

SUSTENTABILIDADE E ENGENHARIA: REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS NAS FUNDAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

SUSTAINABILITY AND ENGINEERING: REDUCING ENVIRONMENTAL IMPACTS IN TRANSMISSION LINE FOUNDATIONS

Igor Reis Barros¹; Raimundo Pereira de Vaconcelos²

RESUMO: Esta pesquisa analisa os impactos ambientais causados pela utilização de estacas tipo raiz na construção de linhas de transmissão de energia no Brasil. O estudo foca na identificação e minimização de impactos, dado que essas fundações utilizam lama bentonítica tóxica na perfuração, afetando solo e recursos hídricos. Alternativas mais sustentáveis são propostas, como a substituição por fluidos à base de biodiesel e sintéticos. Os resultados visam fornecer diretrizes para reduzir esses impactos, conciliando viabilidade econômica e ambiental na expansão da infraestrutura energética nacional.

Palavras-chave: Linhas de transmissão, Impactos ambientais, Fundações tipo raiz, Fluido de perfuração, Sustentabilidade.

ABSTRACT: This research analyzes the environmental impacts caused by the use of micropiles in the construction of energy transmission lines in Brazil. The study focuses on identifying and minimizing impacts, as these foundations use toxic bentonite mud in drilling, affecting soil and water resources. More sustainable alternatives are proposed, such as replacing it with biodiesel-based and synthetic fluids. The results aim to provide guidelines to mitigate these impacts, balancing economic and environmental viability in the national energy infrastructure expansion.

Keywords: Transmission lines, Environmental impacts, Micropiles, Drilling fluid, Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

No contexto do desenvolvimento econômico e tecnológico, a demanda por energia elétrica cresce constantemente, exigindo a ampliação das infraestruturas de geração, transmissão e distribuição de energia. No Brasil, essa expansão encontra desafios específicos, como a vastidão do território e a necessidade de atravessar áreas de floresta e conservação ambiental. A construção de novas linhas de transmissão, essenciais para interligar as usinas geradoras aos centros consumidores, acarreta uma série de impactos ambientais que precisam ser cuidadosamente analisados e mitigados.

As linhas de transmissão são compostas por uma rede complexa de cabos e torres que demandam fundações seguras e eficientes. Uma das tecnologias amplamente utilizadas para fundações é a estaca tipo raiz, que se destaca por sua adaptabilidade a diferentes tipos de solo, inclusive rochosos e de difícil acesso. No entanto, o método de execução dessas estacas requer o uso de lama bentonítica, uma substância estabilizante essencial para evitar o colapso da

¹ Universidade Federal do Amazonas (UFAM) / email: igorrb@ufam.edu.br

² Universidade Federal do Amazonas (UFAM) / email: vasconcelos@ufam.edu.br

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

perfuração, mas que gera sérios impactos ambientais, como a contaminação do solo e dos corpos hídricos subterrâneos.

Estes impactos se tornam ainda mais significativos em áreas de floresta, onde as faixas de servidão necessárias para a passagem das linhas geram desmatamento e alteram os ecossistemas locais. Assim, além da necessidade de infraestrutura energética, surge a responsabilidade de buscar soluções técnicas que reduzam os danos ambientais e assegurem a sustentabilidade desses empreendimentos.

Este artigo tem como objetivo analisar os principais impactos ambientais relacionados ao uso de estacas raiz na construção de linhas de transmissão de energia e propor alternativas que minimizem esses impactos. A pesquisa apresenta um panorama detalhado dos problemas causados pelo uso da lama bentonítica, além de discutir alternativas mais sustentáveis, como fluidos à base de biodiesel, água com aditivos ou polímeros sintéticos. Espera-se que os resultados apresentados contribuam para a adoção de práticas mais sustentáveis no setor elétrico, garantindo tanto a viabilidade econômica quanto a preservação ambiental.

