práticas têm como objetivo minimizar a geração de resíduos na fonte, promover o reaproveitamento de materiais e otimizar o uso de energia e insumos, em alinhamento com a abordagem preventiva que caracteriza a P+L.

**Quadro 1:** Exposição das técnicas identificadas de P+L aplicadas aos resíduos do setor elétrico.

<b>Autor e tema</b>	<b>Medidas investigadas</b>	<b>Resultados principais</b>	<b>Relação com o conceito de P+L</b>
Sathish <i>et al.</i> (2023) – Waste-to-Fuel, Pirólise de óleo de transformador	Conversão do óleo isolante usado em combustível substituindo parcialmente o diesel. Adição de nanopartículas e EGR - Recirculação de gases de escape.	Emissões reduzidas (NOx = 821 ppm; fumaça = 16,6–23,4%), desempenho próximo ao diesel. Boa viabilidade técnica.	Valorização energética de resíduo perigoso e substituição parcial de combustível fóssil. Reutilização de recursos do setor.
Tian <i>et al.</i> (2025) – Recuperação de elementos de cinzas volantes	Recuperação de metais valiosos (Al, Fe, Li, REEs - Elementos de Terra Rara)) de cinzas volantes de termelétricas, através de diferentes procedimentos experimentais	Índices muito elevados da recuperação dos metais alvo. Boa viabilidade técnica e ambiental	Reaproveita subproduto industrial e reduz a geração na fonte suprindo parte da necessidade de extração mineral primária.
Wachter e Jezdinsky (2022) – Circularidade de transformadores	Avaliação da reciclabilidade de transformadores a óleo e a seco.	Transformadores a óleo: > 75% de reaproveitamento; transformadores a seco apresentaram dificuldade de separação dos materiais.	Reuso de metais e óleo isolante; incentivo ao design de equipamentos pensando na reciclagem.
Hassanpour (2021) – Revisão sobre regeneração de óleo isolante	Revisão de técnicas físico-químicas de regeneração (filtração, adsorção, degaseificação, entre outras), analisando sua aplicabilidade industrial.	Restaura propriedades dielétricas e químicas do óleo a níveis próximos ao novo. Viabilidade técnica e econômica para indústria.	Evita descarte e reduz consumo de óleo virgem; reciclagem interna de materiais.
Granato <i>et al.</i> (2000) – Regeneração <i>on-line</i> de óleo	Regeneração do óleo isolante com o transformador energizado; uso de colunas de Terra Füller como adsorvente.	Regeneração das características físico-químicas semelhantes às de um óleo novo. A análise econômica apontou vantagens significativas quando	Reduz a necessidade de descarte do óleo e do transformador, reduz custos e passivos ambientais no setor elétrico.

Autor e tema	Medidas investigadas	Resultados principais	Relação com o conceito de P+L
		comparado com a substituição ou regeneração convencional	
Vu e Mulligan (2023) – Tratamento de solos contaminados com óleo	Revisão de métodos de lavagem, biorremediação e oxidação química.	Lavagem com surfactantes removendo 70-95% do óleo;	Promove reuso de solos e agregados, além da mitigação de passivos ambientais.
Wang <i>et al.</i> (2019) – Lavagem de solos com solventes/surfactantes	Sistema com metanol, acetona, tolueno junto com SDS para lavagem de solos contaminados.	Eficiência atingida = 97% e recuperação parcial do óleo. Reforçou que adições de solventes orgânicos aumentam significativamente a eficiência do processo.	Remediação eficiente e reaproveitamento de materiais; evita destinação de solos contaminados.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A revisão da literatura evidencia que o setor elétrico já dispõe de um conjunto de tecnologias relacionadas à P+L, com destaque para a regeneração de óleo isolante, processos de valorização energética de resíduos (*Waste-to-Energy* – WtE) e o aproveitamento de cinzas e subprodutos de termelétricas. Estudos como os de Hassanpour (2021) e Granato, Junior e Curkarevicz (2000) demonstram a eficácia da regeneração de óleos isolantes, um processo de purificação capaz de restaurar integralmente as propriedades dielétricas e térmicas do fluido. Embora seja um trabalho com mais de duas décadas, a pesquisa empírica supracitada mantém sua relevância por abordar fundamentos técnicos consolidados e apresentar um estudo de caso aplicado em um transformador de 138 kV, em operação, com capacidade de 20 mil litros de óleo isolante, fornecendo dados práticos que ainda são pouco explorados em publicações recentes. Segundo os autores, essa prática permite estender a vida útil dos transformadores em até 10 anos, resultando em um duplo benefício: a mitigação de custos operacionais com a compra de insumos virgens e a efetiva redução da geração de resíduos perigosos na fonte, alinhando-se aos princípios da P+L. Adicionalmente, a análise econômica levantada na referida obra (Tabela 1) indica uma redução de custos ao adotar-se processos de regeneração de óleo, em especial, a chamada “Regeneração *on-line*”, a qual não exige a interrupção da operação do transformador.

