



II CONTEC MATOPIBA

ANAIS DO II CONGRESSO DE TECNOLOGIA, ENGENHARIA E CIÊNCIA (CONTEC) DO MATOPIBA

MARANHÃO INTELIGENTE PARA O
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Organização

Diego Lima Medeiros

Daniel Beserra Costa

Raimundo Nonato Diniz Costa Filho

Edson Nunes Costa Paura

José Ribamar Nascimento dos Santos

Rafael Ramos Campos

Samuel Dias Lemos

**Balsas
2025**



II CONTEC MATOPIBA

ANAIS DO II CONGRESSO DE TECNOLOGIA, ENGENHARIA E CIÊNCIA (CONTEC) DO MATOPIBA

MARANHÃO INTELIGENTE PARA O
DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Organização

Diego Lima Medeiros

Daniel Beserra Costa

Raimundo Nonato Diniz Costa Filho

Edson Nunes Costa Paura

José Ribamar Nascimento dos Santos

Rafael Ramos Campos

Samuel Dias Lemos

**Balsas
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

AN532 Anais do II Congresso de Tecnologia, Engenharia e Ciência (CONTEC) do MATOPIBA: Maranhão inteligente para o desenvolvimento sustentável. Anais...Balsas (MA) UFMA, 2025

Disponível em www.even3.com.br/anais/ii-contec-matopiba-607398

Organizado por: Diego Lima Medeiros, Daniel Beserra Costa, Raimundo Nonato Diniz Costa Filho, Edson Nunes Costa Paura, José Ribamar Nascimento dos Santos, Rafael Ramos Campos, Samuel Dias Lemos

ISBN: 978-65-272-2007-7

1. Engenharia 2. Tecnologia (ciências aplicadas)

UFMA

CDD - 370

CORPO EDITORAL

COORDENADOR DA COMISSÃO ORGANIZADORA

DANIEL BESERRA COSTA

COMISSÃO ORGANIZADORA

CARLOS JOSUÉ DE ARAÚJO DA SILVA

CECÍLIA REGO DOS SANTOS

DAVID ALMEIDA SOUSA

DIEGO LIMA MEDEIROS

EDSON NUNES COSTA PAURA

FRANCISCO COSTA E SILVA NETO

HAYME DHEYMISON VILARINDO BARBOSA

ISLOWRRANE MENESES DA SILVA

JEAN CARLOS REIS DE ARAÚJO

JOSÉ RIBAMAR NASCIMENTO DOS SANTOS

NÁDIA CRUZ DE JESUS

PALOMA JARDIM SOUSA

RAFAEL RAMOS CAMPOS

RAIMUNDO NONATO DINIZ COSTA FILHO

REBECA PEREIRA DE CARVALHO

SAMUEL DIAS LEMOS

COORDENADOR DA COMISSÃO CIENTÍFICA

DIEGO LIMA MEDEIROS (UFMA)

COMISSÃO CIENTÍFICA

ALICE JADNEIZA GUILHERME DE ALBUQUERQUE ALMEIDA (UFMA)

ANA MARIA GONÇALVES DUARTE MENDONÇA (UFCG)

GISLANE PINHO DE OLIVEIRA (UFMA)

GISÉLIA BRITO DOS SANTOS (UFMA)
GUSTAVO ARAÚJO DE ANDRADE (UFMA)
IVANILSON SOUSA DA COSTA (UFMA)
JEFFERSON FONTINELE DA SILVA (UFMA)
JOSÉ RIBAMAR NASCIMENTO DOS SANTOS (UFMA)
LAIANA FERREIRA DA COSTA (UFRPE)
PAULO CRISTIANO QUEIROZ MORAES (UFMA)
PRISCILA MARIA SOUSA GONÇALVES LUZ (UFMA)
QUELI CRISTINA FIDELIS (UFMA)
RAFAEL HENRIQUE AVANÇO (UFGD)
TITO FRANCISCO IANDA (UFBA)
TATIANE CAROLYNE CARNEIRO (UFMA)

APRESENTAÇÃO

O Congresso de Tecnologia, Engenharia e Ciência (CONTEC) chegou em sua segunda edição. Historicamente, este congresso foi idealizado em um contexto de unificação de quatro diferentes eventos científicos, a saber: Semana de Meio Ambiente (seis edições), Semana de Engenharia Elétrica (três edições), Congresso de Engenharia Civil (uma edição) e Congresso de Ciência e Tecnologia (três edições). Esses eventos ocorriam individualmente em seus respectivos cursos no Centro de Ciências de Balsas (CCBL) da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), porém, a partir de 2024, foram unificados no Congresso Multidisciplinar de Engenharias, Ciência e Tecnologia, com o objetivo de trazer os aspectos da interdisciplinaridade das diferentes áreas dos cursos de Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia e Bacharelados em Engenharia Ambiental, Civil e Elétrica do CCBL, bem como, de permitir a melhor interação entre profissionais do mercado, servidores públicos e estudantes da localidade, assim como atores de outras partes do Brasil.

Com o tema, Maranhão Inteligente para o Desenvolvimento Sustentável, no período de 19 a 24 de outubro de 2025, o evento aconteceu com o objetivo de estabelecer um espaço qualificado de natureza multidisciplinar e interinstitucional para o debate técnico-científico e a difusão de resultados de pesquisas sobre a temática abordada. Áreas como a eficiência energética, mitigação de impactos ambientais, gestão de recursos naturais e melhoria da qualidade de vida vêm ganhando grande destaque na sociedade devido à incorporação de soluções baseadas em Inteligência Artificial (IA). Dessa forma, a implementação de ferramentas lastreadas no uso da IA tem se tornado uma estratégia cada vez mais relevante no âmbito das engenharias. Nesse contexto, fundamenta-se a realização do II Congresso de Tecnologia, Engenharia e Ciência (CONTEC) do MATOPIBA.

A temática do evento está vinculada diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU), com destaque para o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima). O uso de IA em áreas tais como a engenharia ambiental, sanitária, civil e elétrica tem gerado avanços relevantes na modelagem de cenários, otimização de processos produtivos e automação inteligente de sistemas,

promovendo ganhos de desempenho e redução de custos. No entanto, a utilização dessas tecnologias de IA ainda enfrenta obstáculos éticos e técnicos significativos, sobretudo na formação de recursos humanos qualificados, consolidação de linhas de pesquisa e aceitação pela sociedade civil.

A proposta do II CONTEC MATOPIBA também está alinhada aos desafios estratégicos das áreas de resultado do Plano Maranhão 2050 da Secretaria de Estado do Planejamento e Orçamento (SEPLAN-MA) que seguem: i) ampliar a oferta do ensino superior e profissionalizante e promover aprendizagem inovadora e conectada com vocações regionais na área de Educação, Identidade e Cultura Transformadoras e Estruturantes; ii) aumentar a atratividade do ambiente de negócios e a capacidade de inovação na área de Economia Próspera e Inclusiva; iii) potencializar o desenvolvimento da economia verde e transversalizar a educação ambiental na área de Meio Ambiente Valorizado e Resiliente; iv) reduzir a desigualdade no acesso a direitos fundamentais, pobreza e escassez de oportunidades na área de Sociedade Saudável, Segura e Justa; e v) estimular a capacidade de inovação e a utilização de recursos digitais na área de Governança Efetiva, Conectada e Inovadora. Desta forma, o evento foi uma oportunidade para discutir a interação entre a IA e ODS, inserindo o público de diferentes partes do Brasil na realidade do complexo de agronegócio do MATOPIBA, o qual abrange parte dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia.

O II CONTEC MATOPIBA contou com 268 inscritos, consolidando-se como um espaço de referência para o debate multidisciplinar. Foram submetidos 21 artigos, todos defendidos e publicados nestes anais, refletindo a qualidade e a diversidade temática das pesquisas apresentadas. A avaliação dos participantes, por meio de formulário de satisfação, destacou a alta qualidade dos minicursos e palestras, com menções positivas à aplicabilidade dos conteúdos e à qualificação dos ministrantes. A organização do evento e o desempenho da equipe de apoio também foram amplamente elogiados, com reconhecimento pelo empenho e atendimento prestado. Observa-se que as edições do CONTEC MATOPIBA têm oferecido oportunidades de aprendizado e uma rede de relações para estudantes, pesquisadores e profissionais, contribuindo para a formação de recursos humanos qualificados. Além disso, promove-se o contato de atores da academia, mercado, governo e sociedade civil, viabilizando a troca de experiências e formação de parcerias.

Para finalizar, a comissão organizadora expressa os sinceros agradecimentos a todos os participantes, palestrantes, ministrantes de minicursos e avaliadores da comissão científica pelo engajamento e contribuição para o sucesso do evento. Um agradecimento especial é feito aos seguintes apoiadores:

- Fundação Sôsaândrade (FSADU);
- Associação dos Produtores de Soja e Milho do Estado do Maranhão (APROSOJA-MA);
- Câmara Municipal de Balsas-MA – Vereadora Isaura Alves de Sousa.

Com o apoio fundamental dessas instituições e parceiros, a realização exitosa do II CONTEC MATOPIBA foi possível. Espera-se que as próximas edições deste evento continuem promovendo a integração entre conhecimento científico, inovação e desenvolvimento regional sustentável.

Prof. Dr. Daniel Beserra Costa
Coordenador do II CONTEC MATOPIBA

SUMÁRIO

1	ANÁLISE DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DO SOLO DE SUBLEITO NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	11
2	ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DO GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO NO CRUZAMENTO DAS RUAS JOSÉ LEÃO E PREFEITO EDÍSIO SILVA EM BALSAS/MA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COM JAAMSIM	21
3	ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA A MELHORIA DO ACESSO AO CAMPUS DA UFMA/BALSAS: UM ESTUDO DE CASO	31
4	ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA: ALGUNS FUNDAMENTOS PARA CONCEPÇÃO DE PROJETOS ARQUITETÔNICOS EM UMA REGIÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	41
5	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO A PARTIR DE CORRENTES FLUVIAIS – UM ESTUDO DE CASO DO RIO BALSAS	48
6	AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE RESÍDUOS DE QUARTZITO PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EM PAVIMENTAÇÃO	58
7	BIOACUMULAÇÃO DE ELEMENTOS TRAÇOS EM BRÂNQUIAS E HEPATOPÂNCREAS DE <i>Ucides cordatus</i> (CRUSTACEA, DECAPODA) COMO INFERÊNCIA DA QUALIDADE AMBIENTAL DE MANGUEZAIS DA COSTA AMAZÔNICA MARANHENSE	67
8	BIOECONOMIA DA BIOMASSA RESIDUAL AGRÍCOLA NA REGIÃO SUL MARANHENSE	77
9	BIORREFINARIA DE MILHO EM PROL DA SUSTENTABILIDADE	87
10	DIAGNÓSTICO DA MOBILIDADE URBANA DE SÃO LUÍS (MA) COM BASE EM INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE	95
11	DIAGNÓSTICO DO SANEAMENTO BÁSICO COM ÊNFASE NA DRENAGEM URBANA NA MESORREGIÃO SUL MARANHENSE	104
12	ESTADO DA ARTE: SITUAÇÃO ATUAL E TENDÊNCIAS FUTURAS SOBRE PREVISÃO DE GERAÇÃO SOLAR E EÓLICA	113
13	ESTUDO AMBIENTAL DO RIACHO CACHOEIRA NO MARANHÃO	123

14	ESTUDO DE CASO: DURABILIDADE E EFICIÊNCIA DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADOS EM VIAS PÚBLICAS NO CENTRO DE BALSAS-MA	133
15	IMPACTOS AMBIENTAIS E EM SAÚDE PÚBLICA DO DESCARTE INADEQUADO DE MEDICAMENTOS: UMA BREVE REVISÃO	143
16	MUDANÇAS CLIMÁTICAS, DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E O MEIO AMBIENTE DE TRABALHO: DESAFIOS E CAMINHOS PARA A PREVENÇÃO	149
17	POTENCIAL GEOTÉCNICO DO RESÍDUO DO POLIMENTO DE PORCELANATO: ESTUDO FÍSICO-QUÍMICO PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS	156
18	RADIAÇÃO NUCLEAR: GAMAGRAFIA APLICADA AO CONTROLE DE QUALIDADE DE INDÚSTRIAS EM PEÇAS METÁLICAS	166
19	REDE DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO MARANHÃO (REDE ACV-MA) PARA O ENSINO, TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL	173
20	SÍNTESE, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE COMPLEXO FOTOSSENSIBILIZADOR EM CÉLULA SOLAR	180
21	VALIDAÇÃO DO TESTE UNIVERSAL DE ENVELHECIMENTO SIMPLES (USAT) PARA ESTUDO DO EFEITO DO ENVELHECIMENTO EM LIGANTES ASFÁLTICOS	190

ANÁLISE DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO DO SOLO DE SUBLEITO NO DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Davi Alencar dos Santos¹, Laiana Ferreira da Costa² & Daiana Cruz Marinho³
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA).

Resumo

Os pavimentos flexíveis compõem a maior parte da malha viária brasileira, sendo fundamentais para a mobilidade e segurança do transporte. O desempenho dessas estruturas depende diretamente das propriedades do solo de subleito, que suporta as camadas superiores. A compactação influencia parâmetros como densidade, resistência e capacidade de suporte e, conseqüentemente, a espessura das camadas do pavimento. Este estudo analisou a influência da variação da energia de compactação na capacidade de suporte de um solo argiloso A-7-5 da Região Metropolitana do Recife, submetido a cinco níveis de energia (12, 24, 36, 48 e 60 golpes). Ensaio de caracterização física e mecânica foram conduzidos conforme normas técnicas vigentes. Os resultados indicaram que 36 golpes apresentaram o melhor desempenho, elevando o CBR em 127% e permitindo redução de 4 cm na sub-base. Energias superiores ocasionaram expansão volumétrica e perda de resistência. A análise econômica demonstrou uma redução nos custos de materiais.

Palavras-chave: energia de compactação; acréscimo de suporte; solo de subleito; pavimentos flexíveis; Região Metropolitana do Recife.

1. Introdução

Segundo a Confederação Nacional de Transportes, cerca de 99% da malha viária brasileira é composta por pavimentos flexíveis, com vida útil de 8 a 12 anos quando submetidos a manutenções adequadas (CNT, 2021).

A qualidade do subleito é determinante para o desempenho dessas estruturas (DNER, 1981), tornando a caracterização e a compactação do solo etapas essenciais para aumentar a durabilidade e reduzir custos.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a influência de diferentes níveis de energia de compactação na capacidade de suporte do subleito e no dimensionamento de pavimentos flexíveis pelo método DNER (1981).

¹Graduando do Curso de Eng. Civil, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA), E-mail: davialenca57@gmail.com

² Docente do Curso de Eng. Civil, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA), E-mail: laiana.ferreira@ufrpe.br

³Graduanda do Curso de Eng. Civil, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA), E-mail: daiana.cruz.marinho@gmail.com.br

2. Fundamentação Teórica

2.1 Método de Dimensionamento DNER

O método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Seu objetivo é evitar deformações plásticas excessivas no subleito, assegurando a integridade do pavimento ao longo de sua vida útil (DNIT, 2006).

O dimensionamento considera a capacidade de suporte do subleito (CBR) e sua relação com o número de repetições do eixo simples padrão de 8,2 toneladas (N), conforme estabelecido pelo DNER (1981).

2.2 Compactação de solos

A compactação do solo é um processo fundamental na engenharia geotécnica e de pavimentação, pois aumenta a densidade pela redução dos vazios, melhorando propriedades como resistência ao cisalhamento, estabilidade estrutural e permeabilidade (Craig, 2013).

Sua eficiência depende da relação entre energia aplicada e teor de umidade: abaixo do ótimo, maior energia eleva a massa específica aparente; acima dele, o efeito é limitado e pode ocorrer o comportamento “borrachudo”, caracterizado por compressão seguida de expansão devido ao ar nos vazios (Pinto, 2006). Dessa forma, a compactação adequada do subleito garante a capacidade de suporte necessária ao dimensionamento.

3. Metodologia

O estudo foi desenvolvido seguindo as etapas metodológicas apresentadas no fluxograma da Figura 1.

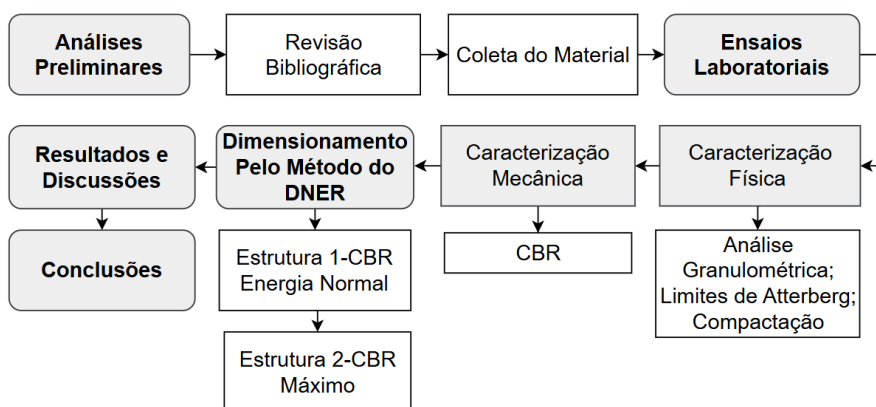


Figura 1. Fluxograma das etapas das metodologias da pesquisa.

Os ensaios laboratoriais seguiram os procedimentos metodológicos das normas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Ensaio de caracterização física e mecânica.

Ensaio	Norma
Análise Granulométrica	ABNT NBR 7181/2025
Limite de Liquidez	ABNT NBR 6459/2016
Limite de Plasticidade	DNER-ME 082/94
Compactação	ABNT NBR 7182/2025
CBR	DNIT 172/2016

O ensaio de compactação foi conduzido aplicando-se energias de 12, 24, 36, 48 e 60 golpes por camada. A partir desse procedimento, foram obtidas as curvas de compactação, que permitiram determinar a massa específica aparente seca máxima e o volume.

O Índice de Suporte Califórnia (CBR) foi determinado para avaliar a expansividade e a resistência do solo em condição de saturação. Para cada energia de compactação (Proctor normal, E1, E2, E3 e E4), foram moldados três corpos de prova com umidade 2% abaixo da ótima, na ótima e 2% acima da ótima, totalizando 15 amostras.

Com base no método do DNER, foram dimensionadas duas estruturas (01 e 02). Adotou-se um tráfego pesado de $5,00 \times 10^7$ repetições do eixo padrão. A análise comparou os valores de CBR obtidos pelo Proctor normal e pela energia que conferiu maior suporte.

4. Resultados e discussão

4.1. Caracterização física do material

A curva granulométrica mostrou que o solo apresenta características de solo mal graduado, com predominância de partículas finas em sua composição (Figura 2).

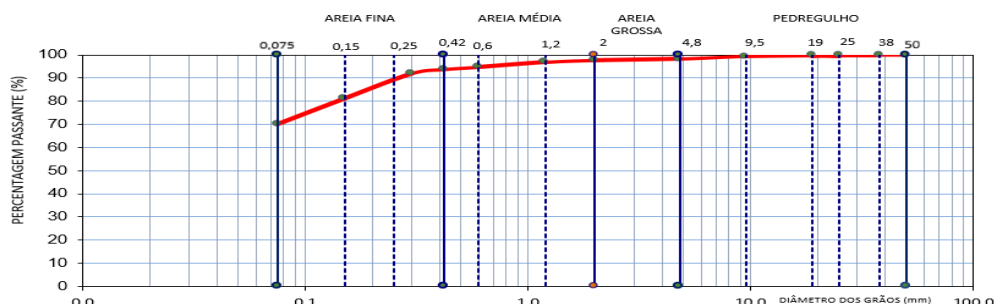


Figura 2. Curva granulométrica do solo.

A tabela 2 mostra os resultados do ensaio de Limites de Atteberg. De acordo com a classificação proposta por Caputo (1996), solos com IP entre 1 e 7% são considerados fracamente plásticos, entre 7 e 15% medianamente plásticos e, acima de 15% altamente plásticos. Assim, o solo analisado enquadra-se na categoria de solo medianamente plástico.

Tabela 2. Limites de Atteberg resultados dos ensaios.

Limites de Atteberg	Valor (%)
Limite de Liquidez (LL)	45,2
Limite de Plasticidade (LP)	33,8
Índice de Plasticidade ($IP = LL - LP$)	11,4

Segundo o sistema HRB/AASHTO, o solo foi classificado como A-7-5, grupo de solos argilosos plásticos, com presença de matéria orgânica e alta compressibilidade. O Índice de Grupo ($IG = 8$) indica baixo desempenho para uso como subleito.

4.1.1. Ensaio de compactação

O Figura 3 apresenta os resultados dos ensaios de compactação aplicando energias normal, E1, E2, E3 e E4 ao solo em cinco camadas. Observou-se que o aumento da energia de compactação eleva a massa específica seca máxima (ρ_{dmax}), reduz a umidade ótima e torna o solo mais compactável, confirmando o comportamento descrito por Tatsuoka e Correia (2018).

A massa específica apresentou variação de 13,7% entre 12 e 36 golpes e menor que 3% entre 36 e 60 golpes. Comparando a energia normal com E3 e E4, o aumento foi de 15,3% e 16,2%, superior a 10%, caracterizando exceção à tendência relatada por Cernica (1995), que aponta que aumentos de densidade raramente ultrapassam 10% em solos.

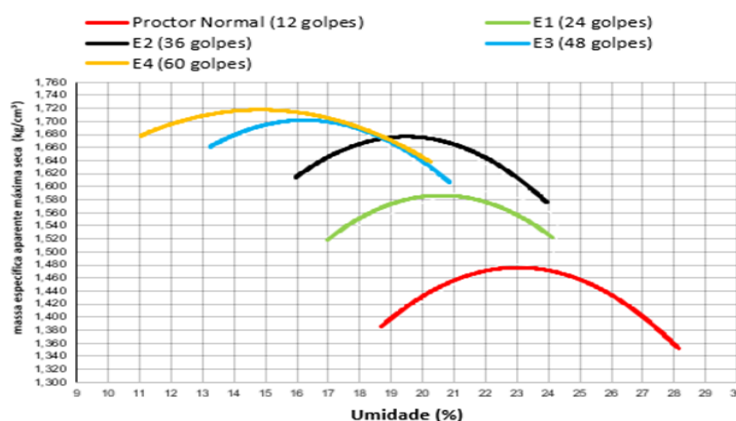


Figura 3. Resultados dos ensaios de compactação.

A umidade ótima diminuiu progressivamente com o aumento da energia: 6,68% (E1), 16,6% (E2), 28,4% (E3) e 35,7% (E4), reduzindo a quantidade de água necessária para a execução da obra. Esse comportamento também foi observado por Zica (2010), que analisou a variação da energia em um solo igualmente classificado como A-7-5, utilizando as energias de Proctor normal, internormal, intermediária e modificada, e verificou que, à medida que a energia aumentava, a umidade diminuía.

4.2. Caracterização mecânica do material

Os resultados dos ensaios de CBR representados na Figura 4 mostraram que o solo apresentou aumento de aproximadamente 127% no CBR ao comparar a energia normal com E2. No entanto, entre E2 e E4, o acréscimo de energia resultou em perda de suporte, com redução de 17,4%, indicando que o CBR não responde linearmente a aumentos de energia de compactação.

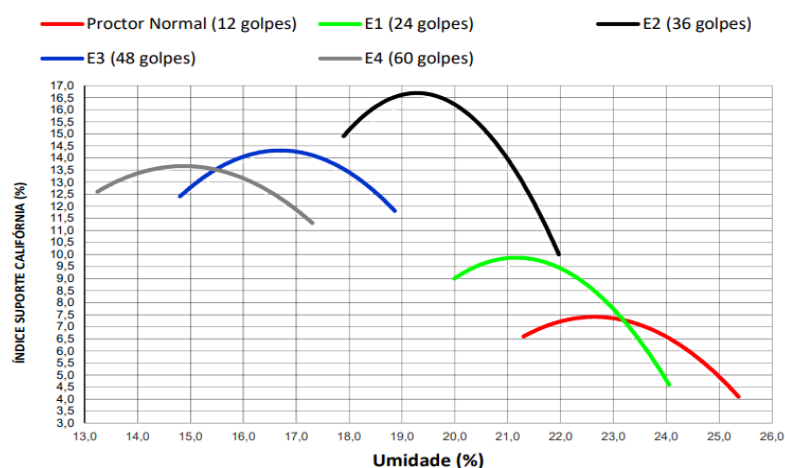


Figura 4. Resultados dos CBRs moldados.

As expansões apresentaram tendência de aumento conforme a energia aplicada, comportamento também observado por Sridharan e Gurtug (2004), e relacionado ao teor de finos do solo, Zica (2010) verificou comportamento similar em solos argilosos, utilizando energias normal, internormal e intermediária.

Embora as expansões tenham aumentado entre a energia normal e E2, os valores permaneceram dentro dos limites da norma DNIT (2006). Somente a partir das energias E3 e E4 as expansões excederam os limites estabelecidos, acompanhando a redução do CBR, evidenciando perda de suporte do solo com aplicação de energias excessivas.

4.3. Análise comparativa das propriedades físicas e mecânicas

Com base nos ensaios de CBR, expansão, massa específica máxima seca e umidade ótima, elaborou-se a Figura 5 para determinar a quantidade ideal de golpes que proporciona o máximo suporte do solo, respeitando os limites do DNIT ($\text{CBR} \geq 2\%$ e $\text{expansão} \leq 2\%$). A massa específica aumentou progressivamente com a energia: 7,6% em E1, 13,7% em E2, 15,3% em E3 e 16,3% em E4. A expansão ultrapassou os limites apenas em E3 e E4, comprometendo o uso como subleito, e o CBR caiu nessas energias.

Conforme Cernica (1995), solos granulares ganham resistência com a compactação, enquanto argilas e siltes podem perder suporte após certo aumento de densidade, comportamento observado entre E2 e E4, com aumento de massa de 2,2% e redução de suporte de 17,4%. O máximo suporte foi atingido com 36 golpes, CBR de 16,6 kgf/cm², 127% maior que o Proctor Normal, com massa específica 14% maior, garantindo eficiência e segurança no dimensionamento.

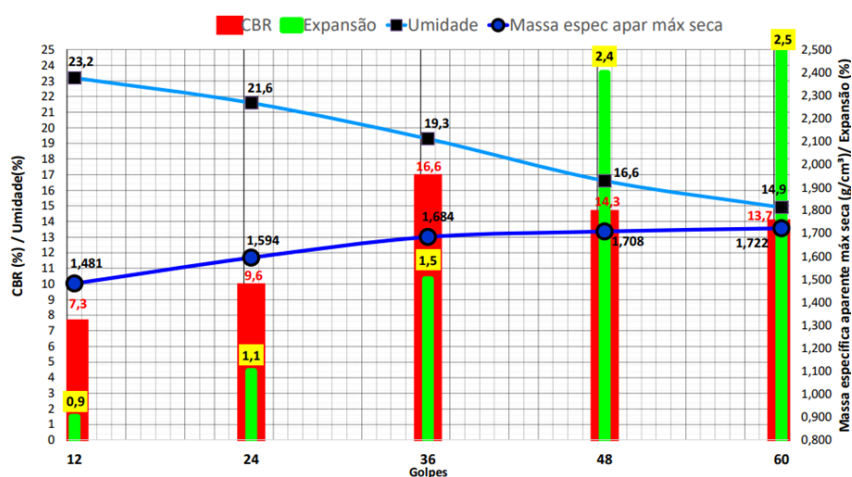


Figura 5. Resultados dos CBRs, Expansões, Massas específicas aparentes máximas secas e Umidades Ótimas, correlacionados com as energias aplicadas

4.4. Resultados do dimensionamento

O aumento da energia de compactação para 36 golpes elevou o CBR em 127% e permitiu reduzir 4 cm na espessura da sub-base granular, conforme a Tabela 3, respeitando o mínimo de 15 cm estabelecido pelo método de dimensionamento do DNER.

Tabela 3. Postos de monitoramento utilizados.

Camada	Tipo do Material	Espessura (cm)	
		Estrutura 01	Estrutura 02
Revestimento	Revestimento Asfáltico	10,0	10,0
Base	Estabilizada Granulometricamente	17,0	17,0
Sub-base	Estabilizada Granulometricamente	19,0	15,0

4.4.1. Análise Comparativa de Custos de materiais e de compactação

Foi realizada uma análise econômica comparativa entre a compactação do subleito utilizando a Energia de Proctor Normal e a energia E2 (36 golpes), considerando todas as etapas construtivas, do preparo do subleito à execução da camada de rolamento. Observou-se que as variações de custo relevantes se concentram na regularização do subleito e na utilização do material granular na sub-base, diretamente influenciadas pela energia de compactação.

O aumento da energia reduz teoricamente o teor ótimo de umidade necessário, podendo diminuir a demanda de água; entretanto, fatores climáticos podem provocar variações em campo, resultando em consumo adicional de caminhão-pipa e custos operacionais de umidificação. Para estimativa de custos, foram utilizadas tabelas de referência do DER-MG, DER-PB e SINAPI, ajustando-se proporcionalmente o custo da energia E2 entre os valores de 26 e 40 golpes, obtendo R\$ 1,32/m².

Tabela 4. Preço das execuções de energias de compactação e dos materiais.

It	Cod	Fonte	Descrição dos serviços	Und	custo unit(R\$)
1.1		ADAPTADO	Regularização do subleito (E2-36 golpes)	m²	1,32
1.2	RO-41081	DER/MG	Regularização do subleito (proctor normal)	m²	1,22
1.3	02.200.00	DER/PB	Sub-base estab. granul.s/mistura exclusive transporte	m³	18,54
1.4	101768	SINAPI	Construção de base e sub-base para pavimentação de solo estabilizado granulometricamente sem mistura de solos - exclusive solo, escavação, carga e transporte. af_09/2024	m³	28,11
1.5	02.260.01	DER/PB	BGS - brita graduada simples (sem considerar o transporte)	m³	189,21
1.6	101768	SINAPI	Construção de base e sub-base para pavimentação de solo estabilizado granulometricamente sem mistura de solos - exclusive solo, escavação, carga e transporte. af_09/2024	m³	28,11
1.7	102470	SINAPI	Execuç de imprimação c/ asfalto diluído cm-30. af_11/2019	m²	1,09
1.8	95995	SINAPI	Execuç de pavimento c/ aplicação de concreto asfáltico, camada de rolamento - exclusive carga/transporte. af_11/2019	m³	2.232,31

Considerando um segmento de pista simples de 1 km por 7 m de largura, os custos totais estimados foram R\$ 1.945.079,00 para a Estrutura 01 com Energia Normal e R\$ 1.932.717,50 para a Estrutura 02 com energia E2. Assim, a adoção da

energia E2 pode gerar economia de R\$ 12.362,00 (aproximadamente 0,63% do custo total), mantendo a eficiência construtiva e atendendo às diretrizes do DNIT.

5. Conclusão

A análise dos ensaios indicou que o solo de subleito é uma argila plástica, com matéria orgânica e elevada compressibilidade, segundo a classificação HRB/AASHTO. O aumento da energia de compactação elevou a massa específica aparente máxima seca, embora a partir da energia E2 esse crescimento tenha se tornado mais sutil, acompanhando a redução do teor de umidade ótimo devido à maior densificação do solo.

O Índice de Suporte Califórnia (CBR) apresentou crescimento de 127% entre a energia normal e E2, mas reduziu-se em energias superiores (E3 e E4), evidenciando que o excesso de compactação pode comprometer a capacidade de suporte. Observou-se também aumento do potencial de expansão com energias mais elevadas, resultado da menor umidade ótima e da maior densificação, que dificultam a dissipação da água.

Os resultados mostram que o CBR do subleito influencia diretamente o desempenho dos pavimentos, a distribuição de cargas e as deformações. O controle da energia de compactação revelou-se eficaz para aprimorar solos de baixo desempenho, podendo ainda reduzir a espessura da sub-base e os custos de pavimentação. Conclui-se que a variação da energia de compactação impacta decisivamente as propriedades do solo, o desempenho estrutural e a economia no dimensionamento de pavimentos flexíveis.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6457**: Solos: Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solos: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solos: Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7182**: Solos: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras, 2022.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI**. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 13 jul. 2025.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 1996.

CERNICA, J. N. **Geotechnical Engineering: Soil Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1995.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (Brasil). **Pesquisa CNT Rodovias 2021**. Brasília: CNT, [s.d.]. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2021/12/pesquisa-cnt-rodovias.pdf>. Acesso em: 2 jul. 2025.

COUTO, B. O. C.; GOMES, R. C. Aplicação da metodologia MCT para determinação da erodibilidade de solos em taludes de corte rodoviários na região do Quadrilátero Ferrífero. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro, v. 43, n. 1, p. 191-198, 2020. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/34110>. Acesso em: 1 abr. 2025.

CRAIG, Robert F. **Mecânica dos solos**. Tradução de: Amir Kurban. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. Título original: Craig's soil mechanics.
DEPARTAMENTO DE EDIFICAÇÕES E ESTRADAS DE RODAGEM DE MINAS GERAIS - DER/MG. **Tabela referencial de preços**. Belo Horizonte: DER/MG, 2022. Disponível em: <https://www.der.mg.gov.br/536-obras/sistema-referencial-de-custos>. Acesso em: 02 jun. 2025.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DA PARAÍBA - DER/PB. **Tabela de preços e serviços (out.–dez. 2024)**: atualizada em 11/12/2024, sem desoneração. João Pessoa: DER/PB, 2024. Disponível em: <https://der.pb.gov.br/informacoes/tabela-de-precos-der-pb/derpb-tabela-de-precos-e-servicos-out-dez2024-atualizada-em-11-12-24-sem-desoneracao.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2025.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO - DER/SP. **Instrução de Projeto IP-DE-P00/006 A**: Avaliação de pavimentos flexíveis e semirrígidos por meio de levantamento visual detalhado de defeitos da superfície. São Paulo: DER/SP, 2024. Disponível em: https://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/normas/IP-DE-P00-006_A.pdf. Acesso em: 1 mar. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. **DNER 082: Solos: Determinação do limite de plasticidade: método de ensaio**. Rio de Janeiro: DNER, 1994.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT.
DNIT 137: Pavimentação: Regularização do subleito: especificação de serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT.
DNIT 172: Solos: Determinação do Índice de Suporte Califórnia (ISC): método de ensaio. Rio de Janeiro: IPR, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT.
Manual de pavimentação. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2006.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso básico de mecânica dos solos:** em 16 aulas. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

TATSUOKA, F.; CORREIA, A. G. Importance of controlling the degree of saturation in soil compaction. **Procedia Engineering**, [s.l.], v. 143, p. 556–565, 2018.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816305100>. Acesso em: 5 abr. 2025.

ZICA, Elizeu da Silva. **Estudo comparativo entre energias de compactação do subleito para subsidiar projetos de pavimentação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em:
<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/19813/1/EnergiasCompactacaoSolos.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.

Abstract

Flexible pavements make up the majority of the Brazilian road network, playing a fundamental role in transportation mobility and safety. The performance of these structures directly depends on the properties of the subgrade soil, which supports the upper layers. Compaction influences parameters such as density, strength, and bearing capacity and, consequently, the thickness of the pavement layers. This study analyzed the influence of varying compaction energy on the bearing capacity of an A-7-5 clayey soil from the Metropolitan Region of Recife, subjected to five energy levels (12, 24, 36, 48, and 60 blows). Physical and mechanical characterization tests were conducted in accordance with current technical standards. The results indicated that 36 blows provided the best performance, increasing the CBR by 127% and allowing a 4 cm reduction in the subbase. Higher energies caused volumetric expansion and loss of strength. The economic analysis demonstrated a reduction in material costs.

Keywords: compaction energy; bearing capacity improvement; subgrade soil; flexible pavements; Metropolitan Region of Recife.

ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DO GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO NO CRUZAMENTO DAS RUAS JOSÉ LEÃO E PREFEITO EDÍSIO SILVA EM BALSAS/MA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COM JAAMSIM

Pedro Augusto Pimentel De Vasconcelos¹, Daniel Beserra Costa², Willame Braga Lima³, Nadia Cruz de Jesus⁴, Marília Pereira Silva⁵, Maria Vitoria Araujo Sousa⁶

¹Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências de Balsas (CCBL)

Resumo

A crescente complexidade da mobilidade urbana exige novas abordagens para o planejamento do tráfego, especialmente em interseções viárias que concentram fluxos diversos e potencializam congestionamentos e acidentes. Este estudo analisa um cruzamento semaforico em Balsas (MA) mediante aplicação de métodos de engenharia de tráfego e simulação computacional no software JaamSim. O objetivo foi avaliar seu desempenho operacional, identificar gargalos e propor melhorias. Os resultados indicaram volumes similares entre as vias, mas com padrões distintos – uma apresentando maior concentração horária e outro fluxo mais distribuído. Verificou-se que o pico ocorre no período das 11h30 às 12h30. Dentre os cenários simulados, o que propôs ajustes moderados nos tempos semaforicos mostrou-se mais eficiente, equilibrando os tempos de espera e reduzindo as filas abaixo de limites críticos. Conclui-se que intervenções focadas na otimização dos ciclos semaforicos e na sinalização são suficientes para melhorar significativamente a segurança e a fluidez do local.

Palavras-chave: Mobilidade urbana; Engenharia de tráfego; Interseções viárias; Simulação computacional.

1. Introdução

A mobilidade urbana é um dos principais desafios das cidades brasileiras, marcada pelo crescimento da frota veicular, infraestrutura insuficiente e necessidade de soluções sustentáveis que assegurem fluidez e segurança (NEGRÃO et al., 2017). O aumento da densidade de veículos resulta em congestionamentos, maiores tempos de viagem e impactos ambientais, como emissões de poluentes (SILVA; PEREIRA, 2021). Nesse contexto, as interseções viárias se configuram como pontos críticos de conflito, onde a eficiência do gerenciamento de tráfego é fundamental para a segurança e a qualidade de vida (WEBSTER, 1958; TRB, 2016).

O planejamento urbano, apoiado em simulações computacionais, tem sido amplamente utilizado para avaliar cenários, prever fluxos e propor medidas de

¹ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: pedro.pimentel@discente.ufma.br

² Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: daniel.beserra@ufma.br

³ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: wb.lima@ufma.br

⁴ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: nadia.cj@discente.ufma.br

⁵ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: eng.mariliasilva@gmail.com

⁶ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: maria.vas@discente.ufma.br

otimização (OLIVEIRA; SANTOS; LIMA, 2025). O JaamSim é uma dessas ferramentas, oferecendo ambiente gráfico integrado para modelagem, animação e análise, sendo gratuito e de fácil acesso (LANG et al., 2021). Seus principais componentes incluem entidades, estações de serviço e fluxos, representando os elementos e trajetos do sistema (NEGRÃO et al., 2017).

Diversos autores aplicaram o JaamSim em diferentes contextos: Ruane et al. (2022) o integraram ao SimWrapper em modelo industrial; Oliveira et al. (2025) avaliaram ganhos energéticos em planta siderúrgica; e Negrão et al. (2017) o utilizaram para estudar uma interseção semaforizada em Medianeira/PR. Essas aplicações demonstram sua robustez para apoiar decisões em sistemas dinâmicos e complexos, inclusive no gerenciamento urbano.

A integração entre observações de campo, cálculos matemáticos e simulações permite identificar gargalos e propor alternativas eficazes (FERNANDES et al., 2020). Nesse sentido, a análise de cruzamentos como o da Rua José Leão com a Rua Prefeito Edísio Silva contribui para compreender a dinâmica local e avançar em estratégias de mobilidade urbana sustentável.

2. Metodologia

A metodologia adotada baseia-se em uma abordagem mista, integrando coleta de dados empíricos, modelagem matemática e simulação computacional, aplicado no cruzamento entre as Ruas José Leão e Prefeito Edísio Silva em Balsas-MA.

2.1. Definição da Área de Estudo

A escolha considerou volume veicular, histórico de congestionamentos e relevância para a mobilidade local (Loch, 2015; Amorim Júnior, 2024). Assim, foi selecionado o cruzamento das ruas José Leão (seta vermelha) e Prefeito Edísio Silva (seta azul) em Balsas-MA, área central com alta concentração de instituições, serviços e comércio (DNIT, 2005).



Figura 1. Cruzamento entre a Rua José Leão e Rua Prefeito Edísio Silva.

2.2. Coleta de dados

A pesquisa adotou metodologia mista, unindo estudo de caso e simulação (Negrão et al., 2017), com etapas qualitativa e quantitativa segundo Loch (2015). Na qualitativa, observações in loco identificaram horários de pico, causas de congestionamentos e problemas de mobilidade, conforme critérios do CONTRAN (2014). Na quantitativa, dados foram coletados em dias úteis, nos períodos de 18h30–19h30 e 11h30–12h30, em intervalos de 15 min, utilizando formulários padronizados (CONTRAN, 2014). Foram avaliados quatro movimentos: (1) fluxo Norte-Sul da Rua José Leão; (2) conversão José Leão–Prefeito Edísio Silva; (3) fluxo Leste-Oeste da Prefeito Edísio Silva; e (4) conversão Prefeito Edísio Silva–José Leão. Os veículos foram classificados em carros, motos e ambulâncias, estas últimas destacadas pela proximidade do Hospital Balsas Urgente e prioridade legal (Highway Capacity Manual, 2010; Lei nº 9.503/1997). Essa sistematização fundamentou a modelagem no software de simulação.

2.3. Análise por Modelos Matemáticos

Para avaliar o desempenho do cruzamento, utilizaram-se modelos matemáticos baseados em indicadores consagrados da engenharia de tráfego. O volume veicular (V_v), expresso em veículos/hora, foi calculado conforme DNIT (2005) pela relação entre o número de veículos (n) e o tempo de contagem (t). O fator de ponta (FP), que relaciona o volume de pico com a média horária, foi empregado para dimensionar a capacidade das vias em períodos de maior demanda (Highway Capacity Manual, 2010).