Por fim, a relevância deste estudo se encontra na necessidade urgente de harmonizar a expansão da infraestrutura energética com a preservação do meio ambiente. Em um país como o Brasil, onde a matriz energética é predominantemente renovável, mas enfrenta desafios logísticos e ambientais, a adoção de tecnologias e práticas sustentáveis nas fundações das torres de transmissão torna-se crucial. As alternativas propostas neste trabalho buscam não apenas minimizar impactos, mas também acelerar o processo de licenciamento ambiental e reduzir os custos e atrasos nas obras, promovendo uma infraestrutura mais eficiente e sustentável.

2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

1.1 Infraestrutura de Transmissão de Energia e Desafios Ambientais no Brasil

A infraestrutura de transmissão de energia é essencial para interligar a geração elétrica com os centros consumidores. No Brasil, devido à predominância de usinas hidrelétricas em regiões remotas, como a Amazônia, a construção de longas linhas de transmissão se torna imprescindível (MURTA, 2015). A vastidão territorial brasileira, com cerca de 8,5 milhões de km², impõe desafios logísticos e ambientais significativos, uma vez que grande parte das obras atravessa áreas de floresta e proteção ambiental (EPE, 2017).

As linhas de transmissão precisam cumprir critérios rigorosos de segurança e eficiência, pois desempenham papel fundamental na estabilidade do sistema elétrico nacional. Contudo, a execução dessas obras pode impactar severamente o meio ambiente, principalmente pela necessidade de desmatamento das faixas de servidão, que geram alterações nos ecossistemas locais e riscos de fragmentação de habitat (CHAVES, 2004; MURTA, 2015). Além disso, fatores como impacto sonoro e contaminação do solo por resíduos de perfuração contribuem para a complexidade do licenciamento ambiental (PEREIRA, 2016).

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

1.2 Fundamentos e Tipologias de Fundações para Linhas de Transmissão

As fundações utilizadas nas torres de transmissão são divididas entre fundações superficiais e profundas. As superficiais, como sapatas, são preferíveis em terrenos com boa capacidade de suporte e apresentam baixo impacto ambiental (ASHCAR, 1999). No entanto, em terrenos irregulares ou instáveis, como solos pedregosos, as fundações profundas, como tubulões e estacas, são mais recomendadas devido à sua maior capacidade de carga e resistência (AZEVEDO, 2011).

Entre as fundações profundas, as estacas tipo raiz são amplamente empregadas por sua versatilidade em diferentes condições de solo, especialmente em terrenos rochosos ou de difícil acesso (NOGUEIRA, 2004). A técnica de execução dessas estacas, no entanto, utiliza lama bentonítica para estabilizar as paredes da escavação, o que pode acarretar riscos ambientais significativos, como a contaminação de lençóis freáticos e solos próximos (PEREIRA, 2018).

1.3 Impactos Ambientais Associados ao Uso de Estacas Tipo Raiz

O uso de estacas raiz em projetos de linhas de transmissão representa um desafio ambiental específico. A lama bentonítica, necessária para a execução das estacas, é composta por argila que, ao entrar em contato com corpos hídricos e o solo, pode alterar suas propriedades químicas e biológicas (LIMA, 2015). Em alguns casos, a dispersão inadequada dessa lama pode comprometer a fauna e flora locais, além de dificultar a recuperação da vegetação nativa nas faixas de servidão (MURTA, 2015).

Além da contaminação, as atividades de perfuração geram efeitos de borda e fragmentação de habitat, especialmente em áreas florestais. Esses efeitos resultam na alteração das condições ecológicas nas margens das faixas desmatadas, modificando a composição da vegetação e afetando a biodiversidade (CHAVES, 2004). Outro impacto relevante é o risco de poluição sonora e interferências eletromagnéticas, que podem afetar tanto a fauna local quanto as populações humanas próximas às obras (PEREIRA, 2016).