**Tabela 1:** Análise custo-benefício da regeneração comparada à substituição do óleo isolante de transformadores.

	Substituição por óleo novo	Regeneração em planta	Regeneração on-line
<b>Interrupção do funcionamento do equipamento</b>	Sim	Sim	Não
<b>Perdas de óleo no processo de regeneração (%)</b>	-	10%	5%
<b>Custo processos (R\$/L de óleo)</b>	R\$ 1,95 / L	R\$ 0,95 / L	R\$ 0,17 / L
<b>Principais vantagens</b>	Óleo novo	Custo reduzido e menor risco operacional	Custo reduzido e operação contínua
<b>Principais desvantagens</b>	Alto custo, exige interrupção e maior geração de resíduos	Exige interrupção e transporte	Controle técnico do processo e substituição/destinação dos adsorventes

Fonte: Adaptado de Granato; Junior; Curkarevicz (2000).

De modo semelhante, rotas de WtE e coprocessamento se mostram alternativas consistentes para o tratamento de resíduos perigosos, permitindo a destruição térmica controlada e a substituição parcial de combustíveis fósseis (Mutz *et al.*, 2017; Sathish *et al.*, 2023).

A abordagem WtE consiste na conversão controlada de resíduos sólidos em energia elétrica, térmica, ou em combustíveis alternativos. Isso ocorre por meio de processos de combustão, gaseificação ou pirólise, com o objetivo de reduzir o volume de resíduos destinados a aterros e, simultaneamente, gerar energia de forma sustentável (Sanetran, 2024).

Nesse contexto, o coprocessamento se destaca como uma tecnologia consolidada, amplamente adotada pelo setor elétrico para a destinação final de resíduos de alto poder calorífico, como óleos isolantes minerais (inclusive com traços de PCB), solos impregnados e equipamentos de proteção individual (EPI) contaminados. Essa rota viabiliza a recuperação energética e a reciclagem material em fornos de clínquer, onde as altas temperaturas e o ambiente alcalino asseguram a destruição completa de compostos orgânicos e a incorporação segura de minerais, desviando resíduos de aterros e mitigando passivos ambientais (BRASIL, 2020; Eletrobras, 2024).

Paralelamente, pesquisas recentes exploram a conversão direta de óleos isolantes residuais em combustíveis alternativos. Sathish *et al.* (2023) demonstraram a viabilidade do Biodiesel Pirolizado de Resíduo de Óleo de Transformador (BPROT) “*Pyrolyzed Biodiesel of Waste Transformer Oil*” obtido via pirólise catalítica.



As análises revelaram que, enquanto o BPROT puro apresenta uma eficiência térmica (BTE) de 27,35%, que é ligeiramente inferior aos 30,12% do diesel convencional, e maiores níveis de emissão de poluentes (1.427 ppm de NO<sub>x</sub>, 19 ppm de HC e 39,5% de opacidade da fumaça, contra 1.248 ppm, 11 ppm e 32,9% do diesel, respectivamente), o tratamento desse combustível altera positivamente esse cenário. A adição de nanopartículas (ZnO e CeO<sub>2</sub>) combinada à recirculação de gases de escape (EGR) resultou em reduções significativas nas emissões. Nessa configuração aditivada, embora a eficiência térmica tenha variado entre 24,67% e 26,04%, observou-se uma queda expressiva na opacidade da fumaça (16,6% a 23,4%) e nas emissões de HC (13 a 15 ppm), além da possibilidade de redução do NO<sub>x</sub> para até 821 ppm, validando sua aplicação técnica.

Corroborando esse potencial de valorização energética, Belkhode *et al.* (2022) e Veeraraghavan *et al.* (2025) evidenciaram que processos mais acessíveis, como a destilação simples, podem gerar frações de destilados com propriedades físico-químicas similares ao diesel. Testes em motores indicaram que misturas contendo até 20% de óleo tratado mantêm eficiência térmica competitiva (cerca de 27-28%) e reduzem o consumo específico de combustível, consolidando essa prática como uma estratégia WtE eficaz para o fechamento de ciclos produtivos no setor (Tiwari *et al.*, 2024).

Além da valorização energética, a literatura recente aponta para o potencial da recuperação de materiais como vetor de circularidade no setor elétrico. Tian *et al.* (2025) destacam que as cinzas volantes de termelétricas a carvão, historicamente tratadas como passivo ambiental, constituem uma fonte secundária de elementos estratégicos como lítio, alumínio e terras raras (ex.: lantânio, cério e neodímio). Processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos já permitem taxas de recuperação superiores a 99% para determinados metais, transformando resíduos em insumos de alto valor agregado e mitigando riscos de lixiviação em aterros (Tian *et al.*, 2025).

Paralelamente, a incorporação dessas cinzas na indústria da construção civil (cimento Portland e cerâmicos) materializa o conceito de simbiose industrial, na qual o resíduo de um processo se torna matéria-prima de outro (Chertow, 2000; Kniess *et al.*, 2019). Contudo, Lenzi (2001) alerta que o reaproveitamento ainda não acompanha o ritmo de geração, especialmente no que tange às cinzas pesadas, cuja aplicação demanda maior investigação tecnológica para viabilizar a substituição de agregados naturais (Singh; Siddique, 2013). Para se ter uma noção mais concreta, de acordo com a revista Brasil Energia (2025), estima-se que as termelétricas



dos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina produzam algo perto de 2,1 milhões de toneladas de cinzas por ano, sendo dessas, 80% volantes.