O ciclo semaforico (C) foi determinado pela fórmula de Webster, considerando o tempo perdido por ciclo (L) e a taxa de fluxo (Y), esta última obtida pela soma das relações entre volume e capacidade de cada movimento. O tempo médio de espera (TME) e o comprimento médio da fila (L) foram calculados para verificar a eficiência do semáforo e a necessidade de ajustes geométricos ou operacionais, com base em parâmetros como volume por movimento (V_i) e comprimento médio dos veículos (l). Esses indicadores permitiram uma análise quantitativa robusta do desempenho do cruzamento antes da simulação computacional.

2.4. Simulação no JaamSim

O JaamSim é um software de simulação de eventos discretos que possui uma interface intuitiva com funcionalidades de "arrastar e soltar" e visualização 3D. Sua

estrutura baseia-se em três componentes principais: o gerenciador de eventos (controla tempo e restrições), as entidades (elementos que se movem no sistema) e os processos (atividades executadas pelas entidades). O processo de modelagem inicia com a construção do ambiente viário no Model Builder, inserindo elementos como fluxos de veículos, vias, semáforos e pontos de origem/destino (Figura 2). Cada componente é configurado via Object Selector com parâmetros como frequência de chegada, tempos de sinalização e regras de comportamento, calibrados com dados de campo. Durante a execução, um motor de eventos processa as interações em tempo simulado, permitindo observar em tempo real o movimento de veículos, formação de filas e tempos de espera.

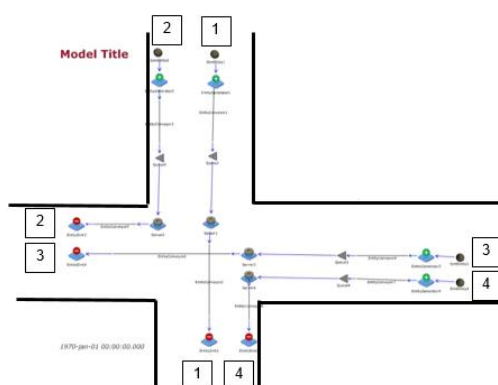


Figura 2. Cruzamento no JaamSim antes do início da simulação.

3. Resultados e discussão

3.1. Tráfego

Após a sistematização dos dados de campo, analisou-se o comportamento do tráfego no cruzamento considerando os quatro movimentos veiculares. A Figura 3 apresenta a distribuição dos volumes médios nos dias 03, 04 e 05 de junho, no intervalo de 18h30–19h30, coincidente com o horário de pico definido pelo DNIT (2005), entre 6h30–8h30 e 17h30–19h30.

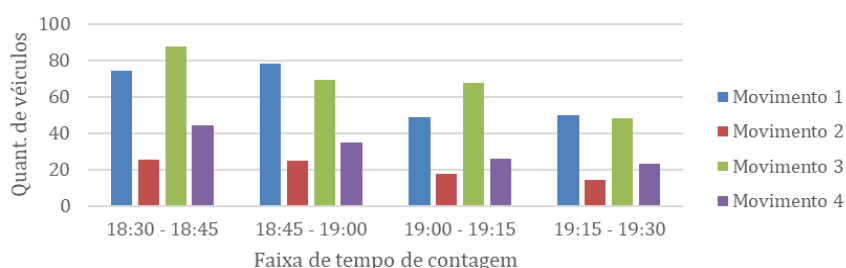


Figura 3. Gráfico da média de veículos/hora no cruzamento das 18:30 às 19:30.

Os movimentos 1 e 3 concentraram os maiores volumes de tráfego, seguidos pelo movimento 4, enquanto o 2 apresentou o menor fluxo. A alternância entre 1 e 3 reflete a oscilação típica de interseções sem controle semafórico ou com controle semafórico deficiente (Silva; Pereira, 2021), influenciada por vias adjacentes, interseções próximas e ondas de congestionamento (Loch, 2015). Apesar das flutuações, observou-se equilíbrio entre os fluxos principais, o que reforça a necessidade de modelagens estocásticas (Batterman et al., 2020).

O movimento 3 é impactado por polos como bancos, hospitais e centros recreativos na Rua Prefeito Edísio Silva, enquanto o 1 é influenciado por órgãos públicos e escolas na Rua José Leão (DNIT, 2005). Já os movimentos 2 e 4 registraram menores volumes devido à baixa atratividade nessas direções. A Figura 4 apresenta os volumes médios da segunda coleta (08, 09 e 10 de julho), entre 11h30 e 12h30, permitindo observar tendências diárias e confirmar os padrões identificados.

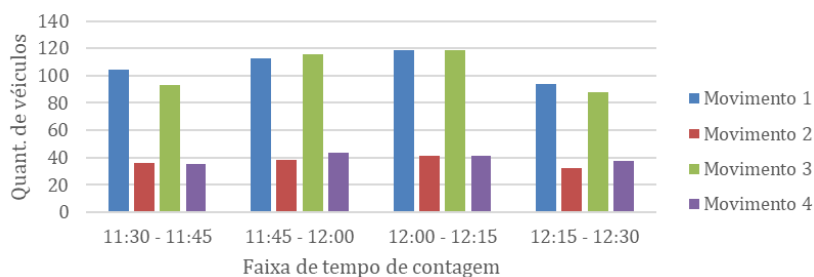


Figura 4. Gráfico da média de veículos/hora no cruzamento das 11:30 às 12:30.

Durante a segunda coleta (11h30–12h30), observou-se distribuição mais uniforme dos volumes veiculares, com valores próximos entre os movimentos 1 e 3 e entre os movimentos 2 e 4. Essa homogeneização está relacionada aos deslocamentos para almoço de estudantes, docentes e profissionais da saúde. A campanha registrou volumes superiores à primeira, evidenciando a influência dos horários de pico. Loch (2015) descreve esse fenômeno como “ondas de chegada” em interseções não coordenadas, resultantes da interação entre fluxos convergentes.

Os resultados indicam a necessidade de priorizar os movimentos 1 e 3 em reconfigurações semafóricas, visando maior eficiência operacional. Recomenda-se ainda o uso de indicadores estatísticos mais robustos, como desvio padrão, variância e coeficiente de variação, para aumentar a confiabilidade das análises de fluxo.

3.2. Cálculos por modelos matemáticos

Com base nos dados da segunda campanha de medição — marcada pela maior uniformidade e intensidade dos fluxos —, aplicaram-se modelos matemáticos

da engenharia de tráfego para avaliar o desempenho do cruzamento. Foram analisados três indicadores principais: tempo médio de espera (TME), comprimento médio de fila (CMF) e fator de saturação (Y), conforme Webster (1958), HCM (2010) e Manual de Estudos de Tráfego do DNIT (2005). A Tabela 1 apresenta os resultados médios obtidos para os movimentos veiculares.

Tabela 1. Média Resultados obtidos pelos modelos matemáticos.

	Movimento 1	Movimento 2	Movimento 3	Movimento 4
MVV	429,67	147,67	414,67	157,33
MVVV	501,33	177,33	549,33	197,33
CE	1750	1400	1750	1400
FP	0,86	0,84	0,76	0,80
Y	0,25	0,11	0,24	0,11
TME	12	10	12	10
CMF	8,78	2,54	8,39	2,74

*MVV: Média de Volume Veicular (veículo/h); *MVVV: Maior Valor de Volume Veicular (veículo/h); *CE: Capacidade Estimada (veículos); *FP: Fator de Ponta; *Y: Taxa de fluxo; *TME: Tempo médio de espera; *CMF: Comprimento médio da fila.

A análise mostra que os movimentos 1 e 3 concentram os maiores volumes, fluxos e comprimentos médios de fila (CMF), exigindo atenção prioritária para garantir a fluidez do cruzamento. Destaca-se a Rua José Leão, onde foram observadas filas de até 3 veículos (≈ 18 m), superiores às da Rua Prefeito Edísio Silva, devido a fatores geométricos e de visibilidade. Com base nesses dados (Tabela 1), calcularam-se os ciclos semaforicos, apresentados na Figura 5.

		Tempo do Semáforo (s)	Tempo Médio de espera (s)	Comprimento da fila (m)
CICLO SEMAFORICO		57		
TEMPO AMARELO		4		
RUA JOSÉ LEÃO	Tempo Vermelho	28	11	11,1
	Tempo Verde	25		
RUA PREFEITO EDÍSIO SILVA	Tempo Vermelho	29	11	11,3
	Tempo Verde	24		
		28	4	25
RUA JOSÉ LEÃO				
		24	4	29
RUA PREFEITO EDÍSIO SILVA				

Figura 5. Resultados do ciclo semaforico obtidos pelos modelos matemáticos.

O estudo destaca a relevância do balanceamento dos tempos semaforicos como estratégia essencial para garantir maior fluidez do tráfego e reduzir tempos de espera em interseções urbanas. Para o cruzamento analisado, recomenda-se ampliar

o tempo de verde para a Rua José Leão, sem comprometer a função da Rua Prefeito Edísio Silva, que deve ter seu ciclo ajustado de forma criteriosa, sobretudo pela proximidade de unidades hospitalares que exigem acesso prioritário.

A análise evidenciou que a integração entre cálculos matemáticos e observações de campo é decisiva para decisões assertivas no planejamento viário. Além disso, reforça-se a necessidade de monitoramento contínuo e ajustes dinâmicos dos tempos semaforicos, de modo a adequar a operação do cruzamento às variações de demanda e garantir maior eficiência e segurança para todos os usuários.

3.3. Simulação do JaamSim

Após os cálculos de tráfego, a etapa seguinte consistiu na simulação do cenário analisado no software JaamSim, amplamente empregado na modelagem de fluxos veiculares (Perera et al., 2017). Nessa fase, ajustou-se o ciclo semaforico de 57 para 60 segundos, adequando-o à realidade operacional e a parâmetros técnicos de programações semaforicas. Os dados de tempo e volume veicular foram inseridos no programa, configurando-se a simulação para o cruzamento em estudo (Figura 2). Para os ciclos semaforicos, foram definidos três cenários distintos.

- O primeiro (Figura 6) atribuiu 26 segundos de verde e 30 de vermelho para as vias José Leão e Prefeito Edísio Silva, servindo como referência inicial para análise comparativa.;

		Tempo do Semaforo (s)	Tempo Médio de Espera (s)	Comprimento Médio da Fila (m)
CICLO SEMAFORICO		60		
TEMPO AMARELO		4		
RUA JOSÉ LEÃO	Tempo Vermelho	30	12	11,8
	Tempo Verde	26		
RUA PREFEITO EDÍSIO SILVA	Tempo Vermelho	30	12	11,6
	Tempo Verde	26		




Figura 6. Resultados do cenário 1.

O Cenário 1 apresentou resultados positivos para o cruzamento estudado, com redução média de 6 metros no comprimento de fila da Rua José Leão, que antes chegava a 18 metros. Os tempos médios de espera permaneceram abaixo de 30 segundos, conforme o Highway Capacity Manual (2010). A principal vantagem foi a distribuição equilibrada do fluxo entre as vias, confirmando que a coordenação

balanceada de tempos semafóricos é eficaz em interseções com volumes semelhantes, conforme o Traffic Signal Timing Manual (2008).

- O Cenário 2 (Figura 7) simulou tempos de verde e vermelho de 28 s na Rua José Leão e 24/32 s na Rua Prefeito Edísio Silva, sendo posteriormente invertidos para avaliar o impacto no fluxo.;

		Tempo do Semáforo (s)	Tempo Médio de Espera (s)	Comprimento da Média da Fila (m)
CICLO SEMAFÓRICO		60		
TEMPO AMARELO		4		
RUA JOSÉ LEÃO	Tempo Vermelho	28	11,5	10,5
	Tempo Verde	28		
RUA PREFEITO EDÍSIO SILVA	Tempo Vermelho	32	13	13
	Tempo Verde	24		
RUA JOSÉ LEÃO		28 (Vermelho) / 4 (Amarelo) / 28 (Verde)		
RUA PREFEITO EDÍSIO SILVA		24 (Verde) / 4 (Amarelo) / 32 (Vermelho)		

Figura 7. Resultados do cenário 2.

No Cenário 2, a Rua José Leão melhorou seu desempenho (CMF 10,5 m; TME 11,5 s), mas à custa da Rua Prefeito Edísio Silva (CMF = 13 m; TME = 13 s). A inversão dos tempos semafóricos apenas transferiu o desequilíbrio, confirmando que ajustes desbalanceados beneficiam uma via em prejuízo da outra (Traffic Signal Timing Manual, 2008). Assim, o Cenário 2 é indicado quando se deseja priorizar a Rua José Leão, aceitando leve piora na via secundária.

- Cenário 3 (Figura 8): a Rua José Leão teve verde de 30 s e vermelho de 26 s, enquanto a Rua Prefeito Edísio Silva apresentou verde de 22 s e vermelho de 34 s; os tempos foram depois invertidos para avaliar o impacto no fluxo.

		Tempo do Semáforo (s)	Tempo Médio de Espera (s)	Comprimento da Média da Fila (m)
CICLO SEMAFÓRICO		60		
TEMPO AMARELO		4		
RUA JOSÉ LEÃO	Tempo Vermelho	26	9	9,2
	Tempo Verde	30		
RUA PREFEITO EDÍSIO SILVA	Tempo Vermelho	34	15	14,5
	Tempo Verde	22		
RUA JOSÉ LEÃO		26 (Vermelho) / 4 (Amarelo) / 30 (Verde)		
RUA PREFEITO EDÍSIO SILVA		22 (Verde) / 4 (Amarelo) / 34 (Vermelho)		

Figura 8. Resultados do cenário 3.

O Cenário 3 evidenciou um padrão de compensação: priorizar a Rua José Leão melhorou seus indicadores (CMF 9,2 m; TME 9 s), enquanto a Rua Prefeito Edísio Silva piorou significativamente (CMF 14,5 m; TME 15 s). A inversão dos tempos semafóricos apenas transferiu o desequilíbrio, confirmando que configurações assimétricas tendem a prejudicar a eficiência global do sistema. Portanto, o Cenário 3 mostrou-se inadequado para interseções em que ambas as vias têm igual importância, reforçando que soluções balanceadas, como as do Cenário 1, proporcionam melhor desempenho operacional e distribuição do fluxo veicular.

4. Conclusão

Este estudo teve como objetivo analisar o desempenho operacional do cruzamento entre a Rua José Leão e a Rua Prefeito Edísio Silva, em Balsas (MA), por meio de simulações no software JaamSim. A metodologia incluiu coleta detalhada de dados de tráfego em diferentes horários e avaliação das condições de sinalização e infraestrutura, identificando deficiências como configuração viária inadequada, formação de filas, problemas de visibilidade e sinalização desgastada.

Com base nos dados, foram simulados três cenários semafóricos. O Cenário 1, com tempos de sinal equilibrados, apresentou o melhor desempenho global, enquanto os Cenários 2 e 3, que priorizavam uma via, geraram ganhos parciais, mas comprometeram a eficiência geral. A análise evidenciou a necessidade de ajustes semafóricos, revitalização da sinalização e ações educativas, mostrando que intervenções baseadas em evidências podem reduzir esperas, melhorar a segurança e otimizar o fluxo veicular, com recomendações de monitoramento contínuo para futuras adaptações.

Referências

AMORIM JÚNIOR, F. S. **Uso da ferramenta SUMO no gerenciamento de tráfego urbano: estudo de caso do cruzamento da Avenida Brasil com a Avenida Tancredo Neves**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Maranhão, Campus Bacanga, São Luís, 2024.

BATTERMAN, S.; COOK, R.; JUSTIN, T. **Temporal variation of traffic on highways and the development of accurate temporal allocation factors for air pollution analyses**. Atmospheric Environment, 2014.

BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. **Institui o Código de Trânsito Brasileiro**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 24 set. 1997

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). **Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: Volume V – Sinalização Semafórica**. Brasília, DF: Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), 2014.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de coleta de dados de tráfego rodoviário**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR/DNIT, 2005.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Traffic Signal Timing Manual**. U.S. Department of Transportation, 2008.

FERNANDES, A. et al. **Modelagem de interseções urbanas com simulação computacional: estudo de caso em vias arteriais**. Revista Transportes, 2020.

HIGHWAY CAPACITY MANUAL. HCM 2010: **Manual de Capacidade de Rodovias**. Transportation Research Board, Washington, D.C., 2010.

LANG, A. et al. **JaamSim: an open-source simulation environment for modeling complex systems**. Simulation Modelling Practice and Theory, 2021.

LOCH, W. F. **Estudo de tráfego na interseção entre a Av. João Pessoa e Rua Coronel Oscar Rafael Jost na cidade de Santa Cruz do Sul/RS**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2015.

NEGRÃO, C. E. et al. **Aplicação do JaamSim na análise de interseções semaforizadas em Medianeira/PR**. Revista de Engenharia de Transportes, 2017.

OLIVEIRA, F.; SANTOS, R.; LIMA, A. **JaamSim: uma ferramenta flexível para simulação de eventos discretos**. Revista de Simulação Computacional, 2025.

PERERA, T.; CASSIDY, J.; BROADBENT, M. **An introduction to JaamSim modelling**. In: Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference. Las Vegas: IEEE, 2017.

RUANE, M. et al. **Digital twin modeling of automated tray loader manufacturing system using JaamSim and SimWrapper**. Journal of Manufacturing Systems, 2022.

SILVA, R. A.; PEREIRA, M. L. **Impactos ambientais e urbanos da expansão da frota veicular: uma análise integrativa**. Revista de Engenharia Ambiental, v. 27, n. 2, 2021.

WEBSTER, F. V. **Traffic Signal Settings**. Road Research Technical Paper no. 39. London: Road Research Laboratory, 1958.

Abstract

The growing complexity of urban mobility demands new approaches to traffic planning, especially at intersections that concentrate diverse flows and increase congestion and accidents. This study analyzes a signalized intersection in Balsas, Maranhão, using traffic engineering and computer simulation methods in the JaamSim software. The objective was to evaluate its operational performance, identify bottlenecks, and propose improvements. The results indicated similar volumes between the two intersections, but with distinct patterns—one presenting a higher hourly concentration and the other a more distributed flow. Peak traffic occurred between 11:30 AM and 12:30 PM. Among the simulated scenarios, the one that proposed moderate adjustments to signal timings proved to be more efficient, balancing wait times and reducing queues below critical limits. It is concluded that interventions focused on optimizing signal cycles and signaling are sufficient to significantly improve safety and traffic flow.

Keywords: Urban mobility; Traffic engineering; Intersections; Computer simulation.

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA A MELHORIA DO ACESSO AO CAMPUS DA UFMA/BALSAS: UM ESTUDO DE CASO

Keven Dalton Bertolino Azevedo¹, Daniel Beserra Costa², Francisco de Assis Alves da Cunha³, Carla Caroline Alves Carvalho⁴, Jean Carlos Reis de Araujo⁵.

¹Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências de Balsas (CCBL)

Resumo

As interseções viárias representam pontos de elevada complexidade dentro do sistema de mobilidade urbana, pois concentram diferentes fluxos de usuários em um mesmo espaço. Essas condições tornam os locais suscetíveis a conflitos, o que implica custos sociais, econômicos e saúde pública. A análise das interseções é fundamental para compreender os fatores que afetam a segurança e a eficiência do tráfego, possibilitando a proposição de soluções técnicas adequadas. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo propor uma solução técnica e economicamente viável para requalificar o acesso à UFMA/Balsas. A metodologia adotada envolveu levantamento de campo, modelagem geométrica, simulações operacionais e estudo de viabilidade econômica (utilizando indicadores: VPL, TIR e B/C). Foram avaliadas três alternativas de intervenção, sendo a antecipação do acesso e reorganização geométrica a solução mais eficiente. Conclui-se que a requalificação proposta não apenas eleva os níveis de segurança/acessibilidade, como também se alinha às diretrizes de desenvolvimento urbano sustentável.

Palavras-chave: Interseções viárias; Segurança no trânsito; Engenharia de tráfego; Mobilidade urbana.

1. Introdução

As interseções viárias representam pontos críticos da malha urbana e rodoviária, pois concentram fluxos de veículos, pedestres e ciclistas em um mesmo espaço, frequentemente associados a altos índices de acidentes (Guia de Redução de Acidentes, 1998). Essa complexidade decorre da interação entre modos de transporte e de fatores estruturais e comportamentais (Ferraz et al., 2012; Vasconcellos, 2003).

Os impactos dos sinistros vão além das consequências imediatas, gerando custos sociais, econômicos e de saúde pública (ONSV, 2020; Feder, 2023). Nesse sentido, investimentos em infraestrutura adequada e tecnologias de gestão de tráfego devem ser compreendidos como estratégias que unem preservação da vida e eficiência econômica (Ferraz et al., 2012; OMS, 2021).

¹ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: keven.bertolino@discente.ufma.br

² Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: daniel.beserra@ufma.br

³ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: cunha.francisco@ufma.br

⁴ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: cca.carvalho@ufma.br

⁵ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: jean.reis@discente.ufma.br

A literatura destaca medidas como redesenho geométrico, rotatórias, controle de velocidades, melhoria da visibilidade e sinalização adaptada, fundamentais para reduzir acidentes e promover mobilidade sustentável (Ma et al., 2020; DNIT, 2005; Silva, 2016), sobretudo quando associadas a princípios de acessibilidade e mobilidade ativa (Vasconcellos, 2012; Harvey, 2014). Nesse cenário, a engenharia de tráfego desempenha papel essencial ao planejar e operar sistemas viários com base em critérios técnicos e ferramentas modernas de simulação e análise (Garber e Hoel, 2009; Ortúzar e Willumsen, 2011; Litman, 2021).

Em Balsas (MA), o trecho da MA-140, que dá acesso ao campus da UFMA, possui atualmente um retorno implantado, mas em localização inadequada e com deficiências estruturais, o que contribui para acidentes e transtornos no tráfego (Diário Sul Maranhense, 2023). Assim, a proposta da pesquisa é ajustar e requalificar esse retorno existente, com intervenções geométricas e de sinalização, a fim de melhorar a segurança viária, a fluidez do tráfego e a mobilidade urbana.

2. Metodologia

O procedimento metodológico adotado neste estudo consistiu em uma pesquisa bibliográfica com abordagem quali-quantitativa, ou seja, combinando elementos qualitativos e quantitativos.

2.1. Levantamento bibliográfico

Inicialmente, foi realizado um estudo exploratório da literatura especializada em segurança viária, mobilidade urbana e engenharia de tráfego, contemplando autores clássicos e recentes da área. Foram consultadas obras de referência em planejamento e modelagem de transporte (Garber *et al.*, 2009; Ortúzar; Willumsen, 2011; Litman, 2021), estudos sobre segurança no trânsito (Ferraz *et al.*, 2012; Vasconcellos, 2003, 2012; OMS, 2021; ONSV, 2020) e diretrizes técnicas para projeto de interseções e redução de acidentes (DNIT, 1998; DNIT, 2005). Esse levantamento forneceu o embasamento conceitual para a definição dos parâmetros de análise e indicadores de desempenho.

2.2. Caracterização da área de estudo

Foi realizada a caracterização física e funcional da interseção selecionada, considerando elementos geométricos, sinalização, volume de tráfego e uso do solo

adjacente (Figura 1). Essa etapa buscou identificar condições críticas associadas à ocorrência de conflitos viários e potenciais fatores de risco, em consonância com metodologias preconizadas por Ferraz et al. (2012) e Vasconcellos (2012).



Figura 1. Local de estudo(a); e, UFMA - Via De Estudo(b).

2.3. Elaboração de solução viária

A elaboração das soluções viárias foi baseada no Manual de Projeto de Interseções do DNIT (2005), seguindo estes princípios técnicos: Minimização de conflitos entre fluxos de tráfego; Seleção adequada do tipo de interseção (em nível, rótulas ou canalizadas); Dimensionamento de elementos geométricos como faixas de desaceleração e canalizações; Implementação de acessibilidade para pedestres conforme ABNT NBR 9050; Canalização de fluxos com ilhas divisórias e sinalização; e, Compatibilização com o crescimento urbano futuro

As soluções foram representadas em plantas baixas no AutoCAD, priorizando intervenções de baixo custo e rápida implementação. As alternativas passaram por uma análise de multicritério que avaliou: Viabilidade técnica e compatibilidade local; Efetividade em segurança e acessibilidade; Custos de implantação e manutenção; e, Impacto urbano e aceitação social.

2.4. Análise econômica

A avaliação econômica das propostas de intervenção utilizou métodos consagrados de engenharia econômica, com base em três indicadores principais: Valor Presente Líquido (VPL) - Calculado pela diferença entre benefícios futuros e custos do projeto, atualizados a valor presente usando uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 10% ao ano, em um horizonte de 10 anos; Taxa Interna de Retorno (TIR) - Corresponde à taxa de desconto que iguala o VPL a zero. A proposta

é considerada viável quando a TIR supera a TMA de 10%; e, Índice Benefício-Custo (B/C) - Mensura a relação entre benefícios e custos. Valores superiores a 1 indicam que os benefícios superam os custos.

Os benefícios considerados incluíram ganhos tangíveis como redução de acidentes, aumento da segurança viária, melhoria na fluidez do tráfego e diminuição do tempo de deslocamento. Os valores foram atualizados com base em fontes oficiais, seguindo os critérios dos Estudos de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) estabelecidos pelo DNIT.

3. Resultados e discussão

Nesta sessão serão discutidos os resultados encontrados a partir da análise técnica realizada nessa pesquisa.

3.1. Análise da situação atual

O trecho da rodovia MA-140 que dá acesso ao Campus da UFMA em Balsas apresenta graves problemas de segurança viária. A vegetação densa nas margens reduz significativamente a visibilidade dos condutores, especialmente em períodos de baixa luminosidade, aumentando o risco de colisões (Figura 2, a). Além disso, a presença de animais mortos (Figura 2, b), lixo irregular e placas de propaganda criam obstáculos perigosos e provocam poluição visual que interfere na sinalização oficial.



(a)



(b)

Figura 2. Vegetação densa, entrada do acesso (a); e, Presença de animais e lixo na via de acesso (b).

A infraestrutura apresenta sinalização horizontal desgastada e completa ausência de sinalização vertical (Figura 3), descumprindo as normativas do Manual de Sinalização Rodoviária. Essas deficiências estão diretamente relacionadas a acidentes graves, como o ocorrido em outubro de 2023 que resultou em duas mortes e um ferimento grave envolvendo um ônibus escolar e uma motocicleta. O conjunto

dessas falhas evidencia a urgência de intervenções para garantir a segurança dos usuários, particularmente os mais vulneráveis.



Figura 3. Desgaste e na sinalização horizontal e inexistência de sinalização vertical.

3.2. Alternativa 1: recuperação da situação existente

A alternativa de manutenção da entrada atual propõe intervenções pontuais como poda de vegetação, restauração da sinalização e adequação do canteiro central. No entanto, esta solução apresenta limitações estruturais significativas, particularmente devido ao perfil convexo da via que cria uma inclinação de até 10,7%, reduzindo a distância de visibilidade de parada para menos de 60 metros - valor inferior aos 75 metros exigidos pela DNIT 138/2010 – ES para a velocidade regulamentada de 60 km/h.

Essa deficiência geométrica compromete severamente a segurança, pois os condutores não conseguem visualizar obstáculos com antecedência suficiente. A solução proposta inclui a aplicação de malha de aço com chapisco de cimento para controle permanente da vegetação. No entanto, especialistas alertam que intervenções paliativas tendem a ser economicamente ineficientes no médio prazo, já que não resolvem os problemas estruturais subjacentes que perpetuam os riscos viários.

3.3. Alternativa 2: Antecipação do acesso

A alternativa de reposicionar o acesso principal (Figura 4, a) do campus da UFMA/Balsas para um ponto anterior (Figura 4, b) ao atual foi desenvolvida com base em critérios técnicos do Manual de Projeto de Interseções do DNIT.

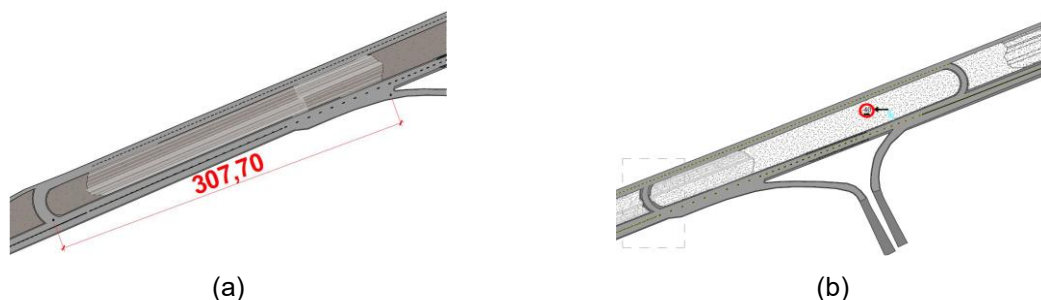


Figura 4. Acesso atual (a); e, Antecipação de acesso (b).

A proposta visa melhorar a segurança viária através da realocação para um trecho com melhores condições de topografia e visibilidade, considerando as limitações do acesso atual. O projeto contempla: Redimensionamento geométrico da via com ajustes no alinhamento horizontal e faixas de rolamento; Sistema completo de drenagem com instalação de bueiro quádruplo tubular de concreto para prevenir alagamentos (Figura 5); Sinalização abrangente incluindo placas de advertência, regulamentação de velocidade (30-40 km/h) e dispositivos auxiliares como tachas refletivas; Medidas de moderação de tráfego como lombadas físicas para áreas escolares.

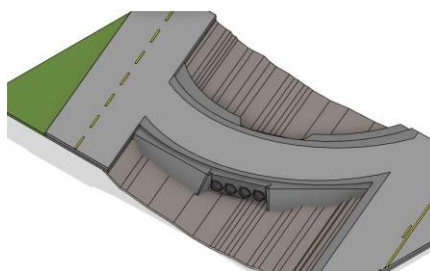


Figura 5. Bueiro Quádruplo Tubular De Concreto (Bqtc),

A intervenção foi planejada para aumentar a distância de frenagem e o tempo de reação dos condutores, reduzindo significativamente os conflitos viários identificados no trecho atual. A solução alinha-se com a Política Nacional de Mobilidade Urbana e os ODS, particularly o ODS 11, representando um avanço estrutural na promoção de um ambiente mais seguro e funcional para a comunidade universitária.

3.4. Alternativa 3: acesso no acostamento

A terceira alternativa para melhoria do acesso ao campus da UFMA em Balsas propõe a reconfiguração do acostamento existente como solução técnica e economicamente viável (Figura 6). Diante das limitações do atual acesso, que conta com um acostamento de apenas 0,90 metro de largura - insuficiente para garantir

segurança operacional -, a intervenção prevê a transformação desta área em uma faixa de desaceleração dedicada com 3,40 metros de largura ao longo de 60 metros frente à entrada da universidade.

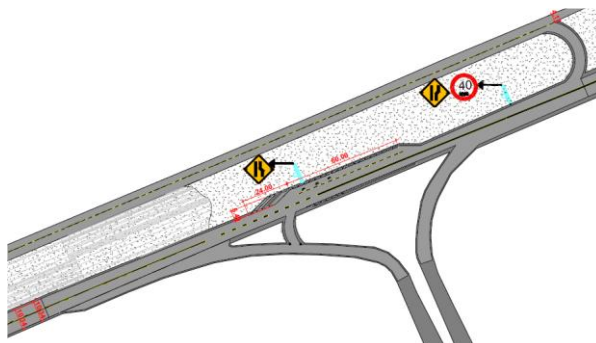


Figura 6. Esquema proposto para acesso via acostamento com faixa de desaceleração.

A proposta baseia-se no aproveitamento integral da faixa de domínio existente de 27 metros, evitando a necessidade de desapropriações. A geometria da via será adequada aos padrões técnicos para vias classe III, mantendo declividade transversal de 3% para garantir conforto operacional e aderência veicular. Como medidas complementares de segurança, inclui-se a realocação das placas de propaganda que causam interferência visual, implementação de sinalização horizontal e vertical completa conforme normativas do DNIT e CONTRAN, instalação de lombada física para controle de velocidade e aplicação de malha de aço com chapisco de cimento para controle permanente da vegetação marginal.

Do ponto de vista operacional, estabelece-se velocidade máxima de 40 km/h no trecho, em conformidade com as diretrizes do Manual de Sinalização Escolar do DNIT para áreas educacionais. A principal vantagem desta alternativa reside na simplicidade construtiva e no menor custo de implantação comparado a soluções mais complexas, como rotatórias ou interseções canalizadas. No entanto, reconhece-se como limitação a capacidade reduzida para horários de pico e a dependência do comportamento dos condutores no respeito aos limites de velocidade.

3.5. Análise das alternativas econômicas

A avaliação econômica da proposta de intervenção foi realizada com base em orçamento sintético elaborado a partir dos valores de referência do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), utilizando o software Orçafascio como ferramenta auxiliar (Figuras 7, 8 e 9).

BANCO	Descrição	Valor total
SINAP	Serviço preliminar (administração local)	R\$ 50.411,88
SINAP	Meio fio	R\$ 5.357,10
SINAP	Sarjeta	R\$ 4.083,00
SINAP	Sinalização horizontal e vertical	R\$ 138.253,32
	Total sem BDI	R\$ 153.105,3
	Total geral	R\$ 203.001,38

Fonte: autor, 2025

Figura 7. Orçamento sintético alternativa 1

BANCO	Descrição	Valor total
SINAP	Serviço preliminar (administração local)	R\$ 61.411,88
SINAP	Serviço de terraplanagem	R\$ 8.538,60
SINAP	Execução de bueiro quadruplo tubular de concreto	R\$ 60.957,48
SINAP	Meio fio	R\$ 5.357,10
SINAP	Sarjeta	R\$ 4.083,00
SINAP	Sinalização horizontal e vertical	R\$ 138.253,32
	Total sem BDI	R\$ 221.992,02
	Total geral	R\$ 278.601,38

Fonte: Autor, 2025

Figura 8. Orçamento Sintético Alternativa 2

BANCO	Descrição	Valor total
SINAP	Serviço preliminar (administração local)	R\$ 85.963,52
SINAP	Serviço de terraplanagem	R\$ 2.153,58
SINAP	Pavimentação	R\$ 2.153,58
SINAP	Urbanização e obras complementares	R\$ 4.854,50
SINAP	Sinalização horizontal e vertical	R\$ 63.620,35
	Total sem BDI	R\$ 155.396,93
	Total geral	R\$ 195.003,64

Fonte: Autor, 2025

Figura 9. Orçamento Sintético Alternativa 3.

Com base nos orçamentos apresentados e na estimativa dos benefícios gerados por cada proposta, foi realizada uma análise comparativa dos indicadores de desempenho econômico para as três alternativas de intervenção. A Figura 10 apresenta o resumo dos resultados obtidos para o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Índice Benefício-Custo (B/C), permitindo uma avaliação objetiva da atratividade de cada alternativa.

Alternativas	VPL(R\$)	TIR(%)	Índice(B/C)
Alternativa 1	R\$ 104.226,98	20,96%	1,51
Alternativa 2	R\$ 90.072,65	17,09%	1,32
Alternativas 3	R\$ 142.947,55	25,23%	1,73

Fonte: Autor, 2025

Figura 10. Resumo Comparativo Da Análise Econômica

Estes indicadores revelam que a Alternativa 3 não apenas recupera o investimento inicial, mas gera expressivo retorno líquido para a sociedade, com cada real investido retornando R\$ 1,73 em benefícios econômicos. A robustez dos resultados sob condições de avaliação exigentes consolida esta alternativa como a solução mais eficiente em termos de custo-benefício, justificando técnica e

economicamente sua adoção conforme os princípios de racionalidade na alocação de recursos públicos.

4. Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo principal desenvolver uma proposta técnica e economicamente viável para a requalificação do acesso principal ao campus da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) em Balsas (MA), com foco na otimização das interseções viárias em nível para melhorar a segurança, fluidez do tráfego e acessibilidade universal. O estudo iniciou com um diagnóstico detalhado que revelou fragilidades significativas nas condições atuais, incluindo geometria inadequada da via com perfil convexo que compromete a visibilidade, sinalização horizontal desgastada e ausência de sinalização vertical, presença de obstáculos visuais como vegetação densa e placas publicitárias, deficiência no sistema de drenagem e falta de elementos de moderação de tráfego na área escolar.

Com base nesse diagnóstico, foram elaboradas três alternativas de requalificação fundamentadas em normas técnicas do DNIT e CTB. A primeira alternativa propunha recuperação pontual da entrada existente; a segunda sugeria a antecipação do acesso para ponto topograficamente mais favorável; e a terceira previa a ampliação do acostamento como faixa de desaceleração exclusiva. Após análise técnica e econômica utilizando orçamentos do SINAPI e indicadores de engenharia econômica (VPL, TIR e B/C), a Alternativa 3 foi selecionada por reunir baixo custo de implantação, boa performance operacional e impacto positivo na segurança viária, além de dispensar desapropriações. A solução escolhida contempla a criação de faixa de desaceleração, melhorias na drenagem, sinalização completa, reconfiguração geométrica da entrada e implantação de dispositivos de moderação de tráfego.

Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9050: **Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos**. Rio de Janeiro, 2020.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Guia de redução de acidentes**. Brasília: DNIT, 1998.
- _____. – DNIT. **Manual de Projeto de Interseções em Nível**. Brasília: DNIT, 2005.
- DIÁRIO SUL MARANHENSE. **Acidente grave na MA-140 deixa duas vítimas fatais**. Balsas, 2023.

____ – DNIT. DNIT 138/2010 – ES: **Projeto Geométrico de Rodovias Rurais**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2010.

FEDER, M. **Plano de Segurança Viária Sustentável de Porto Alegre**. Revista Escola, v. 2, n. 2, p. 15-17, Porto Alegre, 2023.

FERRAZ, C. E.; TORRES, M. M. et al. **Segurança no trânsito: engenharia, educação e fiscalização**. São Paulo: IPT, 2012.

GARBER, N. J.; HOEL, L. A.; SADEK, A. W. **Traffic and Highway Engineering**. 4. ed. Stamford: Cengage Learning, 2009.

HARVEY, D. **Cidades rebeldes: do direito à cidade à revolução urbana**. Boitempo Editorial. São Paulo, 2014.

LITMAN, T. **Transportation cost and benefit analysis**. Victoria: Victoria Transport Policy Institute, 2021.

MA, X. et al. **Modeling traffic emission impacts in urban areas using microsimulation**. Transportation Research Board, 2011.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE SEGURANÇA VIÁRIA – ONSV. **Relatório anual 2020**. Brasília, 2020.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development**. New York: ONU, 2015.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS. **Global plan for the Decade of Action for Road Safety 2021–2030**. Genebra: OMS, 2021.

____ – OMS. **Estimated number of road traffic deaths**. Genebra: OMS, 2021.

ORTÚZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelos de transporte: planejamento, engenharia e economia**. 4. ed. Rio de Janeiro: Bookman, 2011.

VASCONCELLOS, E. A. **Política de transporte no Brasil: a construção da mobilidade excludente**. São Paulo: Annablume, 2003.

VASCONCELLOS, E. A. **Transporte urbano, espaço e equidade: análise das políticas públicas**. São Paulo: Annablume, 2012.

Abstract

Road intersections represent highly complex points within the urban mobility system, as they concentrate different user flows in the same space. These conditions make these locations susceptible to conflicts, which entail social, economic, and public health costs. Analyzing intersections is essential to understanding the factors that affect traffic safety and efficiency, enabling the proposal of appropriate technical solutions. Therefore, this study aimed to propose a technically and economically viable solution to rehabilitate the access to UFMA/Balsas. The methodology adopted involved a field survey, geometric modeling, operational simulations, and an economic feasibility study (using indicators: NPV, IRR, and B/C). Three intervention alternatives were evaluated, with anticipating access and geometric reorganization being the most efficient solution. It is concluded that the proposed rehabilitated project not only improves safety and accessibility but also aligns with sustainable urban development guidelines.

Keywords: Road intersections; Traffic safety; Traffic engineering; Urban mobility.

ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA: ALGUNS FUNDAMENTOS PARA CONCEPÇÃO DE PROJETOS ARQUITETÔNICOS EM UMA REGIÃO DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Chrysttyan Thalles Ribeiro Félix ¹, Ana Maria Duarte Mendonça ², Cáyra Vitória Brito De Souza e Silva³, Brenda Maria Barreto⁴, Thiago Lucena Dias⁵ e Auanny Alícia Alves da Silva ⁶

¹Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Tecnologias e Recursos Naturais (CTRN)

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a elaboração de uma cartilha orientativa voltada à população de Picuí-PB e regiões com características climáticas semelhantes. A proposta busca promover construções mais confortáveis e ambientalmente adequadas, considerando o contexto semiárido da região, caracterizado por altas temperaturas, baixa umidade, chuvas irregulares e solo pobre em nutrientes. A pesquisa foi desenvolvida por meio de levantamento bibliográfico e abordagem qualitativa, com foco na identificação de estratégias arquitetônicas e construtivas adaptadas ao clima local. A cartilha oferece orientações práticas sobre métodos construtivos, soluções arquitetônicas e escolha de materiais mais adequados ao ambiente, visando reduzir os impactos do microclima urbano e melhorar o conforto térmico nas edificações. Para sua produção, foram utilizados softwares como SketchUp e Adobe Photoshop, que auxiliaram na criação e organização visual do conteúdo. O material propõe-se a ser uma ferramenta acessível e eficaz, contribuindo para construções mais sustentáveis e adaptadas à realidade do semiárido paraibano.

Palavras-chave: conforto ambiental. Edificações. Alternativas arquitetônicas.

1. Introdução

A construção de uma edificação deve ser pensada na integração do meio ambiente com o conforto ambiental humano em seu interior. Dito isto, o estudo do ambiente ao qual aquela edificação estará localizada é indispensável, levando-se em consideração o clima da região, técnicas ecológicas e concepções arquitetônicas adequadas.