1.4 Alternativas Sustentáveis para a Minimização de Impactos Ambientais

Com o objetivo de mitigar os impactos ambientais, a literatura propõe alternativas para substituir a lama bentonítica por fluidos de perfuração mais sustentáveis. Uma opção é a utilização de fluidos à base de biodiesel, que apresentam menor toxicidade e são biodegradáveis (LIMA, 2015). Outra alternativa é o uso de fluidos à base de água com aditivos naturais, que reduzem o impacto químico e facilitam a recuperação do solo após a obra (MURTA, 2015).

Fluidos sintéticos, embora mais caros, também oferecem vantagens significativas, pois possuem menor impacto ambiental e melhor estabilidade durante a perfuração (ASHCAR, 1999). Estudos recentes destacam ainda o uso de argilas de várzea como alternativa viável em regiões amazônicas, por serem recursos locais e apresentarem menor impacto de extração e descarte (MATIAS, 2018).

Além da substituição de fluidos, a adoção de práticas de recuperação ambiental das faixas de servidão é essencial para minimizar os impactos a longo prazo. A recomposição da vegetação nativa e a implementação de corredores ecológicos ao longo das linhas de

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

transmissão são medidas que contribuem para a manutenção da biodiversidade (PEREIRA, 2016). Tais medidas, associadas ao uso de tecnologias de fundação menos invasivas, podem acelerar o processo de licenciamento ambiental e reduzir atrasos nas obras.

1.5 Licenciamento Ambiental e Regulação do Setor Elétrico

A construção de linhas de transmissão no Brasil é regida por um complexo processo de licenciamento ambiental, coordenado por órgãos como o IBAMA e as secretarias estaduais de meio ambiente (IBAMA, 2018). O licenciamento envolve etapas rigorosas, que vão desde o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) até a obtenção de licenças prévias, de instalação e de operação. Esses processos visam garantir que os empreendimentos considerem alternativas menos impactantes e adotem práticas de mitigação adequadas (CONAMA, 2011).

No entanto, os atrasos frequentes no licenciamento ambiental de grandes projetos de transmissão demonstram a necessidade de uma maior integração entre as políticas ambientais e o planejamento energético. Projetos como o Linhão de Tucuruí, que precisa atravessar áreas de preservação e terras indígenas, mostram como questões socioambientais podem impactar diretamente a viabilidade e o cronograma das obras (EPE, 2017).

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada nesta pesquisa combinou abordagens qualitativas e quantitativas, envolvendo tanto análise documental quanto levantamento de dados de campo. A seguir, detalham-se as etapas e os procedimentos metodológicos utilizados para a condução do estudo.

3.1. Natureza da Pesquisa

A pesquisa possui caráter descritivo e exploratório, com o objetivo de levantar e analisar os impactos ambientais relacionados ao uso de estacas tipo raiz em linhas de transmissão de energia elétrica no Brasil. Além disso, busca-se propor alternativas sustentáveis, baseando-se em dados e estudos atuais sobre fluidos de perfuração e metodologias de recuperação ambiental.

3.2. Procedimentos de Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada por meio de análise documental e levantamento bibliográfico, com consulta a relatórios de impacto ambiental (RIMA), normas regulamentadoras (como a NBR 5422 e NBR 6122) e artigos científicos relacionados ao tema. Também foram analisados dados específicos de projetos de transmissão que utilizam estacas raiz em suas fundações.

Foram utilizados documentos técnicos disponibilizados por órgãos como o IBAMA, ANEEL e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). A dissertação destacou, por exemplo, o impacto da construção do linhão de Tucuruí, que enfrenta dificuldades no licenciamento devido à necessidade de atravessar áreas de preservação ambiental e terras indígenas (Figura 1).