No âmbito da gestão de ativos em fim de vida, a recuperabilidade dos materiais é fortemente influenciada pelo *design* do equipamento. De Wachter e Jezdinsky (2022) compararam a circularidade de transformadores de média potência, evidenciando que os modelos a óleo apresentam superioridade ambiental, com taxas de reaproveitamento global próximas de 75%, incluindo a regeneração do óleo isolante e a recuperação de cobre com pureza acima de 99,9%. Em contrapartida, transformadores a seco, encapsulados em resina epóxi, impõem barreiras técnicas à separação de componentes, tornando a reciclagem economicamente inviável em diversas regiões. Esses resultados sublinham que a aplicação de P+L deve transcender a operação e permear a concepção dos equipamentos, visando a máxima reintrodução de recursos na cadeia econômica.

No contexto de solos contaminados com hidrocarbonetos, Vu; Mulligan (2023) indicam alto potencial de recuperação, especificamente em casos de vazamentos de óleo isolante em subestações, a técnica de lavagem de solos surge como uma alternativa de remediação de baixo impacto capaz de evitar a disposição final de grandes volumes de materiais contaminados como resíduos perigosos. O processo baseia-se na solubilização do contaminante mediante o uso de soluções combinadas de tensoativos e solventes polares, que reduzem a tensão interfacial e a viscosidade do óleo aderido (Vu; Mulligan, 2023).

Estudos experimentais, como o de Wang *et al.* (2019), demonstram que a otimização dessas soluções para ajuste da temperatura e da proporção solvente/surfactante pode elevar a eficiência de remoção para patamares superiores a 97%. Essa prática viabiliza a reinserção do material (solo ou brita) na área operacional e o encaminhamento do óleo e água oleosa para tratamento, alinhando-se aos princípios de P+L pela redução significativa de passivos ambientais e custos operacionais (Eletrobras, 2024).

Apesar do avanço tecnológico, a aplicação dessas práticas ainda depende de fatores externos à maturidade técnica. Os resultados apontam que a adoção efetiva das soluções avaliadas está condicionada à viabilidade econômica, à disponibilidade de infraestrutura e à integração com a logística existente (De Wachter; Jezdinsky, 2022). Em diversos contextos, práticas como regeneração de óleo ou rotas de WtE são plenamente viáveis sob o ponto de vista técnico, mas permanecem subutilizadas devido a barreiras relacionadas à falta de conhecimento técnico, custo, burocracia ou limitações de mercado para produtos recuperados. Assim, embora



a literatura confirme a existência de soluções consolidadas, sua incorporação plena depende de condições estruturais e gerenciais que variam entre empresas e regiões.

### **3.2 Práticas P+L, princípios de ESG e os ODS**

A incorporação de práticas de P+L no setor elétrico, como ecoeficiência, economia circular e descarbonização, deixou de representar uma ação voluntária ou um diferencial ambiental e passou a constituir um requisito estratégico para a competitividade e a permanência das empresas no mercado. Atualmente, essa abordagem tornou-se um elemento-base tanto para a aplicação do sistema ESG quanto para o alinhamento corporativo às metas ODS (FIEP, 2025).

Cabe destacar que, embora o item 3.1 tenha enfatizado os materiais empregados nos transformadores, especialmente os óleos isolantes, essa abordagem não se dissocia da temática aqui analisada. Isso porque tais insumos, ao atingirem o fim de sua vida útil ou apresentarem degradação de suas propriedades, passam a ser enquadrados como resíduos perigosos, demandando manejo ambientalmente adequado.

Nesse contexto, práticas como regeneração, reprocessamento e recuperação energética desses óleos configuram simultaneamente estratégias de otimização de recursos e de gestão de resíduos sólidos. Essa integração está em consonância com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), especialmente no que se refere à responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos e à priorização da não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Dessa forma, as práticas discutidas no item anterior inserem-se diretamente nas estratégias analisadas neste tópico, evidenciando a continuidade entre a gestão de insumos e a gestão de resíduos no setor elétrico, sob a ótica da P+L.

Com o objetivo de evidenciar como essas conexões se manifestam na prática, foram analisados 10 relatórios de sustentabilidade e ESG de empresas do setor elétrico, nacionais e internacionais. As informações levantadas estão resumidas no Quadro 2, que apresenta um panorama sintético das iniciativas e estratégias observadas nas empresas avaliadas.