¹ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: chrysttyan.thalles@estudante.edu.br

² Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: ana.duartemendoca@professor.ufcg.edu.br

³ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: cayra.vitoria@estudante.ufcg.edu.br

⁴ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: brenda.barreto@estudante.ufcg.edu.br

⁵ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: thiago.lucena@estudante.ufcg.edu.br

⁶ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: auanny.alicia@estudante.ufcg.edu.br

O bem-estar do homem dentro de uma edificação possui relação com as sensações de seu corpo quando há variações dos parâmetros físicos, sendo: temperatura do ar, radiação solar, brilho, movimento do ar, ruídos e iluminação. Dito isto, os parâmetros supracitados em consonância com as temperaturas das superfícies circunvizinhas alteram a sensação de conforto térmico do homem (CORBELA, 2011).

Neste contexto, a arquitetura bioclimática tem o intuito de fazer a adaptação da construção com o clima, tendo como prioridade o conforto quanto à temperatura, a luminosidade, conforto acústico e visual dos usuários (CORBELA, 2011). Faria (2010) corrobora com Corbela (2011) ao afirmar que a arquitetura bioclimática tem quatro pontos base: criação de ambientes renovadores e confortáveis, eficiência energética, desperdícios minimizados e fontes renováveis. Logo, afirma-se que os profissionais responsáveis pela elaboração e execução dos projetos necessitam compreender acerca do clima, materiais e alternativas arquitetônicas adequados para determinada localidade.

Por fim, salienta-se que esse estudo busca indicar concepções arquitetônicas adequadas para o município de Picuí, no interior da Paraíba, aja vista ser uma cidade que na maioria de suas construções não ocorram orientações técnicas com o intuito de fornecer conforto ambiental, segurança e durabilidade para a edificação, devido à falta de contratação de profissionais adequados. Deste modo, destaca-se que o município está localizado no semiárido brasileiro, com características de clima seco e quente, com apenas as estações de inverno e verão bem definidas.

2. Metodologia

Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado de uma abordagem qualitativa, com base em pesquisas bibliográficas e na elaboração de material didático. Deste modo, a pesquisa objetivou fazer uma análise das referências teóricas previamente publicadas em acervos digitais e físicos. Fonseca (2002) afirma que “a pesquisa bibliográfica é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas”.

Concomitante a pesquisa bibliográfica, foi feita uma pesquisa qualitativa como suporte para elaboração das imagens de sugestão arquitetônica. Gerhart e Silveira (2009) afirma que a pesquisa qualitativa tem procura compreender os fenômenos em profundidade, sem a intenção de quantificá-los, não utilizando dados numéricos.

Por fim, para a produção das imagens foram utilizados softwares gráficos específicos, como: SketchUp para a modelagem das imagens e Adobe Photoshop para a diagramação e organização visual.

3. Resultados e discussão

Por meio da análise do clima regional do município, como também com base nas características socioeconômicas da cidade, foi possível sugerir algumas alternativas arquitetônicas com o intuito de melhorar o conforto de usuários em edificações no interior do semiárido. Dito isto, a Figura 1, apresenta uma sugestão já bastante utilizada, que são os ambientes integrados, que causam a sensação de amplitude, melhor circulação do ar e das pessoas, além de, favorecer o conforto térmico e lumínico do ambiente.



Figura 1. Ambientes integrados

A Figura 2, apresenta a sugestão de edificações com alturas maiores, pois edificações com essas características possuem um melhor conforto térmico, devido a melhor circulação do ar em seu interior. Além disso, edificações com essa tipologia possibilita que o ar quente fique na parte superior e quando a massa de ar fria fique mais abaixo, proporcionando a sensação de ambiente ventilado.



Figura 2. Edificações com pé direito mais altos

A Figura 3, sugere a construção de espaços cordiais na edificação, com a presença de plantas, redes, cores e ventilação. Dito isto, os espaços cordiais são ambientes ao qual proporcionam relaxamento ao corpo e a mente dos usuários.



Figura 3. Espaço cordial

A Figura 4, por sua vez, traz uma solução a qual já é bastante utilizada na casa dos brasileiros, sendo a utilização do cobogó. Logo, afirma-se que cobogó é um tipo de blocos de fechamento, que podem ser fabricados em diferentes materiais, e que tem como intuito possibilitar a passagem de iluminação e de ventilação entre os ambientes.

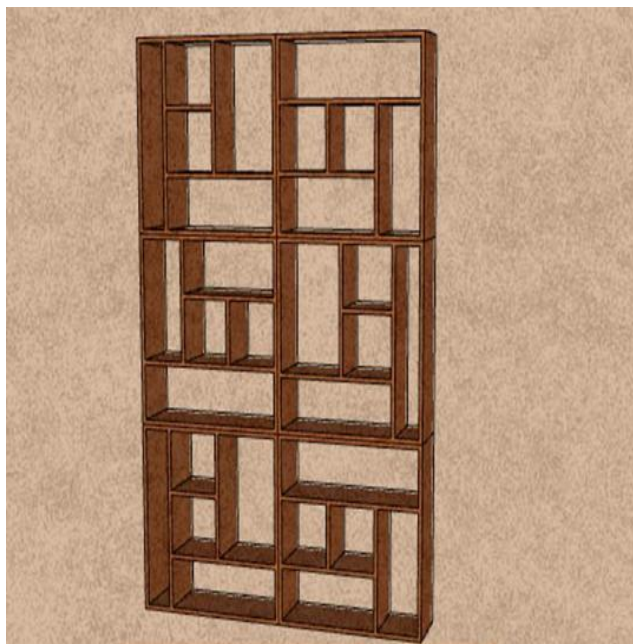


Figura 4. Cobogó

A Figura 5, apresenta a utilização de brise-soleil, ou mais comumente conhecido como quebra-sol, que é composto por diferentes tiras de madeira, concreto, aço ou de materiais poliméricos. O quebra-sol é utilizado no exterior na edificação, especificamente na frente das esquadrias como janelas, com o intuito de absorver parte dos raios solares que incidiram de forma direta ao interior da edificação.



Figura 5. Brise-soleil

Por fim, a Figura 6 apresenta uma alternativa arquitetônica de aumentar o conforto térmico, que seriam os beirais mais alongados, que proporcionam as suas paredes ficarem mais afastadas, e longe da incidência dos raios solares, proporcionando uma melhor sensação térmica para os usuários.



Figura 6. Beirais mais alongados

4. Conclusão

O trabalho apresenta soluções arquitetônicas simples, acessíveis e adaptadas às condições climáticas do semiárido paraibano. Por meio de estratégias como ambientes integrados, pé-direito elevado, uso de cobogós, brises e beirais alongados, é possível promover maior conforto térmico nas edificações da região. Dessa forma, o material proposto busca orientar moradores, construtores e profissionais da área, contribuindo para construções mais eficientes, sustentáveis e adequadas à realidade local.

Referências

- CORBELLA, O. Manual de arquitetura bioclimática tropical/ Oscar Corbella e Viviane Corner. – Rio de Janeiro: Reban, 2011. 1ª impressão, maio de 2015.
- FONSECA, J. J. S. Metodologia da pesquisa científica. Fortaleza: UEC, 2002. p. 32.
- GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. Métodos de pesquisa, editora UFRGS, 2009.
- FARIA, P. M. M. S. A arquitetura bioclimática mediterrânea: um equilíbrio entre duas estações. Revista Lusófona de Arquitectura e Educação, n. 3, p. 179-192, 1 jan. 2010.

Abstract

This study aims to develop a guidance booklet intended for the population of Picuí-PB and other regions with similar climatic characteristics. The proposal seeks to promote more comfortable and environmentally appropriate constructions, taking into account the semi-arid context of the region, which is characterized by high temperatures, low humidity, irregular rainfall, and nutrient-poor soil. The research was conducted through a bibliographic review and a qualitative approach, focusing on identifying architectural and construction strategies adapted to the local climate. The booklet provides practical guidance on construction methods, architectural solutions, and the selection of materials best suited to the environment, aiming to reduce the impacts of the urban microclimate and improve thermal comfort in buildings. For its development, software such as SketchUp and Adobe Photoshop was used to create and visually organize the content. The material is intended to be an accessible and effective tool, contributing to more sustainable constructions adapted to the reality of the semi-arid region of Paraíba.

Keywords: Environmental comfort. Buildings. Architectural alternatives.

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO A PARTIR DE CORRENTES FLUVIAIS - UM ESTUDO DE CASO DO RIO BALSAS

Marina da Silva Miranda ¹, Thiago Almeida da Silva Sousa ², Pedro Bezerra Leite Neto ³

¹Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências de Balsas (CCBL)

Resumo

A geração de energia elétrica no Brasil é predominantemente hidrelétrica, porém grandes barragens causam impactos socioambientais significativos. A energia hidrocínética surge como alternativa sustentável, explorando a energia cinética de correntes fluviais sem represamento. Este estudo avaliou o potencial energético do Rio Balsas, Maranhão, utilizando dados fluviométricos da estação 34130000 e simulações computacionais em MATLAB. A turbina hidrocínética Smart Monofloat foi selecionada para análise de desempenho sob diferentes velocidades de corte. Os resultados demonstraram que o rio apresenta velocidades superiores a 1 m/s apenas 31,1% do tempo, limitando a operação nominal da turbina. Através da extrapolação da curva de geração para velocidades inferiores, especialmente 0,8 m/s, observou-se aumento significativo na energia anual gerada. O estudo conclui que turbinas hidrocínéticas constituem solução viável para geração descentralizada em comunidades ribeirinhas isoladas, equilibrando demanda elétrica e preservação ambiental com baixo impacto sobre o ecossistema local.

Palavras-chave: Energia Renovável; Turbinas Hidrocínéticas; Rio Balsas.

1. Introdução

A geração de energia é considerada um dos principais marcos para o desenvolvimento socioeconômico global, mas ao longo do tempo tem se configurado também como um fator limitante e entrave para o crescimento sustentável (Katwal e Soni, 2003; Dovi et al., 2009). Tradicionalmente, no Brasil, a produção hidráulica de energia tem ocorrido em larga escala, centrada em grandes usinas hidrelétricas afastadas dos principais centros consumidores, o que exige vastos investimentos em linhas de transmissão e infraestrutura associada. Embora o país ocupe posição de destaque mundial como grande produtor de energia hidrelétrica, essas grandes estruturas ocasionam elevados impactos socioambientais, como o alagamento de vastas áreas florestais, alteração do regime de cursos d'água, prejuízos à fauna e à flora locais e impacto na ocupação humana (Ciclovivo, 2020; Queiroz et al., 2013).

¹MA-140, Km 04, Balsas/MA, CEP 65.800-000.E-mail:marina.miranda@discente.ufma.br

²MA-140, Km 04, Balsas/MA, CEP 65.800-000.E-mail:thiago.ass@discente.ufma.br

³MA-140, Km 04, Balsas/MA, CEP 65.800-000.E-mail:pedro.neto@ufma.br

Nas últimas décadas, essa cultura de geração centralizada vem cedendo espaço à descentralização das fontes energéticas, aproximando centros produtores dos centros consumidores, o que além de mitigar os impactos ambientais, reduz custos de transmissão, possibilita explorar áreas hoje inacessíveis e promove a diversificação da matriz elétrica com maior participação de fontes renováveis, condição fundamental para a descarbonização do sistema elétrico e aumento da segurança elétrica (Miranda e Sousa, 2023).

Neste contexto, destacam-se as turbinas hidrocínéticas, que utilizam o potencial energético das correntes fluviais sem necessidade de represamento, conforme ilustrado na Figura 1, configurando uma tecnologia de baixo impacto ambiental, adequada especialmente para atender às demandas energéticas de comunidades ribeirinhas isoladas, em sintonia com princípios de sustentabilidade e proteção ambiental (Miranda e Sousa, 2023).

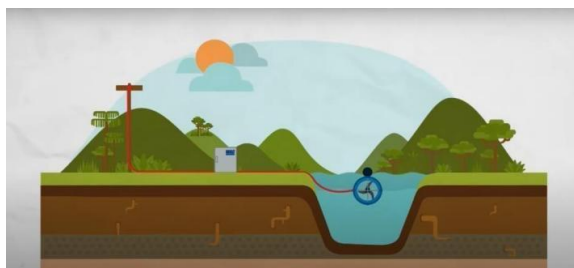


Figura 1. Funcionamento de uma turbina hidrocínética

O Rio Balsas, situado no sul do Maranhão, apresenta características hidrológicas promissoras, com fluxo caudaloso e correntezas regulares, sendo a bacia hidrográfica um componente estratégico para o desenvolvimento regional que inclui o agronegócio planejado na região do MATOPIBA. O uso sustentável deste recurso hídrico é fundamental para evitar danos irreversíveis aos sistemas ambientais e sociais locais, impondo a necessidade de estudos de viabilidade energética que considerem soluções tecnológicas modernas e de baixo impacto (Vaz et al., 2021) (Diário de Balsas, 2017). Estudos anteriores já haviam avaliado um potencial de instalação de 98 MW na região, mas sofreram forte resistência da sociedade local devido aos impactos ambientais previstos (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2015) (Folha do Cerrado, 2017)

O presente trabalho visa, portanto, avaliar o potencial elétrico do Rio Balsas para geração descentralizada por turbinas hidrocínéticas, utilizando dados reais de

velocidade das correntes e análise do desempenho da turbina Smart Monofloat, buscando oferecer uma alternativa eficiente, ambientalmente amigável e economicamente viável para suprir as necessidades energéticas locais, alinhada com as tendências atuais de sustentabilidade e inovação tecnológica.

2. Metodologia

2.1 Caracterizações da área de estudo

O Rio Balsas, objeto deste estudo, está localizado no município de Balsas, sul do estado do Maranhão, cujas coordenadas geográficas são Latitude 7°31'59" Sul e Longitude 46°2'6" Oeste. A bacia hidrográfica do Rio das Balsas (BHRDB) tem sua nascente na serra do Penitente e na chapada das Mangabeiras, e sua foz no município de Benedito Leite, desaguando no rio Parnaíba (GOV.br, 2022).

2.2 Coleta e origem dos dados

Os dados utilizados para análise do potencial elétrico foram coletados da estação fluviométrica 34130000 do Rio Balsas, fornecidos pelo sistema HidroApp, cujos detalhes estão na Tabela 1. Estes dados históricos de velocidade das correntes incluem medições contínuas que cobrem um período representativo do regime hidrológico local, garantindo confiabilidade e validade estatística na caracterização da dinâmica do fluxo do rio.

Tabela 1. Detalhes da Estação fluviométrica 34130000

Código	34130000	Nome	Balsas
Bacia	Atlântico, trecho Norte/Nordeste	Longitude	- 460.358
Sub-bacia	Rio Parnaíba	Latitude	-75.344
Rio	Rio das Balsas	Local	Balsas/MA

A partir dos dados, foi construída a curva de permanência do perfil de velocidade, representada pela Figura 2, que demonstrou que durante 50% do tempo, a velocidade do rio é inferior a 0,93 m/s, e apenas em 31,1% do tempo a velocidade é superior a 1 m/s. Esta análise é crucial para avaliar a viabilidade de tecnologias com velocidades de corte específicas.

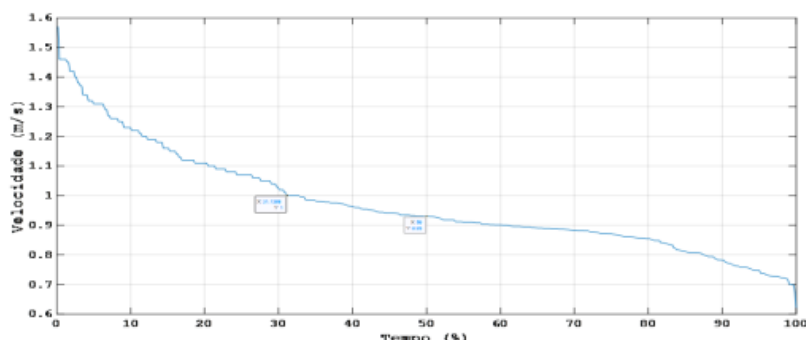


Figura 2. Detalhes da Estação fluviométrica 34130000

2.3 Cálculo do potencial energético

O potencial hidrocínético que representa a potência extraível da massa de água em movimento, foi calculado utilizando a Equação 1, a seguir:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

onde P é a potência (W), ρ é a densidade da água (assumida como 1000 kg/m^3), A é a área da seção transversal do fluxo (m^2) e v é a velocidade média da corrente (m/s).

A partir disso, a densidade de potência (D_p), que representa a potência disponível por unidade de área, foi calculada pela Equação 2

$$D_p = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (2)$$

2.4 Seleção da turbina hidrocínética

Foi escolhida para o estudo a turbina Smart Monofloat, Figura 3, reconhecida em projetos comerciais como um dispositivo eficiente para conversão de energia hidrocínética em rios sem necessidade de barramento físico. Esta turbina apresenta potência nominal adaptada a correntes com velocidade de corte de 1 m/s , sistema de ancoragem flutuante, fácil instalação e proteção mecânica contra detritos, o que a torna ideal para o cenário do Rio Balsas.



Figura 3. Instalação de uma turbina Monofloat

2.5 Simulação computacional

Utilizando o software MATLAB, foi desenvolvido um modelo computacional para simular a produção elétrica da turbina com base nos dados de velocidade do rio. A simulação incluiu a extrapolação da curva de potência para velocidades inferiores à de corte nominal (1 m/s), permitindo investigar o desempenho em regimes de baixa velocidade. A eficiência foi avaliada pelo fator de capacidade, que compara a energia gerada em condições reais com a produção máxima teórica da turbina.

3. Resultados e discussão

Para uma análise mais ampla do potencial de geração, foram simulados sete cenários com diferentes velocidades de corte. Os resultados, apresentados na Tabela 2, demonstram a relação direta entre a velocidade de corte, o tempo de operação e a energia gerada anualmente.

Tabela 2. Energia gerada e tempo de operação para distintas velocidades de corte

Velocidade de corte	Energia gerada (Kwh)	Tempo de operação - horas
0,8	129860	76689
0,9	112560	52685
1	85420	28680
1,1	66896	18705
1,2	46180	10599
1,3	28813	561
1,5	12302	15

Observa-se que, com a velocidade de corte nominal da turbina (1,0 m/s), a geração anual seria de 85.420 kWh, com a turbina operando por 28.680 horas. No entanto, ao reduzir a velocidade de corte para 0,8 m/s, a energia gerada aumenta para 129.860 kWh, e o tempo de operação sobe para 76.689 horas. Isso representa um aumento de mais de 50% na energia gerada, evidenciando que a viabilidade do projeto está diretamente ligada à capacidade da turbina de operar em velocidades mais baixas, que são mais frequentes no Rio Balsas.

Os histogramas de frequência, Figura 4 e Figura 5, e as curvas de potência, Figura 6 e Figura 7, para cada cenário reforçam que a maior parte da produção de energia ocorre em velocidades mais baixas. A dependência cúbica da potência em relação à velocidade (conforme Equação 1) significa que pequenas variações na velocidade da corrente causam grandes alterações na potência gerada, o que sublinha a sensibilidade do sistema às condições hidrodinâmicas.

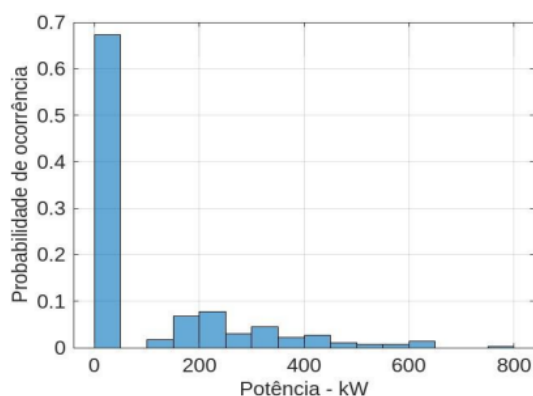


Figura 4. Histograma para uma velocidade de corte de 1 m/s

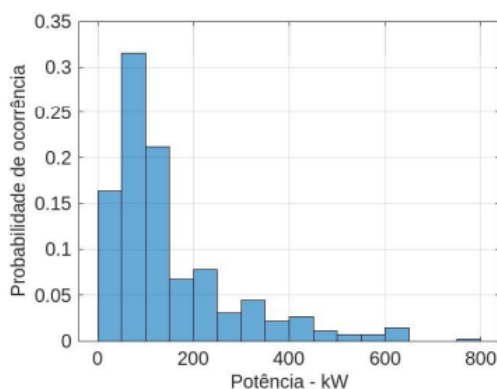


Figura 5. Histograma para uma velocidade de corte de 0,8 m/s

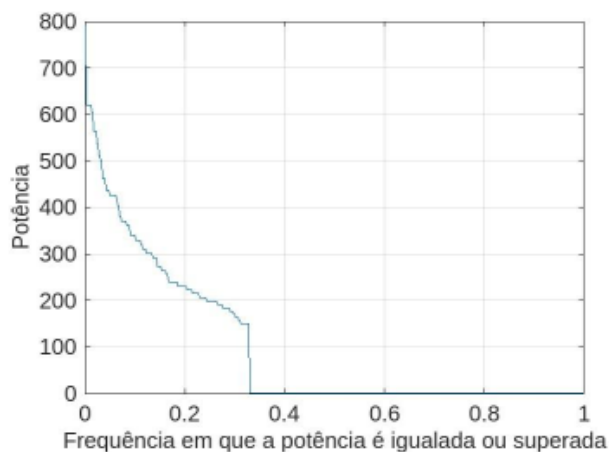


Figura 6. Curva de potência para uma velocidade de corte de 1 m/s

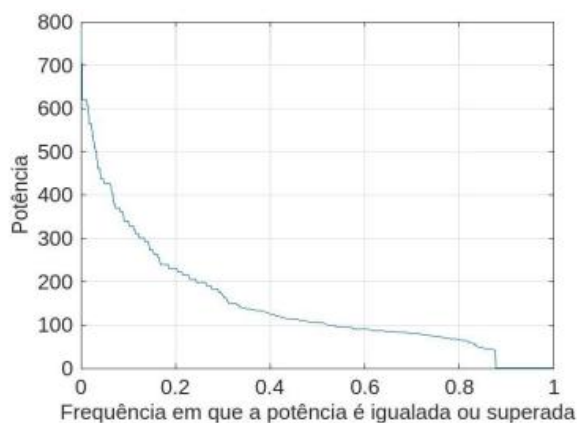


Figura 7. Curva de potência para uma velocidade de corte de 0,8 m/s

A análise do fator de capacidade, Figura 8 e Figura 9, representa a eficiência operacional sob diferentes velocidades de corte, mostrou incremento consistente da geração efetiva conforme a velocidade mínima de operação diminuía, corroborando a viabilidade técnica da adoção de turbinas projetadas para regimes hidrológicos variáveis e baixos.

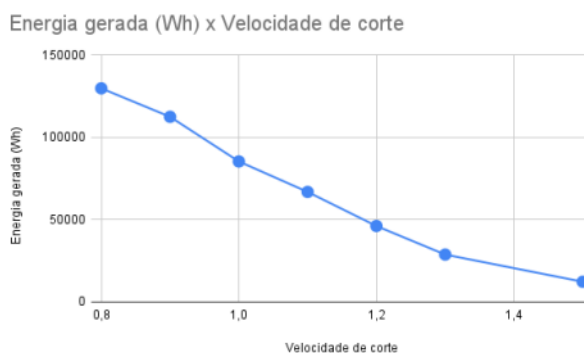


Figura 8. Energia gerada x velocidade de corte

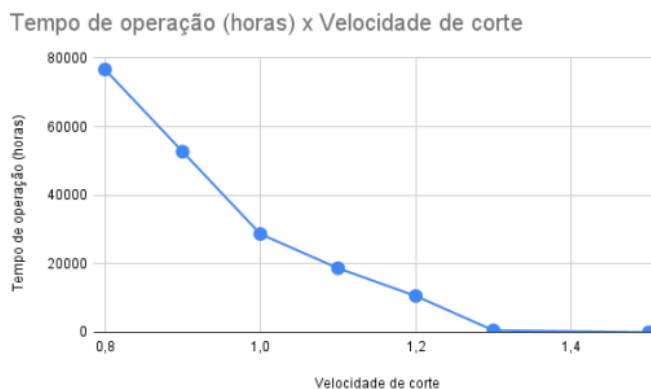


Figura 9. Tempo de operação x velocidade de corte

É importante ressaltar uma limitação deste estudo: a análise utilizou a velocidade média da seção transversal do rio. Essa abordagem tende a subestimar o potencial real, pois não considera a existência de pontos de maior densidade energética (hotspots), onde a velocidade da corrente é significativamente maior. Como desdobramento, sugere-se a realização de um mapeamento detalhado da seção transversal do rio para identificar esses hotspots, o que permitiria otimizar o posicionamento das turbinas e maximizar a geração de energia.

Adicionalmente, o uso de múltiplas turbinas em arranjos de geração poderia aumentar significativamente a produção total, superando eventuais impactos negativos. Estudos futuros deveriam focar na validação experimental dos modelos de extrapolação de potência e em uma análise econômica detalhada para avaliar a viabilidade comercial de tais arranjos no contexto do Rio Balsas.

4. Conclusão

Este estudo evidenciou que a geração de energia hidrocinética no Rio Balsas apresenta-se como uma solução tecnicamente viável e ambientalmente sustentável para a geração descentralizada de energia, especialmente voltada às comunidades ribeirinhas isoladas. A análise detalhada dos dados hidrológicos da estação fluviométrica 34130000, em conjunto com a modelagem computacional do comportamento da turbina Smart Monofloat, demonstrou que a operação da turbina à velocidade nominal de corte (1 m/s) é limitada, dada a prevalência de velocidades inferiores nesse trecho do rio. A extrapolação da curva de potência para velocidades menores que 1 m/s expandiu o potencial elétrico explorável, indicando que turbinas hidrocinéticas com capacidade para operar em baixas velocidades são essenciais

para maximizar a eficiência e a geração elétrica em contextos hidrológicos similares ao do Rio Balsas. Além disso, o estudo ressalta a importância de levantamentos hidrodinâmicos mais aprofundados, com medições pontuais e análise transversal do perfil de velocidades, os quais são fundamentais para otimizar o posicionamento das unidades geradoras e incrementar o aproveitamento energético.

Por fim, a energia hidrocínética se destaca como alternativa promissora no cenário elétrico regional, conciliando inovação tecnológica, baixa interferência ambiental e inclusão energética. Recomenda-se a realização de estudos experimentais adicionais e análises econômicas detalhadas para consolidar os resultados apresentados, garantindo a viabilidade operacional e comercial da tecnologia no contexto do Rio Balsas e regiões congêneres.

Agradecimentos

Agradecemos a Deus pela orientação e força durante esta jornada acadêmica. Reconhecemos o apoio incondicional da família, nossos pilares de amor e incentivo, que estiveram presentes em todos os momentos. Agradecemos também aos professores e orientadores, cujo empenho e sabedoria foram fundamentais para nosso crescimento pessoal e acadêmico. Este trabalho é fruto de um esforço coletivo e dedicado a todos que fizeram parte desta trajetória.

Referências

CICLOVIVO. Micro gerador usa a correnteza dos rios para produzir energia. CicloVivo, 2020.

DIÁRIO DE BALSAS COMUNICAÇÃO. Construções de Barragens em Balsas terá licença expedida pelo município. 2017. Disponível em: <https://www.diariodebalsas.com.br/noticias/construcoes-de-barragens-em-balsas-tera-licenca-expedida-pelo-municipio-18350.html>. Acesso em: 24 ago. 2025.

DOVI, V. G. et al. A method for the design of sustainable energy systems. Energy, v. 34, n. 10, p. 1678-1686, 2009.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. Estudos de Planejamento da Expansão da Geração - Identificação e Classificação de Potenciais Reservatórios de Regularização. Ministério de Minas e Energia, 2015.

FOLHA DO CERRADO. Audiência Pública contra a construção de barragens no Rio Balsas tem o apoio do Dep. Wellington do Curso. Folha do Cerrado, 2017.

GOV.br, Projeto Revitalização das Nascentes do rio das Balsas - Maranhão. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/programa-semeando-aguas/projetos/baciado-parnaiba-1/projeto-projeto-revitalizacao-das-nascentes-do-rio-das-balsas-maranhao>>. Acesso em: 24 ago. 2025.

KATWAL, K. C.; SONI, R. C. Renewable energy sources for developing countries. Energy for Sustainable Development, v. 7, n. 3, p. 89-93, 2003.

MIRANDA, Marina da Silva; **SOUSA,** Thiago Almeida da Silva. Avaliação do potencial energético a partir de correntes fluviais – um estudo de caso do Rio Balsas. Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências de Balsas, 2023.

QUEIROZ, Rosemar et al. Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGET, v. 13, n. 13, p. 2236, Santa Maria: UFSM, 2013.

VAZ, Ana Paula de Melo et al. Bacia hidrográfica do rio balsas: diagnóstico físico e avaliação qualitativa de áreas suscetíveis à erosão. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 26, p. 77-87, 2021.

Abstract

Electricity generation in Brazil is predominantly hydroelectric, but large dams cause significant socio-environmental impacts. Hydrokinetic energy emerges as a sustainable alternative, harnessing the kinetic energy of river currents without damming. This study evaluated the energy potential of the Balsas River, Maranhão, using fluviometric data from station 34130000 and computer simulations in MATLAB. The Smart Monofloat hydrokinetic turbine was selected for performance analysis under different cut-in speeds. The results showed that the river reaches speeds above 1 m/s only 31.1% of the time, limiting the turbine's nominal operation. By extrapolating the generation curve to lower speeds, especially 0.8 m/s, a significant increase in annual energy generation was observed. The study concludes that hydrokinetic turbines constitute a viable solution for decentralized generation in isolated riverside communities, balancing energy demand and environmental preservation with low impact on the local ecosystem.

Keywords: Renewable Energy; Hydrokinetic Turbines; Balsas River.

AVALIAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DE RESÍDUOS DE QUARTZITO PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS EM PAVIMENTAÇÃO

Cáya Vitória Brito De Sousa e Silva ¹, Chrysttyn Thalles Ribeiro Félix ², Auanny Alcía Alves da Silva ³, Thiago Lucena Dias ⁴, Ana Maria Gonçalves Duarte ⁵ & Brenda Maria Barreto de Souza ⁶
^{1,2,3,4,5,6} Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Ciências de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN)

Resumo

A expansão das obras de infraestrutura viária e a necessidade de reduzir impactos ambientais associados à extração de agregados motivam a avaliação de alternativas de menor passivo. Neste estudo, investiga-se o resíduo de quartzito (RQ), subproduto da cadeia de rochas ornamentais, como insumo para estabilização de solos empregados em pavimentação. A abordagem baseou-se na caracterização físico-química do material por Fluorescência de Raios X (FRX), Difração de Raios X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A FRX revelou composição majoritariamente silicosa, com Al_2O_3 , K_2O , MgO e demais óxidos em teores. Os resultados sustentam o aproveitamento do resíduo de quartzito como alternativa técnica alinhada a diretrizes de sustentabilidade na engenharia de pavimentos, recomendando-se, em etapas subsequentes, a verificação mecânica (CBR/UCS, módulo resiliente e durabilidade) para estabelecer faixas ótimas de incorporação em solos lateríticos.

Palavras-chave: Caracterização físico-química; filler mineral; estabilização de solos; pavimentação.

1. Introdução

O dinamismo econômico vem elevando a procura por agregados naturais, insumos minerais essenciais para a construção civil, com destaque para obras rodoviárias. Ao mesmo tempo, cresce a inquietação com a finitude desses recursos e com os impactos ambientais decorrentes da extração de matérias-primas. Esse cenário tem impulsionado o setor a adotar práticas para mitigar danos, como o uso mais eficiente dos materiais, a redução e o reaproveitamento de resíduos e sua destinação adequada.

¹ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: cayra.vitoria@estudante.ufcg.edu.br

² Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: chrysttyn.thalles@estudante.edu.br

³ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: auanny.alicia@estudante.ufcg.edu.br

⁴ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: thiago.lucena@estudante.ufcg.edu.br

⁵ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: ana.duartemendoca@professor.ufcg.edu.br

⁶ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: brenda.barreto@estudante.ufcg.edu.br

A lavra de jazidas para produção de agregados está associada a impactos significativos, como geração de poeira, poluição visual e sonora, aumento de tráfego e degradação de corpos hídricos por contaminação e assoreamento. Nesse contexto, investigar substitutos aos agregados convencionais, por exemplo, resíduos de quartzito, para aplicações em infraestrutura viária torna-se pertinente, pois sua utilização pode diminuir o passivo ambiental.

Do ponto de vista geológico, o quartzito é uma rocha metamórfica composta quase integralmente por grãos de quartzo. Quando apresenta granulometria fina e textura granoblástica, pode ter propriedades semelhantes às de certos granitos. Apesar do valor comercial, a cadeia do quartzito ornamental produz grande volume de rejeitos: a exploração de jazidas costuma ter baixo aproveitamento (muitas vezes abaixo de 15%) e, no beneficiamento, parcela relevante dos blocos serrados converte-se em resíduo fino, estimativas indicam cerca de um quarto do volume serrado. Além disso, parte expressiva desses resíduos tem teor elevado de SiO_2 (frequentemente acima de 95%), o que desperta interesse para usos de maior valor agregado em segmentos que demandam sílica de alta pureza.

Em termos setoriais, dados divulgados pela ABIROCHAS para 2016 indicam que o quartzito respondeu por pequena fração do faturamento total das exportações brasileiras (cerca de 2,8%), embora representasse parcela significativa do volume físico das rochas exportadas, evidenciando uma pauta de baixo valor unitário — e, portanto, espaço para agregação de valor por meio do aproveitamento de resíduos.

Saraiva (2006) ressalta que uma alternativa é empregar materiais de origem regional em camadas de pavimentos. Ainda que nem sempre atendam integralmente às especificações normativas, esses materiais podem alcançar desempenho estrutural comparável ao dos sistemas tradicionais. Entre as possibilidades figuram resíduos de mineração, solos residuais, escórias e materiais sintéticos.

No Brasil, a exploração de quartzito tem gerado grandes volumes de rejeitos e, em algumas localidades, faltam práticas adequadas de disposição e aproveitamento. Em Minas Gerais, por exemplo, a produção de quartzito aumentou 37,6% entre 2003 e 2004, enquanto a taxa de aproveitamento do minério destinado a revestimentos e ornamentação — muito usado na construção civil — situa-se em apenas 8% a 10% (Alecrim *et al.*, 2009). Estudos apontam que o resíduo de serragem de quartzito é um material muito fino, com teor de sílica próximo a 99,4% de SiO_2 , e que pode ser

direcionado a aplicações nobres, inclusive como matéria-prima para rotas que visam sílica vítrea e silício grau metalúrgico, desde que se definam processos de purificação e se avalie sua viabilidade econômica (Júnior, Barros e Neves, 2018).

De modo geral, a extração e o beneficiamento de rochas ornamentais resultam em resíduos grosseiros provenientes da quebra durante o corte e em rejeitos finos sob a forma de lama, frequentemente lançados no ambiente sem tratamento. Após a evaporação da água, o pó pode se dispersar, comprometendo a qualidade do ar e dos recursos hídricos. Sendo assim, uma estratégia para reduzir o desperdício associado ao uso indiscriminado de agregados convencionais é incorporar resíduos aos materiais de pavimentação, alinhando-se aos princípios do desenvolvimento sustentável e gerando benefícios sociais.

2. Metodologia

O Resíduo de quartzito utilizado na pesquisa foi coletado no município de Conde-PB. Os ensaios das propriedades físico-químicas serão conduzidos no Laboratório de Engenharia de Pavimentos e CERTBIO (LEP/UAEC/CTRN/UFCG), seguindo as diretrizes estabelecidas pelas instruções normativas e metodologias pertinentes, como as normas para os ensaios de FRX, MEV para caracterizar o resíduo de quartzito.

Foram realizados ensaios no solo natural utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em conjunto com a técnica de Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS). O MEV possibilita a visualização detalhada da microestrutura do solo, proporcionando imagens de alta resolução geradas a partir da energia emitida pelas partículas. A EDS complementa a análise, permitindo identificar de maneira imediata a composição química do material, o que agrega valor à caracterização microscópica.

Os testes foram conduzidos no Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO), da Universidade Federal de Campina Grande. O equipamento utilizado foi o modelo "Hitachi TM-1000" (Figura 1), e as amostras analisadas foram previamente secas e peneiradas através de uma malha nº 200, com abertura de 0,075 mm



Figura 1. Equipamento Hitachi TM-1000, utilizado na pesquisa.

Além disso, também foram realizados ensaios de Fluorescência de Raios-X (FRX) para o solo natural e de Difração de Raios-X (DRX) para os solos natural e estabilizado, com o objetivo de determinar a estrutura química dos solos. O ensaio de DRX permite a identificação da estrutura cristalina do material, bem como sua composição em termos de minerais e argilominerais. Por outro lado, o FRX possibilita a detecção dos elementos químicos presentes na amostra.

Esses ensaios foram conduzidos no Laboratório de Materiais Avançados. Para a execução do FRX, foi utilizada amostra passante na peneira nº 200, de forma semelhante ao processo adotado para o MEV. O ensaio de FRX foi realizado utilizando o equipamento "EDX-720" da Shimadzu, conforme ilustrado na Figura

Em relação à avaliação da perda ao fogo, o material foi inicialmente seco em estufa a 110°C por 24 horas e, em seguida, calcinado em mufla a 1000°C por 60 minutos, conforme mostrado na Figura 2.



Figura 2. EDX 720 da Shimadzu e Mufla, respectivamente.

O ensaio de Difração de Raios-X (DRX) foi conduzido utilizando o equipamento "XRD-6000" da Shimadzu (Figura 3). Para a execução do ensaio, foram adotados os seguintes parâmetros: amplitude angular de 2θ , com intervalo de medição variando entre 5° e 60° , velocidade de $0,05^\circ/\text{min}$, além de uma voltagem de 35 kV e corrente de 15 mA.



Figura 3. XRD-6000 da Shimadzu.

3. Resultados e discussão

3.1. Análise química por Fluorescência de raios-X (FRX)

A Tabela 1, apresenta os resultados obtidos para a Fluorescência de raios X do quartzito.

Tabela 1. Resumo dos compostos obtidos em FRX do resíduo de quartzito.

Composto	(%)
SiO ₂	78,86
Al ₂ O ₃	14,7
K ₂ O	2,91
MgO	2,91
Fe ₂ O ₃	0,75
CaO	0,31
SO ₃	0,14
TiO ₂	0,11
BaO	0,07
Sm ₂ O ₃	0,01

Rb₂O	0,006
ZnO	0,003
SrO	0,002
Y₂O₃	0,001

O resíduo de quartzito apresenta uma composição majoritária de SiO₂ com teor de 78,85% , Al₂O₃ com teores de 14,79%, K₂O com 2,908%, e MgO com 2,042%. A composição representada pelo SiO₂ indica que o quartzito possui alta dureza e resistência ao desgaste, características cruciais para materiais de construção e abrasivos.

A presença de Al₂O₃ e outros óxidos, como MgO e TiO₂, contribui para a estabilidade térmica do material, tornando-o uma opção viável para ambientes de alta temperatura. Além disso, a presença de Al₂O₃ aumenta a resistência à compressão e à abrasão, o que o torna adequado para aplicações estruturais.

3.2. Difração de raios-X (DRX)

A análise da difração de raios-X permitiu identificar os argilominerais constituintes da amostra.

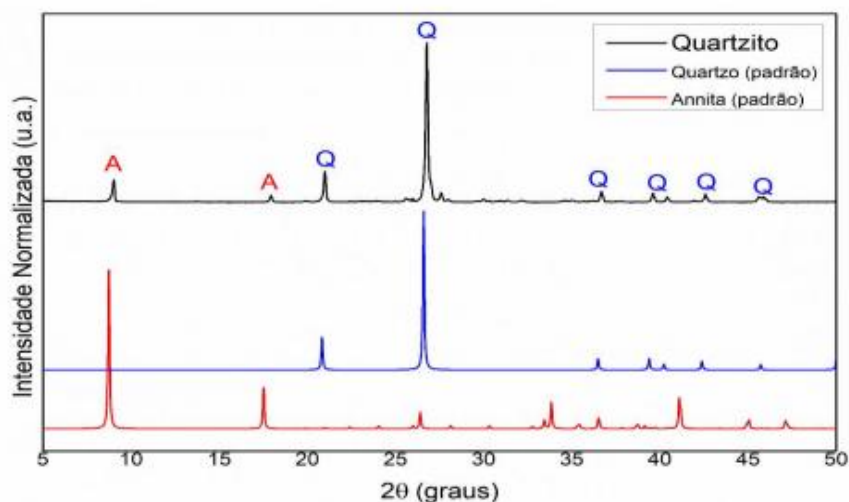


Figura 4. Resultado do ensaio de DRX do resíduo de quartzito

As principais reflexões observadas no padrão de difração incluem picos nas posições de 2θ de 20.9°, 26.6°, 36.5°, 39.5°, 42.5° e 45.6°. Estes picos correspondem aos planos cristalográficos (100), (101), (110), (102), (200) e (112) do quartzo, respectivamente.

A concordância entre as posições dos picos observados e os valores de referência confirma a predominância de quartzo na amostra analisada. Além disso, as reflexões observadas no padrão de difração com picos nas posições de 2θ de 8.8° , 17.8° , 19.4° , 27.6° , 35.0° , 37.6° e 42.4° correspondendo aos planos cristalográficos (001), (002), (110), (112), (004), (113) e (024), e da annita, respectivamente, sugerem a presença de impurezas nas amostras, natural pela sua natureza de ser um rejeito de mineração.

Para a análise quantitativa, as intensidades dos picos de difração foram comparadas com as intensidades relativas da carta padrão. O quartzo puro deve apresentar intensidades que correspondem às da carta de referência. Qualquer desvio ou picos adicionais indicariam a presença de impurezas ou outras fases cristalinas na amostra. No caso desta análise, a correspondência imprecisa sugere que a amostra é predominantemente composta por quartzo com contaminação.

3.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 5 ilustra o resultado obtido para a microscopia eletrônica de varredura do resíduo de quartzito.