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

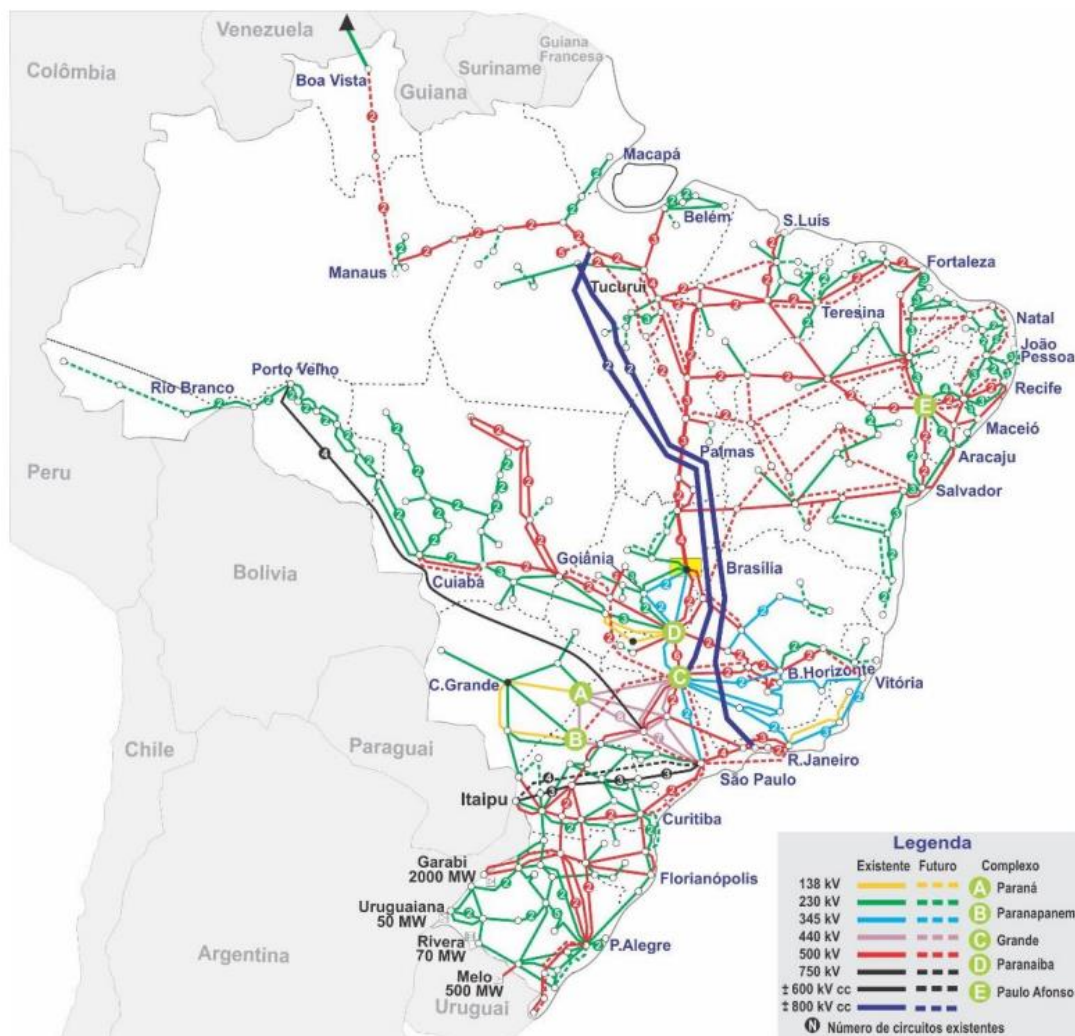


Figura 1. Sistema de transmissão brasileiro (Fonte: ONS, 2019).

3.3. Análise dos Dados

Os dados foram organizados e analisados com base em categorias específicas, como tipo de impacto ambiental, método de perfuração e viabilidade econômica das alternativas propostas. Foi realizada uma análise qualitativa dos impactos ambientais observados e uma análise de custo-benefício das alternativas sustentáveis levantadas.

3.4. Limitações da Pesquisa

A principal limitação encontrada foi a escassez de dados específicos de alguns projetos de transmissão em fase inicial de licenciamento ambiental. Além disso, a falta de estudos empíricos sobre a aplicação em larga escala dos fluidos alternativos propostos limitou a profundidade da análise comparativa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa revelam que a utilização de estacas tipo raiz na construção de torres para linhas de transmissão de energia apresenta uma série de impactos

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

ambientais. A seguir, são discutidos os principais resultados observados, as alternativas propostas para mitigação e a relevância desses achados para a sustentabilidade no setor energético.