**Quadro 2:** Resumo de informações identificadas nos relatórios de sustentabilidade considerados na análise

Empresa	Práticas relacionadas à gestão de resíduos que se alinham ao conceito P+L	Resultados
Empresa 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Economia circular como logística reversa de baterias estacionárias e reciclagem de painéis fotovoltaicos com recuperação de material de alto valor agregado;</li> <li>Treinamento na área de resíduos;</li> <li>Priorização da não geração seguida de reutilização e reciclagem, conforme PGRS;</li> <li>Reaproveitamento de paletes para evitar aquisição de novos;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Índice de 75% de recuperação de resíduos, superando a meta estabelecida de 57% para o ano de 2024;</li> <li>Mais de 3 mil toneladas de placas solares recicladas desde 2022 (99% de eficácia no reaproveitamento) e 13 toneladas de baterias enviadas para reciclagem em 2024;</li> </ul>
Empresa 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Economia circular visando extensão de vida útil dos ativos;</li> <li>Foco em uso eficiente de recursos;</li> <li>Ações norteadas pelo PGRS;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Das 29,1 mil toneladas geradas em 2024 (pico devido a obras), cerca de 84% foram encaminhadas para reciclagem ou reutilização.</li> <li>15% dos resíduos não perigosos foram para aterro ou incineração.</li> </ul>
Empresa 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Economia circular (implícita) com ações de logística reversa;</li> <li>Ações norteadas pelo PGRS como treinamentos sobre resíduos;</li> <li>Desinvestimentos em ativos termelétricos a carvão e a gás;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Implementação do programa Ecoinfra, com soluções na área de resíduos;</li> <li>Alcance de 97% de geração por fontes renováveis em 2024;</li> </ul>
Empresa 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Economia circular e redução na fonte com foco em reciclagem dos materiais e painéis solares; <i>redesign</i> de produtos visando a eficiência</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alto grau de reciclagem dos resíduos;</li> </ul>
Empresa 5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Economia circular e redução na fonte com reforma de transformadores, regeneração de óleo isolante e postes 100% recicláveis;</li> <li>Substituição de insumos (óleo mineral por vegetal);</li> <li>Orgânicos e resíduos de poda encaminhados para compostagem;</li> <li>Ações de conscientização ambiental para colaboradores e comunidade;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>83% dos resíduos gerados foram reutilizados ou reciclados;</li> <li>Lucro de R\$ 22,3 milhões com alienação de sucatas;</li> <li>Plano de redução de 50% de matérias-primas e reciclagem de pás eólicas e painéis solares</li> </ul>
Empresa 6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Economia circular e redução na fonte com extensão de vida útil e recuperação de insumos através da reciclagem;</li> <li>Projeto Canteiro Sustentável que visa reutilizar matérias primas de canteiros de obras, além de doação para comunidade local;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Redução de 46% da geração estimada de resíduos para o ano de 2024;</li> </ul>
Empresa 7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Economia circular e redução na fonte com regeneração de óleo isolante;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>100% dos resíduos perigosos destinados, foram para coprocessamento;</li> </ul>

Empresa	Práticas relacionadas à gestão de resíduos que se alinham ao conceito P+L	Resultados
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planos de manutenção preditiva, preventiva e corretiva;</li> <li>• Venda de sucatas para construção civil; destinação de resíduos perigosos para coprocessamento;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meta de zerar o envio de resíduos perigosos para aterro atingida em 2022;</li> <li>• Meta de reduzir 10% da geração por km de linha de transmissão até 2030; substituição de equipamentos com SF<sub>6</sub>;</li> </ul>
Empresa 8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Economia circular (implícita) com reuso de materiais e painéis solares;</li> <li>• Programa que avalia e monitora destinação de resíduos;</li> <li>• Redução de geração na fonte, e aumento de reciclagem;</li> <li>• Treinamentos de resíduos;</li> <li>• Gestão centralizada em um local, garantindo consistência e menores custos no tratamento e destinação;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 199,6% de resíduos de combustão de carvão gerados no ano, foram reciclados;</li> <li>• Aumento geral de índices de reciclagem, e menores gastos;</li> </ul>
Empresa 9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Economia circular e redução na fonte com foco em maximizar ciclo de vida e reciclagem de postes, cabos e transformadores;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consolidação do programa Ecoeficiência com metas de resíduos;</li> <li>• 100% dos componentes de distribuição reciclados ou em logística reversa;</li> </ul>
Empresa 10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Economia circular e redução na fonte focado no reuso e reforma de transformadores, regeneração de óleo e gás SF<sub>6</sub>;</li> <li>• Substituição de substâncias perigosas (PCBs);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 99,7% dos resíduos gerados foram reciclados/alienados;</li> <li>• 542 transformadores reformados no ano;</li> <li>• Regeneração de óleo obteve 95% de eficiência;</li> <li>• (Meta) substituir 100% dos equipamentos com PCB até 2028;</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A análise dos relatórios de sustentabilidade das dez empresas selecionadas revela que as grandes corporações do setor elétrico já alinham suas estratégias corporativas aos princípios de P+L, utilizando a economia circular como vetor de competitividade. Observa-se que oito das dez companhias analisadas citam explicitamente a adoção de práticas de economia circular em suas diretrizes, evidenciando que o tema deixou de ser uma pauta periférica para se tornar um eixo central da gestão de ativos e resíduos.

No âmbito do sistema ESG, o pilar Ambiental (E, do inglês *Environmental*) destaca-se pela regeneração de insumos críticos, como o óleo isolante e o gás SF<sub>6</sub> (hexafluoreto de enxofre), mitigando emissões de alto potencial de aquecimento global. Contudo, as práticas de P+L também sustentam o pilar Social (S, do inglês *Social*), transcendendo a gestão ambiental pura. A substituição de equipamentos com PCBs e a gestão segura de resíduos perigosos



reduzem diretamente os riscos de insalubridade e acidentes para os colaboradores (Brasil, 2025). Além disso, iniciativas como o "Projeto Canteiro Sustentável" da Empresa 6 e os programas de doação de materiais da Empresa 1 e da Empresa 5 demonstram como a gestão de resíduos pode gerar valor compartilhado, beneficiando comunidades locais e promovendo a inclusão social. Essa eficiência operacional transborda para o pilar de Governança (G, do inglês *Governance*), comprovando que a sustentabilidade gera retorno financeiro. A venda de sucatas metálicas e a alienação de ativos obsoletos geraram receitas significativas, com a Empresa 10 e a Empresa 5 reportando R\$ 43,6 e R\$ 22,3 milhões, respectivamente, em 2023.