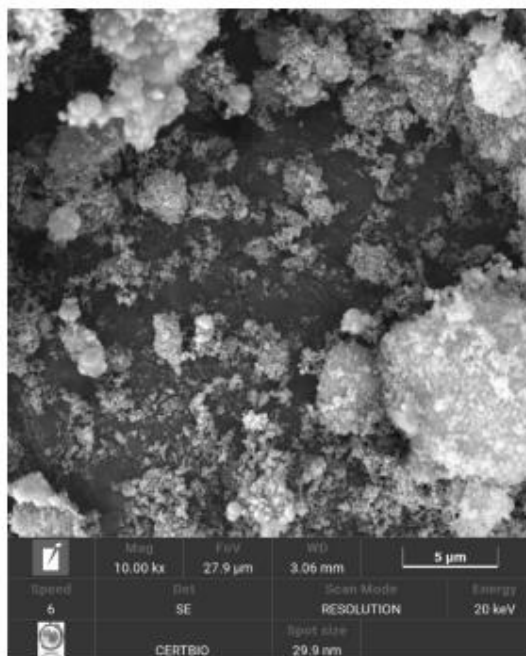


Figura 5. Ensaio de MEV do resíduo de quartzito

A micrografia apresentada na Figura 4, revela uma superfície composta por grãos de quartzo bem cimentados, característica distintiva do quartzito. Os grãos

apresentam formas arredondadas a sub arredondadas, indicando muita recristalização.

Observa-se a presença de contatos intergranulares bem definidos, sugerindo um processo de metamorfismo que resultou na recristalização do quartzo. Além disso, a imagem mostra uma textura intergranular compacta, com poucos poros e microfissuras, indicando uma alta resistência mecânica. A superfície dos grãos de quartzo exibe uma textura lisa e homogênea, sem sinais significativos de dissolução ou alteração química.

4. Conclusão

Os ensaios confirmam que o resíduo de quartzito é predominantemente silicoso, com $\text{SiO}_2 \approx 78,9\%$, além de $\text{Al}_2\text{O}_3 \sim 14,7\%$ e menores teores de K_2O e MgO , seguidos por óxidos traço (Fe_2O_3 , CaO , TiO_2 , SO_3 , entre outros). Essa composição é compatível com materiais de alta dureza e baixa reatividade química em condições ambientais, caracterizando um insumo essencialmente inerte do ponto de vista pozolânico imediato.

A DRX evidencia o quartzo como fase cristalina principal (reflexões típicas em $2\theta \sim 20,9^\circ$, $26,6^\circ$, $36,5^\circ$, $39,5^\circ$, $42,5^\circ$ e $45,6^\circ$), com fases acessórias (picos associados à annita), condizentes com a natureza residual do material. A predominância quartzosa sustenta a interpretação de baixa atividade química e de um papel majoritariamente físico quando incorporado a misturas solo-resíduo.

As micrografias de MEV mostram textura intergranular compacta, grãos de quartzo bem cimentados, pouca porosidade e ausência de sinais relevantes de alteração química superficial. Em conjunto, esses achados caracterizam um material quimicamente estável e de alta dureza, cuja contribuição, quando incorporado a solos, se dá predominantemente por mecanismos físicos: o efeito *filler* e a melhora do empacotamento reduzem o índice de vazios e tendem a refletir em incrementos de desempenho mecânico (p. ex., CBR/UCS) por adensamento e ajuste granulométrico da matriz.

A ausência de fases altamente reativas indica que efeitos cimentantes autógenos não são esperados em condições ambientais; logo, ganhos químicos demandam coestabilização com aglomerantes (cal e/ou cimento) e, se pertinente, ativação alcalina e/ou maior finura para estimular reações pozolânicas. A presença

acessória de anita não altera a interpretação global, mas recomenda monitoramento de variabilidade entre lotes.

Em síntese, o Resíduo de quartzito mostra-se apto como estabilizante físico em sistemas solo–resíduo, cabendo à etapa subsequente de validação mecânica (CBR, UCS, módulo resiliente, perda por imersão e sensibilidade à umidade) definir faixas ótimas de incorporação conforme a natureza do solo alvo.

Referências

ABIROCHAS. **O setor brasileiro de rochas ornamentais. Informe ABIROCHAS 05/2018**. Brasília: Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais, 2018. Disponível em: https://abirochas.com.br/wp-content/uploads/2022/01/Informe_05_2018_Setor_de_Rochas_Ornamentais_c.pdf. Acesso em: 30 set. 2025.

ALECRIM, A. V.; FABBRI, G. T. P.; BERNUCCI, L. B.; MOURA, E. (2009). **Estudo do Resíduo de Quartzito para emprego em sub-base e base de pavimentos**. In: 16a Reunião de Pavimentação Urbana, Belo Horizonte, MG.

JÚNIOR, C. M. D.; BARROS, S. V. A.; NEVES, G. A. Utilização de resíduos de quartzito para aplicação em pavimentos intertravados. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 13, n. 3, p. 196–200, 2018. ISSN 1809-8797. Disponível em: <https://remap.revistas.ufcg.edu.br/index.php/remap/article/download/687/463>. Acesso em: 30 set. 2025.

SARAIVA, S. L. C. **Metodologia e Análise Experimental do Comportamento Geotécnico da Estrutura de Pavimentos Rodoviários**. Tese de M. Sc., Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 123p.

Abstract

The increasing demand for aggregates in road infrastructure and the need to mitigate environmental impacts from mineral extraction motivate the search for lower-footprint alternatives. This study investigates quartzite residue (QR)—a by-product of the ornamental stone industry—as an input for soil stabilization in pavements. The approach comprised physicochemical characterization by X-ray fluorescence (XRF), X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). XRF revealed a silica-rich composition ($\text{SiO}_2 = 78.857\%$), with $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.790\%$, $\text{K}_2\text{O} = 2.908\%$, $\text{MgO} = 2.042\%$, and minor oxides at trace levels (e.g., Fe_2O_3 , CaO , SO_3 , TiO_2). The results support the valorization of QR as a technically sound option aligned with pavement sustainability goals, while subsequent stages should verify mechanical performance (e.g., CBR/UCS, resilient modulus, durability) to establish optimal incorporation ranges for lateritic soils.

Keywords: Physicochemical characterization, filler effect, soil stabilization, pavements.

BIOACUMULAÇÃO DE ELEMENTOS TRAÇOS EM BRÂNKIAS E HEPATOPÂNCREAS DE *Ucides cordatus* (CRUSTACEA, DECAPODA) COMO INFERÊNCIA DA QUALIDADE AMBIENTAL DE MANGUEZAIS DA COSTA AMAZÔNICA MARANHENSE

Wanda Batista de Jesus¹, Raimundo Nonato Diniz Costa Filho², Raimunda Nonata Fortes Carvalho Neta³, Ligia Tchaicka⁴ & Débora Batista Pinheiro Sousa⁵

¹Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia (REDE BIONORTE)

²Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

³Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia (REDE BIONORTE)

⁴Universidade Estadual do Maranhão (UEMA). Departamento de Química e Biologia (UEMA)

⁵Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia (REDE BIONORTE)

Resumo

Neste estudo, objetivou-se avaliar concentrações de elementos traços em brânquias e hepatopâncreas do caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*) de quatro manguezais da costa Amazônica maranhense. Foram selecionadas quatro áreas, três inseridas no Complexo Portuário e Industrial de São Luís e uma na Área de Proteção Ambiental. Caranguejos machos adultos foram capturados dos manguezais. As brânquias e hepatopâncreas passaram por análise dos elementos-traço (Cobre -Cu, Ferro -Fe, Manganês - Mn, Níquel - Ni, Chumbo - Pb e Zinco - Zn) através da técnica de Espectrometria de Absorção Atômica de Chama. O Fe apresentou maior concentração (estação chuvosa e de estiagem) nos hepatopâncreas e nas brânquias dos caranguejos, na área mais impacta, provavelmente pela movimentação de cargas na região industrial e portuária. As brânquias tiveram altas concentrações de Fe em comparação com o hepatopâncreas. Esses dados reforçam a necessidade da implementação de políticas públicas para a conservação dos caranguejos e das áreas de manguezais.

Palavras-chave: Caranguejo-uçá; Contaminação; Órgãos de exposição; Poluição; Porto.

¹ São Luís, Maranhão. E-mail: wandadossantosbatista@gmail.com

² Balsas, Maranhão. E-mail: raimundo.diniz@ufma.br

³ São Luís, Maranhão. E-mail: raifortes@gmail.com

⁴ São Luís, Maranhão. E-mail: ligiatchaicka@professor.uema.br

⁵ Balsas, Maranhão. E-mail: debora.batista@ufma.br

1. Introdução

O complexo industrial e portuário de São Luís, está localizado na Baía de São Marcos, e vem sendo considerado o segundo mais importante em termos de movimentações de cargas da América Latina (Carvalho Neta *et al.*, 2019). Por outro lado, essas zonas industriais e portuárias têm gerado impactos de suas atividades que não são favoráveis aos manguezais próximos e à biota aquática (Jesus *et al.*, 2021). No contexto histórico da Baía de São Marcos, estudos registraram a contaminação química por elementos traços (Jesus *et al.*, 2021; Torres *et al.*, 2024) nos tecidos de peixes e caranguejos, em sedimentos e água (Jesus *et al.*, 2021; Macedo *et al.*, 2024; Oliveira *et al.*, 2023).

O manguezal é o ecossistema mais afetado pela contaminação por substâncias químicas na Baía de São Marcos (Jesus *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2023). Essas substâncias podem causar efeitos deletérios sobre a biota aquática, comprometendo a sustentabilidade dos ecossistemas e a sanidade das espécies residentes (Jesus *et al.*, 2021). Uma das espécies ameaçadas pela contaminação por elementos traços é o caranguejo *Ucides cordatus*.

U. cordatus (Linnaeus, 1763) é um caranguejo semiterrestre crucial para a manutenção de ambientes de manguezal (Duarte *et al.*, 2016; Jesus *et al.*, 2021). Esta espécie é altamente sensível a poluentes químicos, servindo como indicador da qualidade ambiental em manguezais (Jesus *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2023). Um estudo realizado por Jesus *et al.* (2021) demonstrou a presença de elementos traços nos tecidos musculares de *U. cordatus* em regiões próximas a empreendimentos industriais e portuários na Baía de São Marcos no Maranhão. Duarte *et al.* (2020) estudaram a toxicidade de chumbo em diferentes tecidos da espécie *U. cordatus* em manguezais com diferentes estados de conservação no litoral sul do estado de São Paulo, Brasil. Assim, a espécie apresenta facilidade em bioacumular elementos traços, sendo uma característica útil para o monitoramento da poluição ambiental.

O biomonitoramento em regiões portuárias é uma prática crucial para avaliar a qualidade ambiental dos ecossistemas próximos de áreas com intenso tráfego marítimo, como portos e terminais de carga (Jesus *et al.*, 2021; Oliveira, *et al.*, 2023). O biomonitoramento através da metodologia de bioacumulação de elementos traços em órgãos específicos das espécies submetidas ao estresse ambiental é uma alternativa eficaz no diagnostico rápido dos impactos ambientais, pois a

bioacumulação avalia os poluentes que se acumulam em tecidos e órgãos de organismos ao longo da cadeia alimentar (Pinheiro *et al*, 2013). Sendo assim, objetivou-se avaliar concentrações de elementos traços em brânquias e hepatopâncreas do caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*) de quatro manguezais da costa Amazônica maranhense.

2. Metodologia

2.1. Área de estudo

As coletas foram realizadas em quatro áreas de estudos (Figura 1). A primeira P1- Ilha dos Caranguejos (sob coordenadas 02°50'26 S" e 44° 30'61" W), é uma Área de Proteção Ambiental da Baixada Maranhense. Estudo nessa região realizado por Jesus *et al* (2021) descreve a Ilha dos Caranguejos sendo uma área de baixo impacto sendo adequada como área de referência porque é uma reserva natural desde 1991 (APA ¼ Área de Proteção Ambiental) que não é fortemente impactada pelo complexo portuário da baía.

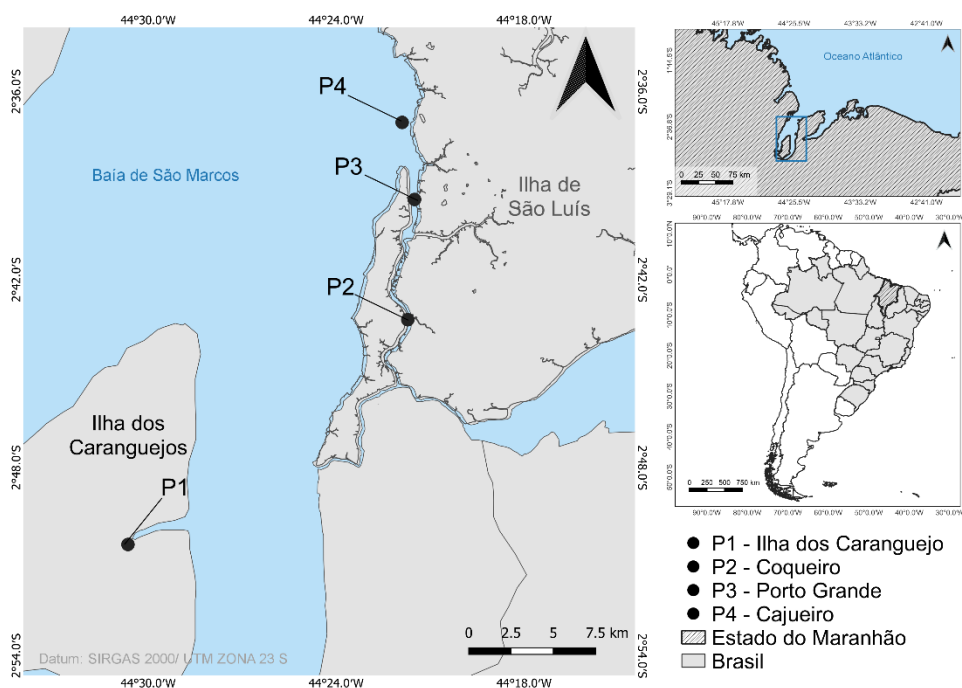


Figura 1. Mapa de localização das áreas de estudos P1- Ilha dos Caranguejos (Área de Proteção Ambiental), P2- Coqueiro, P3 – Porto Grande e P4- Cajueiro (Áreas inseridas no Complexo Portuário e Industrial).

O Complexo Portuário e Industrial de São Luís (área potencialmente impactada) estão inseridas as seguintes áreas: P1- Coqueiro (sob coordenadas 02°40',21" S e 44° 21'65" W), neste local observou-se além da instalação do porto da ALUMAR de propriedade da empresa Consórcio Alumínio do Maranhão (Alcoa, BHP Billiton e Rio Tinto Alcan), uma grande concentração de casas e bares próximos do ecossistema manguezal nessa localidade. P3- Porto Grande (sob coordenadas 02° 45'77" S e 44° 21'28" W) o local apresenta uma intensa movimentação de navios no Porto da Alumar/Alcoa, onde ocorre a movimentação de produtos químicos tais como o alumínio/alumina e bauxita. Além disso, nas proximidades são observados locais com embarcações atracadas e outros servindo para a limpeza de embarcações. A4 está localizada na comunidade de P4- Cajueiro (sob coordenadas 02° 36'93" S e 44° 21'52"W), fica a poucos metros do Complexo do Itaqui (Porto do Itaqui, Terminal pesqueiro do Porto Grande, Terminal da Ponta da Espera, Terminal do Cujepe e Terminal de São José de Ribamar) e próximo ao Terminal marítimo da Ponta da Madeira (propriedade da empresa VALE/SA) local de intensa movimentação de embarcações.

2.2. Amostragem do material biológico

As coletas dos caranguejos foram feitas em duas épocas do ano chuvosa e estiagem, nos meses de março e agosto em dois anos (2023 e 2024). De cada área amostral foram coletados 10 exemplares de caranguejos totalizando um "n" amostral de 160 indivíduos em cada campanha de coleta. Somente indivíduos machos adultos foram analisados neste estudo seguindo a metodologia adotada por Pinheiro; Fiscarelli (2001) que avaliam o formato do abdômen, o estágio e maturação das gônadas dos machos adultos e também o tamanho da toca em que esses animais vivem. Todos os exemplares foram retirados de dentro de suas tocas aleatoriamente, por meio da técnica de braceamento, que consiste na retirada do caranguejo utilizando-se do braço esticado até o fundo da toca.

A autorização legal para execução das coletas e captura dos caranguejos foi obtida junto à SEMA/SIGEP (Número de autorização A11-2023, número de processo 2303140033) que emitiu parecer favorável à coleta dos exemplares. Os exemplares foram levados em caixa de isopor com gelo para o laboratório. Em laboratório as amostras de brânquias e hepatopâncreas de cada exemplar foram retiradas e

armazenadas em sacos plásticos e congeladas para posteriores análises de elementos traços.

2.3. Análise dos elementos traços

As amostras de caranguejos, compostas por hepatopâncreas e brânquias, foram individualmente pesadas em potes coletores esterilizados, utilizando-se uma balança analítica digital (Shimadzu 220 g – modelo AUW 220d), com o intuito de determinar a massa úmida de cada amostra. Após 72 horas, as amostras congeladas foram submetidas ao processo de liofilização (Terroni, Série 500), durante um período de 120 horas. Concluído o processo, as amostras foram novamente pesadas, individualmente, com o objetivo de obter a massa seca. A partir da diferença entre os valores de massa úmida e seca, foi possível calcular o teor de água presente em cada amostra. Às amostras previamente liofilizadas foram adicionados 3,0 mL de ácido nítrico (HNO₃, 65% - para análise – Marca Sigma Aldrich EMSURE® - Reag. pH Eur, ISO-P.A.). Posteriormente, as amostras foram submetidas à evaporação em chapa aquecedora retangular (QUIMIS, Q313I) mantida a 120 °C. Após a completa evaporação, adicionaram-se 2,0 mL de ácido clorídrico (HCl, 37% fumegante - para análise – Marca Sigma Aldrich EMSURE® - ACS, ISSO, Reag. pH Eur, - P.A.) e as amostras foram novamente colocadas na chapa aquecedora para a volatilização completa. Em seguida, realizou-se a ressuspensão dos resíduos com 15 mL de ácido clorídrico a 0,1 N. Por fim, as soluções foram filtradas utilizando filtros de celulose com porosidade de 0,45 µm (Whatman).

A análise dos elementos-traço (Cobre -Cu, Ferro -Fe, Manganês - Mn, Níquel - Ni, Chumbo - Pb e Zinco - Zn) nas amostras foi feita por um Espectrometria de Absorção Atômica de Chama (A Analyst 400, Perkin Elmer, Waltham, EUA). Durante todas as análises visando garantir maior confiabilidade e controle analítico, as amostras foram acompanhadas por três brancos e três materiais de referência certificados (MRC), sendo a National Research Canada (DORM – 2), EnviroMAT, SCP SCIENCE (SS-2 Soil) e Supelco – Merck (Fresh Water Sediment – CRM016). O método de Akan *et al.* (2012) foi utilizado de forma adaptado para a extração química e posteriormente a sua determinação.

3. Resultados e discussão

A tabela 1 apresenta as médias e desvio-padrão dos níveis de elementos traços em tecidos de hepatopâncreas do caranguejo *U. cordatus* capturado nas áreas de estudos, em duas estações sazonais uma chuvosa e outra de estiagem. As concentrações dos elementos traços Cu, Mn, Ni, Pb e Zn em hepatopâncreas de caranguejos foram altas nas áreas inseridas no complexo portuário e industrial P2, P3 e P4, em comparação com a Área de Proteção Ambiental (P1), para as duas estações sazonais.

Contudo, na estiagem os indivíduos de caranguejos apresentaram médias altas de concentração de Cu em todas as áreas de estudo quando comparado com a estação chuvosa. A ordem de bioacumulação de metais nesse tecido é Fe>Cu>Mn>Zn>Ni>Pb nos caranguejos coletados na estação chuvosa em todas as áreas. Por outro lado, na estiagem a ordem de bioacumulação no tecido de hepatopâncreas é de em P1 e P3- Fe>Cu>Mn>Zn>Ni>Pb e em P2 e P4 – Fe>Cu>Zn>Mn>Ni>Pb.

Tabela 1. Elementos traços em hepatopâncreas de *Ucides cordatus* capturados em três áreas inseridas no Complexo Portuário e Industrial de São Luís e em uma Área de Proteção Ambiental.

Elementos traços (mg/kg)	Hepatopâncreas -Chuvoso			
	P1	P2	P3	P4
Cu	93.73±86.2	102.9±105.7	94.1±78.9	108.5±95.1
Fe	1701.6±1776.9	441.0±539.6	619.2±588.2	466.7±409.3
Mn	41.9±21.8	91.93±92.0	18.9±7.5	16.5±3.2
Ni	7.23±4.4	29.1±32.4	5.2±4.2	4.3±2.5
Pb	2.7±1.7	1.9±1.8	0.5±0.2	0.8±0.2
Zn	33.9±2.4	88.2±83.4	31.1±12.5	31.3±7.2
Hepatopâncreas –Estiagem				
Cu	132.3±123.1	203.3±166.0	217.8±135.7	243.0±155.7
Fe	1373.7±1575.0	996.0±1007.2	1337.5±1105.9	533.5±363.1
Mn	90.4±83.4	35.5±6.9	116.0±119.0	30.8±17.4
Ni	4.0±1.5	7.1±5.1	10.87±7.7	8.5±10.7
Pb	2.5±2.0	2.1±1.6	3.1±2.0	0.8±0.7
Zn	46.3±6.5	52.6±2.4	64.0±7.3	63.5±42.1

Neste estudo o ferro foi o elemento traço com maior concentração no tecido de hepatopâncreas em caranguejos sendo que na estiagem essa concentração foi maior quando comparado com a chuvosa. O Cu também apresentou níveis de bioacumulação elevadas em tecidos de hepatopâncreas em *U. cordatus*, principalmente nos indivíduos coletados nas áreas do complexo portuário e industrial. Da mesma forma, Jesus *et al.* (2021) verificou presença de Cu em músculo de *U. cordatus* e Macedo *et al.* (2024) em sedimentos coletados na baía de São Marcos no Maranhão, uma região considerada de intenso impacto ambiental decorrente as atividades portuária e industrial nessa área.

A tabela 2 apresenta as médias e desvio-padrão dos níveis de elementos traços em brânquias de caranguejos *U. cordatus* de cada área de estudo, em duas estações sazonais chuvosa e de estiagem. As médias de concentrações dos elementos traços em brânquias de caranguejos variaram entre as áreas de estudo. As concentrações de Cu, Fe e Pb foram altas nos tecidos das brânquias dos exemplares de P1 na estação chuvosa, e concentrações baixas nos tecidos das brânquias dos caranguejos das demais áreas.

Por outro lado, a concentração de Cu nas brânquias de caranguejos coletados na estiagem apresentou médias maiores em P2 e P4. E ainda na estiagem em P2 todos os elementos traços apresentaram as maiores médias de concentrações nos tecidos das brânquias em comparação com as demais áreas.

A ordem de bioacumulação de elementos traços nesse tecido em P1, P2 e P4 na estação chuvosa é Fe>Cu>Mn>Zn>Ni>Pb. A ordem de bioacumulação em P3 na estação chuvosa é Fe>Cu>Zn>Mn>Ni>Pb. Na estação de estiagem a ordem de bioacumulação no tecido das brânquias é P1 e P4- Fe>Cu>Zn>Mn>Ni>Pb em P2 – Fe>Zn>Mn>Cu>Ni>Pb e P3 – Fe>Mn>Cu>Zn>Ni>Pb.

Tabela 2. Elementos traços em brânquias de *Ucides cordatus* capturados em três áreas inseridas no Complexo Portuário e Industrial de São Luís e em uma Área de Proteção Ambiental.

Elementos traços ((mg/kg))	Brânquias -Chuvoso			
	P1	P2	P3	P4
Cu	145.0±62.7	65.8±38.8	50.6±24.4	36.7±5.3
Fe	4443.5±4251.8	3416.6±3434.2	1775.3±1539.5	1596.7±1578.4
Mn	70.0±28.0	79.1±24.1	40.6±15.5	30.6±29.1
Ni	9.8±6.3	9.5±6.3	11.9±9.9	1.1±1.1
Pb	6.2±4.5	4.3±2.8	3.1±1.4	2.2±1.8
Zn	44.6±11.5	50.0±18.3	42.9±13.2	22.2±17.1
Brânquias –Estiagem				
Cu	85.5±18.3	93.2±28.3	69.0±4.3	127.8±55.4
Fe	398.0±377.7	1477.7±1817.4	1437.0±1240.3	374.6±267.5
Mn	22.6±5.5	123.5±148.7	96.5±71.2	32.8±7.8
Ni	4.8±4.7	50.1±79.3	5.5±3.8	3.9±3.1
Pb	1.8±1.6	7.2±6.8	3.1±2.6	2.0±2.4
Zn	58.0±18.7	223.9±282.8	48.2±3.6	64.3±21.2

Nos tecidos de brânquias de caranguejos o Fe também se mostrou com concentrações altas, principalmente na estação chuvosa. Geralmente, os estudos apontam que o Fe é o elemento traço que mais se acumula nos tecidos de brânquias e fígados de peixes (Akan *et al.*, 2012). Da mesma forma, esse elemento traço também foi alto nos tecidos de caranguejos neste estudo.

Neste estudo os níveis de bioacumulação em relação as áreas e estação variaram, sendo que o Cu por exemplo no hepatopâncreas foi elevado nos caranguejos coletados na região portuária e industrial, por outro lado, em brânquias esse elemento traço teve um valor de concentração alta na área de proteção ambiental.

Sendo assim, os elementos traços eles podem se comportar de maneira diferentes nos organismos, o que pode estar relacionado com o tempo de exposição do organismo com o metal, a área com maior impacto e disponibilidade de elementos traços, a estação do ano e até mesmo os fatores bióticos como salinidade, pH entre outros fatores. Alguns elementos traços essenciais são importantes para o organismo,

porem em excesso pode se tóxico e ocasionar problemas na sanidade dos organismos aquáticos (Duarte *et. al.*, 2020).

4. Conclusão

O Fe foi o elemento traço mais concentrado nos hepatopâncreas e brânquias indicando que este elemento traço é abundante nos manguezais em estudo. O Cu também foi o segundo elemento com maiores médias nos órgãos de *U. cordatus* principalmente nas áreas com manguezais próximos ao complexo portuário e industrial de São Luís. Os resultados acima apontam bioacumulação de elementos traços nos tecidos de brânquias e hepatopâncreas de caranguejos neste estudo. Esses dados reforçam a necessidade da implementação de políticas públicas para a conservação dos caranguejos e das áreas de manguezais.

Agradecimentos

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia (REDE BIONORTE) pelo ensino, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo de doutorado e pelo apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA).

Referências

AKAN, J. C., et al. Study on the distribution of heavy metals in different tissues of fishes from River Benue in Vinikilang, Adamawa State, Nigeria. **British Journal of Applied Science & Technology**, 2.4: 311, 2012.

DUARTE, L. F. A. et al. Multi-level biological responses in *Ucides cordatus* (Linnaeus, 1763)(Brachyura, Ucididae) as indicators of conservation status in mangrove areas from the western Atlantic. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 133: 176-187, 2016.

CARVALHO NETA, R. N. F. et al. Biochemical and morphological responses in *Ucides cordatus* (Crustacea, Decapoda) as indicators of contamination status in mangroves and port areas from northern Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, 26, 15884-15893. 2019.

JESUS, W. B. et al. Biomarcadores enzimáticos e histológicos em brânquias de *Ucides cordatus* (Linnaeus, 1763) (Crustacea, Brachyura, Ucididae) indicativos de impactos ambientais em uma região portuária do nordeste do Brasil. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 72, p. 1413-1423, 2020.

JESUS, W. B. et al. Biomarkers and occurrences of heavy metals in sediment and the bioaccumulation of metals in crabs (*Ucides cordatus*) in impacted mangroves on the Amazon coast, Brazil. **Chemosphere**, 271, 129444. 2021.

MACEDO, G. H. R. V. et al. Histological biomarkers and microbiological parameters of an estuarine fish from the Brazilian Amazon coast as potential indicators of risk to human health. **Environmental Monitoring and Assessment**, 196(7), 626. 2024.

OLIVEIRA, S. R.S. et al. Biomarkers and health status of the crab *Ucides cordatus* to assess the impact of contaminants in an estuarine mangrove region in the Brazilian Amazon. **Gaia Scientia**, 17(1), 153-167. 2023.

PINHEIRO, M. A. A.; FISCARELLI, A. G. **Manual de apoio à fiscalização do caranguejo-uçá**. Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) /Centro de Pesquisa e Extensão Pesqueira das Regiões Sudeste e Sul (CEPSUL) 1ª ed. Itajaí, 60 p. 2001.

PINHEIRO, M. A. A., et al. Habitat monitoring and genotoxicity in *Ucides cordatus* (Crustacea: Ucidiidae), as tools to manage a mangrove reserve in southeastern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, 185.10: 8273-8285, 2013.

TORRES, H. S. et al. Oligoelementos e multibiomarcadores em *Sciades herzbergii* (Pisces, Ariidae) para monitoramento de áreas portuárias no litoral norte da Amazônia, Brasil. **Estudos Regionais em Ciências Marinhas**, 77, 103656. 2024.

Abstract

This study aimed to evaluate trace element concentrations in the gills and hepatopancreas of the fiddler crab (*Ucides cordatus*) from four mangrove forests on the Amazonian coast of Maranhão. Four areas were selected: three located within the São Luís Port and Industrial Complex and one in an Environmental Protection Area. Adult male crabs were captured from the mangrove forests. The gills and hepatopancreas were analyzed for trace elements (Copper - Cu, Iron - Fe, Manganese - Mn, Nickel - Ni, Lead - Pb, and Zinc - Zn) using Flame Atomic Absorption Spectrometry. Iron showed the highest concentration (rainy and dry seasons) in the hepatopancreas and gills of the crabs in the most impacted area, likely due to cargo handling in the industrial and port region. The gills had high concentrations of iron compared to the hepatopancreas. This data reinforces the need for the implementation of public policies for the conservation of crabs and mangrove areas.

Keywords: Uçá crab; Contamination; Exposure organs; Pollution; Port.

BIOECONOMIA DA BIOMASSA RESIDUAL AGRÍCOLA NA REGIÃO SUL MARANHENSE

Maria de Jesus Cavalcante dos Santos ¹, Gislane Pinho de Oliveira ¹, Regina Maria Mendes Oliveira ¹ & Diego Lima Medeiros ¹

¹Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências de Balsas (CCBL)

Resumo

Este estudo avalia o potencial da biomassa agrícola na região Sul Maranhense com ênfase no município de Balsas. Foi analisado o potencial de aproveitamento das biomassas residuais de soja, milho e cana-de-açúcar, as quais são oriundas dos principais cultivos da região. A utilização da biomassa residual gerada em Balsas para a produção de eletricidade é capaz de abastecer a demanda da população do município. A análise de custos de coleta e transporte revela que o preço final da biomassa residual é competitivo e pode contribuir na geração de receita anual, sendo em média 280 milhões de reais para o Maranhão, 202 milhões de reais para o Sul Maranhense e 69 milhões de reais para Balsas. O aproveitamento da biomassa agrícola representa uma oportunidade para o desenvolvimento econômico e a sustentabilidade ambiental, a qual pode fornecer uma fonte de energia renovável, melhorar a rentabilidade dos cultivos e fortalecer a economia regional.

Palavras-chave: Bioeconomia; Biotecnologia; Biomassa residual agrícola.

1. Introdução

O Brasil tem se destacado globalmente no setor de agronegócio, o qual é impulsionado por avanços tecnológicos que transformam processos naturais e geram impactos ambientais. Dentro desse contexto, a bioeconomia emerge como uma ciência que integra o crescimento econômico com a sustentabilidade ambiental por meio do uso responsável da biomassa e das biotecnologias disponíveis (Mejias *et al.*, 2019). Sendo assim, a bioeconomia foca em promover um crescimento econômico que minimize impactos ambientais, enquanto a biotecnologia oferece as ferramentas e técnicas para alcançar esses objetivos (Juma; Konde, 2001).

Esta pesquisa objetivou analisar o potencial de oferta de biomassa residual na região Sul Maranhense e o seu potencial energético e econômico para agregar valor ao setor agrícola. Foram identificados os cultivos agrícolas com maiores produções e estimados os potenciais de aproveitamento mássico, assim como o conteúdo energético e ganho econômico das biomassas residuais mais relevantes no Maranhão, Sul Maranhense e Balsas. O potencial de oferta de energia de biomassa

¹ Rodovia MA-140, Km 4, s/n, CEP 65.800-000, Balsas-MA.

E-mail: maria.cavalcante@discente.ufma.br, gislane.oliveira@ufma.br, regina.oliveira@ufma.br & diego.lm@ufma.br, respectivamente.

obter biomassa residual disponível (BRD) por produto agrícola para colheita, transporte e processamento usa-se a Equação 2.

$$BRD = BRG \times (100\% - \% \text{ que fica no solo}) \quad (2)$$

Além disso, com a BRD por produto agrícola, foi estimado o conteúdo energético da biomassa residual (CEB), através da Equação 3.

$$CEB = BRD \times \text{Conteúdo energético unitário da biomassa residual} \quad (3)$$

Para realizar uma comparação do consumo de energia residencial em relação ao potencial energético da biomassa residual disponível, foram coletados os valores do consumo per capita (CPC) do Maranhão de 37,2 kWh/(hab.mês) em 2017.

Dessa maneira, a análise foi realizada para o município de Balsas com os dados da população do município no ano base 2017, que de acordo com o site ATLASBRASIL (2024) foi de 94.779 pessoas. No qual, foi possível calcular o consumo de energia elétrica (CEE) com a utilização da Equação 4, e analisar a capacidade de geração através das biomassas residuais agrícolas.

$$CEE = \text{valor médio do CPC} \times \text{população} \quad (4)$$

Para a conversão do conteúdo energético da biomassa residual disponível de megajoule para quilowatt-hora, utilizou-se a divisão do conteúdo energético por 3,6 MJ/kWh. Sabendo que no processo de geração de energia a partir da biomassa, nem toda a energia vira eletricidade, sendo assim, considerou que a conversão de energia térmica em elétrica seja 30% do seu potencial, obtemos um potencial realista de geração de energia elétrica com a biomassa disponível nos cultivos.

Considerando que o custo logístico seja 60% do preço final da biomassa a ser entregue, o qual é combinado ao lucro de 10% e gastos com tributos de 30% em média, estima-se a receita unitária com base na composição do preço de venda da biomassa colhida e transportada com a Equação 5.

$$\text{Receita unitária} = \text{Custo} + \text{Lucro} + \text{Tributos} \quad (5)$$

A receita unitária é composta de 60% de Custo, 10% de Lucro e 30% de Tributos. Sendo assim, ao realizar a multiplicação desta receita unitária com a BRD do Maranhão, Sul Maranhense e Balsas, é estimada a receita total da biomassa (RTB) deste subproduto da agricultura na economia das áreas em estudo com a Equação 6.

$$RTB = BRD \times \text{Receita unitária da biomassa} \quad (6)$$

3. Resultados e discussão

Ao realizar a análise dos maiores cultivos na região Sul Maranhense, com o intuito de buscar formas de aproveitamento da biomassa disponível no agronegócio, foram encontrados no Censo Agro (IBGE, 2017a) dados que tornou viável identificar que os principais cultivos nas áreas em estudo milho, soja e cana de açúcar. A contribuição do Sul Maranhense em relação ao Maranhão para os cultivos de milho foi de 76,64 %, para os cultivos de soja 73,54 % e para os cultivos de cana de açúcar 51,28 %.

A busca pelos coeficientes técnicos e econômicos por produto agrícola, teve o intuito de estimar o potencial de aproveitamento da biomassa agrícola da região. A obtenção desses coeficientes foi em análises bibliográficas de variadas fontes, na qual, para cada cultivo obteve-se os dados demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1. Coeficientes técnicos e econômicos por produto agrícola

Produto	Biomassa residual gerada por produto agrícola (t/t)	Conteúdo energético unitário da biomassa residual (MJ/t)	Preço unitário da biomassa residual (R\$/t)
Milho – Grão	1,96	17700	63
Soja – Grão	2,12	14600	63
Cana de açúcar	0,27	5927	63

Tonelada (t).

Fonte: Autoria própria com dados obtidos na pesquisa.

As quantidades de biomassa residual dos produtos agrícolas foram estimadas para o Maranhão, Sul Maranhense e Balsas (Tabela 2).

Tabela 2. Biomassa residual gerada por produto agrícola para o Maranhão, Sul Maranhense e Balsas em 2017.

Produto	Maranhão (t/ano)	Sul Maranhense (t/ano)	Balsas (t/ano)
Milho – Grão	2.776.030,32	2.127.603,52	923.818,56
Soja – Grão	4.111.148,52	3.023.357,44	958.818,76
Cana de açúcar – Bagaço e Palha	592.603,95	303.883,78	135,27
Total	7.479.782,79	5.454.844,74	1.882.772,59

Tonelada (t).

Uma parte da biomassa gerada foi desconsiderada nesta análise, já que parte dela tem grande papel na proteção do solo e conservação de suas características para o próximo plantio. Na Tabela 3, apresenta-se a biomassa residual por produto agrícola

disponível para o aproveitamento e os percentuais mássicos que devem ser mantidos em campo para a proteção do solo.

Tabela 3. Biomassa residual disponível para o aproveitamento por produto agrícola em 2017.

Produto	Maranhão (t/ano)	Sul Maranhense (t/ano)	Balsas (t/ano)	Quantidade que fica no solo (t/t)
Milho – Grão	1.110.412,13	851.041,41	369.527,42	60%
Soja – Grão	1.233.344,56	907.007,23	287.645,63	70%
Cana de açúcar – Bagaço e Palha	296.301,98	151.941,89	67,64	50%
Total	2.640.058,66	1.909.990,53	657.240,69	-

Tonelada (t). A quantidade que fica no solo é referente a biomassa gerada (Tabela 2).

Os conteúdos energéticos da biomassa residual gerada por produto agrícola são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Conteúdo energético da biomassa residual disponível por produto agrícola em 2017.

Produto	Maranhão (MJ/ano)	Sul Maranhense (MJ/ano)	Balsas (MJ/ano)
Milho – Grão	19.654.294.666	15.063.432.922	6.540.635.405
Soja – Grão	18.006.830.518	13.242.305.587	4.199.626.169
Cana de açúcar – Bagaço e Palha	1.756.472.192	900.708.475	400.939
Total	39.417.597.375	29.206.446.984	10.740.662.513

Megajoule (MJ).

Dessa maneira, o conteúdo energético da biomassa residual disponível (Tabela 4) foi convertido de MJ para kWh através da divisão do conteúdo energético por 3,6 MJ/kWh. No processo de geração de energia a partir da biomassa, nem toda a energia vira eletricidade ao final do processo. Dessa forma, ao considerar que a conversão de energia térmica em elétrica seja 30% do seu potencial, obtemos um potencial realista de geração de energia elétrica com a biomassa disponível nos cultivos, demonstrando a possibilidade de utilização desse tipo de material no próprio município. A Tabela 5 apresenta o potencial de produção de eletricidade a partir das biomassas agrícolas estudadas em 2017.

Tabela 5. Potencial de oferta de energia elétrica proveniente das biomassas agrícolas estudadas para o ano de 2017.

Produto	Maranhão (kWh/ano)	Sul Maranhense (kWh/ano)	Balsas (kWh/ano)
Milho – Grão	1.637.857.889	1.255.286.077	545.052.950
Soja – Grão	1.500.569.210	1.103.525.466	349.968.847
Cana de açúcar – Bagaço e Palha	146.372.683	75.059.040	33.412
Total	3.284.799.781	2.433.870.582	895.055.209

Quilowatt-hora (kWh).

Com o valor estimado da população do município de Balsas em 2017 multiplicado pelo CPC no Maranhão foi possível demonstrar que o município teve um consumo médio de energia de 3.525.778 *kWh/mês* em 2017, o qual representa um consumo médio anual de 42.309.345 *kWh/ano*. Dessa maneira, foi observado na Tabela 5 que o valor da energia elétrica potencial proveniente das biomassas agrícolas são capazes de suprir o consumo médio anual de eletricidade residencial do município de Balsas, tendo um excedente de 852.745.864 *kWh/ano* para os outros setores que consomem energia elétrica. Sendo assim, a biomassa residual agrícola apresenta um potencial significativo para geração de energia elétrica.

Sabendo que R\$ 63,67 é o valor do custo de cada tonelada, que faz parte de 60% do preço final por tonelada, estimou-se o preço final da tonelada em R\$ 106,12. Com essas informações podemos calcular também o valor de tributo e de lucro, a partir da Equação 5, sendo respectivamente R\$ 31,84 e R\$ 10,61 para cada tonelada coletada e transportada. Dessa maneira, estima-se o potencial de venda da biomassa agrícola residual de cada cultivo para as áreas em estudo, como demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6. Preço da biomassa residual disponível por produto agrícola.

Produto	Maranhão (R\$/ano)	Sul Maranhense (R\$/ano)	Balsas (R\$/ano)
Milho – Grão	117.836.935	90.312.514	39.214.250
Soja – Grão	130.882.524	96.251.607	30.524.954
Cana de açúcar – Bagaço e Palha	31.443.565	16.124.073	7.177
Total	280.163.025	202.688.194	69.746.381

Para estudo do Produto Interno Bruto (PIB) em Balsas foi analisado o valor do PIB per capita do ano de 2017 o qual foi obtido no Portal Cidades do IBGE (2024), de R\$32.137,37. Sendo assim, foi possível calcular o PIB do município usando o valor da

população do município no mesmo ano, sendo de R\$3.045.947.791. Utilizando a mesma fonte, com o intuito de realizar comparação, obteve-se o valor do PIB per capita do ano de 2021, valor mais recente disponível, sendo de R\$65.059,77. No site Data MPE Brasil (SEBRAE, 2024) tem-se o valor da população estimada para 2021, sendo de 96.951 pessoas, com isso foi possível dimensionar o PIB de 2021 sendo de R\$6.307.609.761.