4.1. Impactos Ambientais da Utilização de Estacas Tipo Raiz

O levantamento mostrou que o impacto ambiental mais significativo está relacionado ao uso de lama bentonítica como fluido estabilizante nas perfurações. A lama utilizada durante a execução das estacas altera as propriedades físicas e químicas do solo e pode contaminar corpos hídricos subterrâneos. A Figura 2 apresenta um diagrama de transferência de poluentes para o solo e corpos hídricos, ilustrando o caminho da contaminação.

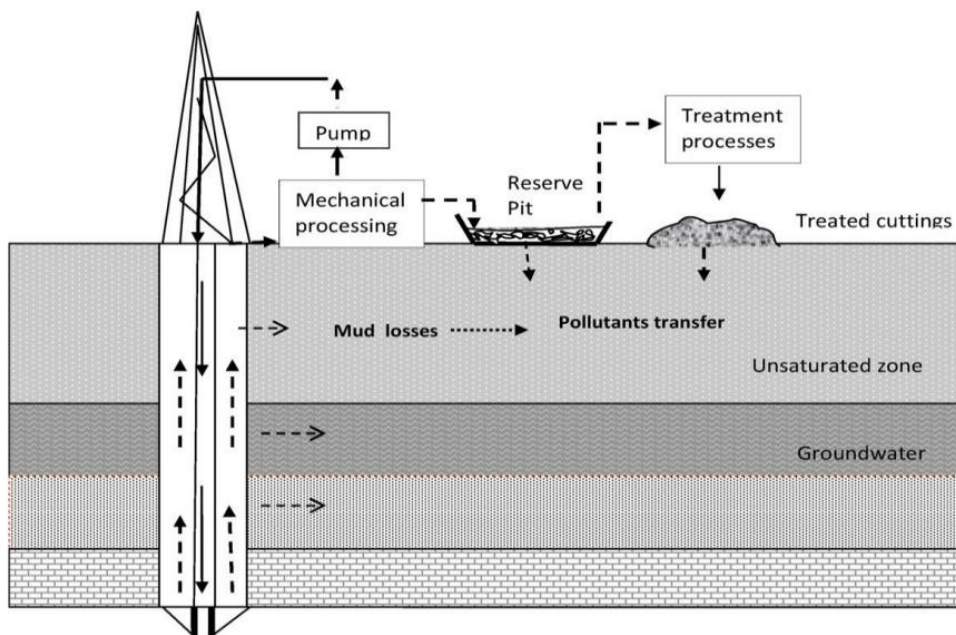


Figura 2. Diagrama da transferência de poluentes para o solo e corpos hídricos subterrâneos (Fonte: Ghazi et. Al., 2011).

Além disso, a pesquisa identificou que as faixas de servidão necessárias para as linhas de transmissão geram fragmentação de habitats e efeitos de borda, que alteram a biodiversidade local. A Figura 3 detalha a extensão dessas áreas impactadas, evidenciando as mudanças na vegetação ao longo das linhas.

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição



Figura 3. Faixa de servidão e áreas afetadas diretamente e indiretamente pelas linhas de transmissão (Fonte: Biasotto, 2017).

4.2. Análise Comparativa das Fundações Profundas

A pesquisa comparou a estaca tipo raiz com outras fundações profundas, como tubulões e estacas metálicas, para identificar vantagens e limitações. A Figura 4 apresenta uma visão esquemática dos diferentes tipos de fundações profundas. As estacas raiz destacaram-se pela versatilidade em terrenos de difícil acesso e por possibilitarem o uso em solos pedregosos e rochosos. Contudo, o custo elevado e o impacto ambiental relacionado ao uso de fluidos estabilizantes são desafios significativos.