Quanto à Agenda 2030, a conexão ocorre em múltiplas frentes. O ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) é o mais direto, traduzido em metas de reciclagem e redução na fonte. O ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) é demonstrado pela mitigação de emissões na cadeia de suprimentos e recuperação de gases. Por fim, identifica-se uma relação técnica crucial com o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível): a regeneração de óleos e a reforma de transformadores restauram o desempenho operacional dos ativos, reduzindo perdas técnicas na transmissão e distribuição. Ao manter os equipamentos na curva ideal de eficiência, a P+L contribui diretamente para a meta de eficiência energética, otimizando o sistema elétrico como um todo.

### 3.3 Análise de empresas do setor elétrico

O estudo de caso abrangeu as duas únicas empresas que responderam ao questionário, sendo ambas grandes empresas do setor elétrico com perfis de governança distintos, identificadas como Empresa A (gestão privada, atuando em geração e transmissão) e Empresa B (gestão pública, atuando em distribuição). A análise comparativa das respostas, sintetizada no Quadro 3, revela um paradoxo estrutural na maturidade da gestão de resíduos do setor: uma desconexão entre a conformidade documental e a eficácia operacional.

**Quadro 3:** Informações obtidas por meio do questionário enviado às empresas.

Questões	Empresa A	Empresa B
1. Nome da empresa;	<ul style="list-style-type: none"><li>Mantido em anonimato, conforme solicitado na questão 2.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Mantido em anonimato, conforme solicitado na questão 2.</li></ul>
2. O nome necessita ser mantido em anonimato?	<ul style="list-style-type: none"><li>Sim</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>Sim</li></ul>

Questões	Empresa A	Empresa B
3. Atuação da empresa;	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geração, transmissão e comercialização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Distribuição.</li> </ul>
4. Porte da empresa;	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grande (<math>\geq 500</math> funcionários).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grande (<math>\geq 500</math> funcionários).</li> </ul>
5. Quais são os principais tipos de resíduos sólidos gerados anualmente na operação da empresa?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resíduos metálicos.</li> <li>Resíduos oleosos.</li> <li>Resíduos de escritório.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Resíduos metálicos.</li> <li>Resíduos oleosos.</li> <li>Resíduos de madeira ou poda.</li> </ul>
6. A empresa possui inventário ou banco de dados atualizado sobre a geração de resíduos?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sim, mas não atualizado periodicamente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sim, atualizado periodicamente.</li> </ul>
7. Caso a resposta seja sim, especificar o método de controle (ex: Excel, IGS, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Indicadores de Sustentabilidade, Manifestos de transporte de resíduos (MTRs) e Declarações de movimentação de resíduos (DMRs).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Excel, a partir dos MTRs emitidos.</li> </ul>
8. Há na empresa um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS)?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sim, mas em revisão ou sem aplicação efetiva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não possui.</li> </ul>
9. Se a resposta anterior for “sim”, por favor envie o PGRS no campo abaixo.	--	--
10. Há na empresa algum equipamento em circulação contendo PCBs?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não, já foram todos substituídos.</li> </ul>	--
11. A empresa possui parcerias ou contratos de logística reversa para resíduos perigosos (ex.: lâmpadas, baterias, EPIs)?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Não.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sim.</li> </ul>
12. Quais medidas condizentes com as práticas de P+L já foram adotadas pela empresa?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reúso de materiais (exemplo: recuperação e reutilização de óleo isolante).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reúso de materiais (exemplo: recuperação e reutilização de óleo isolante).</li> <li>Reciclagem de materiais (exemplo: cabos, metais, plásticos).</li> <li>Monitoramento de indicadores ambientais.</li> <li>Programas internos de educação ambiental / treinamento de equipes.</li> </ul>
13. Existem barreiras identificadas para ampliar a adoção de P+L?	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conformidade legal e redução de riscos.</li> <li>Redução de impactos ambientais e emissões.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Falta de fornecedores especializados ou tecnologia disponível.</li> <li>Falta de conhecimento de estratégias possíveis.</li> </ul>
14. Na sua visão, quais benefícios mais se	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conformidade legal e redução de riscos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Melhoria de imagem institucional.</li> </ul>

Questões	Empresa A	Empresa B
destacam com a P+L aplicada à gestão de resíduos?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução de impactos ambientais e emissões.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução de impactos ambientais e emissões.</li> </ul>
15. Cite um exemplo de boa prática em gestão de resíduos adotada pela empresa que poderia ser replicado no setor.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regeneração de óleo isolante (OMI).</li> <li>• Classificação de sucatas e alienação de materiais por tipo de classificação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A parceria com associações de catadores de baixa renda, realizada por meio de Chamada Pública, para encaminhamento dos documentos que já extrapolaram o tempo oficial de guarda, para desfragmentação.</li> </ul>
16. Na sua opinião, quais são os maiores desafios para implantar estratégias P+L no setor elétrico?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Logística dos fornecedores.</li> <li>• Pontos de entrega/coleta dos materiais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• [...] Numa empresa pública existem os desafios burocráticos para realizar doações de inservíveis, que poderiam ser reutilizados por outras entidades [...].</li> </ul>
17. Que recomendações faria para fortalecer a gestão sustentável de resíduos no setor?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manejo apropriado dos equipamentos, óleos e materiais de consumo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A gestão é eficiente na Empresa B; cerca de 98% dos resíduos são reinseridos por reuso e reciclagem. Recomenda-se fortalecer associações e ONGs, oferecendo apoio para que obtenham os licenciamentos necessários e ampliem sua capacidade de receber e valorizar esses materiais.</li> </ul>
18. Como a empresa enxerga a relação das suas práticas com o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente com os ODS 7, 12, e 13?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabalho alinhado com as boas práticas ambientais e normas técnicas vigentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Com o gerenciamento de resíduos, estamos reinserindo os materiais na economia circular, o que colabora para diminuir a extração de matérias-primas, o consumo de água e de energia, além de desviar estes materiais de aterros. Portanto, enxergamos uma relação com o ODS 12 especialmente e com o 13.</li> </ul>