Relacionando os valores obtidos de aproveitamento da biomassa com o PIB do ano de 2017, constatou-se que teria uma influência considerável dessa fonte de renda no PIB do município de Balsas para esse período, com cerca de 2,29% no PIB do município. Sendo um ganho relevante, pois no Brasil o PIB encerrou o ano de 2017 com crescimento de 1,0% em relação a 2016 (IBGE, 2017b). No qual, foi obtido também o valor do PIB per capita do ano de 2016, sendo de R\$ 25.529,28 para Balsas (IBGE, 2024), sendo assim, estima-se que Balsas teve uma taxa de crescimento do PIB de 28,00% em 2017, considerando o PIB per capita de R\$ 32.137,37 no final de 2017 e R\$ 25.529,28 no início de 2017, assumindo a mesma população.

Dessa maneira, com as modernizações tecnológicas que proporcionam o aumento de produtividade no setor agrícola, tende-se haver um crescimento econômico considerável neste setor, quando explorado. O processamento desta biomassa amplia as possibilidades de destinação desse material. Com isso, será necessário um estudo mais aprofundado dos dados e da viabilidade deste processamento, de forma a agregar um valor mais vantajoso a essa biomassa.

4. Conclusão

A análise dos principais cultivos na região Sul Maranhense foi utilizada para identificar o potencial da biomassa agrícola residual disponível do milho, da soja e da cana-de-açúcar como as principais culturas. Na pesquisa, foi demonstrado que a produção da soma dos três cultivos alcançou 5.484.679 t produzidas no Maranhão, 3.603.422 t no Sul Maranhense e 924.095 t em Balsas. De forma que, esse volume tem a possibilidade de gerar para aproveitamento de 2.640.058 t de biomassa disponível no Maranhão, 1.909.990 t no Sul Maranhense e 657.240 t em Balsas devido a necessidade de deixar uma parte da biomassa no campo para a manutenção do solo.

A análise demonstra que o conteúdo energético das biomassas disponíveis dos cultivos em estudo tem um alto potencial para geração de energia, apresentado 3.211.519.402 *kWh/ano* para o Maranhão, 2.396.292.840 *kWh/ano* no Sul Maranhense e 895.038.482 *kWh/ano* em Balsas. Comparando com o consumo médio de energia para o município de Balsas em 2017 de 42.309.345 *kWh/ano*, foi identificado que a energia elétrica potencial proveniente das biomassas agrícolas têm a capacidade para atender ao consumo elétrico residencial de Balsas, no qual esse valor representa 4,7% do potencial de geração de energia a partir da biomassa agrícola das culturas em estudo, tendo um excedente de 852.745.864 *kWh/ano* para os outros setores que necessitam de abastecimento, como o comércio e as indústrias.

A análise dos custos de coleta e transporte da biomassa mostra que o preço final da biomassa residual foi estimado em R\$106,12 a tonelada, sendo um preço competitivo e podendo gerar receitas substanciais para os produtores. Os dados indicam que as biomassas agrícolas em estudo podem contribuir de forma significativa para a economia local, no qual tem-se uma influência considerável dessa fonte de renda no PIB do estado do Maranhão com cerca de 0,31%, elevando assim a receita dos produtores.

O aproveitamento da biomassa agrícola no Sul Maranhense, especialmente em Balsas, oferece uma oportunidade valiosa para o desenvolvimento econômico e a sustentabilidade ambiental. A integração dessa biomassa na matriz energética pode não apenas assegurar uma fonte de energia renovável complementar às hidrelétricas, mas também melhorar a rentabilidade dos cultivos e fortalecer a bioeconomia regional. Estudos adicionais sobre o processamento e a utilização da biomassa residual em diferentes fins apoiam a identificação de oportunidades para promover um desenvolvimento mais sustentável e competitivo.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) no Edital AGEUFMA Nº 21/2023 [Projeto de Pesquisa: PVBAL3376-2023].

Referências

ATLASBRASIL. Balsas, MA. **Atlas Brasil**, 2024. Disponível em:

<http://www.atlasbrasil.org.br/perfil/municipio/2101400>. Acesso em: 20 dez. 2024.

CONAB. **Manual de Levantamento de Custos de Produção 30.302-01. Sistema de Operações Subsistema de Gestão de Informações e Conhecimento**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2021.

SEBRAE. Data MPE Brasil. Balsas. **Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas**, 2024. Disponível em: <https://datampe.sebrae.com.br/profile/geo/balsas>. Acesso em: 29 dez. 2024.

IBGE. Censo Agro 2017. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2017a. Disponível em: https://censoagro2017.ibge.gov.br/templates/censo_agro/resultadosagro/agricultura.html?localidade=21&tema=76434. Acesso em: 20 nov. 2023.

IBGE. Portal cidades, Produto Interno Bruto - PIB. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2024. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/balsas/pesquisa/38/0?ano=2017>. Acesso em: 20 dez. 2024.

IBGE. Indicadores IBGE Contas Nacionais Trimestrais Indicadores de Volume e Valores Correntes 2017. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2017b. Disponível em: https://ftp.ibge.gov.br/Contas_Nacionais/Contas_Nacionais_Trimestrais/Fasciculo_Indicadores_IBGE/2017/pib-vol-val_201704caderno.pdf. Acesso em: 28 nov. 2024.

JUMA, C.; KONDE, V. **The New Bioeconomy - Industrial and Environmental Biotechnology in Developing Countries**. Genebra: United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD), 2001.

MEJIAS, R. G. *et al.* Bioeconomia e suas aplicações. **ÂNDÉ: Ciências e Humanidades**, v. 2, n. 3, p. 105-121, 2019.

Abstract

This study assesses the potential of agricultural biomass in the Southern Maranhão region, with an emphasis on the municipality of Balsas, Maranhão. The study analyzed the potential for utilizing residual biomass from soybeans, corn, and sugarcane, which are the region's main crops. Using residual biomass from Balsas to produce electricity is capable of supplying the needs of the municipality's population. An analysis of collection and transportation costs reveals that the final price of residual biomass is competitive and can lead to increased revenue, averaging R\$ 280 million for Maranhão, R\$ 202 million for the Southern Maranhão, and R\$ 69 million for Balsas. The use of agricultural biomass represents an opportunity for economic development and environmental sustainability, providing a renewable energy source, improving crop profitability, and strengthening the regional economy.

Keywords: Bioeconomy; Biotechnology; Agricultural residual biomass.

BIORREFINARIA DE MILHO EM PROL DA SUSTENTABILIDADE

Francisco Costa e Silva Neto ¹ & Diego Lima Medeiros ¹

¹ Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências de Balsas (CCBL)

Resumo

Esta pesquisa tem por finalidade apontar os impactos socioeconômicos e ambientais da produção de etanol de milho no Brasil. A metodologia adotada consiste na elaboração de uma análise crítica da literatura a fim de sintetizar os principais conceitos e estudos relacionados a fabricação de etanol de milho, coletando dados de indicadores socioeconômicos e ambientais e analisando desafios e oportunidades. Como resultado, constatou-se que o Brasil tem grande vantagem mundial na fabricação do etanol de milho e coprodutos, tais como os grãos secos de destilaria (DDGs), óleo e eletricidade, devido a disponibilidade de matéria-prima. Por fim, os resultados mostram que as emissões de gases de efeito estufa são inferiores aos combustíveis fósseis e ao etanol de milho norte-americano, contribuindo com a descarbonização do setor de energia e sendo fundamental para o desenvolvimento sustentável.

Palavras-chave: Biocombustível; Etanol de milho; Indicador de sustentabilidade.

1. Introdução

O Programa Nacional do Álcool (Pró-Álcool) no Brasil foi o marco da expansão do etanol devido a crise do petróleo em 1975. Essa iniciativa impulsionou a produção de etanol de cana-de-açúcar, levando a uma rápida adoção em larga escala. Na década de 1980, cerca de 90% dos carros vendidos no país eram movidos a etanol, consolidando o Brasil como líder global em biocombustíveis. O etanol de milho, por sua vez, ganhou expressão no país a partir de 2014, quando usinas de cana-de-açúcar começaram a se adaptar para processar milho durante a entressafra da cana. Essa inovação permitiu otimizar a capacidade produtiva das usinas e expandir a produção de biocombustíveis para regiões onde a cana não era viável, como o Centro-Oeste brasileiro (GAZETAWEB, 2024).

O objetivo deste trabalho é analisar indicadores técnicos, econômicos, sociais e ambientais de biorrefinarias de milho para identificar os desafios e oportunidades na tomada de decisão em prol da sustentabilidade. Para tanto, foi elaborado um referencial teórico sobre etanol de milho, coletado dados sobre a biorrefinaria milho e identificado desafios e oportunidades para a tomada de decisão em prol da sustentabilidade.

¹ Rodovia MA-140, Km 4, s/n, CEP 65.800-000, Balsas-MA.

E-mail: francisco.costa2@discente.ufma.br & diego.lm@ufma.br, respectivamente.

2. Metodologia

A metodologia deste trabalho consiste em uma análise crítica da literatura, com o objetivo de identificar e sintetizar os principais conceitos e estudos relacionados a produção de etanol de milho no Brasil, destacando a sua contribuição nos indicadores socioeconômicos e ambiental. Foram selecionados artigos científicos, publicações acadêmicas, portais de notícias, *sites* e relatórios de agências do setor para fundamentar o tema em estudo, utilizando as seguintes palavras-chave:

- Desenvolvimento sustentável;
- Biorrefinarias;
- Etanol de milho no Brasil;
- Agroindústria;
- Impactos socioeconômicos;
- Impacto ambiental.

O procedimento metodológico seguido nesta pesquisa é resumido na Figura 1.

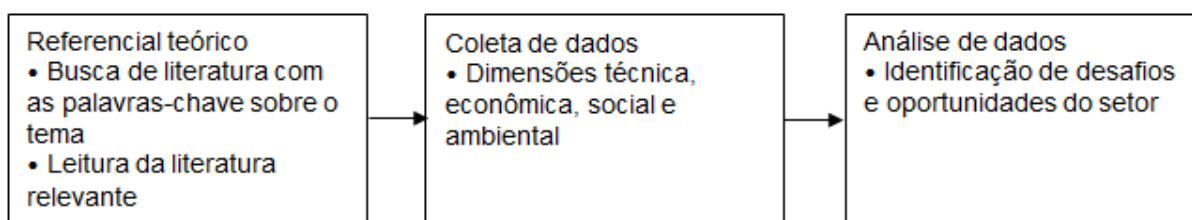


Figura 1. Procedimento metodológico desta pesquisa.

A principal limitação desta metodologia foi a restrição ao acesso de algumas publicações em base de dados pagas e em idioma diferente do português, no qual pode ter limitado a abrangência da análise.

3. Resultados e discussão

3.1. Biorrefinarias de milho

No Brasil, existem três modelos de plantas industriais em operação. As usinas Full dedicadas são projetadas para processar exclusivamente o milho como matéria-prima durante o ano todo e são predominantes localizadas em regiões onde há uma maior produção do cereal, tendo sua localização próxima as lavouras para reduzir o custo de logística. As usinas Flex são de cana-de-açúcar adaptadas para o processamento do milho durante a entressafra da cana, gerando um fluxo de caixa em um período que a planta estaria inativa. As usinas Flex Full são modelos mais avançados e integrados, capazes de produzir simultaneamente durante todo o ano.

Este tipo elimina ou reduz drasticamente os custos para a troca de matéria-prima (CNA, 2023). O diagrama do sistema de produção de uma biorrefinaria de milho é apresentado na Figura 2.

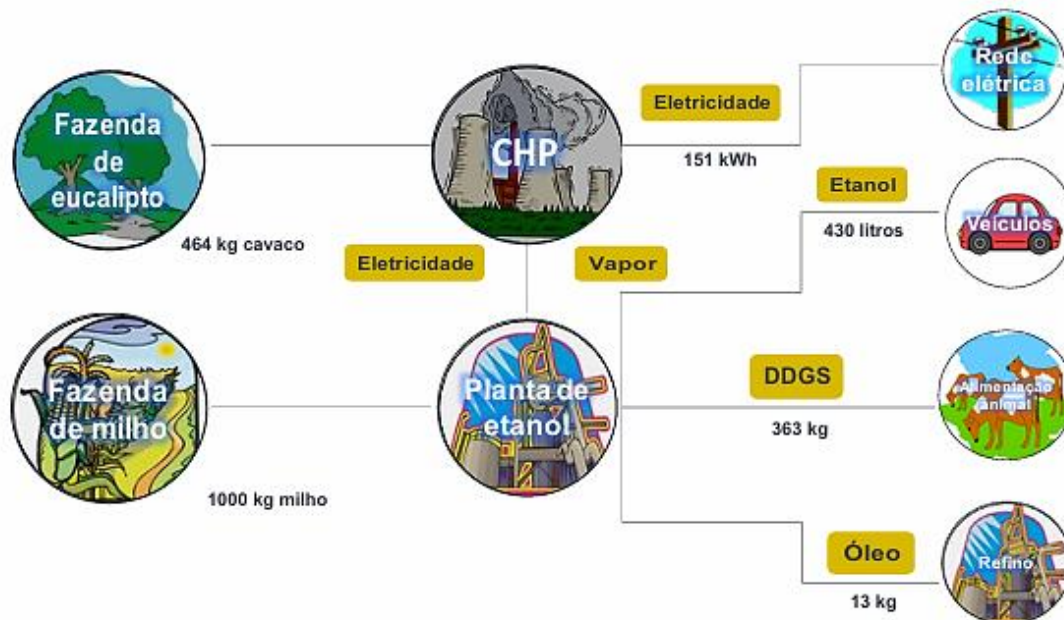


Figura 2. Biorrefinaria de milho em prol da sustentabilidade

Fonte: Moreira e Arantes (2018).

A cada tonelada de grão de milho processado, são produzidos 430 L de etanol, 363 kg de DDGs e 13 kg de óleo bruto. Neste processo, são utilizados 464 kg de cavacos de eucalipto para suprir a demanda elétrica e térmica da biorrefinaria, tendo um excedente de 151 kWh de eletricidade injetada na rede elétrica.

Uma vantagem do milho em relação a cana é no armazenamento por um longo período. A cana é muito perecível, tendo apenas 24 horas para ser encaminhada para a produção do etanol após a colheita para não perder seu teor de sacarose e desempenho final (CNA, 2023). Outra diferença entre as duas matérias-primas é a produtividade industrial. O milho produz mais sacarose e álcool. Enquanto uma tonelada de milho rende 430 litros de etanol, uma tonelada de cana gera apenas 90 litros de etanol (CNA, 2023).

Cerca de 60% do mercado mundial de biocombustíveis corresponde ao etanol, o qual é majoritariamente produzido de cana-de-açúcar e milho. Os Estados Unidos e o Brasil juntos somam 70% da produção global de etanol (GLOBAL GROWTH INSIGHTS, 2025). O Brasil possui 25 biorrefinarias de milho em operação (Figura 3).



Figura 3. Mapa de biorrefinarias de milho no Brasil.

Fonte: Unem (2024).

O mapa da Figura 3 apresenta a distribuição das biorrefinarias de etanol no Brasil, onde o estado que lidera o ranking com mais usinas operando é o Mato Grosso. Das 10 biorrefinarias com autorização de construção e 20 biorrefinarias projetadas para construção em todo o país, 16 são para este estado.

O Mato Grosso é o maior produtor de grãos de milho do Brasil, totalizando 37% da produção nacional (AGROSUSTENTAR, 2025). Devido à grande disponibilidade de matéria-prima e a dificuldades de logística para escoamento da produção no país, o milho ganhou forças no Mato Grosso com a chegada do etanol, agregando mais valor ao produto e estimulando a economia regional.

No estado do Maranhão, a Inpasa inaugurou uma das maiores biorrefinarias de milho da América Latina. A unidade está localizada no município de Balsas, região sul do estado, que se consolida como um polo do agronegócio. A nova planta industrial tem gerado ganhos socioeconômicos significativos para a região do MATOPIBA – importante fronteira agrícola brasileira que comporta os estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (PREFEITURA MUNICIPAL DE BALSAS, 2025).

A produção de milho no Brasil tem apresentado uma tendência de crescimento. A produção de milho no Brasil aumentou de 42 milhões de toneladas na safra 2005/06 para 119 milhões de toneladas em 2024/25 (Unem, 2024). A moagem de milho para a produção de etanol no Brasil aumentou de 0,07 milhões de toneladas na safra

2013/14 para 18 milhões de toneladas em 2024/25 (Unem, 2024). A produção de etanol de milho no Brasil aumentou de 0,03 bilhões de litros na safra 2013/14 para 8 bilhões de litros em 2024/25 (Unem, 2024).

A biorrefinaria de milho tem sido vista como um potencial de agregação de valor para outras cadeias de produção e consumo devido a geração de coprodutos tais como os DDGs, óleo e biomassa residual (CNA, 2023). Os DDGs possuem um elevado valor energético e nutricional. Desta forma, são utilizados em dietas de bovinos, suínos, aves e peixes. A produção de DDGs de milho no Brasil aumentou de 0,13 milhões de toneladas na safra 2016/17 para 4 milhões de toneladas em 2024/25 (Unem, 2024). Considerando a expansão da produção de milho de segunda safra no Brasil, o aumento da produção de etanol e coprodutos contribui para a intensificação sustentável da agricultura brasileira.

3.2. Desempenho socioeconômico

Para avaliar os impactos socioeconômicos de uma planta de etanol, foram consideradas duas fases, a fase de investimentos e a fase de operação. Foi adotada uma planta que produz 500.000.000 L/ano, e demanda 1,2 milhão de toneladas de milho safrinha (MOREIRA; ARANTES, 2018). São apresentados os impactos econômicos do etanol de milho nas fases de investimento e operação (Tabela 1).

Tabela 1. Impactos econômicos do etanol de milho nas fases de investimento e operação no estado do Mato Grosso, Brasil.

Fase	Valor de produção	Emprego gerado
Investimento	R\$ 2 500 000 000 ^a	1 627
Operação	R\$ 2 024 000 000	2 919

Fonte: ^a Cultivar (2019); Moreira e Arantes (2018).

Na fase de investimentos, foi considerada que para a construção de uma nova planta demanda 2 anos. Observa-se na Tabela 1 que o investimento para a instalação da biorrefinaria é de 2,5 bilhões de reais, a qual tem um potencial de produção anual de 2 bilhões de reais. Ademais, há uma alta geração de empregos, sendo que para um município de 100 mil habitantes com a metade da população ativa, a geração de emprego na fase de construção pode representar aproximadamente 4% do total, reduzindo a taxa de desemprego. Já na fase de operação, a geração de emprego é maior que o dobro em comparação a da construção.

5.3. Desempenho ambiental

No combate às mudanças climáticas e a redução de Gases de Efeito Estufa (GEE), os biocombustíveis aparecem como uma alternativa crucial na transição energética. Nesse processo, as emissões de GEE e a pegada de carbono são indicadores indispensáveis para medir o desempenho ambiental desses combustíveis (BACHION; ARANTES, 2025), os quais são comparados para diferentes locais (Tabela 2).

Tabela 2. Pegada de carbono do etanol de milho em comparação com a gasolina.

Tipo	Pegada de carbono	Local	Fonte
Etanol de milho de segunda safra	18-25 g CO ₂ eq/MJ	Brasil	Bachion e Arantes (2025)
Etanol de milho	27 g CO ₂ eq/MJ	Estados Unidos	Neves (2021)
Gasolina	87 g CO ₂ eq/MJ	-	Neves (2021)

Conforme a Tabela 2, a pegada de carbono do etanol de milho no Brasil é uma das mais baixas no setor, em relação ao etanol de milho dos Estados Unidos, e de forma drástica quando comparado a gasolina. Isso porque o milho de segunda safra, além de ser plantio direto que otimiza os recursos com o sistema de rotação de cultura com a soja, também é utilizado principalmente de cavaco de eucalipto como fonte de energia para a biorrefinaria (NEVES, 2021).

4. Conclusão

Esta análise crítica da literatura sobre a biorrefinaria de milho no Brasil abordou aspectos socioeconômicos e ambientais deste setor em expansão. Foi identificado o etanol como o produto principal e coprodutos como os grãos secos de destilaria (DDGs), óleo e eletricidade. Projeta-se que este setor dobre a sua produção nos próximos 10 anos, gerando milhares de empregos (2-3 mil vagas) nas fases de construção e operação, assim como bilhões de reais em movimentações financeiras (1-2 bilhões de reais) em cada fase. Ademais, o etanol de milho do Brasil possui vantagens significativas na redução de gases de efeito estufa em comparação etanol de milho dos Estados Unidos e a gasolina, assim como contribui para a ampliação da matriz energética renovável. Desta forma, pesquisas futuras devem aprofundar as análises da sustentabilidade deste setor para apoiar a sua intensificação sustentável.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado em parte pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) da Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA) no Edital AGEUFMA Nº 18/2024 [Projeto de Pesquisa: PVBAL3376-2023].

Referências

AGROSUSTENTAR. Maiores Produtores de Milho do Brasil e do Mundo. **Agrosustentar**, 2025. Disponível em: <https://agrosustentar.com.br/agronegocio/maiores-produtores-milho/> Acesso em: 03 set 2025.

BACHION, L. C.; ARANTES, S. M. Etanol de milho e a redução das emissões de gases do efeito estufa. **Globo Rural**, 2025. Disponível em: <https://globorural.globo.com/opiniaio/noticia/2025/07/etanol-de-milho-e-a-reducao-das-emissoes-de-gases-do-efeito-estufa.ghtml>. Acesso em: 04 set 2025.

GLOBAL GROWTH INSIGHTS. Tamanho do mercado de biocombustíveis, participação, crescimento e análise da indústria, por tipos (biodiesel, bioetanol), por aplicações (indústria química, combustíveis de transporte) e insights regionais e previsão para 2033. **Global Growth Insights**, 2025. Disponível em: <https://www.globalgrowthinsights.com/pt/market-reports/biofuels-market-109492>. Acesso em: 03 set. 2025.

CNA. Milho invade as indústrias de produção de etanol. **Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil**, 2023. Disponível em: <https://www.cnabrasil.org.br/noticias/milho-invade-as-industrias-de-producao-de-etanol>. Acesso em: 01 ago. 2025.

CULTIVAR. Modelo de usina "flex" impulsiona etanol de milho no Brasil. **Revista Cultivar**, 2019. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/modelo-de-usina-flex-impulsiona-etanol-de-milho-no-brasil>. Acesso em: 08 set. 2025.

GAZETAWEB. AL e os 100 anos do etanol: a revolução do biocombustível começou aqui. **Gazetaweb**, 2024. Disponível em: <https://www.gazetaweb.com/blogs/edivaldo-junior/al-e-os-100-anos-do-etanol-a-revolucao-do-biocombustivel-comecou-aqui-791216>. Acesso em: 01 ago. 2025.

MOREIRA, M. M. R.; ARANTES, S. M. **Análise socioeconômica e ambiental da produção de etanol de milho no centro oeste brasileiro**. São Paulo: INPUT, 2018.

NEVES, M. F. **Etanol de Milho: Cenário atual e perspectivas para a cadeia no Brasil**. Ribeirão Preto, SP: UNEM, 2021. Disponível em: https://doutoragro.com/wp-content/uploads/2021/05/Ebook_Etanol-de-Milho-compa-ctado.pdf. Acesso em: 20 ago. 2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BALSAS. Balsas ganha unidade da Inpasa, a maior biorrefinaria de etanol de grãos da América Latina. **Prefeitura Municipal de Balsas**, 2025. Disponível em: <https://balsas.ma.gov.br/informa.php?id=51> Acesso em: 03 set 2025.

UNEM. Biorrefinarias no Brasil. **Unem**, 2024. Disponível em: <https://etanoldemilho.com.br/dados-setoriais/> Acesso em: 30 abr. 2025.

Abstract

This research aims to identify the socioeconomic and environmental impacts of corn ethanol production in Brazil. The methodology adopted consists of a critical literature analysis to synthesize the main concepts and studies related to corn ethanol production, collecting socioeconomic and environmental indicator data and analyzing challenges and opportunities. As a result, it was found that Brazil has a significant global advantage in the production of corn ethanol and co-products, such as distillers' dried grains (DDGs), oil, and electricity, due to the feedstock availability. Finally, the results show that greenhouse gas emissions are lower than those of fossil fuels and North American corn ethanol, contributing to the decarbonization of the energy sector and being fundamental to the sustainable development.

Keywords: Biofuel; Maize ethanol; Sustainability indicator.

DIAGNÓSTICO DA MOBILIDADE URBANA DE SÃO LUÍS (MA) COM BASE EM INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

Luanderson Barbosa Almeida¹, Matheus Serra da Silva², Sandra Racib Pires Chaves³, Thais Correa Souza⁴, Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz⁵

¹Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET)

²Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET)

³Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET)

⁴Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET)

⁵Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências Exatas e Tecnologia (CCET)

Resumo

Este artigo analisa a mobilidade urbana da cidade de São Luís (MA), com base na metodologia do Índice Folha de Mobilidade Urbana, desenvolvido pelo jornal Folha de S. Paulo. O objetivo é identificar os principais gargalos da mobilidade urbana e propor soluções sustentáveis. Assim, a pesquisa é de natureza exploratória, descritiva e qualitativa, com base em dados secundários de órgãos oficiais. A análise mostrou que São Luís apresenta um dos piores desempenhos entre as capitais brasileiras, com score normalizado de 0,3068. Em resposta, são propostas intervenções como ampliação da frota de transporte coletivo nos horários de pico, requalificação da infraestrutura ciclovitária, calçadas cobertas e seguras, e políticas voltadas à mobilidade ativa. As propostas buscam orientar políticas públicas sustentáveis, apesar das limitações do índice utilizado e da disponibilidade de dados.

Palavras-chave: Tráfego, Mobilidade, Sustentabilidade.

1. Introdução

As cidades estão em constante transformação, especialmente no que diz respeito à sua organização espacial. O transporte desempenha um papel fundamental nesse processo, moldando e estruturando o espaço urbano, uma vez que o crescimento e o desenvolvimento das cidades sempre estiveram ligados ao sistema de transporte (Vasconcellos, 2001). Nesse contexto, a mobilidade urbana sustentável tem ganhado relevância crescente no planejamento urbano contemporâneo.

A Política Nacional de Mobilidade Urbana Sustentável (PNMUS) define a mobilidade como o conjunto de condições que visa aperfeiçoar o deslocamento de pessoas e bens no espaço urbano, de forma segura, eficiente, inclusiva e sustentável (BRASIL, 2012).

¹ Avenida dos Portugueses, 1966, São Luís – MA. luanderson.barbosa@discente.ufma.br

² Avenida dos Portugueses, 1966, São Luís – MA. matheus.serra@discente.ufma.br

³ Avenida dos Portugueses, 1966, São Luís – MA. sandra.racib@discente.ufma.br

⁴ Avenida dos Portugueses, 1966, São Luís – MA. souza.thais@discente.ufma.br

⁵ Avenida dos Portugueses, 1966, São Luís – MA. priscila.luz@ufma.br

Com a intensificação da urbanização e o aumento da frota de veículos particulares, diversas capitais brasileiras enfrentam sérios problemas relacionados ao tráfego, como congestionamentos, acidentes e poluição atmosférica. No caso de São Luís, capital do Maranhão, tais desafios se agravam em virtude da expansão urbana desordenada, da ineficiência do transporte público e da ausência de infraestrutura adequada para diferentes modais. Segundo o IMESC (2021), a frota de veículos em São Luís cresceu cerca de 50% entre 2010 e 2020, enquanto a malha viária urbana permaneceu praticamente inalterada. Além disso, o transporte coletivo apresenta baixa cobertura e frequência, não conseguindo atender adequadamente às demandas da população (NTU, 2023).

A falta de articulação entre o planejamento urbano e a gestão da mobilidade tem resultado em um sistema de transporte ineficiente, socialmente excludente e ambientalmente insustentável. Diante disso, torna-se essencial o desenvolvimento de uma abordagem focada na Gestão da Mobilidade (GM). Segundo Reis (2011), a GM é uma abordagem centrada na demanda, que visa promover a intermodalidade e facilitar o acesso a bens e serviços. Isso significa valorizar os modos de transporte mais sustentáveis e garantir que as necessidades de mobilidade da população sejam atendidas de forma equitativa.

No entanto, para que haja uma gestão da mobilidade eficiente, é imprescindível o uso de ferramentas capazes de mensurar a efetividade das estratégias adotadas. Nesse sentido, os índices de mobilidade urbana sustentável surgem como instrumentos fundamentais para diagnosticar as condições de mobilidade e avaliar os impactos das políticas públicas implementadas (Costa, 2008).

Diante desse cenário, a mobilidade urbana de São Luís enfrenta sérios desafios, como congestionamentos, ineficiência do transporte coletivo e ausência de infraestrutura para modais alternativos. Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar os principais problemas relacionados ao tráfego urbano em São Luís e identificar os gargalos viários mais críticos por meio do estudo realizado pela Folha de S. Paulo (2022) — que aplicou o Índice Folha de Mobilidade Urbana, uma metodologia desenvolvida pelo jornal para avaliar o desempenho das capitais brasileiras por meio de indicadores como tempo de deslocamento, qualidade do transporte coletivo, infraestrutura para modais ativos, acessibilidade, segurança viária

e governança — e, a partir dessa análise, propor soluções para a melhoria da mobilidade urbana na capital maranhense.

2. Metodologia

O presente trabalho, caracterizou-se como um estudo de natureza exploratória e descritiva, com abordagem qualitativa, buscando analisar o tráfego urbano em São Luís – MA com base na aplicação do Índice Folha de Mobilidade Urbana nas capitais brasileiras. A metodologia adotada foi dividida em três etapas principais: (i) coleta de dados secundários, (ii) análise da aplicação do índice e (iii) formulação de propostas de intervenção.

2.1. Coleta e análise de dados secundários

Inicialmente, foi elaborada uma revisão bibliográfica, considerando-se teses, dissertações e artigos à mobilidade urbana sustentável, índices de mobilidade e outros temas pertinentes à concepção deste estudo. A coleta de dados foi baseada em fontes secundárias, com ênfase em estatísticas sobre frota veicular, infraestrutura viária, desempenho do transporte público, acessibilidade urbana e padrões de deslocamento.

As principais instituições consultadas foram: o Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos (IMESC), o Departamento Estadual de Trânsito do Maranhão (DETRAN-MA), a Secretaria Municipal de Trânsito e Transportes (SMTT), a Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A partir desses dados, a pesquisa teve como principais referências o trabalho de Costa (2008), que desenvolveu um índice para mensurar a sustentabilidade da mobilidade urbana, e o estudo da Folha de S. Paulo (2022), que aplicou tal índice nas capitais brasileiras, com algumas adaptações e limitações.

2.2. Análise do Índice Folha de Mobilidade Urbana (IMU)

Na segunda etapa, foram definidos conceitos fundamentais para a continuidade da análise. Com base nos dados coletados, foi aplicada a metodologia do Índice Folha de Mobilidade Urbana, desenvolvido pela Folha de S. Paulo (2022) em parceria com pesquisadores da área. A metodologia baseia-se em uma versão reduzida do Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS), elaborado por Costa (2008).

Enquanto a versão completa do IMUS utiliza 87 indicadores, a versão reduzida aplicada neste estudo é composta por 13 indicadores, organizados em Domínios e Temas, conforme apresentado no Quadro 1. Cada critério foi avaliado com base na realidade de São Luís, com o objetivo de quantificar seu desempenho em mobilidade urbana e identificar os principais pontos de fragilidade.

Quadro 1. Estrutura do Índice Folha de Mobilidade Urbana

Domínio	Temas	Indicador
Aspectos Ambientais	Controle dos impactos no meio ambiente	Emissões de CO
	Recursos naturais	Uso de energia limpa e combustíveis alternativos
Infraestrutura de Transportes	Provisão e manutenção das vias da infraestrutura de transportes	Densidade e conectividade da rede viária
Modos não motorizados	Transporte cicloviário	Extensão e conectividade de rede viária
	Modos não motorizados	Vias para pedestres
	Redução de viagens	Ações para redução do tráfego motorizado
Tráfego e Circulação Urbana	Acidentes de trânsito	Acidentes de trânsito
		Acidentes com pedestres e ciclistas
	Fluidez e circulação	Velocidade média de tráfego
	Transporte individual	Índice de motorização
Sistemas de Transporte Urbano	Disponibilidade e qualidade do transporte público	Passageiros transportados anualmente
	Diversificação modal	Diversidade de modos de transporte
	Política tarifária	Tarifas de transporte

Fonte: Adaptado de Miranda e Silva (2022)

2.3. Diagnóstico e formulação de propostas

Após a análise dos critérios do índice reduzido, foi elaborado um diagnóstico da mobilidade urbana em São Luís. Essa análise permitiu identificar os principais gargalos do sistema, como vias saturadas, transporte coletivo ineficiente e infraestrutura inadequada para a mobilidade ativa.

Com base nesse diagnóstico, foram formuladas propostas de intervenção para o curto, médio e longo prazos, alinhadas aos princípios da mobilidade sustentável. As propostas foram embasadas em experiências bem-sucedidas de outras cidades brasileiras e nas diretrizes da PNMUS, com o objetivo de subsidiar a implementação de políticas públicas mais eficazes e adequadas ao contexto local.

3. Resultados e discussão

Com base nos critérios definidos pela Folha de S. Paulo (2022) para avaliação do desempenho de cada cidade analisada, buscou-se a segregação e análise individualizada da cidade de São Luís. Com isso, São Luís revelou um cenário preocupante quanto à qualidade da mobilidade urbana, obtendo um score normalizado de 0,3068, posicionando-se com o pior desempenho entre as capitais analisadas, conforme a Figura 1.

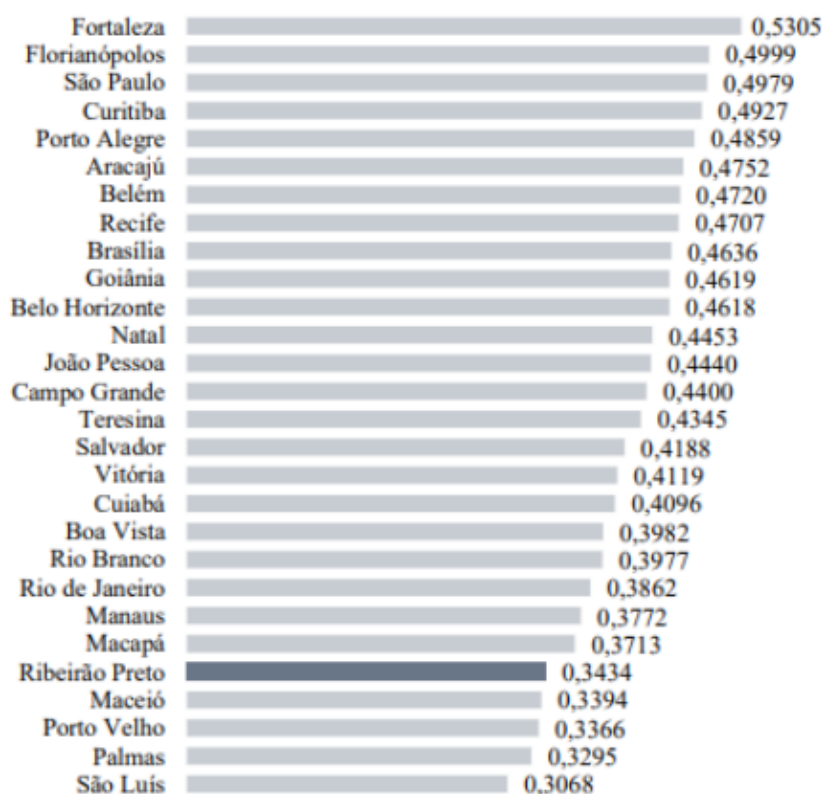


Figura 1. Sedes das capitais + Ribeirão Preto. Fonte: Miranda e Silva (2022)

Ao analisar a pontuação individual de cada indicador utilizado na metodologia, percebe-se que São Luís apresenta desempenho satisfatório em alguns aspectos pontuais, ao passo que a maior parte dos indicadores evidencia resultados negativos, principalmente no que diz respeito à sustentabilidade e ao incentivo de modos alternativos. A Figura 2, mostra os scores individuais dos indicadores.

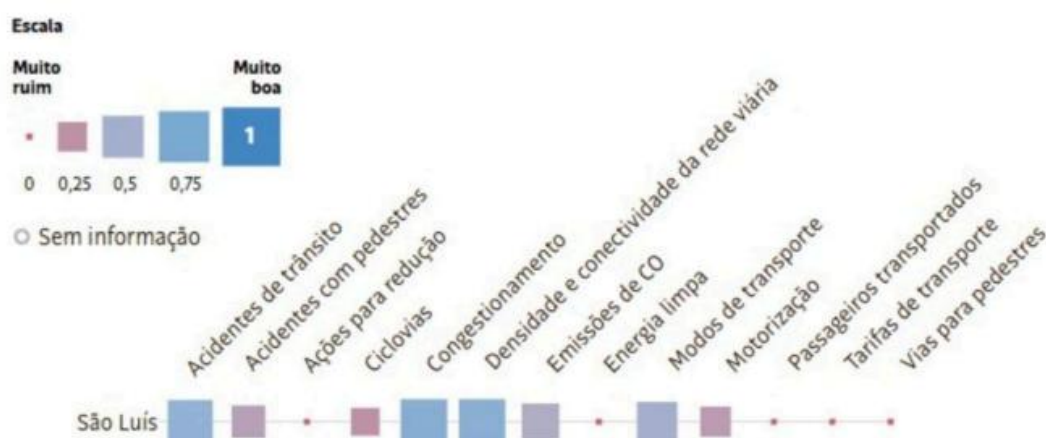


Figura 2. Scores individuais dos indicadores. Fonte: Folha (2022)

Dentre os poucos indicadores que contribuem positivamente para o índice, pode-se destacar “Densidade e conectividade da rede viária”. Isso se deve ao fato de que, apesar de a cidade apresentar deficiências em planejamento urbano, há a existência de malhas viárias razoavelmente densas e interligadas nas regiões centrais e bairros consolidados. Esse desempenho exerce o papel de sustentar o índice geral, impedindo que seja ainda mais baixo. Outro indicador com score elevado é o “Congestionamento”, o qual representa a velocidade média de tráfego na via. Esse desempenho pode ser explicado pelo desenho urbano da cidade e pelo fato de que, apesar dos entraves nos horários de pico, o trânsito flui com mais facilidade em comparação com outras cidades.

No entanto, os indicadores com maior valoração são pouco expressivos se comparados àqueles que contribuem negativamente para o índice global de São Luís. Um deles é o indicador “Energia limpa”, que recebeu score 0, evidenciando a persistência do uso de veículos motorizados no sistema de transporte da cidade, sem qualquer renovação ou políticas voltadas para o incentivo de modos mais sustentáveis. Outro ponto de atenção está relacionado aos indicadores “Ciclovias” e “Vias para pedestres”, pertencentes ao domínio “Modos não motorizados”, os quais

apresentaram scores praticamente nulos, sugerindo ausência quase total de infraestrutura cicloviária e calçadas adequadas e acessíveis. A cidade oferece baixas condições para o deslocamento ativo, o que leva ao desestímulo desses modais e amplia a dependência de modos motorizados.

Outro ponto de fragilidade está no domínio “Sistema de transporte urbano”, que também apresenta resultados negativos. O indicador “Passageiros transportados” registrou score próximo de zero, o que sugere que os usuários têm deixado de utilizar o sistema de transporte coletivo nos últimos anos. Isso pode ser explicado pela má qualidade dos serviços, pela falta de pontualidade e pela ausência de segurança nos veículos, pontos de parada e terminais. Além disso, a falta de diversidade nos modos de transporte coletivo, com a predominância dos ônibus, contribui de maneira negativa para o índice. Como consequência, observa-se a ausência de VLTs, metrô ou bicicletas públicas. Por fim, o indicador “Motorização” revela uma elevada proporção de veículos por habitante, o que agrava os problemas de mobilidade, acentua as emissões de gases poluentes e gera maiores impactos ambientais. Contudo, os indicadores “Acidentes de trânsito” e “Acidentes com pedestres” apresentaram valoração positiva, com scores entre 0,5 e 0,75.

4. Conclusão

A análise da mobilidade urbana de São Luís evidencia um cenário ainda distante dos parâmetros sustentáveis desejáveis. A cidade apresenta sérias carências de infraestrutura para pedestres e ciclistas, ausência de políticas efetivas de controle de tráfego, baixa eficiência do transporte coletivo e uma elevada taxa de motorização, associada à escassez de incentivos ao uso de modais ativos. O índice global de mobilidade urbana da capital maranhense, com score normalizado de 0,3068, foi o mais baixo entre as capitais brasileiras analisadas, o que reforça a urgência de ações concretas.

Embora o uso da versão reduzida do Índice Folha de Mobilidade Urbana tenha possibilitado um diagnóstico relevante, reconhece-se que sua aplicação apresenta limitações, como a simplificação de variáveis complexas e a ausência de indicadores locais específicos. Da mesma forma, esta pesquisa está condicionada à disponibilidade e atualização dos dados secundários utilizados.

Com base no diagnóstico realizado, propõem-se intervenções de curto, médio e longo prazo, tais como: ampliação da frota de transporte coletivo nos horários de

pico, requalificação da malha cicloviária existente e implantação de novas ciclovias, construção de calçadas cobertas e acessíveis, e fortalecimento das políticas de segurança viária para pedestres e ciclistas. Tais medidas, alinhadas aos princípios da mobilidade urbana sustentável, são essenciais para promover um sistema mais eficiente, inclusivo e ambientalmente responsável em São Luís.

Referências

BRASIL. Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012. Política Nacional de Mobilidade Urbana Sustentável (PNMUS). Diário Oficial da União, Brasília-DF, 3 de janeiro de 2012.

COSTA, M. S. Um índice de mobilidade urbana sustentável. 2008. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18144/tde-01112008-200521/publico/Tese_MCOSTA.pdf. Acesso em 02 jul. 2025.