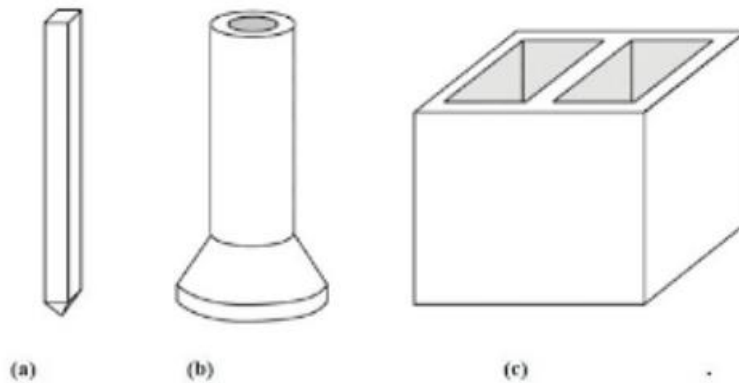


Figura 4. Fundações profundas: a) estacas, b) tubulões e c) caixões (Fonte: Pereira, 2016).

Em projetos como o linhão de Tucuruí, essas características se tornaram críticas, dado que o traçado atravessa áreas de conservação ambiental e terras indígenas, onde o controle de impactos ambientais é fundamental. A necessidade de soluções mais sustentáveis para minimizar os impactos é evidente nesses contextos.

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

4.3. Alternativas Sustentáveis para Redução de Impactos

Para mitigar os impactos da lama bentonítica, a pesquisa avaliou o uso de fluidos alternativos, como:

- **Fluidos à base de biodiesel:** Biodegradáveis e com menor toxicidade para o meio ambiente.
- **Fluidos à base de água com aditivos:** Menos poluentes e de fácil dispersão após a execução das fundações.
- **Fluidos sintéticos:** Com maior eficiência de estabilização, porém com custo mais elevado.

A Figura 2 destaca a importância da escolha de fluidos menos poluentes para evitar a contaminação de corpos hídricos subterrâneos.

Além dos fluidos, a pesquisa sugere a recuperação das faixas de servidão por meio de corredores ecológicos, contribuindo para a preservação da biodiversidade. Essas medidas são especialmente importantes em projetos que atravessam áreas ambientalmente sensíveis.

4.4. Análise Econômica e Ambiental das Alternativas

Os resultados indicam que, apesar do maior custo inicial, a substituição da lama bentonítica por fluidos sustentáveis pode gerar benefícios econômicos a longo prazo. A adoção de práticas ambientalmente corretas pode acelerar o processo de licenciamento ambiental, evitando atrasos nas obras e custos adicionais relacionados a compensações ambientais.

O Quadro 1 apresenta uma matriz de vantagens e desvantagens das alternativas propostas, facilitando a tomada de decisão por parte das empresas e gestores públicos. A pesquisa sugere que o uso de fluidos menos poluentes, combinado com práticas de recuperação ambiental, é essencial para garantir a viabilidade dos projetos de transmissão de energia.

Quadro 1: Principais Vantagens e Desvantagens das Alternativas para Redução dos Impactos Ambientais

Alternativa	Vantagens	Desvantagens
Lama Bentonítica	- Boa estabilidade durante a perfuração - Fácil disponibilidade no mercado	- Alto risco de contaminação do solo e água - Complexidade no descarte adequado
Fluidos à base de Biodiesel	- Biodegradável - Baixa toxicidade - Reduz danos ambientais	- Custo elevado - Logística de transporte mais complexa
Fluidos à base de Água com Aditivos	- Econômico - Fácil manuseio e descarte - Menor impacto ambiental comparado à lama bentonítica	- Eficácia limitada em solos de alta permeabilidade
Fluidos Sintéticos	- Alta eficiência de estabilização - Menor impacto ambiental	- Custo muito elevado - Necessita estrutura específica para logística e descarte
Argilas de Várzea	- Fonte local, reduzindo custos logísticos - Menor impacto ambiental	- Eficácia variável conforme a composição do solo - Dependência de disponibilidade regional

Fonte: Autores, 2022.