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

No caso da Empresa A, de gestão privada, observa-se o fenômeno do "*compliance* de fachada". A organização possui um PGRS formalmente constituído, atendendo aos requisitos legais da PNRS. Contudo, a execução desse planejamento é fragilizada por barreiras de mercado. A empresa relata que a "falta de fornecedores especializados" e gargalos logísticos impedem a adoção de rotas tecnológicas mais avançadas, forçando a manutenção de práticas convencionais. Assim, embora o instrumento de planejamento exista, ele corre o risco de se tornar uma peça de ficção administrativa, incapaz de operacionalizar a P+L na velocidade necessária.

Em contrapartida, a Empresa B, de gestão pública, apresenta um cenário inverso: possui forte capacidade operacional, evidenciada por contratos ativos de logística reversa e taxas de recuperação de materiais próximas a 98%, mas opera com lacunas de planejamento (ausência

de PGRS formal) e graves entraves burocráticos. A principal barreira identificada não é técnica, mas institucional: a legislação de alienação de bens públicos trava a economia circular. O relato do gestor da Empresa B ilustra vividamente como a burocracia transforma ativos com potencial de reuso em passivos ambientais:

[...] numa empresa pública existem os desafios burocráticos para realizar doações de inservíveis [...] sempre há que se ter todo tipo de comprovação de que o inservível não possui valor financeiro [...] a obrigatoriedade de Chamada Pública cria todo um rito burocrático que exige, no mínimo, 'hora/homem' [...] a doação é muito dificultosa pois [...] a empresa pública não pode ter 'gastos' e realizar esta etapa do gerenciamento e carregar e entregar os resíduos numa cooperativa.

Essa "trava burocrática" contradiz a lógica da P+L, pois o tempo de espera pelo rito processual muitas vezes condena o equipamento à deterioração no pátio, inviabilizando o reuso.

Conclui-se, portanto, que a evolução do setor elétrico rumo à sustentabilidade plena exige a fusão das competências observadas nos dois modelos. É necessário aliar a cultura de planejamento e *compliance* da esfera privada à capilaridade operacional e compromisso social da esfera pública. Para isso, é fundamental a desburocratização dos processos de desfazimento de bens inservíveis criando vias rápidas para itens com risco ambiental e o fomento a uma cadeia de suprimentos de reciclagem mais robusta, que viabilize tecnicamente as metas estabelecidas nos PGRS.

#### 4 Considerações finais

O estudo discutiu algumas práticas alinhadas ao conceito de P+L na gestão de resíduos sólidos do setor elétrico, confirmando que o segmento dispõe de tecnologias maduras para a transição rumo à economia circular. A revisão técnica evidenciou que soluções como a regeneração de óleos isolantes e rotas de valorização energética são estratégias interessantes, oferecendo eficiência operacional e redução de passivos ambientais. Contudo, a barreira para a sustentabilidade plena no setor não é tecnológica, mas sim gerencial e institucional.

Além disso, evidenciou-se uma escassez de publicações científicas recentes que associem explicitamente o termo "P+L" à gestão de resíduos. Essa carência de materiais sugere que a terminologia clássica vem sendo absorvida por termos corporativos mais recentes, embora

a essência técnica da P+L continue sendo a base para a eficiência operacional e a redução de passivos ambientais.

No que tange à aderência aos princípios ESG e aos ODS, identificou-se uma heterogeneidade significativa. Enquanto grandes corporações já incorporam o ODS 12 como eixo estratégico, impulsionando a reciclagem e a redução na fonte, a conexão com o ODS 13 e o pilar ambiental do ESG ainda carece, em muitos contextos, de profundidade operacional, limitando-se frequentemente ao cumprimento de *compliance* ou ações pontuais. A gestão ainda opera majoritariamente sob a lógica de "fim de tubo", reagindo à geração do resíduo em vez de preveni-la no *design* do sistema.

A análise comparativa revelou um paradoxo estrutural na gestão de resíduos. O modelo de gestão privada, embora amparado por instrumentos formais de planejamento (exemplo: PGRS), enfrenta limitações logísticas e de mercado que dificultam a execução das metas propostas. Inversamente, o modelo de gestão pública demonstra robustez operacional na logística reversa, mas é severamente restringido por entraves burocráticos que retardam a alienação e o reuso de ativos, transformando bens com potencial circular em resíduos estocados. Cabe ressaltar que a validação prática desses cenários esbarrou em limitações inerentes à pesquisa, evidenciadas pelo baixo retorno do questionário enviado às empresas. Levanta-se a hipótese de que essa baixa adesão decorra do receio corporativo de expor dados sensíveis sobre passivos ambientais, somado à excessiva burocracia interna necessária para autorizar a divulgação de informações institucionais no setor elétrico.