Folha de São Paulo (2022) Índice Folha de Mobilidade. Jornal Folha de São Paulo. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2022/05/capitais-estao-longe-do-ideal-de-mobilidade-sustentavel.shtml>. Acesso em: 06 jul. 2025.

IMESC. Anuário Estatístico do Maranhão – 2021. São Luís: Instituto Maranhense de Estudos Socioeconômicos e Cartográficos, 2021. Disponível em: <https://imesc.ma.gov.br/>. Acesso em: 2 jul. 2025.

MIRANDA, H. F.; SILVA, A. N. R. da. Riscos e Oportunidades da Aplicação de uma Versão Reduzida do Índice de Mobilidade Urbana Sustentável. In: 36º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 2018, Fortaleza - CE. Anais. Fortaleza, 2022.

NTU – Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos. Anuário NTU: 2022-2023. Brasília: NTU, 2023. Disponível em: [Pub638272765778419772.pdf](https://pub638272765778419772.pdf). Acesso em: 2 jul. 2025.

REIS, M. F. M. Gestão da mobilidade - plano de mobilidade FEUP. 2011. Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto, Porto. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/61841?locale=pt>. Acesso em 02 jul. 2025.

VASCONCELLOS, E. A. Transporte urbano, espaço e equidade: análise das políticas públicas. 1. ed. São Paulo: Annablume, 2001. [ISBN: 85-7419-184-1].

Abstract

This article analyzes urban mobility in the city of São Luís, Maranhão, based on the Folha Urban Mobility Index methodology, developed by the Folha de S. Paulo newspaper. The objective is to identify the main bottlenecks in urban mobility and

propose sustainable solutions. Therefore, the research is exploratory, descriptive, and qualitative in nature, based on secondary data from official agencies. The analysis showed that São Luís has one of the worst performances among Brazilian capitals, with a normalized score of 0.3068. In response, interventions are proposed, such as expanding the public transportation fleet during peak hours, upgrading cycling infrastructure, providing covered and safe sidewalks, and policies focused on active mobility. The proposals seek to guide sustainable public policies, despite the limitations of the index used and the availability of data.

Keywords: Traffic, Mobility, Sustainability.

DIAGNÓSTICO DO SANEAMENTO BÁSICO COM ÊNFASE NA DRENAGEM URBANA NA MESORREGIÃO SUL MARANHENSE

Cláudio Luís de Araújo Neto¹, Amanda Paiva Farias², Manayara Santos Rodrigues Bezerra³ & Guilherme dos Santos⁴

¹Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências de Balsas (CCBL)

Resumo

A ausência ou ineficiência de sistemas de drenagem, potencializada pela impermeabilização do solo e mudanças climáticas, resulta em severos impactos socioeconômicos e ambientais, como enchentes e contaminação. O presente estudo objetiva realizar um diagnóstico da infraestrutura de drenagem urbana na Mesorregião Sul Maranhense, componente do saneamento básico frequentemente negligenciado. A metodologia consistiu no levantamento e análise de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) para a mesorregião sul maranhense, verificando indicadores como extensão de canais, densidade de captações e domicílios em risco de inundação. Os resultados apontam para uma infraestrutura de drenagem predominantemente incipiente ou ausente, sendo em geral superficial quando existente. A gestão inadequada e a ocupação de áreas de risco acentuam a vulnerabilidade da região a inundações, evidenciando a necessidade de investimentos e fiscalização para mitigar os problemas identificados.

Palavras-chave: SNIS, indicadores de saneamento, infraestrutura urbana.

1. Introdução

A drenagem urbana constitui componente estruturante do saneamento básico, frequentemente negligenciado em abastecimento de água, esgotamento sanitário e resíduos sólidos. Sua função transcende o simples escoamento de águas pluviais, envolvendo processos de planejamento hidrológico, hidráulico e de ordenamento territorial, cuja ausência ou ineficiência resulta em riscos hidrossanitários, degradação ambiental e impactos socioeconômicos severos (RODRIGUES; RODRIGUES; RIBEIRO, 2022). Em áreas urbanas densamente impermeabilizadas, a incapacidade de absorção do solo intensifica o escoamento superficial, promovendo picos de vazão em intervalos reduzidos e potencializando a ocorrência de enchentes, erosão e contaminação difusa (FRANCISCO et al., 2023).

No contexto brasileiro, a drenagem urbana apresenta desafios estruturais e institucionais que comprometem a resiliência das cidades. Entre os principais entraves

¹ Universidade Federal do Maranhão. E-mail: claudio.neto@ufma.br

² Grupo de Pesquisa Saneamento e Goetecnia Ambiental. E-mail: amandapaiva.farias@gmail.com

³ Universidade Federal do Maranhão. E-mail: manayara.bezerra@discente.ufma.br

⁴ Universidade de São Paulo. E-mail: guilherme.santos.uf@gmail.com

destacam-se: carência de regulação normativa específica, ausência de integração com políticas de uso e ocupação do solo, deficiências no monitoramento hidrológico e precariedade na manutenção da infraestrutura já instalada (SOUZA et al., 2023). Esses fatores agravam-se diante da intensificação das mudanças climáticas, que elevam a frequência e magnitude de eventos extremos de precipitação, impondo maior pressão sobre sistemas subdimensionados ou obsoletos.

O novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) estabeleceu metas ambiciosas para universalizar o acesso aos serviços até 2033, destacando a necessidade urgente de diagnósticos detalhados e investimentos direcionados, principalmente para a drenagem urbana. A ausência de dados robustos e atualizados sobre a infraestrutura e a gestão da drenagem é uma barreira considerável para o avanço do saneamento no país, especialmente em municípios de pequeno e médio porte.

Diante desse contexto, o presente estudo objetiva realizar um diagnóstico do saneamento básico na Mesorregião Sul Maranhense, com ênfase na infraestrutura de drenagem urbana. Por meio da análise de dados sobre a condição da rede de drenagem, formalização de captações, pavimentação e risco de inundações, busca-se traçar um panorama da situação atual.

2. Metodologia

2.1 Descrição do local da pesquisa

O Estado do Maranhão situa-se no Nordeste Oriental, numa área de transição entre o Nordeste e o Norte, onde 80% do seu território corresponde à área da Amazônia Legal. O Estado do Maranhão ocupa uma área de 329.651,50 km², sendo o segundo maior em extensão do Nordeste e o oitavo do Brasil. No último censo, realizado em 2022, o Estado possuía uma população de 6.776.699 habitantes dividida em cinco mesorregiões: Centro, Leste, Oeste, Norte e Sul. (IBGE, 2023).

A Mesorregião Sul Maranhense, objeto de estudo dessa pesquisa, é uma das cinco mesorregiões maranhenses, conforme divisão do IBGE (1992). Ela é composta por 13 municípios e divide-se em três microrregiões: Porto Franco; Gerais de Balsas; e Chapada das Mangabeiras.

Segundo dados do IBGE (2023), a microrregião de Porto Franco integra os municípios de Carolina, Estreito e Porto Franco, possui uma população de aproximadamente 81.259 habitantes e uma área territorial de 10.408,46 km². A

população da microrregião dos Gerais de Balsas, é de aproximadamente 143.883 habitantes, e a área total é de 35.040,53 km², integrando cinco municípios do sul do Maranhão: Alto Parnaíba, Balsas, Feira Nova do Maranhão, Riachão e Tasso Fragoso. Já a microrregião da Chapada das Mangabeiras que integra os municípios de Benedito Leite, Fortaleza dos Nogueiras, Loreto, Sambaíba, São Félix de Balsas e São Raimundo das Mangabeiras, possui uma população total de aproximadamente 58.348 habitantes e 15.268,51 km².

2.2 Coleta de dados

Para obter o panorama sobre o saneamento básico, nas microrregiões de Porto Franco, Gerais de Balsas e Chapada das Mangabeiras, foi realizado um levantamento das informações no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2022), sendo verificados os indicadores relacionados a drenagem urbana.

Com base no Quadro 1, há descrição do indicador que foi abordado nesta pesquisa. A escolha dos Indicadores se deu em função da sua relevância para a avaliação das condições de saneamento e a disponibilidade de informações nas fontes de dados consultadas.

Quadro 1 – Indicadores de Saneamento Básico

INDICADORES DE DRENAGEM URBANA	
Canais abertos (%)	
Segundo Oliveira et. al (2004), percorrem a área urbana, onde há predomínio de trechos abertos, sem grandes intervenções nas margens e no leito.	$\frac{IE034}{IE032} \times 100$ <p>IE032 - Extensão total dos cursos d'água naturais perenes em áreas urbanas</p> <p>IE034 - Extensão total dos cursos d'água naturais perenes canalizados abertos em áreas urbanas</p>
Canais fechados (%)	
Curso d'água naturais com canais/canalização artificial fechada	$\frac{IE035}{IE032} \times 100$ <p>IE032 - Extensão total dos cursos d'água naturais perenes em áreas urbanas:</p>

	IE035 - Extensão total dos cursos d'água naturais perenes canalizados fechados em áreas urbanas
Canais subterrâneos (%)	
É um sistema de escoamento de água da chuva que visa prevenir enchentes e alagamentos em áreas urbanas e rurais (Melo, 2024).	$\frac{IE024}{IE017} \times 100$ <p>IE017 - Extensão total de vias públicas urbanas do município: IE024 - Extensão total de vias públicas urbanas com redes ou canais de águas pluviais subterrâneos</p>
Captações (und./Km³)	
As captações de águas pluviais são estruturas instaladas ao longo do sistema de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas com a função de coletar as águas de chuva e conduzi-las a jusante do sistema, em canais, galerias, reservatórios entre outros	$\frac{IE021 + IE022}{GE002}$ <p>GE002 - Área urbana total, incluindo áreas urbanas isoladas: IE021 - Quantidade de bocas de lobo existentes no município: IE022 - Quantidade de bocas de leão ou bocas de lobo múltiplas (duas ou mais bocas de lobo conjugadas) existentes no município</p>
Domicílios em risco (%)	
Parcela de domicílios em Situação de Risco de Inundação	$\frac{RI013}{GE008} \times 100$ <p>GE008 - Quantidade total de domicílios urbanos existentes no município: RI013 - Quantidade de domicílios sujeitos a risco de inundação</p>
Taxa de pavimentação (%)	

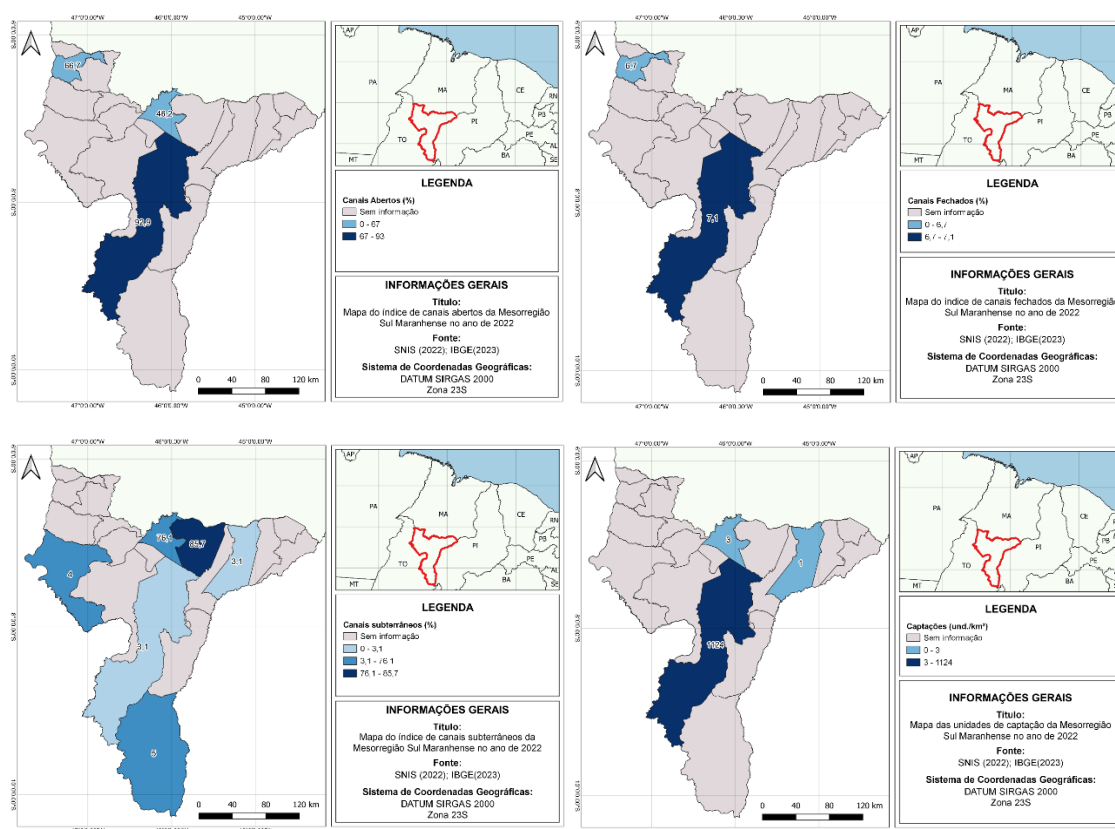
Relação percentual entre a projeção da edificação e a área do terreno (Saboya, 2020).

$$\frac{IE019}{IE017} \times 100$$

IE017 - Extensão total de vias públicas urbanas do município:
IE019 - Extensão total de vias públicas urbanas com pavimento e meio-fio (ou semelhante)

3. Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta os mapas dos indicadores da drenagem urbana da Mesorregião Sul Maranhense. Nas Figuras 1A, 1B, 1C, 1D, 1E e 1F são apresentados os dados sobre canais abertos (%); canais fechados (%); canais subterrâneos (%); captações (und./Km³); domicílios em risco (%) e taxa de pavimentação (%), respectivamente.



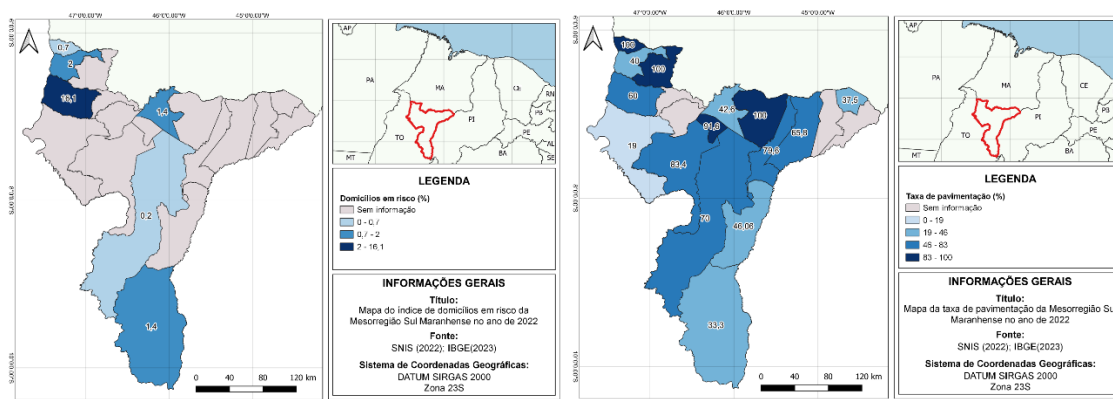


Figura 1 - Mapa de indicadores da drenagem urbana da Mesorregião Sul Maranhense

A Figura 1A revela presença de canais abertos na Mesorregião Sul Maranhense. O município de Balsas possui o maior percentual de canais abertos da mesorregião. Porém, a maioria dos municípios não informaram o percentual de canais abertos. As áreas em sem informação representam uma lacuna nos dados, impossibilitando a análise e o planejamento adequado em relação à infraestrutura de drenagem e aos potenciais usos desses canais.

Um grande risco associado a canais abertos é o seu uso indevido para o lançamento de esgoto doméstico sem tratamento, especialmente em áreas com baixa cobertura de redes coletoras e estações de tratamento. Isso transforma os canais em fontes de poluição, vetores de doenças e degradadores do ambiente.

Quanto a infraestrutura de canais fechados, é possível observar, na Figura 1B, que é predominantemente incipiente ou ausente na maior parte da Mesorregião Sul Maranhense. Esta observação contrasta com a concentração de canais abertos observados na Figura 1A, sugerindo que, quando há alguma infraestrutura de drenagem, ela tende a ser superficial. A presença de canais fechados é um indicador positivo de modernização da infraestrutura de drenagem e pode estar associada a áreas urbanas mais densas e com maior capacidade de investimento.

Para a infraestrutura de canais subterrâneos, Figura 1C, também é possível observar que um maior número de municípios disponibilizou essa informação, quando comparado com os demais tipos de canais. Porém, este indicador é predominantemente incipiente ou ausente na maior parte da Mesorregião Sul Maranhense. Os baixos percentuais verificados nos municípios indicam que a infraestrutura de drenagem subterrânea é uma exceção. Este cenário sugere que a

drenagem, quando existente, é majoritariamente realizada por canais abertos ou de forma inadequada.

Na Figura 1D é possível observar que grande parte da mesorregião possui uma baixa densidade de captações formalizadas ou reportadas, ou que os dados não estão disponíveis. No entanto, o município de Balsas possui uma concentração significativamente maior de unidades de captação.

A vulnerabilidade na Mesorregião Sul Maranhense, quanto a presença domicílios em risco de inundação podem ser observado na Figura 1E. Apesar de vários municípios não disponibilizarem os dados, verifica-se que o município de Estreito foi o que apresentou um maior risco de inundação e o município de Balsas foi o que apresentou um menor percentual. A gestão inadequada da drenagem urbana, a ocupação de áreas de risco e as mudanças climáticas são fatores que acentuam essas vulnerabilidades. Para mitigar essas consequências, é necessário a implantação e manutenção de redes de drenagem eficientes (canais abertos e subterrâneos) e bacias de retenção, regulamentação e fiscalização rigorosas da ocupação do solo, evitando construções em áreas de risco, monitoramento de níveis de rios e chuvas, e sistemas de alerta precoce para a população e conscientização da população sobre a importância de não descartar resíduos de forma inadequada.

A Figura 1F apresenta o mapa da taxa de pavimentação da Mesorregião Sul Maranhense. Este indicador é fundamental para analisar a infraestrutura urbana e a qualidade de vida nos municípios da mesorregião. Observa-se, na Figura 1F, que, embora existam áreas com alta taxa de pavimentação, grande parte dos municípios se encontra em faixas mais baixas ou sem informação, indicando um déficit considerável na infraestrutura viária e urbana. A pavimentação é um componente essencial para o desenvolvimento urbano, influenciando diretamente a qualidade da drenagem, a redução da poeira (com impactos na saúde respiratória), a segurança do tráfego e a acessibilidade aos serviços.

4. Conclusão

O diagnóstico da drenagem urbana na Mesorregião Sul Maranhense revelou um cenário de significativa precariedade e lacunas de informação. A análise dos dados demonstrou que a infraestrutura, quando existente, é majoritariamente

superficial, com predominância de canais abertos, enquanto sistemas fechados e subterrâneos são incipientes ou ausentes na maior parte dos municípios.

A principal contribuição deste estudo reside na compilação e espacialização de dados sobre a drenagem urbana em uma região com carência de informações sistematizadas, oferecendo um panorama que pode subsidiar o planejamento e a formulação de políticas públicas. A pesquisa evidencia a urgência de alinhar o desenvolvimento urbano local às diretrizes do Marco Legal do Saneamento, destacando a drenagem como um componente essencial e frequentemente negligenciado para a resiliência das cidades.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a realização de estudos de campo para validar os dados do SNIS e preencher as lacunas de informação identificadas.

Referências

FRANCISCO, T. H. S. et al. The main challenges for improving urban drainage systems from the perspective of Brazilian professionals. *Infrastructures*, v. 8, n. 1, p. 5, 2023. DOI: 10.3390/infrastructures8010005.

IBGE - Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. Divisão do Brasil em Mesorregiões e Microrregiões Geográficas. 1992.

IBGE. Censo Demográfico 2023. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

MELO, Ivan Henrique. O que é Drenagem de Águas Pluviais de Canais. Gabarito Universitário. 2024. Disponível em: <https://gabaritouniversitario.com.br/glossario/o-que-e-drenagem-de-aguas-pluviais-de-canais/>. Acesso em: 16 de jun. 2024.

OLIVEIRA, Edson Luis de Almeida et. al. Modificações Antropogênicas nos Canais de Drenagem em Área Urbana na Bacia Hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria/Rs. UFMS, 2004. Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/5/6/Edson%20Luis%20de%20Almeida%20Oliveira%202.pdf>. Acesso em: 30 de jun. 2024.

RODRIGUES, N. M.; RODRIGUES, C. E. F.; RIBEIRO, C. R. The lack of urban drainage in Brazilian cities. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 6, e29652, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i6.29652.

SABOYA, Renato. Taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento v.2.0. Urbanidades Urbanismo, Planejamento Urbano E Planos Diretores, 2020. Disponível em: <https://urbanidades.arq.br/2020/03/29/taxa-de-ocupacao-e-coeficiente-de-aproveitamento-v-2-0/>. Acesso em: 20 de jun. 2024.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos 2022. Brasília, DF: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2022.

SOUZA, G. O. de et al. Technical analysis of urban drainage problems on the street Rio Grande do Norte of Açailândia – Maranhão considering the slope of the road and its impact on water drainage in rainy periods. *Research, Society and Development*, v. 12, n. 2, e40010, 2023. DOI: 10.33448/rsd-v12i2.40010.

Abstract

The absence or inefficiency of drainage systems, compounded by soil impermeability and climate change, results in severe socioeconomic and environmental impacts, such as flooding and contamination. This study aims to diagnose urban drainage infrastructure in the Southern Maranhão Mesoregion, an often-neglected component of basic sanitation. The methodology consisted of collecting and analyzing data from the National Sanitation Information System (SNIS) for the Southern Maranhão Mesoregion, verifying indicators such as canal length, water intake density, and households at risk of flooding. The results indicate a predominantly incipient or absent drainage infrastructure, generally superficial when present. Inadequate management and the occupation of at-risk areas increase the region's vulnerability to flooding, highlighting the need for investment and oversight to mitigate the identified problems.

Keywords: SNIS, sanitation indicators, urban infrastructure.

ESTADO DA ARTE: SITUAÇÃO ATUAL E TENDÊNCIAS FUTURAS SOBRE PREVISÃO DE GERAÇÃO SOLAR E EÓLICA

Manayara Santos Rodrigues Bezerra¹, Tatiane Carlyne Carneiro¹

¹ Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências de Balsas (CCBL)

Resumo

A intermitência inerente às energias eólica e solar fotovoltaica compromete a segurança e a operação da rede elétrica, tornando essencial o desenvolvimento de modelos de previsão precisos. Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sistematizada sobre técnicas de *Machine Learning* (ML) aplicadas à previsão da geração solar e eólica, com ênfase nas abordagens de *Deep Learning* (DL). A pesquisa foi conduzida nas bases *Web of Science*, *Scopus*, *IEEE Xplore* e Periódicos CAPES, considerando publicações revisadas por pares no último quinquênio (2020 a 2025). Foram analisados 58 artigos que atenderam aos critérios de inclusão, seguidos por uma análise bibliométrica e uma classificação por relevância técnica e metodológica. Os resultados mostram um aumento significativo do interesse científico no tema, embora ainda haja baixa cooperação internacional entre os países. A análise detalhada destacou o uso de arquiteturas híbridas de DL para previsão simultânea de geração solar e eólica. As tendências futuras apontam para a integração de técnicas de *Transfer Learning* e o uso de modelos capazes de lidar com múltiplas fontes de dados meteorológicos e energéticos.

Palavras-chave: Geração solar; geração eólica; métodos de previsão; aprendizado de máquina; aprendizado profundo.

1. Introdução

Os métodos de previsão de séries temporais baseiam-se na análise de observações registradas ao longo de um intervalo de tempo, as quais revelam padrões de comportamento que podem ser explorados para antecipar eventos futuros. Embora diversas técnicas já estejam consolidadas na literatura, avanços recentes em *Machine Learning* (ML) e *Deep Learning* (DL) têm impulsionado o desenvolvimento de modelos híbridos capazes de capturar relações não lineares e interdependentes (Karakan, 2024; Bamisile et al, 2023).

A intermitência dos recursos eólico e solar continua sendo um dos principais desafios para a operação segura e eficiente dos sistemas de energia elétrica, afetando diretamente a estabilidade dos sistemas e a previsibilidade dos mercados de energia (Yousuf; Al-Bahadly; Avci, 2019). Assim, previsões acuradas de geração de energia renovável tornaram-se fundamentais para otimizar o despacho

¹MA-140, KM 04, Balsas - MA, 65800-000. E-mail: manayara.bezerra@discente.ufma.br

energético, reduzir custos operacionais e promover a integração sustentável de fontes limpas.

O crescimento global da adoção de energias renováveis é motivado pela necessidade de reduzir as emissões de carbono e atender às metas de descarbonização (Lima et al, 2020). No entanto, a natureza intermitente e estocástica dessas fontes impõe limitações que exigem soluções preditivas cada vez mais sofisticadas (Garg e Krishnamurthi, 2023).

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sistematizada sobre as técnicas de previsão de geração solar e eólica, com ênfase nas metodologias de ML e DL. Busca-se identificar as principais abordagens, lacunas de pesquisa, tendências futuras e perspectivas de integração de modelos híbridos no contexto energético contemporâneo.

2. Fontes Intermitentes para Geração de Energia Elétrica

Fontes de energia renovável são consideradas substitutas promissoras para combustíveis fósseis por serem sustentáveis, limpas e inesgotáveis. O futuro dos sistemas de energia está fortemente vinculado à alta penetração de fontes renováveis (Karakan, 2024). As fontes intermitentes para geração de eletricidade, incluindo as fontes eólica e solar, têm sido rapidamente integradas aos sistemas de energia mundialmente, impulsionadas pela necessidade de reduzir as emissões globais de carbono e pela implementação de políticas de energia renovável (Bamisile et al, 2023).

O setor produtivo tem passado por transformações, demonstrando o aumento no uso de fontes intermitentes que podem estar conectadas à rede ou funcionar em sistemas isolados (Garg e Krishnamurthi, 2023). Essas fontes apresentam como principais características a natureza estocástica, incerta e intermitente, onde a geração é dependente de variáveis ambientais não controláveis, como a velocidade do vento e as condições climáticas (Khan et al, 2021).

Os principais recursos utilizados para fontes intermitentes incluem fotovoltaicos (PV), energia eólica, hidrelétrica, geotérmica, biomassa e de ondas (Karakan, 2024). A geração eólica somente está disponível quando o vento sopra a partir de determinados níveis de velocidade. De forma semelhante, a geração solar varia com o nível de irradiação incidente, sendo variável de acordo com o

movimento do planeta e com a nebulosidade local, segundo Garg e Krishnamurthi (2023) o pico de geração solar ocorre tipicamente na tarde, o que contrasta com o pico de consumo que se dá após o pôr do sol.

Assim, à medida que a participação de fontes renováveis como a eólica e a solar cresce nas matrizes elétricas, maior é a estocasticidade e intermitência na geração de energia elétrica, que gera uma maior incerteza na geração, que agrava os impactos negativos e pode comprometer o balanceamento de energia, bem como a segurança, estabilidade e confiabilidade do sistema de energia (Bamisile et al, 2023).

3. Metodologia

A pesquisa bibliográfica foi conduzida de forma sistematizada, abrangendo as bases de dados *Web of Science*, *Scopus*, *IEEE Xplore* e no portal de periódicos CAPES. O levantamento concentrou-se em publicações revisadas por pares no período de 2020 a 2025, com foco em técnicas de ML aplicadas à previsão de geração solar e eólica.

Para tornar a busca mais precisa, utilizaram-se as combinações de palavras-chaves, incluindo: *solar forecasting*, *PV forecasting*, *solar power prediction*, *solar irradiance prediction*, *wind forecasting*, *wind power prediction*, *wind speed prediction*, *wind and solar power*, *deep learning*, *convolutional neural network* (CNN), *recurrent neural network* (RNN) e *long short-term memory* (LSTM).

O processo inicial identificou 854 artigos. Após a exclusão de duplicatas e de publicações que não se enquadraram como artigos científicos, procedeu-se à triagem temática, com leitura de títulos e resumos. Os trabalhos foram classificados em três categorias: a) Excluídos, fora do escopo da pesquisa; b) Potencialmente relevantes, abordaram o tema, mas com técnicas distintas; c) Incluídos, artigos diretamente relacionados ao objetivo da revisão. Os critérios de inclusão exigiram que os estudos tivessem como foco a previsão de geração solar e/ou eólica utilizando técnicas de ML, com especial ênfase em abordagens de DL.

Após a filtragem, 58 artigos foram selecionados para análise detalhada. Em seguida, aplicou-se um sistema de avaliação estruturada composto por sete questões, com pontuação, com o objetivo de filtrar os trabalhos mais relevantes. As perguntas foram as seguintes: Q1. A técnica de ML é descrita de forma sistemática e

detalhada?; Q2. O artigo discute as limitações, restrições ou condições de aplicabilidade?; Q3. O artigo utiliza métricas de desempenho consolidadas para avaliar o modelo?; Q4. O modelo é testado em diferentes conjuntos de dados ou regiões, ou é específico para um caso de estudo?; Q5. Os dados e as hipóteses do estudo são explicitamente descritos?; Q6. Apresenta de forma explícita as camadas que foram usadas para montar o algoritmo em questão? e Q7. Apresenta de forma explícita os valores dos hiperparâmetros usados?.

Os seis artigos com maior pontuação foram analisados na íntegra, permitindo identificar tendências metodológicas, limitações e lacunas de pesquisa. Por fim, foi conduzida uma análise bibliométrica dos 58 artigos selecionados utilizando o *software RStudio* e o pacote *Bibliometrix*, resultando em gráficos e indicadores de produtividade científica, cooperação internacional e palavras-chave mais frequentes.

4. Resultados e discussão

A análise bibliométrica dos 58 artigos selecionados revelou um crescimento expressivo das publicações sobre previsão de geração solar e eólica entre 2020 e 2024, com destaque para os anos de 2023 e 2024, período em que se observa a consolidação de técnicas baseadas em ML aplicadas a sistemas energéticos, conforme apresentado na Figura 1. Uma possível explicação para o aumento de pesquisa na área energética pode ser o fato de que cada vez mais países buscam soluções alternativas e sustentáveis para a geração de energia.

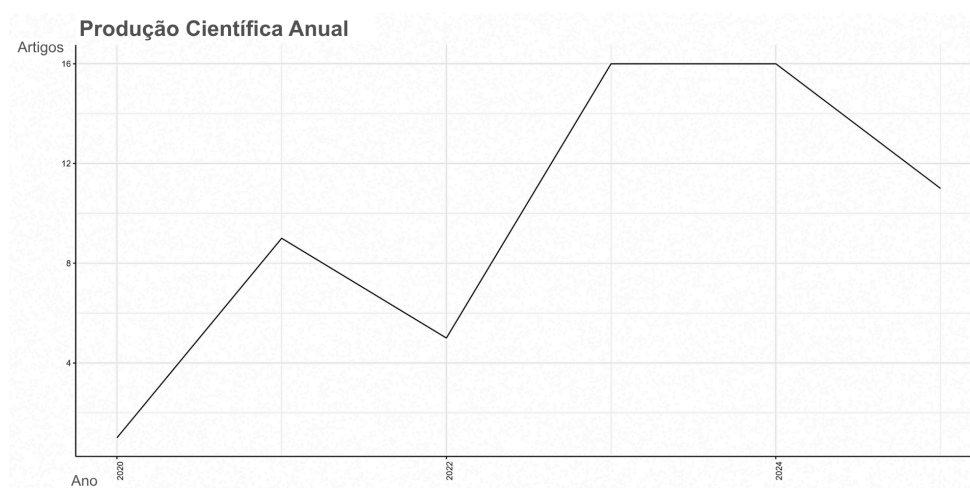


Figura 1. Valores da produção científica anual na área de previsão de geração solar e eólica.

Fonte: Próprio autor, 2025.

A cooperação internacional entre pesquisadores mostrou-se limitada, com predomínio de publicações unilaterais (SCP - *Single Country Publication*). A China destacou-se como principal produtora de estudos, seguida por Coreia do Sul, Reino Unido, Austrália e Emirados Árabes Unidos, que apresentam menor colaboração entre si, conforme apresentado na Figura 2.

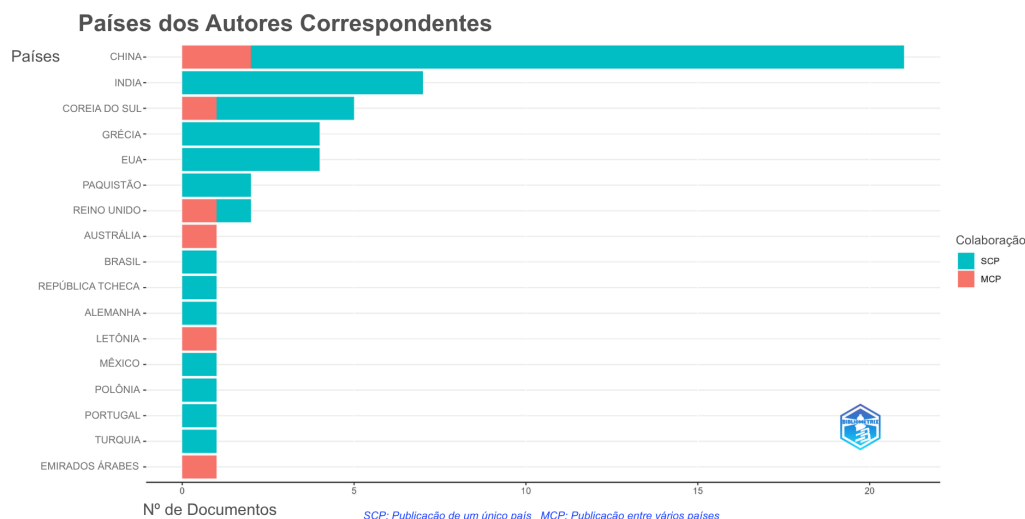


Figura 2. Cooperação entre autores de diferentes países.
Fonte: Próprio autor, 2025.

A análise de autores evidenciou a concentração da produção científica em poucos pesquisadores, como Khan S. e Wang Y., com 4 publicações cada, e Li, Wang B. e Wang H. com 3 pesquisas desenvolvidas, conforme apresentado na Figura 3.

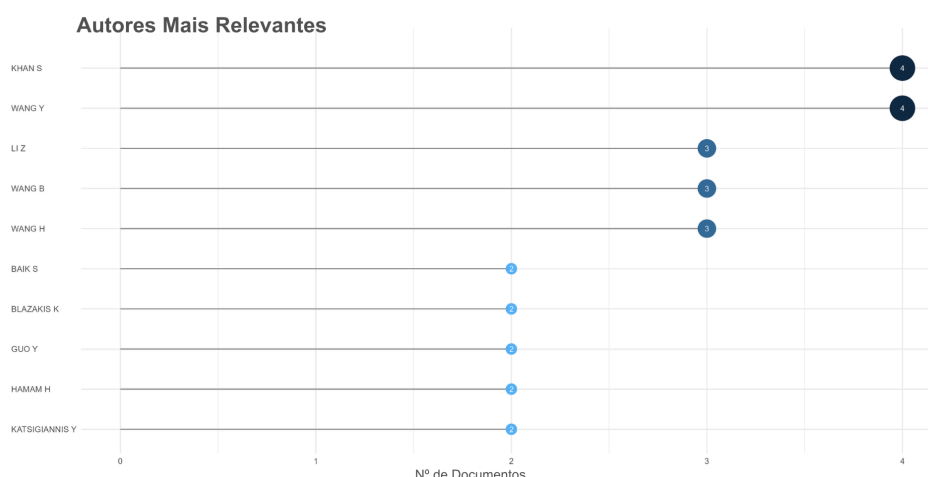


Figura 3. Autores mais relevantes na área de previsão de geração solar e eólica.
Fonte: Próprio autor, 2025.

(BiLSTM) para a previsão final. Foi utilizado dois *datasets* publicamente disponíveis: (a) *Solar Dataset* e (b) *Wind Dataset*. O AB-Net superou consistentemente os modelos concorrentes (BiLSTM, CNN-BiLSTM, *Encoder-Decoder*) em ambos os *datasets*. Para o *Solar Dataset*, alcançou MSE de 0,0106 e RMSE de 0,1028; para o *Wind Dataset*, o MSE foi de 0,0004 e RMSE de 0,0189.

Garg e Krishnamurthi (2023) foca em resolver o problema da escassez de dados históricos para novas instalações de energia, sendo assim, os autores propõem um modelo LSTM parametrizado baseado em *Transfer Learning* (TL) para análises preditiva de curto prazo. Os resultados obtidos mostraram uma melhora significativa no RMSE, onde para a planta solar 1, a melhoria do RMSE foi de até 517%. Para a demanda de Estação de Carregamento de Veículos Elétricos (EVCS), a melhoria foi de até 133%. A escassez de modelos pré-treinados disponíveis para domínios especializados (como EVCS ou solar) representa um desafio para a aplicação generalizada de TL.

Hu *et al.* (2023) buscou superar as limitações do método *Analog Ensemble* (AnEn), que utiliza métricas de similaridade baseadas em distância Euclidiana e sofre com o custo computacional da otimização de pesos para múltiplos preditores. Foi proposto pelos autores a *Deep Analog* (DA), que utiliza uma *Triplet Network* para aprender uma transformação não linear dos preditores de tempo e a LSTM para codificar a série temporal. Além disso, os autores usaram o método *Reverse Analog* (RA) para construir amostras, onde a similaridade é determinada pela semelhança das observações associadas. As previsões foram feitas utilizando um conjunto completo de 227 preditores do *North American Mesoscale Model*. Os resultados obtidos apontaram que o DA superou o AnEn em métricas como RMSE e *bias*, especialmente nas primeiras 24 horas de previsão. O DA mostrou a menor variação de *bias* para a velocidade do vento.

O estudo de Karakan (2024) compara o desempenho de modelos DL e estatísticos em diferentes horizontes de tempo (semanal, mensal, anual). O autor utilizou técnicas diferentes para cada sistema de energia, para a energia solar, foi realizado a comparação dos modelos LSTM e SARIMA, já para a energia eólica, foi utilizado modelos híbridos e independentes: CNN-GRU, GRU, LSTM, LSTM-GRU, CNN-LSTM, e CNN-RNN. Foram usados três *datasets* de usinas solares reais e dados de velocidade do vento de estações meteorológicas. Para a energia solar o

modelo LSTM superou o SARIMA em todas as usinas, atingindo uma precisão máxima de 81%. Para os dados eólicos, o modelo híbrido CNN-GRU alcançou a precisão máxima de 99,81% na previsão anual de velocidade do vento.

Neumann *et al.* (2023) investiga como as transformações de dados meteorológicos influenciam a precisão da previsão de séries temporais de energia (demanda elétrica, solar, eólica). Os modelos de previsão utilizados foram Rede Neural Profunda (DNN) e Regressão Linear (LR). Os dados usados foram séries temporais de demanda elétrica, energia solar e eólica para Baden-Württemberg, Alemanha do ano de 2015 a 2019. Os resultados obtidos apontam que a transformação de dados melhorou a precisão da previsão entre 3,7% e 5,2% em comparação com dados brutos, sendo que as transformações estatísticas e de redução de dimensionalidade estão entre as melhores.

A convergência das pesquisas indica que modelos híbridos, como CNN-LSTM e CNN-GRU, oferecem melhor desempenho ao lidar com a não linearidade e variabilidade dos dados energéticos. Observa-se também o avanço do uso de TL e de modelos capazes de combinar dados meteorológicos, geoespaciais e operacionais para melhorar a generalização. Os resultados evidenciam que a combinação de técnicas avançadas de ML e a qualidade dos dados são os elementos centrais para o avanço da previsão precisa de energia renovável.

5. Conclusão

Percebe-se um crescimento expressivo da produção científica voltada à previsão de geração solar e eólica a partir de 2020, destacando-se a liderança da China em número de publicações e a baixa cooperação internacional entre grupos de pesquisa. Essa limitação indica uma oportunidade para fortalecer parcerias internacionais e ampliar a troca de dados e metodologias entre países.

A literatura converge na importância das arquiteturas de *Deep Learning* e das técnicas de *feature engineering* - seja através de transformações de dados de entrada, como estudado por Neumann et al., ou através de extração de *features* por Autoencoders, como no AB-Net - para lidar com a complexidade da previsão de energia renovável. O Transfer Learning emerge como uma solução promissora para cenários de escassez de dados, enquanto modelos avançados como DHN-Net e

Deep Analog demonstram a viabilidade da previsão simultânea e da superação de gargalos computacionais para incerteza.

Dessa forma, o avanço das técnicas de ML e DL, aliados à colaboração científica internacional e a qualidade dos dados meteorológicos, será determinante para o desenvolvimento de previsões mais precisas e escaláveis no contexto da transição energética global.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à minha orientadora, Tatiane Carolyne Carneiro, pelo apoio, dedicação e orientação ao longo de todo o processo. Sou imensamente grata por todo o aprendizado e pelas contribuições valiosas que tornaram este trabalho possível.

Referências

BAMISILE, Olusola *et al*, Deep hybrid neural net (DHN-Net) for minute-level day-ahead solar and wind power forecast in a decarbonized power system, **Energy Reports**, v. 9, p. 1163–1172, 2023.

GARG, Sherry; KRISHNAMURTHI, Rajalakshmi, Transfer learning: a cross domain LSTM way towards sustainable power predictive analytics, **Multimedia Tools and Applications**, v. 83, n. 18, p. 54097–54123, 2023.

LIMA, M.A.F.B. *et al*. Improving solar forecasting using Deep Learning and Portfolio Theory integration. **Energy** 195:117016, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117016>.

HU, Weiming *et al*, Machine Learning Weather Analogs for Near-Surface Variables, **Boundary-Layer Meteorology**, v. 186, n. 3, p. 711–735, 2023.

KHAN, Noman *et al*, AB-Net: A Novel Deep Learning Assisted Framework for Renewable Energy Generation Forecasting, **Mathematics**, v. 9, n. 19, p. 2456, 2021.