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

4.5. Relevância dos Achados e Recomendações

A pesquisa demonstrou que a implementação de alternativas sustentáveis é viável tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. A substituição de lama bentonítica por fluidos mais seguros e a adoção de práticas de recuperação ambiental são fundamentais para minimizar impactos e garantir o desenvolvimento sustentável do setor energético no Brasil.

A partir desses resultados, sugere-se a adoção de políticas públicas que incentivem o uso de fluidos alternativos e a implementação de corredores ecológicos nas faixas de servidão. Além disso, recomenda-se a realização de estudos futuros para avaliar o desempenho prático dos fluidos alternativos em condições reais de campo e para aprofundar a análise econômica das alternativas propostas.

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa revelou que a utilização de estacas tipo raiz na construção de torres para linhas de transmissão de energia apresenta benefícios operacionais, mas também gera impactos ambientais significativos, especialmente devido ao uso da lama bentonítica. A contaminação do solo e dos corpos hídricos, bem como os efeitos de borda e fragmentação de habitats nas faixas de servidão, foram identificados como os principais impactos negativos. A análise comparativa entre as alternativas propostas mostrou que é possível mitigar esses impactos com soluções mais sustentáveis, como fluidos de perfuração biodegradáveis e técnicas de recuperação ambiental.

O estudo destacou que o uso de fluidos à base de biodiesel e água com aditivos apresenta um equilíbrio entre eficiência operacional e menor impacto ambiental. No entanto, a adoção dessas alternativas pode exigir maior planejamento, dado o custo e a logística mais complexa em comparação com a lama bentonítica tradicional. O quadro de vantagens e desvantagens apontou que a escolha da alternativa ideal deve considerar não apenas a viabilidade técnica e econômica, mas também o contexto ambiental e social de cada projeto.

Além das soluções técnicas, a pesquisa reforçou a importância de integrar práticas de recuperação ambiental ao longo das faixas de servidão, como a recomposição da vegetação e a criação de corredores ecológicos. Essas medidas podem minimizar os impactos a longo prazo e facilitar o processo de licenciamento ambiental, evitando atrasos e custos adicionais nas obras.

Por fim, a adoção de fluidos sustentáveis e a implementação de boas práticas ambientais são fundamentais para garantir o desenvolvimento sustentável do setor energético no Brasil. Projetos como o Linhão de Tucuruí demonstram que a integração entre engenharia e meio ambiente é essencial para viabilizar a expansão da infraestrutura de forma responsável. Recomenda-se que estudos futuros explorem em maior profundidade a eficiência dos fluidos alternativos em condições reais de campo, bem como analisem os benefícios econômicos da adoção dessas soluções no longo prazo.

Dessa forma, esta pesquisa contribui para o aprimoramento das práticas na construção de linhas de transmissão, propondo diretrizes que conciliam eficiência operacional, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental.

REFERÊNCIAS

ASHCAR, M. Fundamentos de Fundações. São Paulo: Pini, 1999.

AZEVEDO, L. G. Fundações Profundas: Métodos e Aplicações. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

CHAVES, J. A. Energia e Sustentabilidade: Impactos e Alternativas. Belo Horizonte: UFMG, 2004.

Realização:

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção – UFAM
24 e 25 de Outubro de 2024, 1ª edição

CONAMA. Resolução n.º 01, de 23 de janeiro de 2011. Brasília: Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2011.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia. Brasília: EPE, 2017.

IBAMA. Relatório de Licenciamento Ambiental. Brasília: IBAMA, 2018.

LIMA, R. A. Fluidos de Perfuração e Sustentabilidade. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MATIAS, F. G. Alternativas Locais para Fundações de Linhas de Transmissão. Manaus: UFAM, 2018.

MURTA, R. A. Sistemas de Transmissão e Impactos Ambientais. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2015.

NOGUEIRA, P. A. A. Tipologias de Fundações em Linhas de Transmissão. São Paulo: USP, 2004.

PEREIRA, R. P. Estacas Raiz e Sustentabilidade em Linhas de Transmissão. Manaus: UFAM, 2018.