Para superar esses desafios e converter o potencial técnico do setor em efetiva sustentabilidade corporativa, recomenda-se a adoção de estratégias divididas em três horizontes temporais:

- Curto prazo: Focar na desburocratização dos processos de desfazimento de bens inservíveis, criando mecanismos ágeis, sobretudo na gestão pública, para a doação ou venda de ativos obsoletos. Paralelamente, os PGRS devem ser atualizados e institucionalizados como ferramentas vivas de gestão, e não apenas documentos de fachada.
- Médio prazo: Implementar e padronizar relatórios de sustentabilidade auditáveis, baseados em métricas internacionais de reporte já amplamente consolidadas. Isso garantirá a transparência necessária para atrair investimentos

atrelados ao ESG e forçará as empresas a monitorarem seus dados de resíduos com maior rigor.

- Longo prazo: Promover uma mudança cultural, visando superar a lógica de "fim de tubo". As empresas devem integrar os princípios de P+L diretamente na concepção de seus projetos e na homologação de fornecedores, garantindo que o resíduo seja evitado na fonte e consolidando, em definitivo, a economia circular no setor elétrico brasileiro.

### Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004-1**: Resíduos sólidos – Classificação Parte 1: Requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12235**: Armazenamento de resíduos sólidos perigosos. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14605-2**: Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis – Sistema de drenagem oleosa. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BELKHODE, P. N. *et al.* Performance analysis of CI engine using distilled waste transformer oil and diesel fuel blends. **Materials Today: Proceedings**, v. 56, p. 342-347, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.008>.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm).

BRASIL. **Lei nº 14.250, de 25 de novembro de 2021**. Dispõe sobre a eliminação controlada de bifenilas policloradas (PCBs) e de seus resíduos. Brasília, DF: Presidência da República, 2021. [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2021/Lei/L14250.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14250.htm).

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 499, de 6 de outubro de 2020**. Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer. Brasília, DF: CONAMA, 2020b. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-conama/mma-n-499-de-6-de-outubro-de-2020-281790575>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **Como o fim do uso de PCBs em equipamentos elétricos beneficia meio ambiente e sociedade**. Brasília: MMA, 2025. Disponível em: [https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/seguranca-quimica/convencao-de-estocolmo/pcb/projeto\\_pcb](https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/seguranca-quimica/convencao-de-estocolmo/pcb/projeto_pcb)

Revista Gestão & Sustentabilidade, Chapecó (RG&S), v. 7 n. 1, p. 1-23, jan./dez. 2025



responsavel/pcb-noticias/como-o-fim-do-uso-de-pcbs-em-equipamentos-eletricos-beneficia-meio-ambiente-e-sociedade. Acesso em: 27 mar. 2026.

CEMIG. **Relatório Anual de Sustentabilidade 2023**. Belo Horizonte: CEMIG, 2024. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/relatorio/relatorio-anual-de-sustentabilidade-2023/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

CHERTOW, M. R. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 25, n. 1, p. 313-337, 2000. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313>.

CPFL ENERGIA. **Relatório Anual 2024**. Campinas: CPFL Energia, 2024. [https://www.grupocpfl.com.br/sites/default/files/2025-04/250107\\_CPFL\\_RA24\\_VF%20Final2.pdf](https://www.grupocpfl.com.br/sites/default/files/2025-04/250107_CPFL_RA24_VF%20Final2.pdf).

DE WACHTER, D.; JEZDINSKY, V. **The circularity of medium-power electrical transformers Evaluating design options based on an in-depth market**. Brussels: Copper Alliance, 2022. <https://hrcak.srce.hr/file/392582>.

EDF. **Universal Registration Document 2024: Annual Financial Report**. Paris: Électricité de France, 2024. <https://www.edf.fr/sites/groupe/files/2025-04/2025-04-24-edf-urd-2024-en.pdf>.

ELETROBRAS. **Relatório Anual 2024**. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2024. <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Relatorio-Anual.aspx>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2024: Ano base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>.

ENEL. **Relatório de Sustentabilidade 2024**. São Paulo: Enel Brasil, 2024. [https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/quemsomos/relatorios-anuais/2024/Relat%C3%B3rio%20de%20Sustentabilidade%20Enel%20Brasil\\_2024.pdf](https://www.enel.com.br/content/dam/enel-br/quemsomos/relatorios-anuais/2024/Relat%C3%B3rio%20de%20Sustentabilidade%20Enel%20Brasil_2024.pdf).

ENGIE BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2024**. Florianópolis: Engie Brasil Energia, 2024. [https://www.engie.com.br/wp-content/uploads/2025/04/Engie\\_RS2024\\_PT.pdf](https://www.engie.com.br/wp-content/uploads/2025/04/Engie_RS2024_PT.pdf).

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO PARANÁ (FIEP). **O que empresas perdem quando não olham para o ESG**. Curitiba: FIEP, 2025. <https://www.fiepr.org.br/central-de-informacoes/comunicacao-sesi-senai-e-iel/o-que-empresas-perdem-quando-nao-olham-para-o-esg-1-37872-488256.shtml>.

GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 114, p. 11-32, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>

GRANATO, A. C.; JUNIOR, S. L.; CURKAREVICZ, S. Regeneração de óleo isolante em transformador energizado de 138kV. In XIV Seminário Nacional De Distribuição De Energia Elétrica, 14, 2000, Foz do Iguaçu, **Anais** [...]. <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/01/REGENERAC%CC%A7A%CC%83O-DE-O%CC%81LEO-ISOLANTE-EM-TRANSFORMADOR-ENERGIZADO-DE-138KV.pdf>.