KARAKAN, Abdil, Predicting Energy Production in Renewable Energy Power Plants Using Deep Learning, **Energies**, v. 17, n. 16, p. 4031, 2024.

NEUMANN, Oliver *et al*, Using weather data in energy time series forecasting: the benefit of input data transformations, **Energy Informatics**, v. 6, n. 1, p. 44, 2023.

YOUSUF, M.U.; AL-BAHADLY, I.; AVCI, E. Current perspective on the accuracy of deterministic wind speed and power forecasting. **IEEE Access**, 7, 159547-159564, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8890707>.

Abstract

The intermittency inherent in wind and solar photovoltaic energy compromises the safety and operation of the electrical grid, making the development of accurate forecasting models essential. This work presents a systematic literature review on Machine Learning (ML) techniques applied to forecasting solar and wind generation, with an emphasis on Deep Learning (DL) approaches. The research was conducted in the Web of Science, Scopus, IEEE Xplore, and CAPES Journals databases, considering peer-reviewed publications in the last five years (2020 to 2025). 58 articles that met the inclusion criteria were analyzed, followed by a bibliometric analysis and a classification by technical and methodological relevance. The results show a significant increase in scientific interest in the topic, although there is still low international cooperation between countries. The detailed analysis highlighted the use of hybrid DL architectures for simultaneous forecasting of solar and wind generation. Future trends point to the integration of Transfer Learning techniques and the use of models capable of handling multiple sources of meteorological and energy data.

Keywords: Solar generation; Wind power generation; forecasting methods; machine learning; deep learning

ESTUDO AMBIENTAL DO RIACHO CACHOEIRA NO MARANHÃO

Hayme Dheymison Vilarindo Barbosa ¹, Ronaldo Sousa dos Santos ¹ & Diego Lima Medeiros ¹
¹ Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências de Balsas (CCBL)

Resumo

O estudo ambiental é um instrumento de grande relevância no planejamento e execução de intervenções ambientais. Desta forma, um estudo ambiental foi utilizado na identificação da evolução do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica para fornecer informações para orientar políticas públicas voltadas ao desenvolvimento sustentável. Foi avaliado o Riacho Cachoeira, localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Neves (BHRN) na região Sul Maranhense. O estudo considerou tanto o meio rural quanto o urbano, com foco na redução da degradação ambiental. Observou-se, a importância de adequação ambiental para minimizar os impactos negativos e promover a conservação do Riacho Cachoeira, beneficiando diretamente a população que depende deste recurso hídrico.

Palavras-chave: Impacto ambiental; Estudo ambiental; Riacho Cachoeira.

1. Introdução

A disponibilidade hídrica deve ser assegurada em qualidade e quantidade. O planejamento e ocupação do solo requer uma ampla identificação das demandas hídricas, cuja a ocupação de uma bacia vai agregar na geração de impactos. Esses problemas se agravam próximos de áreas as quais a economia é mais desenvolvida, as matas se transformam-se em empecilhos para a abertura de estradas, desenvolvimento de culturas agrícolas e pastagens além de padecerem com a pressão antrópica (Pequeno *et al.*, 2002).

A expansão de chácaras e fazendas no entorno do Riacho Cachoeira na Bacia Hidrográfica do Rio Neves (BHRN) na região Sul Maranhense tem sido de forma descontrolada, gerando desmatamento e queimadas frequentes e redução no volume de água. É possível perceber o assoreamento do leito do rio em decorrência das construções de áreas de lazer e recreação. Além disso, há uma falta de conscientização não só pelos donos de chácaras, mas também pelos frequentadores do local, já que os impactos ocasionam modificações na paisagem, sendo algumas irreversíveis (São Raimundo das Mangabeiras, 2024).

As evidências nos colocam em alerta quanto à alta velocidade processo de ocupação, sobretudo nas chácaras que se instalam ao longo do Riacho São

¹ Rodovia MA-140, Km 4, s/n, CEP 65.800-000, Balsas-MA.

E-mail: hayme.barbosa@discente.ufma.br, ronaldosousa110@gmail.com & diego.lm@ufma.br, respectivamente.

Raimundo das Mangabeiras na região Sul Maranhense, cujo ambiente vem sendo extremamente fragilizado e apresenta níveis elevados de degradação em decorrência da substituição não planejada da cobertura vegetal inicial por extensas áreas de monocultura, criação de animais e também ocupação de Áreas de Preservação Permanente (APP) para recreação (Correia Filho *et al.*, 2011).

Este estudo apresenta uma perspectiva na melhoria da qualidade ambiental e consequente manutenção da qualidade de vida na população. Cabe salientar que a região é extremamente escassa de estudos ambientais. Portanto, um levantamento de dados ambientais é fundamental para apoiar o planejamento e adequação da bacia do Riacho Cachoeira. O estudo ambiental foi utilizado para identificar como ocorreu a evolução do uso e ocupação do solo na bacia do Riacho Cachoeira de modo que as informações coletadas servem de base para discussão e posterior elaboração políticas públicas de desenvolvimento sustentável, considerando a conservação e preservação ambiental do meio rural e urbano.

2. Metodologia

A metodologia desse trabalho foi dividida nas etapas listadas a seguir:

- I. Pesquisa bibliográfica: foi realizado um levantamento de dados hidrográficos junto à Secretaria Municipal de Meio Ambiente de São Raimundo das Mangabeiras-MA, com consulta a documentos técnicos, relatórios ambientais e registros oficiais referentes ao Riacho Cachoeira;
- II. Planejamento da atividade de campo: formou-se uma equipe composta por seis profissionais, entre técnicos e engenheiros, e definiu-se a utilização de equipamentos como drone, motocicletas, caminhonete, aparelhos de *Global Positioning System* (GPS), câmeras fotográficas, celulares, bem como os devidos equipamentos de proteção individual (EPI), coletiva (EPC) e pessoal (EPP);
- III. Levantamento em campo: foi realizada a visita ao Riacho Cachoeira, percorrendo-se desde a nascente até a estação de captação localizada na cidade de São Raimundo das Mangabeiras-MA. Durante esse processo, foram feitos registros fotográficos, georreferenciamento com GPS e mapeamento aéreo por drone, além da identificação de áreas degradadas e pontos de impacto ambiental ao longo do curso do riacho;

- IV. Aplicação de questionários: foram entrevistados os proprietários de imóveis situados no entorno do Riacho Cachoeira, a fim de coletar informações sobre o uso da água, práticas de manejo do solo, percepção ambiental e histórico de degradação da região;
- V. Organização e análise dos dados: as informações levantadas em campo e obtidas por meio dos questionários foram sistematizadas e cruzadas com os dados secundários da pesquisa bibliográfica, possibilitando uma visão integrada da situação ambiental da bacia hidrográfica estudada;
- VI. Elaboração do Plano de Conservação: com base nos dados obtidos, foram identificadas as áreas críticas para recuperação ambiental e delineadas as ações necessárias para a elaboração de um Plano de Conservação e Restauração de Áreas Degradadas no curso do Riacho Cachoeira.

3. Resultados e discussão

3.1 Dados ambientais coletados

Os resultados da aplicação dos questionários são apresentados por questão. A primeira questão identificou o tempo em que os proprietários possuíam a propriedade, verificando o lapso temporal de degradação dos cursos d'água (Figura 1).

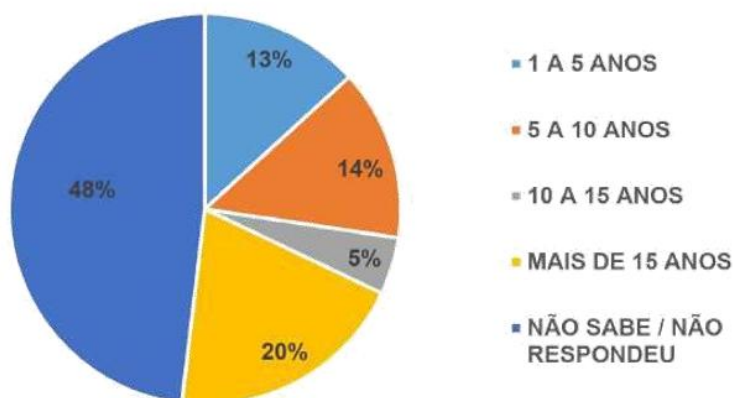


Figura 1. Tempo de posse da propriedade.

A Figura 1 demonstra que 20% dos proprietários possuem o imóvel a mais de 15 anos, 5% entre 10 a 15 anos, 14% entre 5 a 10 anos e 13% possuem a propriedade

a 1 a 5 anos. Vale destacar que das 108 propriedades visitadas pelos pesquisadores, 48% delas estavam sem os moradores ou não souberam responder. Os proprietários puderam mencionar mais de uma atividade desenvolvida no imóvel (Figura 2). No total foram obtidas 118 respostas.

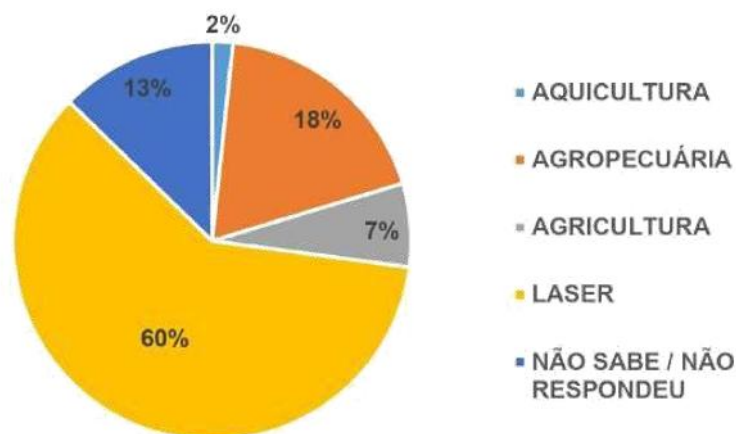


Figura 2. Atividades desenvolvidas na propriedade.

Foi constatado que 60% dos imóveis são utilizados apenas para o Lazer, 18% dos imóveis desenvolvem a atividade agropecuária, 7% a agricultura, 2% a aquicultura e 13% não souberam ou não responderam. A Figura 3 apresenta a origem da água consumida na propriedade.

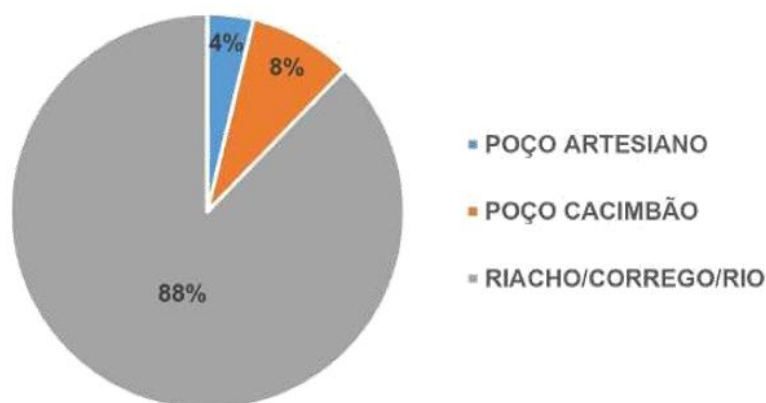


Figura 3. Origem da água consumida na propriedade.

Ficou claro que a maioria das propriedades (88%) utiliza as águas do Riacho Cachoeira para o consumo doméstico, 8% possuem poço cacimbão e 4% poço artesiano. A Figura 4 apresenta os dados sobre a presença de construções nas APPs do Riacho Cachoeira.

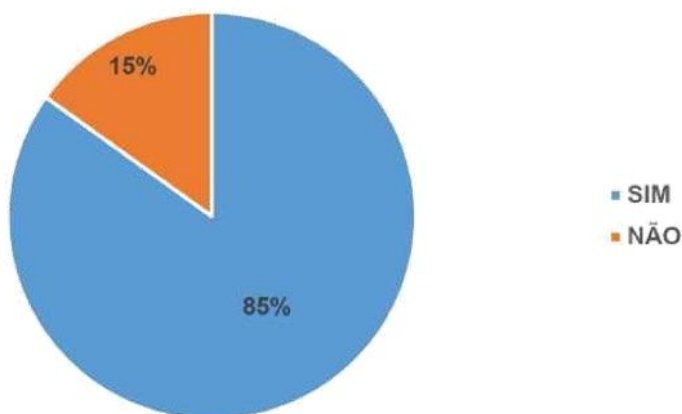


Figura 4. Construção na Área de Preservação Permanente (APP).

A construção em APP é considerada crime ambiental e infração administrativa, a não ser que esteja de acordo com o Código Florestal – Lei 12.651 (Brasil, 2012). De acordo com a Figura 4, 85% das propriedades localizadas no entorno dos Riacho Cachoeira possuem construções na APP e apenas 15% das propriedades possuem construções fora dela.

A construção em APPs pode trazer ameaças à natureza, tais como impermeabilização de áreas, perda de biodiversidade, solapamento e assoreamento do curso d'água. Do total de construções avaliadas, 89% são casas principal ou sede, as quais são assoalhadas de tijolos ou alvenaria (Figura 5). Em 6% são casas de morador (caseiro) e 5% são para outras finalidades.



Figura 5. Tipo de Construção na Área de Preservação Permanente (APP).

As equipes visitaram as 106 propriedades localizadas no entorno do Riacho Cachoeira que além das casas-sede e casa dos morador-caseira, existe também outros tipos de edificações nas APPs (Figura 6).

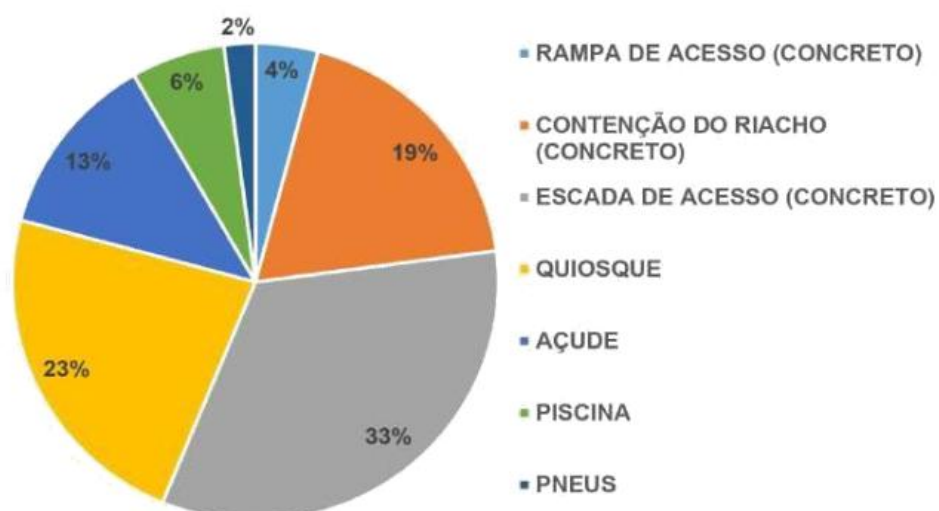


Figura 6. Construções observadas na Área de Preservação Permanente (APP).

Como podemos observar na Figura 6, 33% das propriedades possuem escadas de acesso em concreto, 23% quiosques de tijolos e cobertura em telha cerâmica, 19% possuem muros de contenção (concreto) dos riachos, 13% açudes, em 6% das propriedades possuem piscinas, já em 4 % tem rampa de acesso e em 2 % as contenções nos riachos são feitas com pneus. As APPs são áreas protegidas que tem

a função de preservar a paisagem, biodiversidade, recursos hídricos, estabilidade geológica, solo e o bem-estar das populações humanas. A Figura 7 mostra o tempo em anos que essas construções possuem.

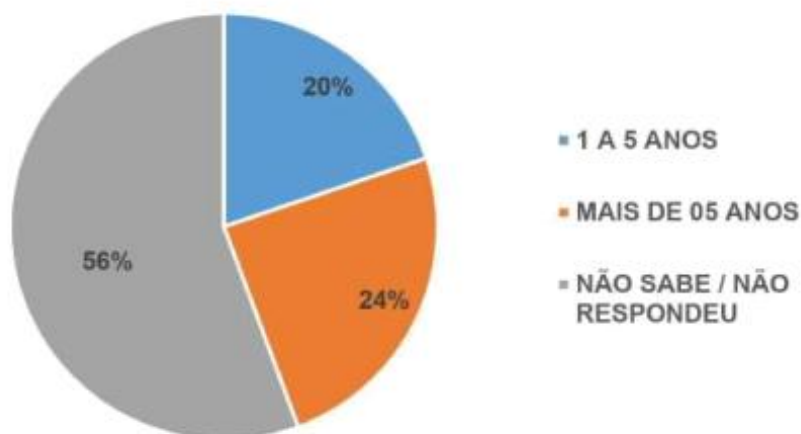


Figura 7. Tempo de construções observadas na Área de Preservação Permanente (APP).

A Figura 7 mostra que 55% dos entrevistados não sabe ou não respondeu qual o tempo de construção, 24% disseram que existe em mais de 5 anos e 20% em menos de 5 anos. Em relação a forma de captação de água (Figura 8), em 73% das propriedades não existe a captação de água, o acesso é feito diretamente do riacho de forma manual. Em 21% dos imóveis, a captação é superficial e em 6% é realizada de forma profunda.

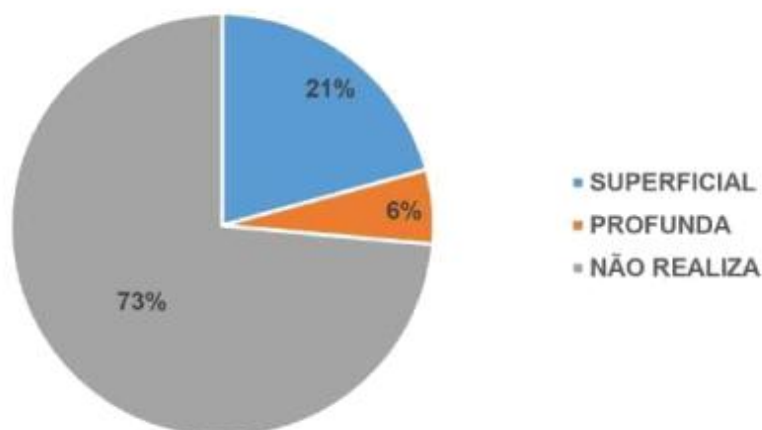


Figura 8. Forma de Captação de Água nas Propriedades.

Percepção ambiental pode ser descrita como uma tomada de consciência do meio ambiente pela humanidade. O meio ambiente natural vem sendo alterado por espaços urbanos e rurais. É necessário propiciar fundamentações, métodos, procedimentos e instruções que assegure a aptidão dos ecossistemas com sistemas de ocupação a fim de atender os requisitos legais e certificações voluntárias de produção sustentável. O nível de degradação ambiental nas bacias hidrográficas é atribuído a falta de comprometimento ambiental, principalmente devido as questões políticas, gerando impactos ambientais significativos.

3.2 Impactos ambientais

O estudo ambiental do Riacho Cachoeira indicou os seguintes potenciais impactos ambientais:

- Assoreamento e erosão das margens, decorrentes da supressão da vegetação ciliar e da ausência de práticas conservacionistas no manejo do solo;
- Supressão da vegetação nativa, com consequente perda de biodiversidade e fragmentação de habitats;
- Alterações na qualidade da água, devido ao carreamento de sedimentos, defensivos agrícolas e nutrientes provenientes das áreas agrícolas adjacentes;
- Pressões sobre a fauna aquática e terrestre, resultantes da alteração das condições naturais do riacho e da redução da conectividade entre áreas de vegetação;
- Impactos socioeconômicos, como a diminuição da disponibilidade hídrica para abastecimento e irrigação, comprometendo a qualidade de vida das comunidades rurais.

Esses resultados corroboram estudos sobre degradação ambiental no bioma Cerrado, os quais apontam o avanço da agropecuária como principal vetor de pressão sobre os recursos hídricos (Klink; Machado, 2005).

3.3 Medidas mitigadoras e programas de monitoramento

Com base nos impactos ambientais identificados, foram propostas medidas mitigadoras e programas de monitoramento voltados à conservação e uso sustentável

do Riacho Cachoeira. Entre eles, destacam-se a recuperação da vegetação ciliar, por meio da recomposição florestal ao longo das margens, em conformidade com o Código Florestal – Lei nº 12.651 (Brasil, 2012), garantindo a proteção das APPs. Além disso, recomenda-se o controle da erosão e adoção de práticas conservacionistas, como curvas de nível, terraceamento e rotação de culturas, a fim de reduzir o carreamento de sedimentos.

Outro ponto fundamental refere-se ao monitoramento contínuo da qualidade da água, por meio de análises físico-químicas e biológicas, seguindo os parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357 (Brasil, 2005). Paralelamente, a educação ambiental voltada a produtores rurais e comunidades locais visa promover a conscientização sobre o uso sustentável dos recursos hídricos. Também se destaca a proteção da fauna, mediante a criação de corredores ecológicos e o fortalecimento da fiscalização contra a caça predatória. Essas ações, conforme Sánchez (2013), são indispensáveis para garantir a resiliência do ecossistema aquático, a sustentabilidade do desenvolvimento econômico regional e a efetividade do processo de gestão ambiental que depende da integração entre poder público, setor produtivo e sociedade civil.

4. Conclusão

O estudo ambiental do Riacho Cachoeira na região Sul Maranhense identificou que a qualidade da água e o ecossistema aquático podem ser afetados por interferências como represas e açudes, que alteram a turbidez, os níveis e os volumes do corpo hídrico. A fauna e a flora também sofrem impactos, com a perda temporária de habitats, especialmente nas margens do riacho. No entanto, medidas mitigadoras, como a recomposição vegetal, monitoramento contínuo e regularização ambiental das propriedades são consideradas eficazes para minimizar os efeitos negativos e promover a recuperação da biodiversidade e da qualidade ambiental.

O estudo concluiu que a adequação é ambientalmente viável, desde que todas as ações de mitigação sejam rigorosamente executadas e acompanhadas por um plano de monitoramento contínuo. Ressalta-se que, se implementado conforme as diretrizes estabelecidas, a recuperação das áreas degradadas na bacia do Riacho Cachoeira poderá contribuir para o desenvolvimento sustentável, conciliando a conservação do riacho com benefícios socioeconômicos à comunidade local, ao

mesmo tempo em que reduz impactos negativos e favorece os usuários que dependem deste curso d'água.

Referências

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa.** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 28 maio 2012.

CORREIA FILHO, Francisco Lages; GOMES, Érico Rodrigues; NUNES, Ossian Otávio; LOPES FILHO, José Barbosa. **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, estado do Maranhão: relatório diagnóstico — o município de São Raimundo das Mangabeiras.** Teresina: CPRM — Serviço Geológico do Brasil, 2011. Relatório diagnóstico.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. **A conservação do Cerrado brasileiro. Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 147-155, 2005.

PEQUENO, P. L. de L.; VASCONCELOS, L. P.; VIEIRA, A. H.; MARTINS, E. P.; LOCATELLI, M.; OLIVEIRA, V. B. V. **Importância das matas ciliares.** Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2002. 11 p.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

SÃO RAIMUNDO DAS MANGABEIRAS (MA). **Estudo de Impacto Ambiental – Riacho Cachoeira.** São Raimundo das Mangabeiras: Prefeitura Municipal, 2024. Estudo de impacto ambiental.

Abstract

Environmental assessments are highly relevant tools for planning and implementing environmental interventions. Therefore, an environmental assessment was used to identify the evolution of land use and occupation in the river basin, providing information to guide public policies aimed at sustainable development. The assessment included the Cachoeira Stream, located in the Neves River Basin (BHRN) in the southern region of Maranhão. The study considered both rural and urban environments, focusing on reducing environmental degradation. The study highlighted the importance of environmental adaptation to minimize negative impacts and promote the conservation of the Cachoeira Stream, directly benefiting the population that depends on this water resource.

Keywords: Environmental impact; Environmental study; Cachoeira Stream.

ESTUDO DE CASO: DURABILIDADE E EFICIÊNCIA DE BLOCOS DE CONCRETO INTERTRAVADOS EM VIAS PÚBLICAS NO CENTRO DE BALSAS-MA

Roney da Silva Gomes¹, Daniel Beserra Costa², Celso Henrique Rodrigues Borgneth³, Debora Louvane Gama de Abreu⁴, Marília Pereira Silva⁵.

¹Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências de Balsas (CCBL)

Resumo

Os blocos intertravados de concreto têm sido amplamente utilizados na pavimentação urbana por seus benefícios ambientais e funcionais. Destacam-se pela facilidade de execução, manutenção simples e permeabilidade, que auxilia no escoamento das águas pluviais e na recarga dos lençóis freáticos. Quando corretamente projetados e instalados, apresentam resistência à compressão, abrasão e agentes químicos, assegurando durabilidade e eficiência. No município de Balsas, Maranhão, esse tipo de pavimento foi aplicado em ruas e praças antigas, substituindo métodos rudimentares e oferecendo maior conforto e estética. O presente estudo buscou avaliar a durabilidade e o desempenho dos blocos intertravados de concreto da praça Eloy Coelho e vias adjacentes, por meio de pesquisa bibliográfica, ensaios laboratoriais e análise qualitativa da percepção dos usuários. A investigação evidenciou que o sistema, após décadas de uso, necessita de aprimoramento em planejamento, execução e manutenção, a fim de garantir maior vida útil às infraestruturas urbanas.

Palavras-chave: Pavimentação urbana; Blocos intertravados; Durabilidade; Eficiência.

1. Introdução

A pavimentação é uma das mais antigas práticas de engenharia, desenvolvida para garantir deslocamentos seguros e eficientes. As primeiras estradas pavimentadas datam de cerca de 4.000 a.C., na Índia e Mesopotâmia, enquanto no Egito já se utilizavam lajões justapostos entre 2.600 e 2.400 a.C. (BERNUCCI et al., 2022). Com o tempo, civilizações como gregos e romanos aperfeiçoaram essas técnicas, consolidando sistemas viários que influenciaram a mobilidade e a organização urbana (FIORITI, 2007; MARCHIONI; SILVA, 2011).

Entre os métodos construtivos, destaca-se o pavimento intertravado de concreto, difundido na Europa no século XIX e adotado no Brasil a partir da década de 1950, com expansão nos anos 1970 (SANTANA, 1993; OLIVEIRA, 2018). Segundo a ABNT NBR 15.593 (ABNT, 2011), esse pavimento é constituído por peças de

¹ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: roney.gomes@discente.ufma.br

² Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: daniel.beserra@ufma.br

³ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: celso.borgneth@ufma.br

⁴ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: debora.abreu@discente.ufma.br

⁵ Departamento de Engenharia Civil, UFMA, Balsas. E-mail: eng.mariliasilva@gmail.com

concreto assentadas sobre base e sub-base compactadas, formando um sistema robusto capaz de suportar cargas e variações climáticas.

Os blocos intertravados oferecem vantagens como permeabilidade, que favorece o escoamento de águas pluviais e reduz ilhas de calor (RODRIGUES et al., 2010; FILGUEIRAS, 2019), além de resistência mecânica e durabilidade (COSTA et al., 2019; SILVA et al., 2023; ABCP, 2010). Para manter sua eficiência, recomenda-se manutenção preventiva, substituição de peças e técnicas de recuperação (ABCP, 1999; DNIT, 2006). Inovações, como blocos drenantes, têm ampliado o uso desse pavimento, conciliando desempenho e sustentabilidade (ABCP, 2011; LIMA FILHO; COSTA JR., 2020).

Estudos de caso comprovam benefícios técnicos e econômicos, reforçando o conforto, segurança e viabilidade ambiental do sistema (GODINHO, 2009; FILGUEIRAS, 2019; COSTA et al., 2023; SOARES et al., 2023). Em Balsas (MA), grande parte das praças e ruas antigas foi pavimentada com blocos intertravados, proporcionando melhor estética, durabilidade e conforto em comparação às vias empicarradas. Entre elas, a Praça Eloy Coelho e suas principais vias de acesso, pavimentadas há mais de 40 anos, constituem um exemplo relevante para avaliar a durabilidade e eficiência desse sistema, além de orientar futuras práticas de planejamento, execução e manutenção.

2. Metodologia

O estudo concentrou-se no entorno da Praça Eloy Coelho e adjacências (Ruas Dr. Justo Pedrosa e Padre Franco), pavimentadas com blocos intertravados sextavados no início da década de 1980, segundo relatos locais. A escolha desse material relaciona-se à disponibilidade regional de insumos e mão de obra. A pavimentação atendeu também à relevância histórica e cultural da área, palco de manifestações como bailes no Clube Recreativo Balsense, festas da Liga Operária, carnaval de rua e o tradicional desfile cívico da Semana da Pátria, ainda realizado na Rua Padre Franco.

2.1. Levantamento de dados preliminares

A coleta de dados iniciou com registro fotográfico presencial para avaliar as condições do pavimento intertravado e definir os pontos de coleta das amostras (Figura 1). Foram selecionados quatro pontos estratégicos considerando a

convergência do tráfego veicular: dois na Rua Padre Franco (ponto 01 na parte mais elevada e 02 na mais baixa) e dois na Rua Dr. Justo Pedrosa (ponto 03 na parte mais baixa e 04 na mais elevada), contemplando também os cantos mais baixos da Praça Eloy Coelho.



Figura 1. Pontos de coleta das amostras no pavimento.

O procedimento foi autorizado pela Secretaria de Infraestrutura municipal, sendo coletados dois blocos em cada ponto, totalizando oito amostras (Figura 2) identificadas como 1.A, 1.B, 2.A, 2.B, 3.A, 3.B, 4.A e 4.B. Após a coleta documentada fotograficamente, as amostras foram encaminhadas ao laboratório de Geotecnia da UFMA campus Balsas, onde foram limpas e preparadas para os ensaios técnicos subsequentes.



Figura 2. Blocos amostrais coletados e limpos.

2.2. Avaliação Visual de Estado dos pavimentos

Foi realizado uma inspeção visual em todo o pavimento em estudo, a fim de detectar e avaliar as suas condições atuais, sendo realizado registros fotográficos de alguns pontos. Cabe enfatizar que o pavimento avaliado possui espessura de 100mm, e nesse caso, segundo Shackel (1990), essa espessura de 100 mm das peças aumenta o desempenho do pavimento intertravado de concreto de forma significativa em relação a espessuras menores.

2.3. Avaliação da eficiência e durabilidade do pavimento em estudo

Os testes consistem em duas etapas: inicialmente, no laboratório de Geotecnia da UFMA campus Balsas, realizaram-se os ensaios de avaliação dimensional e determinação da absorção de água; posteriormente, o ensaio de resistência à compressão foi conduzido no laboratório de concreto de uma empresa parceira local. Ressalta-se que o ensaio de resistência à abrasão não foi realizado, por ser facultativo segundo a norma técnica ABNT NBR 9781 (2013).

2.3.1. Ensaio de avaliação dimensional

O ensaio de avaliação dimensional das peças do pavimento intertravado foi realizado nos dias 7 e 8 de maio, conforme o Anexo D da ABNT NBR 9.781 (2013). Foram analisadas oito amostras do tipo III (formato hexagonal), avaliando-se comprimento, altura e ângulos de inclinação. O comprimento foi medido três vezes em eixos distintos, enquanto a altura contou com dezoito medições por peça, distribuídas nas seis faces verticais. Utilizaram-se paquímetro de precisão (0,08 mm) e esquadro 125 x 80 mm, com todas as peças apoiadas em bancada plana.

Com base nos dados, calcularam-se o comprimento médio (L_m), a altura média (H_m) e o índice de forma ($IF = L_m/H_m$). A norma estabelece comprimento máximo de 250 mm, espessura mínima de 60 mm (múltiplos de 20 mm) e tolerância de ± 3 mm, além da verificação do ângulo de 90° . Os resultados foram registrados e comparados aos parâmetros normativos.

2.3.2. Ensaio de determinação da absorção de água

O ensaio de absorção de água, realizado entre os dias 9 e 11 de maio, seguiu a metodologia prescrita pela ABNT NBR 9.781 (2013), que define a absorção como o incremento percentual de massa de um corpo poroso devido à penetração de água em seus poros. As oito peças foram divididas em dois grupos: o primeiro composto pelos blocos dos pontos 01 e 02, e o segundo pelos dos pontos 03 e 04.

O procedimento consistiu em saturar as amostras por imersão em água a 23 ± 5 °C por 24 horas, seguida de pesagem individual na condição saturada com superfície seca. Em seguida, as peças foram secas em estufa a 110 ± 5 °C por igual período e pesadas novamente. O cálculo da absorção foi obtido pela equação descrita pela ABNT NBR 9.781 (2013). Conforme a norma, o valor médio da absorção não deve ultrapassar 6%, sendo vedado qualquer resultado individual superior a 7%.

2.3.3. Ensaio de determinação da resistência característica a compressão (f_{pk})

O ensaio de resistência à compressão dos blocos intertravados foi realizado nos dias 13 e 14 de maio, em conformidade com o Anexo A da ABNT NBR 9.781 (2013). As peças foram preparadas por corte e saturação em água e, em seguida, submetidas ao rompimento em prensa hidráulica manual de 100 tf, certificada pelo INMETRO (Figura 3).



Figura 3. Preparação das amostras para ensaio de resistência a compressão.

As amostras permaneceram saturadas em água a 23 ± 5 °C por no mínimo 24 h, tiveram as superfícies retificadas e foram posicionadas centralmente sobre placas auxiliares. O carregamento foi aplicado até a ruptura total, com velocidade controlada de 550 kPa/s. A resistência (MPa) foi calculada a partir da carga de ruptura, convertida em kN, dividida pela área de carregamento e ajustada pelo fator de correção “p”. A resistência característica ($f_{pk,est}$) foi obtida por $f_{pk,est} = f_p - t_{xs}$, sendo exigido pela norma o mínimo de 35 MPa para blocos destinados a tráfego leve

3. Resultados e discussão

3.1. Inspeção Visual do Pavimento

A inspeção visual detalhada do pavimento intertravado de concreto revelou um quadro preocupante de degradação, caracterizado por múltiplas manifestações patológicas que comprometem significativamente sua integridade estrutural e segurança aos usuários. Identificou-se a descontinuidade da contenção lateral em diversos trechos, uma falha crítica que prejudica o mecanismo de intertravamento dos blocos, essencial para a distribuição adequada das cargas do tráfego. Associado a este problema, foram registrados inúmeros pontos de afundamento das peças,

agravados pela falta de um arremate adequado, infiltração de água na base e, notavelmente, pela presença de gramíneas nas juntas, que contribuem para a lavagem do material de rejunte (Figura 4).



Figura 4. Defeitos de desgaste e afundamento.

O estado avançado de deterioração das peças é evidente (Figura 5), com desprendimento de agregados e perda de massa, indicativos claros de que o pavimento opera no limite de sua vida útil. Situações de levantamento de placas, provocadas pela intrusão de raízes de árvores de grande porte, criam desníveis perigosos, especialmente para pedestres e motociclistas. A presença generalizada de fissuras e trincas, resultantes da fadiga do material sob carregamentos repetitivos, e a descontinuidade nas bordas dos blocos, causada por movimentações da base, completam um cenário de urgência para intervenções corretivas. A ocorrência conjunta dessas patologias, somada à evidente heterogeneidade dos agregados (seixos de tamanhos variados) utilizados na confecção original das peças – o que sugere um controle de qualidade insuficiente durante a produção –, corrobora a necessidade de um plano de manutenção abrangente e imediato para restaurar a funcionalidade e a segurança do pavimento.



Figura 5. Defeito de desgaste.

3.2. Ensaio de Avaliação Dimensional

A seguir é apresentado na Figura 6 o resultado da avaliação dimensional dos blocos amostrais nos quesitos comprimento médio e altura média das peças, com o incremento do IF – índice de forma ao final.

Corpo de prova	Altura média (cm)	Comprimento médio (cm)	IF - índice de forma
1A	8,82	30,01	3,40
1B	9,28	30,00	3,23
2A	9,64	30,02	3,11
2B	9,29	29,98	3,23
3A	9,33	30,01	3,22
3B	9,34	30,02	3,21
4A	9,05	29,97	3,31
4B	9,63	30,01	3,12
Média	9,30	30,00	3,23

Figura 6. Resultado ensaio de avaliação dimensional.

A avaliação dimensional dos blocos intertravados é essencial para garantir o correto funcionamento do pavimento (GODINHO, 2009). No estudo, constatou-se que o comprimento médio das peças ultrapassa o limite de 250 mm previsto pela ABNT (2013), o que se explica por sua execução anterior à norma. Um aspecto crítico foi a redução média de 0,70 cm na altura das peças, indicando desgaste avançado e desprendimento de agregados graúdos, que compromete a segurança, sobretudo de ciclistas. Em contrapartida, o índice de forma manteve-se dentro do parâmetro normativo (máx. 4%), assim como o ângulo de 90°, favorecendo o intertravamento. Esses resultados evidenciam a necessidade de intervenções para mitigar riscos e prolongar a durabilidade do pavimento.

3.3. Ensaio de Determinação da Absorção De Água

A seguir na Figura 7 os resultados obtidos no ensaio de determinação de absorção de água nos blocos amostrais conforme ABNT NBR 9.781 (ABNT, 2013).

Corpo de prova	Peso saturado (kg)	Peso seco (kg) 110 ± 5 (°C)	Absorção (%)
1ª	15,16	15,02	0,91
1B	15,75	15,32	2,81
2ª	15,79	15,13	4,39
2B	15,14	14,87	1,82
3ª	15,96	15,42	3,45
3B	14,84	14,53	2,11
4ª	15,87	15,66	1,37
4B	16,80	16,41	2,38
Média	15,66	15,30	2,40

Figura 7. Resultado do ensaio de absorção de água.

O ensaio de absorção de água, conduzido segundo DNIT (2006), mostrou que todos os blocos apresentaram valores dentro do limite da ABNT (2013), inferior a 7%.

Tal resultado pode estar relacionado à origem dos agregados, extraídos de rios locais como o Maravilha e o das Balsas, compostos por areia fina e grossa e seixos, prática comum em várias regiões (COSTA et al., 2014). Segundo Fernandes (2016), essa combinação favorece a resistência do concreto, reduz a absorção e diminui o consumo de cimento. Assim, a baixa absorção observada decorre provavelmente das propriedades dos agregados naturais, embora análises mecânicas adicionais sejam necessárias para confirmação.

3.4. Ensaio Determinação da Resistência Característica a Compressão (f_{pk}).

Os resultados do ensaio estão apresentados a seguir nas Figuras 8.

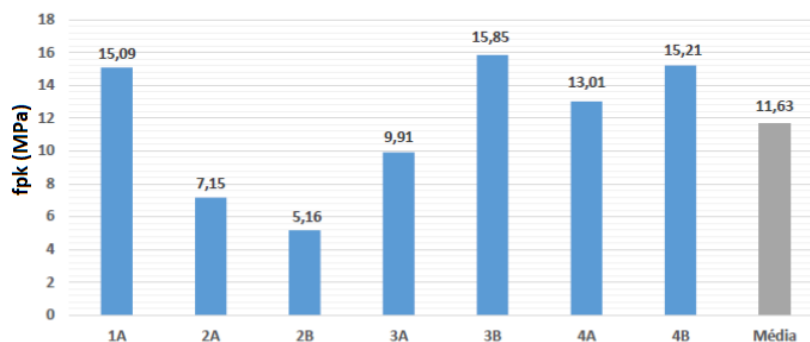


Figura 8. Resultado do ensaio de determinação da resistência característica a compressão.

Dentre as amostras ensaiadas nenhuma atingiu o valor mínimo de 35 MPa exigido pela norma brasileira (ABNT, 2013), ou seja, há evidências fortes de que a resistência dos blocos à compressão, já está comprometida, após todos esses anos de existência do pavimento. Uma vez que em outros países o intervalo de resistência a compressão individual dessas peças fica entre 45 MPa e 55 MPa como apontado por Shackel (1990). Essa atual capacidade de carga do pavimento, baseada na resistência a compressão obtida, nesse ensaio, aponta Godinho (2009), a distribuição das cargas concentradas não funcione mais com eficiência e isso é sua função básica.

Portanto, nesse ensaio fica claro que os blocos intertravados de concreto do pavimento em estudo estão no final de sua vida útil, ou seja, com sua durabilidade e eficiência comprometida para os próximos anos. Sendo assim, é necessário se repensar os próximos passos para o prolongamento da vida útil do pavimento em questão, ou mesmo uma possível substituição total do pavimento.

4. Conclusão

O estudo avaliou a durabilidade e eficiência de um pavimento intertravado de concreto instalado há quase quatro décadas no centro de Balsas-MA. Foram realizadas pesquisa bibliográfica, ensaios laboratoriais e levantamento qualitativo com usuários, evidenciando que o desempenho do pavimento depende diretamente da qualidade dos materiais empregados e da manutenção periódica.

A análise apontou que os blocos foram produzidos artesanalmente, com uso de agregados sem rigor técnico, resultando em manifestações patológicas como fissuras, afundamentos, trincas e desgaste excessivo. Ensaos laboratoriais confirmaram inadequação aos padrões da ABNT (2013), com apenas uma das oito amostras atendendo à resistência mínima de 35 MPa, valor inferior a referências internacionais (45–55 MPa). O ensaio dimensional também revelou redução significativa da altura média das peças, associada ao tráfego, envelhecimento e ausência de manutenção adequada.

Apesar disso, o ensaio de absorção de água apresentou valores dentro do limite normativo ($<7\%$), indicando dosagem adequada nesse aspecto. Conclui-se que, embora o pavimento tenha cumprido satisfatoriamente sua função ao longo dos anos, há necessidade de manutenção corretiva e uso de materiais de melhor qualidade em futuras intervenções, garantindo segurança aos usuários e preservando a relevância histórica e sustentável do sistema intertravado.