HASSANPOUR, M. Transformer Oil Generation and Regeneration Techniques Based on Recent Developments (A Review). **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, 105432, 2021. <https://doi.org/10.15377/2409-787X.2021.08.2>.

HENISZ, W.; KOLLER, T.; NUTTALL, R. Five ways that ESG creates value. **McKinsey Quarterly**, 2019. [https://www.mckinsey.com/~/\\_/media/McKinsey/Business%20Functions/Strategy%20and%20Corporate%20Finance/Our%20Insights/Five%20ways%20that%20ESG%20creates%20value/Five-ways-that-ESG-creates-value.ashx](https://www.mckinsey.com/~/_/media/McKinsey/Business%20Functions/Strategy%20and%20Corporate%20Finance/Our%20Insights/Five%20ways%20that%20ESG%20creates%20value/Five-ways-that-ESG-creates-value.ashx).

ISA CTEEP. **Relatório Anual 2024**. São Paulo: ISA CTEEP, 2024. <https://www.isaenergiabrasil.com.br/sustentabilidade/relatorios-de-sustentabilidade/#:~:text=Relat%C3%B3rio%20de%20Sustentabilidade%202024,empresarial%20%C3%A9tica%2C%20respons%C3%A1vel%20e%20transparente>.

KNISS, C. T. *et al.* Utilização do resíduo resultante da combustão de carvão mineral em usinas termelétricas na produção de novos materiais: uma análise a partir de artigos científicos e de patentes. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 13, p. 76-93, 2019.

LENZI, E. **Influência do uso de cinzas da combustão de carvão mineral em argamassas de revestimento**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2001. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/79747>.

MEDEIROS, D. D. *et al.* Aplicação da Produção mais Limpa em uma empresa como ferramenta de melhoria contínua. **Production**, v. 17, n. 1, p. 109-128, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0103-65132007000100008>.

MELLONI, Eugênio. Indústria do carvão quer eliminar o passivo das cinzas. **Brasil Energia**, 8 maio 2025. Disponível em: <https://brasilenergia.com.br/brasilenergia/termeletricas-e-seguranca-energetica/industria-do-carvao-quer-eliminar-o-passivo-das-cinzas>. Acesso em: 30 mar. 2026.

MUTZ, D.; HENGEVOSS, D.; GROSS, C. **Opções em Waste-to-Energy na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos: Um Guia para Tomadores de Decisão em Países Emergentes ou em Desenvolvimento**. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2017. <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/protegeer-antigo/arquivos/umguiaparatomadoresdedecisoempasesemergentesouemdesenvolvimento.pdf>.

NEOENERGIA. **Relatório Integrado 2024**. Rio de Janeiro: Neoenergia, 2024. <https://www.neoenergia.com/relatorio-anual-de-sustentabilidade>.



NEXTERA ENERGY. **Environmental, Social and Governance Report 2024**. Juno Beach: NextEra Energy, 2024. <https://www.investor.nexteraenergy.com/sustainability/sustainability-resources>.

PEREIRA, N. *et al.* Relatórios de sustentabilidade: ferramenta de interface no desempenho social, econômico e ambiental das organizações. **Revista de Auditoria Governança e Contabilidade**, v. 3 n. 5 RAGC, 2015.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). **Environmental agreements and cleaner production.**, 2007. <https://www.unep.org/resources/report/environmental-agreements-and-cleaner-production>.

REN21. **Renewables 2023 Global Status Report**. Paris: REN21 Secretariat, 2023. <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/>.

RIBEIRO, S; BORGES, F. Gestão de resíduos sólidos urbanos e geração de energia elétrica. **RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar** - ISSN 2675-6218. 2. 195-213. 10.47820/recima21.v2i2.95, 2021.

SANETRAN. **Tudo sobre Waste-to-Energy (WtE): Entenda como essa tecnologia transforma resíduos em energia**. 2024. Disponível em: <https://sanetran.com.br/waste-to-energy-wte/>.

SATHISH, T. *et al.* Waste to fuel: Pyrolysis of waste transformer oil and its evaluation as alternative fuel along with different nanoparticles in CI engine with exhaust gas recirculation. **Energy**, v. 267, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126595>.

SINGH, M.; SIDDIQUE, R. Effect of coal bottom ash as partial replacement of sand on properties of concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 72, p. 20-32, 2013.

STATKRAFT BRASIL. **Relatório de Sustentabilidade 2024**. Florianópolis: Statkraft, 2024. <https://www.statkraft.com.br/sustentabilidade/relatorios/>.

TIAN, X. *et al.* Recovery of valuable elements from coal fly ash: A review. **Environmental Research**, v. 282, 121928, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121928>.

TIWARI, P. *et al.* Hazardous effects of waste transformer oil and its prevention: A review. **Next Sustainability**, v. 3, 100026, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100026>.

VEERARAGHAVAN, S. *et al.* Optimized injection strategy for hydrogen-waste transformer oil biodiesel dual-fuel engines: A novel waste-to-energy solution towards environmental protection. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 202, 107749, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107749>.



VU, H. P.; MULLIGAN, C. N. An Overview on the Treatment of Oil Pollutants in Soil Using Synthetic and Biological Surfactant Foam and Nanoparticles. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, 1916, 2023. <https://doi.org/10.3390/ijms24031916>.

WANG, M. *et al.* Washing of oil-contaminated soil using a novel surfactant-solvent system. **RSC Advances**, v. 9, p. 2402-2411, 2019. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ra/c8ra09964b>.