Referências

- ABCP. **Manual de pavimentos intertravados**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1999.
- ABCP. **Pavimento intertravado: normas, especificações e aplicações**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2006.
- ABCP. **Blocos intertravados permeáveis: guia técnico**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2010.
- ABCP. **Pavimentos intertravados permeáveis: recomendações técnicas**. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2011.
- ABNT. NBR 15593: **Pavimento intertravado com peças de concreto – Execução**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDA, 2022.
- COSTA, F. L. M. et al. **Desempenho mecânico de pavimentos intertravados: estudo de caso**. Revista IBRACON, v. 12, n. 4, p. 892-910, 2019.

COSTA, M. C. et al. **Sustentabilidade e desempenho em pavimentação intertravada**. Revista Matéria, v. 28, n. 2, p. 1-12, 2023.

DNIT. **Manual de pavimentação**. 2. ed. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2006.

FILGUEIRAS, M. S. **Pavimentos intertravados: avaliação técnica e ambiental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

FIORITI, C. M. **História da engenharia rodoviária**. São Paulo: Edgar Blücher, 2007.

GODINHO, A. C. **Análise de custos e benefícios de pavimentos intertravados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

LIMA FILHO, M. A.; COSTA JR., J. C. **Blocos de concreto drenantes: inovação tecnológica para a pavimentação urbana**. Revista de Engenharia Civil IMED, v. 7, n. 1, p. 45-59, 2020.

MARCHIONI, V. C.; SILVA, A. R. **História e evolução da pavimentação urbana**. Revista Engenharia Civil, v. 25, n. 1, p. 33-42, 2011.

OLIVEIRA, R. S. **Pavimentação intertravada: evolução e perspectivas no Brasil**. 2018. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2018.

RODRIGUES, R. R. et al. **Desempenho hidráulico de pavimentos permeáveis em áreas urbanas**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 15, n. 1, p. 79-88, 2010.

SANTANA, A. M. **História da pavimentação urbana no Brasil**. São Paulo: Pini, 1993.

SILVA, T. J. et al. **Resistência de blocos intertravados frente a ações químicas e mecânicas**. Revista ALCONPAT, v. 13, n. 2, p. 207-220, 2023.

SOARES, G. P. et al. **Avaliação técnica e econômica do pavimento intertravado em áreas urbanas**. Revista Engenharia Urbana, v. 15, n. 3, p. 55-70, 2023.

Abstract

Interlocking concrete blocks have been widely used in urban paving for their environmental and functional benefits. They are known for their ease of construction, simple maintenance, and permeability, which aids in rainwater drainage and groundwater recharge. When properly designed and installed, they offer resistance to compression, abrasion, and chemical agents, ensuring durability and efficiency. In the municipality of Balsas, Maranhão, this type of paving was installed on older streets and squares, replacing rudimentary methods and offering greater comfort and aesthetics. This study sought to evaluate the durability and performance of interlocking concrete blocks in Eloy Coelho Square and adjacent streets through bibliographic research, laboratory testing, and qualitative analysis of user perceptions. The investigation revealed that the system, after decades of use, requires improvements in planning, implementation, and maintenance to ensure a longer lifespan for urban infrastructure.

Keywords: Urban paving; Interlocking blocks; Durability; Efficiency.

IMPACTOS AMBIENTAIS E EM SAÚDE PÚBLICA DO DESCARTE INADEQUADO DE MEDICAMENTOS: UMA BREVE REVISÃO

Lígia de Sousa Silveira Monroe ¹, Jainara Lindoso Maia ¹, Pedro Henrique Cunha Fontenelle ¹, Aline de Oliveira Rezende ¹ & Gustavo Henrique Rodrigues Vale de Macedo ¹

¹ Centro Universitário Florence

Resumo

O crescente consumo e descarte inadequado de medicamentos resulta na presença constante de fármacos em ambientes aquáticos e terrestres, gerando riscos ecotoxicológicos como bioacumulação, comprometimento da qualidade da água e potencial aumento da resistência aos antimicrobianos. Uma análise crítica de estudos selecionados que incluiu ensaios experimentais, revisões de literatura e ferramentas preditivas demonstrou que substâncias como propranolol e diclofenaco apresentam alto risco para organismos aquáticos. Logo, estratégias integradas que associem monitoramento, modelagem preditiva, políticas públicas, educação e pontos de coleta mostram-se essenciais para promover o descarte seguro, a mitigação de impactos e proteger os ecossistemas e a saúde pública.

Palavras-chave: medicamentos; resistência antimicrobiana; modelagem preditiva.

1. Introdução

O uso crescente de medicamentos, aliado ao descarte inadequado, tem levado à presença constante de fármacos em ambientes aquáticos e terrestres (Aus der Beek *et al.*, 2016). Compostos como diclofenaco, propranolol e carbamazepina são frequentemente detectados em concentrações próximas às ambientais e podem afetar organismos aquáticos de diferentes níveis tróficos (Aus der Beek *et al.*, 2016). Esses efeitos incluem redução de crescimento, alterações fisiológicas e interferência em sistemas endócrinos e reprodutivos, especialmente em organismos como fitoplâncton e peixes (Nugnes *et al.*, 2025). Além dos riscos diretos aos organismos aquáticos, diversos estudos relatam que esses fármacos podem atuar como desreguladores endócrinos, afetando processos reprodutivos e de desenvolvimento em organismos não-alvo (Kar *et al.*, 2018a; Nugnes *et al.*, 2025). Esses efeitos ecotoxicológicos representam uma grave perturbação à saúde pública, seja pela possibilidade de bioacumulação na cadeia alimentar, seja pelo impacto na qualidade da água consumida por populações humanas. Além disso, a resistência aos antimicrobianos

¹ E-mail: ligiasilveiramonroe@outlook.com, jainaralindosom@gmail.com, pedrohfontenelle@hotmail.com, alinerezende20@gmail.com & gustavo.macedo.7@hotmail.com, respectivamente.

pode ser potencializada pela presença contínua de antibióticos no ambiente, configurando um problema global de saúde (Kraemer; Ramachandran; Perron, 2019).

Nesse cenário, tornam-se essenciais abordagens que integrem ensaios experimentais, revisões sistemáticas sobre descarte seguro e métodos preditivos como QSAR (Quantitative Structure-Activity Relationship), priorização estrutural e avaliação PBT (Substâncias Persistente, Bioacumulativas e Tóxicas), com vistas à compreensão dos impactos ambientais e ao desenvolvimento de estratégias mais eficazes para a mitigação dos riscos de toxicidade em organismos aquáticos e terrestres, por meio da implementação de políticas públicas assertivas (OECD, 2019).

2. Metodologia

Este trabalho consiste em uma breve revisão integrativa com análise crítica de cinco artigos científicos publicados nas bases de dados *PubMed* e *Springer Nature* com parceria da *BMC*, abordando efeitos ecotoxicológicos de fármacos em organismos aquáticos, intervenções de descarte seguro de medicamentos, modelagem preditiva (QSAR), priorização estrutural e avaliação PBT de contaminantes farmacêuticos. Os critérios de inclusão abrangeram artigos dos últimos 10 anos, em inglês ou português, com metodologia clara e relevância para a ecotoxicologia ou gestão de resíduos. Também foram considerados estudos que aplicaram ferramentas de modelagem computacional (QSAR e priorização estrutural), além de análises de risco em fitoplâncton, zooplâncton e peixes, permitindo integrar efeitos laboratoriais e preditivos no mesmo corpo de análise (Sangion; Gramática, 2016a). O uso de modelos QSAR, combinado a critérios PBT, também foi descrito nas referências como ferramenta de triagem para novos fármacos, permitindo identificar aqueles com maior risco ambiental ainda na fase de desenvolvimento.

Foram excluídos estudos duplicados e/ou anteriores a 10 anos de publicação, bem como revisões narrativas sem análise crítica, trabalhos sem dados quantitativos ou sem relação direta com impactos ambientais e saúde pública. A coleta de dados foi precedida por leitura integral e extração das informações relevantes, seguida de classificação por abordagem metodológica e análise integrada dos efeitos ambientais, riscos à saúde pública e implicações para políticas de mitigação da toxicidade em organismos aquáticos e terrestres.

3. Resultados e discussão

Evidências experimentais demonstraram que fármacos como o propranolol e o diclofenaco representam um elevado risco ecotoxicológico para organismos aquáticos (Sangion; Gramática, 2016a). Estudos com plâncton demonstraram interferência no crescimento, fotossíntese e reprodução, o que pode comprometer a base da cadeia trófica marinha e desencadear desequilíbrios em ecossistemas inteiros (Nugnes *et al.*, 2025). No caso do diclofenaco, Sangion e Gramática (2016a) destacaram seu alto potencial de persistência e bioacumulação, o que aumenta a chance de acúmulo em diferentes compartimentos ambientais, especialmente em sedimentos aquáticos. Esta ameaça transcende o ambiente, sugerindo efeitos indiretos na saúde humana mediante a deterioração da qualidade da água e o potencial de transferência e bioacumulação na cadeia alimentar (Kraemer; Ramachandran; Perron, 2019).

Em contrapartida, revisões sistemáticas indicaram que a implementação de estratégias educacionais, aliada à instalação de pontos de coleta de medicamentos, promove significativamente o descarte adequado (Ma *et al.*, 2025). Além disso, programas que combinaram educação em saúde com incentivos econômicos, como devolução em farmácias com bonificação, demonstraram ainda maior adesão populacional (Ma *et al.*, 2025). Esta medida preventiva é crucial para evitar que resíduos farmacêuticos contaminem redes de esgoto e aterros sanitários. Tais achados possuem clara relevância para políticas públicas de saúde, uma vez que se traduzem na redução de custos com tratamento de água e na minimização da exposição populacional a esses contaminantes, reduzindo custo no tratamento de saúde para pessoas contaminadas por esses poluentes.

De maneira complementar, a aplicação de ferramentas preditivas, como modelagem QSAR (Quantitative Structure-Activity Relationship), estratégias de priorização estrutural e a avaliação de critérios PBT (Persistência, Bioacumulação e Toxicidade), reforçam a necessidade de priorizar compostos com perfil de preocupação elevado (Sangion; Gramática, 2016b; Kar *et al.*, 2018b). Os modelos QSAR se mostraram eficazes em prever a toxicidade de fármacos ainda não testados, antecipando potenciais riscos ambientais e permitindo priorizar substâncias com alto perfil de persistência, bioacumulação e toxicidade (Sangion; Gramática, 2016a; Kar *et al.*, 2018a). A priorização estrutural demonstrou ser eficiente não apenas para fármacos já amplamente estudados, mas também para aqueles menos investigados,

forneendo um ranking de risco que auxilia órgãos reguladores na tomada de decisão. Evidências também indicam que a resistência antimicrobiana associada à presença de antibióticos no ambiente configura um risco difuso, pois pode alcançar tanto comunidades bacterianas aquáticas quanto patógenos humanos, reforçando a dimensão sanitária global (Kar *et al.*, 2018b). Do ponto de vista da saúde pública, essa abordagem proativa é fundamental para identificar precocemente fármacos com potencial para desregular sistemas endócrinos e reprodutivos ou para induzir resistência aos antimicrobianos.

Assim, os estudos analisados reforçam que a contaminação ambiental por produtos farmacêuticos ultrapassa a dimensão ecológica, configurando-se como um desafio sanitário global. Sua mitigação efetiva exige uma abordagem integrada e multissetorial, harmonizando a vigilância ambiental e as ações de saúde pública.

4. Conclusão

Os fármacos no ambiente configuram um desafio tanto ambiental quanto de saúde pública. Seus efeitos ecotoxicológicos em organismos aquáticos podem repercutir na segurança alimentar e na qualidade da água potável, enquanto o descarte inadequado aumenta os custos do sistema de saúde e contribui à resistência aos antimicrobianos.

A combinação de estratégias de monitoramento como ensaios experimentais de modelos QSAR e PBT com políticas de gestão, educação e pontos de coleta, representa a abordagem mais efetiva para reduzir riscos. Essa integração de métodos laboratoriais e computacionais, além de orientar a formulação de políticas ambientais, permite reduzir custos de monitoramento e antecipar riscos antes da entrada de novos fármacos no mercado. A análise integrada das referências mostra que políticas públicas bem estruturadas, aliadas a educação ambiental e ferramentas computacionais, podem transformar o cenário de risco atual em uma oportunidade de prevenção, com ganhos diretos em sustentabilidade e saúde coletiva. Assim, abordar a contaminação ambiental por fármacos é também investir em prevenção de doenças, segurança hídrica e sustentabilidade em saúde pública.

Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Pós-Graduação, Pesquisa e Extensão (CONEX) do Centro Universitário Florence pelo contínuo suporte acadêmico e financeiro.

Referências

AUS DER BEEK, T. *et al.* Pharmaceuticals in the environment—Global occurrences and perspectives. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 35, n. 4, p. 823-835, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.3339>. Acesso em: 20 de setembro de 2025.

KAR S, ROY K, LESZCZYNSKI J. Impact of Pharmaceuticals on the Environment: Risk Assessment Using QSAR Modeling Approach. **Methods in Molecular Biology**, 2018a; 1800:395-443. doi: 10.1007/978-1-4939-7899-1_19. Disponível em: PMID: 29934904; PMCID: PMC7120680. Acesso em: 17 de setembro de 2025.

KAR, S. *et al.* Endocrine-disrupting activity of pharmaceuticals in aquatic environment: A review. **Environment International**, v. 120, p. 825-846, 2018b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.08.007>. Acesso em: 17 de setembro de 2025.

KRAEMER, S. A.; RAMACHANDRAN, A.; PERRON, G. G. Antibiotic pollution in the environment: From microbial ecology to public policy. **Microorganisms**, v. 7, n. 6, p. 180, 2019. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms7060180>. Acesso em: 17 de setembro de 2025.

MA, A.SB., MCLACHLAN, AJ, ABDEL SHAHEED, C. *et al.* Eficácia de intervenções projetadas para aumentar o descarte seguro de medicamentos: uma revisão sistemática e meta-análise de ensaios clínicos randomizados. **Systematic Reviews**, v. 14, art. nº 119, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13643-025-02820-4>. Acesso em: 17 de setembro de 2025.

NUGNES, R., GAMBARDELLA, C., MIROGLIO, R. *et al.* Compostos farmacêuticos em ecossistemas marinhos: efeitos ecotoxicológicos e avaliação de risco em fitoplâncton e zooplâncton. **Ecotoxicologia** (2025). Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10646-025-02960-2>. Acesso em: 17 de setembro de 2025.

OECD. Guidance Document on the Use of the Harmonised Templates for Reporting Summary Information on Environmental Fate and Exposure Studies. **OECD Series on Testing and Assessment**, No. 307. Paris: OECD Publishing, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1787/5jrs3stcrns2-en>. Acesso em: 20 de setembro de 2025.

SANGION A, GRAMÁTICA P. Hazard of pharmaceuticals for aquatic environment: Prioritization by structural approaches and prediction of ecotoxicity. *Environ Int.* 2016 Oct; 95:131-43. **Environment International**, v. 95, p. 131-143, out. 2016a. Disponível em: doi: 10.1016/j.envint.2016.08.008. PMID: 27568576. Acesso em: 19 de setembro de 2025.

SANGION A, GRAMÁTICA P. PBT assessment and prioritization of contaminants of emerging concern: Pharmaceuticals. **Environmental Research**, v. 147, p. 297-306,

maio 2016b. 147:297-306. doi: 10.1016/j.envres.2016.02.021. Epub 2016 Feb 24.
Disponível em: PMID: 26921826. Acesso em: 19 de setembro de 2025.

Abstract

The growing consumption and improper disposal of pharmaceuticals have led to the constant presence of drugs in aquatic and terrestrial environments, posing ecotoxicological risks such as bioaccumulation, deterioration of water quality, and the potential increase in antimicrobial resistance. A critical review of selected studies – including experimental assays, literature reviews, and predictive modeling tools – showed that substances such as propranolol and diclofenac present a high risk to aquatic organisms. Thus, integrated strategies that combine monitoring, predictive modeling, public policies, education, and collection points are essential to ensure safe disposal, mitigate impacts, and safeguard ecosystems and public health.

Keywords: ecotoxicology; pharmaceutical disposal; antimicrobial resistance; water quality; predictive modeling.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS, DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE DE TRABALHO: DESAFIOS PARA A GESTÃO DA SAÚDE E SEGURANÇA NO TRABALHO

Joseilson Gonçalves da Cunha¹, Izanilde Barbosa da Silva²

¹Mestrando em Educação Profissional e Tecnológica-PROFTEPT-IFPB

² Mestre em Energias Renováveis e Engenheira de Segurança do Trabalho

Resumo

O presente artigo realiza uma revisão integrativa da literatura acerca dos impactos das mudanças climáticas no meio ambiente de trabalho, com ênfase nas implicações para a segurança e saúde ocupacional no contexto do desenvolvimento sustentável. Evidências recentes demonstram que o aumento das temperaturas globais, a intensificação de eventos climáticos extremos e a degradação ambiental têm potencial para agravar riscos como estresse térmico, doenças cardiovasculares e respiratórias, acidentes e transtornos psicossociais, especialmente em setores de alta exposição externa. Nesse cenário, o desenvolvimento sustentável e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 emergem como referenciais estratégicos para orientar políticas, práticas preventivas e processos de adaptação organizacional. A revisão destaca a necessidade de incorporar variáveis climáticas aos programas de gestão em segurança e saúde do trabalho (SST), de forma a promover ambientes laborais mais resilientes, preventivos e sustentáveis, alinhados às demandas sociais, ambientais e produtivas do século XXI.

Palavras-chave: mudanças climáticas; meio ambiente de trabalho; sustentabilidade; saúde ocupacional; prevenção.

1. Introdução

As mudanças climáticas constituem uma das maiores ameaças contemporâneas à saúde humana, à estabilidade social e ao desenvolvimento sustentável. O aumento da temperatura média global, a elevação do nível do mar e a intensificação de eventos climáticos extremos — como ondas de calor, secas, enchentes e tempestades — representam riscos crescentes para a vida no planeta, afetando não apenas ecossistemas e cadeias produtivas, mas também o mundo do trabalho e a saúde ocupacional (IPCC, 2021; WHO, 2018). Esses fenômenos intensificam desigualdades sociais, ampliam vulnerabilidades e impõem desafios inéditos às políticas públicas, às empresas e às comunidades.

¹ E-mail: joseilson.contato@gmail.com

² E-mail: iza.silva.ap@gmail.com

No contexto laboral, os efeitos das mudanças climáticas são cada vez mais evidentes. Trabalhadores expostos ao ambiente externo, como agricultores, profissionais da construção civil, garis, transportadores e profissionais da saúde, estão sujeitos a condições climáticas adversas que impactam diretamente sua saúde, segurança e produtividade (Kjellstrom et al., 2016). O estresse térmico, por exemplo, já é reconhecido como um dos principais fatores de risco ocupacional agravado pelo aquecimento global, aumentando casos de desidratação, fadiga e doenças cardiovasculares e respiratórias. Paralelamente, eventos extremos, como enchentes e deslizamentos, expõem trabalhadores a riscos de acidentes e doenças infecciosas, além de gerarem instabilidade social e econômica.

A literatura científica e relatórios internacionais apontam que, até 2030, aproximadamente 2% da produtividade global poderá ser comprometida em decorrência do calor excessivo, especialmente em países tropicais e em atividades laborais de alta intensidade física (ILO, 2019). Esse dado evidencia que a questão climática transcende o campo ambiental e assume contornos econômicos e sociais, diretamente relacionados à qualidade do trabalho, à renda e ao bem-estar das populações. Além dos riscos físicos, os trabalhadores também enfrentam impactos psicossociais, como ansiedade, estresse e insegurança diante de desastres climáticos recorrentes, configurando uma sobrecarga para os sistemas de saúde e de proteção social (Silva & Gomes, 2020).

Diante desse cenário, o conceito de desenvolvimento sustentável adquire centralidade. Originalmente apresentado no Relatório Brundtland (WCED, 1987), esse conceito preconiza a satisfação das necessidades presentes sem comprometer as gerações futuras, articulando crescimento econômico, equidade social e preservação ambiental. No ambiente de trabalho, traduz-se em práticas que respeitam os limites ecológicos, asseguram condições dignas e promovem justiça social (Sachs, 2004). A integração do desenvolvimento sustentável às políticas de segurança e saúde no trabalho (SST) torna-se, portanto, essencial para prevenir riscos emergentes e construir organizações mais resilientes.

A Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, por meio dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), reforça a importância dessa articulação. Entre os 17 objetivos, destacam-se o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), que propõe a promoção de vidas saudáveis; o ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento

Econômico), que defende ambientes de trabalho seguros e inclusivos; o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), que orienta práticas sustentáveis de uso de recursos; e o ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), que convoca ações urgentes para mitigação e adaptação climática. Esses objetivos demonstram que a saúde do trabalhador não pode ser dissociada da sustentabilidade ambiental e das políticas de enfrentamento da crise climática (Silva & Beretta, 2022; Reis et al., 2023).

No Brasil, políticas como a Política Nacional de Segurança e Saúde do Trabalhador (PNSTT) e as Normas Regulamentadoras (NRs) também têm buscado incorporar dimensões ambientais e preventivas no ambiente laboral, embora ainda existam lacunas significativas na integração entre saúde ocupacional e mudanças climáticas (Fundacentro, 2020). Tais lacunas reforçam a necessidade de pesquisas interdisciplinares que abordem a relação entre variáveis ambientais e condições de trabalho, ampliando o debate sobre prevenção, resiliência organizacional e responsabilidade social.

Assim, compreender as interações entre mudanças climáticas, desenvolvimento sustentável e o meio ambiente de trabalho é fundamental para antecipar riscos, proteger a saúde do trabalhador e consolidar práticas organizacionais alinhadas às demandas do século XXI. Este artigo, portanto, propõe uma revisão narrativa da literatura recente sobre o tema, com o objetivo de analisar os principais desafios e apontar caminhos para a prevenção no campo da saúde e segurança do trabalho.

2. Metodologia

Este artigo utiliza o método de revisão bibliográfica narrativa, com levantamento de fontes científicas e técnicas publicadas nos últimos dez anos. As buscas foram realizadas nas bases SciELO, PubMed, Google Scholar e em documentos institucionais da ILO e do IPCC, utilizando os descritores: mudanças climáticas, meio ambiente de trabalho, desenvolvimento sustentável, segurança no trabalho e saúde do trabalhador.

Foram incluídos artigos, relatórios e documentos técnicos com abordagem interdisciplinar, que relacionassem variáveis ambientais às condições laborais. Publicações em português, inglês e espanhol, disponíveis integralmente online, foram priorizadas.

3. Resultados e discussão

A literatura indica que o aumento da temperatura está associado a estresse térmico, fadiga, desidratação e agravamento de doenças cardiovasculares e respiratórias, especialmente em trabalhadores expostos a atividades externas (Kjellstrom et al., 2016; Habibi et al., 2024).

Eventos extremos, como ondas de calor, enchentes, incêndios florestais e tempestades, têm aumentado em frequência e intensidade, afetando produtividade, capacidade de trabalho e segurança laboral (IPCC, 2021). A ILO (2019) estima que até 2030 cerca de 2% da produtividade global pode ser perdida devido a condições climáticas extremas, com maior impacto em economias tropicais e em atividades físicas intensas. Além disso, o estresse psicológico, ansiedade e sensação de insegurança são consequências relevantes diante de desastres climáticos.

O desenvolvimento sustentável, segundo o Relatório Brundtland (WCED, 1987), visa atender às necessidades atuais sem comprometer as futuras gerações. No ambiente laboral, isso se traduz em práticas que respeitam limites ambientais, promovem justiça social e garantem condições dignas de trabalho (Sachs, 2004; Silva & Gomes, 2020).

A ILO (2015) introduziu o conceito de transição justa, integrando políticas ambientais à saúde e segurança do trabalho. Entre as estratégias propostas estão: investimentos em tecnologias limpas, infraestrutura resiliente, capacitação profissional e gestão de riscos ambientais. A adoção de práticas sustentáveis, como uso racional de recursos, reaproveitamento de materiais, arborização de ambientes laborais e gestão adequada de resíduos, proporciona benefícios duplos: proteção ambiental e melhoria da saúde ocupacional.

A revisão evidencia que a inclusão da variável climática nos Programas de Gerenciamento de Riscos (PGR) é essencial. Estratégias incluem:

- Ampliação de diagnósticos ambientais;
- Uso de tecnologias de monitoramento climático;
- Adaptação de Equipamentos de Proteção Individual (EPIs);
- Revisão da infraestrutura física;
- Protocolos de pausas estratégicas e flexibilização de jornadas;
- Educação ambiental contínua para trabalhadores e gestores.

Essas ações fortalecem a resiliência organizacional e promovem uma cultura preventiva, sustentável e centrada na saúde do trabalhador (ILO, 2019; WHO, 2018).

Os resultados evidenciam que os efeitos das mudanças climáticas já estão alterando as condições de trabalho, exigindo novas abordagens de gestão em SST. O desenvolvimento sustentável, conforme o Relatório Brundtland (WCED, 1987), surge como eixo estratégico de mitigação e adaptação. No ambiente laboral, práticas sustentáveis contribuem para reduzir riscos ocupacionais e alinhar as organizações aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A Agenda 2030 da ONU, por meio dos ODS, reforça essa articulação. O ODS 3 (Saúde e Bem-Estar) orienta ações para prevenir doenças ocupacionais; o ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico) destaca ambientes laborais seguros; o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) incentiva práticas sustentáveis na gestão de recursos; e o ODS 13 (Ação Climática) exige medidas urgentes contra impactos ambientais. Pesquisas recentes (Silva & Beretta, 2022; Reis et al., 2023; Colussi et al., 2020) indicam que tais objetivos são fundamentais para fortalecer a saúde ocupacional em um cenário de mudanças climáticas.

4. Conclusão

As evidências analisadas confirmam que as mudanças climáticas já afetam de forma significativa o meio ambiente de trabalho, ampliando riscos físicos, ambientais e psicossociais que comprometem a saúde e a segurança dos trabalhadores. Nesse cenário, a integração entre segurança do trabalho, desenvolvimento sustentável e gestão organizacional torna-se indispensável para a construção de respostas eficazes. A incorporação de variáveis climáticas nos programas de Segurança e Saúde do Trabalho (SST), aliada à adoção de práticas sustentáveis, fortalece a resiliência organizacional e contribui para a criação de ambientes laborais mais seguros e inclusivos. A Agenda 2030 e seus Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) oferecem um referencial estratégico para essa transformação, destacando a interdependência entre saúde, trabalho decente, proteção ambiental e ação climática.

Portanto, superar os desafios impostos pelas mudanças climáticas requer um esforço coletivo, envolvendo políticas públicas, compromisso institucional e engajamento dos trabalhadores. Mais do que mitigar impactos imediatos, é necessário

promover uma cultura preventiva e sustentável, capaz de valorizar a vida, proteger a saúde integral e assegurar o futuro do trabalho em um contexto de rápidas transformações socioambientais.

Referências

BRASIL. Ministério da Saúde. **Política Nacional de Segurança e Saúde do Trabalhador**. Brasília: MS, 2012.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Normas Regulamentadoras de Segurança e Saúde no Trabalho**. Brasília: MTE, 2023.

COLUSSI, T. L.; BORTOLUZZI, M. P.; KIRSTEN, V. R. Mudanças climáticas e seus reflexos sobre a saúde do trabalhador: uma análise integrativa. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 45, n. 12, p. e32, 2020. DOI: 10.1590/2317-6369000000020.

HABIBI, P.; RAZMJOUEI, J.; MORADI, A.; MAHDAVI, F.; FALLAH-ALIABADI, S.; HEYDARI, A. Climate change and heat stress resilient outdoor workers: findings from systematic literature review. **BMC Public Health**, v. 24, n. 1, p. 1711, 2024. DOI: 10.1186/s12889-024-19212-3

FUNDACENTRO. **Mudanças Climáticas e Saúde do Trabalhador: riscos emergentes e estratégias de prevenção**. São Paulo: Fundacentro, 2020.

ILO – International Labour Organization. **Working on a warmer planet: The impact of heat stress on labour productivity and decent work**. Geneva: ILO, 2019.

ILO – International Labour Organization. **Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all**. Geneva: ILO, 2015.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Sixth Assessment Report**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

KJELLSTROM, T.; HOLMER, I.; LEMKE, B. **Workplace heat stress, health and productivity – An increasing challenge for low and middle-income countries during climate change**. **Global Health Action**, v. 9, n. 1, p. 31072, 2016.

LOPES, R. E.; SILVA, F. C. **Mudanças climáticas e os impactos na saúde do trabalhador**. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 45, p. e30, 2020.

REIS, A. P. et al. Mudanças climáticas e saúde do trabalhador: uma análise à luz dos ODS. **Saúde e Sociedade**, v. 32, n. 1, p. 1-15, 2023.

SACHS, I. **Desenvolvimento incluyente, sustentável, sustentado**. Rio de Janeiro: Garamond, 2004.

SILVA, M. A.; GOMES, J. R. **Sustentabilidade, saúde e segurança do trabalhador: desafios no contexto das mudanças climáticas**. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 25, n. 11, p. 4543-4554, 2020.

SILVA, M. A.; BERETTA, F. Sustentabilidade e saúde ocupacional: interfaces com os ODS 3 e 8. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 27, n. 10, p. 4567-4578, 2022.

WHO – **World Health Organization**. **Protecting workers from potential risks of climate change**. Geneva: WHO, 2018.

WCED – **World Commission on Environment and Development**. **Our Common Future** (Relatório Brundtland). Oxford: Oxford University Press, 1987.

Abstract

This article conducts an integrative literature review on the impacts of climate change on the workplace, with an emphasis on the implications for occupational safety and health in the context of sustainable development. Recent evidence shows that rising global temperatures, the intensification of extreme weather events, and environmental degradation have the potential to exacerbate risks such as heat stress, cardiovascular and respiratory diseases, accidents, and psychosocial disorders, especially in sectors with high external exposure. In this scenario, sustainable development and the Sustainable Development Goals (SDGs) of the 2030 Agenda emerge as strategic frameworks to guide policies, preventive practices, and organizational adaptation processes. The review highlights the need to incorporate climate variables into occupational safety and health (OSH) management programs to promote more resilient, preventive, and sustainable workplaces, aligned with the social, environmental, and productive demands of the 21st century.

Keywords: climate change; workplace; sustainability; occupational health; pr

POTENCIAL GEOTÉCNICO DO RESÍDUO DO POLIMENTO DE PORCELANATO: ESTUDO FÍSICO-QUÍMICO PARA ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS LATERÍTICOS

Cáyra Vitória Brito De Sousa e Silva ¹, Auanny Alícia Alves da Silva ², Chrysttyn Thalles Ribeiro Félix ³, Thiago Lucena Dias ⁴, Brenda Maria Barreto de Souza ⁵ & Ana Maria Gonçalves Duarte ⁶
^{1,2,3,4,5,6} Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Ciências de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN)

Resumo

Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial do resíduo do polimento de porcelanato (RPP) como agente estabilizante de solos lateríticos, amplamente presentes no território brasileiro e frequentemente utilizados em obras de infraestrutura rodoviária. Foram realizados ensaios de caracterização físico-química, incluindo Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-EDS), Fluorescência de Raios-X (FRX) e Difração de Raios-X (DRX). Os resultados indicaram morfologia irregular com superfície rugosa, presença significativa de sílica (67,48%) e alumina (17,91%), além de fases cristalinas como quartzo, albita e mulita. A composição química permite enquadrar o RPP como pozolana classe N, segundo a NBR 12653/2014. Tais características confirmam a viabilidade do RPP como material reativo em processos de estabilização, contribuindo para o ganho de resistência e durabilidade do solo tratado. O estudo reforça o reaproveitamento de resíduos industriais como alternativa técnica e sustentável para a engenharia de pavimentos.

Palavras-chave: Estabilização de solos; solos lateríticos; pozolanas; caracterização físico-química.

1. Introdução

A densidade da malha rodoviária pavimentada no Brasil é consideravelmente inferior à de outros países com dimensões territoriais comparáveis. Com apenas cerca de 25 quilômetros de rodovias pavimentadas para cada 1.000 km², o país possui apenas 12,3% de sua malha rodoviária total pavimentada, segundo dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2016). Esses números evidenciam, de

¹ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: cayra.vitoria@estudante.ufcg.edu.br

² Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: auanny.alicia@estudante.ufcg.edu.br

³ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: chrysttyn.thalles@estudante.edu.br

⁴ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: thiago.lucena@estudante.ufcg.edu.br

⁵ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: ana.duartemendoca@professor.ufcg.edu.br

⁶ Rua Aprígio Veloso, 832, Universitário, Campina Grande. E-mail: brenda.barreto@estudante.ufcg.edu.br

forma inequívoca, a carência estrutural da infraestrutura de transporte terrestre brasileira, o que demanda investimentos urgentes na ampliação e modernização da rede viária, de modo a acompanhar o crescimento da frota de veículos e garantir maior eficiência logística.

Entretanto, além da escassez de pavimentação, um desafio adicional se impõe: a natureza dos solos brasileiros. Os solos lateríticos e subtropicais recobrem uma extensa parcela da superfície terrestre, estimada em cerca de 28 milhões de km², o que corresponde a aproximadamente 19% da área total do planeta. Desses, estima-se que cerca de 66% sejam constituídos por solos vermelhos tropicais, predominantes em ambientes com clima quente e úmido (Mélo, 2011).

No caso específico do Brasil, os solos lateríticos estão distribuídos em mais de 80% do território nacional, com forte presença em regiões críticas do ponto de vista da infraestrutura, como a faixa litorânea do Nordeste (Figura 1). Essa predominância torna esses solos elementos inevitáveis em projetos de pavimentação, sobretudo em áreas remotas ou de difícil acesso.



Figura 1. Ocorrência de solos de comportamento laterítico no Brasil (Villibor e Nogami, 2009)

No entanto, suas propriedades geotécnicas pouco favoráveis, como baixa capacidade de suporte, elevada plasticidade e forte variação de comportamento com alterações de umidade, representam um entrave técnico significativo à durabilidade e estabilidade das estruturas rodoviárias implantadas sobre eles (Farias, 2023).

O resíduo do polimento de porcelanato (RPP) é uma suspensão aquosa rica em sílica e alumina, composta por restos de porcelanato e partículas abrasivas provenientes do processo de polimento de revestimentos cerâmicos. Esse processo é realizado em máquinas automatizadas com sistemas de refrigeração à base de água, nas quais se utilizam abrasivos como carbureto de silício e partículas de diamante para remoção de uma fina camada da superfície das peças cerâmicas (Cardoso; Pelisser, 2015).

Após sua geração, o RPP é recolhido, armazenado e frequentemente filtrado em estações de tratamento, onde o excesso de água é removido, transformando-o em uma lama cerâmica. Essa lama pode ser reutilizada ou encaminhada para o descarte, embora represente um subproduto com potencial significativo de aproveitamento em aplicações geotécnicas, como a estabilização de solos tropicais.

Os porcelanatos utilizados neste processo apresentam microestrutura densa e porosidade fechada, sendo caracterizados por uma fase vítrea formada a partir de cristais de mulita e cristobalita, incorporados durante a queima do material. Essa fase vítrea contém, predominantemente, óxidos alcalinos e alcalino terrosos, como potássio, sódio, magnésio e cálcio, os quais conferem ao material baixo ponto de fusão e maior reatividade pozolânica (Bernardin *et al.*, 2006).

Essas características físico-químicas do RPP conferem ao resíduo atividade pozolânica, isto é, a capacidade de reagir com hidróxidos de cálcio em presença de água para formar compostos cimentantes. A presença significativa de sílica amorfa e alumina reativa favorece essas reações, tornando o RPP um material promissor para uso como agente estabilizante de solos lateríticos, que são ricos em ferro e alumínio, mas carecem de coesão estrutural em ambientes de variação hídrica.

Diante do exposto, observa-se que o resíduo alternativo apresenta características físico-químicas que o qualificam como um material potencialmente eficaz para aplicação em técnicas de estabilização de solos, especialmente em regiões onde predominam solos lateríticos, assim como feito por Arruda (2025).

Assim, este estudo tem como objetivo principal realizar uma análise físico-química detalhada do RPP, de modo a avaliar sua viabilidade técnica como agente estabilizante de solos lateríticos, contribuindo tanto para o aprimoramento das propriedades geotécnicas dos solos quanto para a valorização de um resíduo industrial gerado em larga escala. Ao integrar o reaproveitamento de resíduos

cerâmicos com soluções de engenharia de pavimentos, esta pesquisa busca promover alternativas sustentáveis e economicamente viáveis para o setor de infraestrutura rodoviária no Brasil.

2. Metodologia

O Resíduo do Polimento de Porcelanato utilizado na pesquisa foi coletado no município de Conde-PB. Os ensaios das propriedades físico-químicas serão conduzidos no Laboratório de Engenharia de Pavimentos e CERTBIO (LEP/UAEC/CTRN/UFCG), seguindo as diretrizes estabelecidas pelas instruções normativas e metodologias pertinentes, como as normas para os ensaios de FRX, MEV para caracterizar o resíduo de polimento de porcelanato (RPP).

Foram realizados ensaios no solo natural utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) em conjunto com a técnica de Espectrometria de Energia Dispersiva de Raios-X (EDS). O MEV possibilita a visualização detalhada da microestrutura do solo, proporcionando imagens de alta resolução geradas a partir da energia emitida pelas partículas. A EDS complementa a análise, permitindo identificar de maneira imediata a composição química do material, o que agrega valor à caracterização microscópica.

Os testes foram conduzidos no Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO), da Universidade Federal de Campina Grande. O equipamento utilizado foi o modelo "Hitachi TM-1000" (Figura 2), e as amostras analisadas foram previamente secas e peneiradas através de uma malha nº 200, com abertura de 0,075 mm.



Figura 2. Equipamento Hitachi TM-1000, utilizado na pesquisa.

Realizaram-se ensaios de Fluorescência de Raios-X (FRX) para o solo natural e de Difração de Raios-X (DRX) para os solos natural e estabilizado, com o objetivo de determinar a estrutura química dos solos. O ensaio de DRX permite a identificação da estrutura cristalina do material, bem como sua composição em termos de minerais e argilominerais. Por outro lado, o FRX possibilita a detecção dos elementos químicos presentes na amostra.

Esses ensaios foram conduzidos no Laboratório de Materiais Avançados. Para a execução do FRX, foi utilizada amostra passante na peneira nº 200, de forma semelhante ao processo adotado para o MEV. O ensaio de FRX foi realizado utilizando o equipamento "EDX-720" da Shimadzu, conforme ilustrado na Figura

Em relação à avaliação da perda ao fogo, o material foi inicialmente seco em estufa a 110°C por 24 horas e, em seguida, calcinado em mufla a 1000°C por 60 minutos, conforme mostrado na Figura 3.



Figura 3. EDX 720 da Shimadzu e Mufla, respectivamente.

O ensaio de Difração de Raios-X (DRX) foi conduzido utilizando o equipamento "XRD-6000" da Shimadzu (Figura 4). Para a execução do ensaio, foram adotados os seguintes parâmetros: amplitude angular de 2θ , com intervalo de medição variando entre 5° e 60°, velocidade de 0,05°/min, além de uma voltagem de 35 kV e corrente de 15 mA.



Figura 4. XRD-6000 da Shimadzu.

3. Resultados e discussão

3.1. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 5 ilustra o resultado obtido para a microscopia eletrônica de varredura do RPP.



Figura 5: Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura do RPP.

A morfologia das partículas do RPP é caracterizada por superfícies rugosas, formas irregulares e contornos angulares, apresentando variações significativas em seus formatos.

3.2. Difração de raios-X (DRX)

A análise da difração de raios-X permitiu identificar os argilominerais constituintes da amostra.

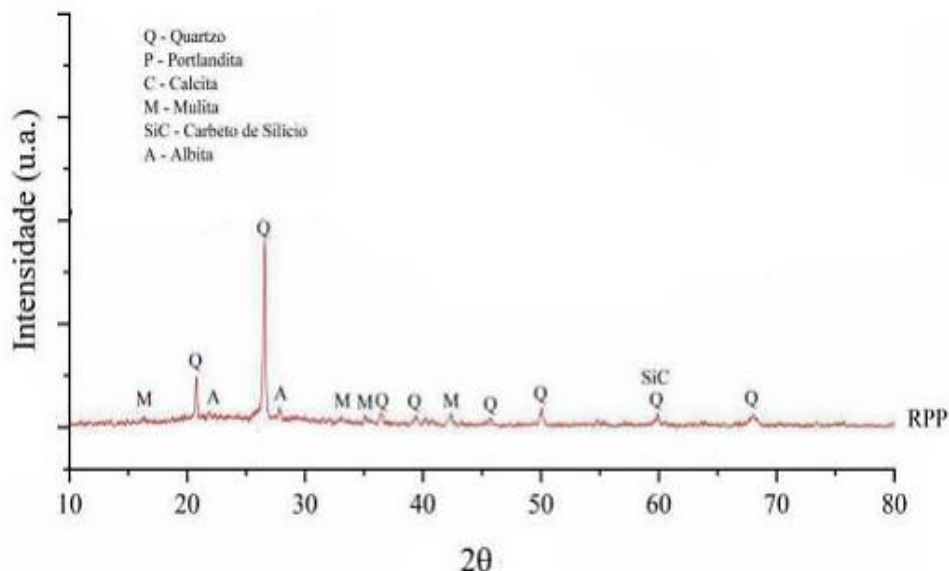


Figura 6: Resultado do ensaio de DRX do RPP.

Quanto à mineralogia foram identificadas como principais fases cristalinas o quartzo, albita, mulita e carbeto de silício, sendo os três primeiros provavelmente provenientes da massa porcelânica e o último do material abrasivo utilizado. O teor pozolânico do resíduo, constatado por meio de sua composição química e reatividade na presença de um ativador alcalino, reforça a aplicabilidade desse material em operações de estabilização do solo.

3.3. Análise química por Fluorescência de raios-X (FRX)

A Tabela 1, apresenta os resultados obtidos para a Fluorescência de raios X do RPP.

Tabela 1. Resumo dos compostos obtidos através do ensaio de FRX do RPP.

Composto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	K ₂ O	NaO ₂	SO ₃
(%)	67,48	17,91	1,01	3,32	0,33	3,6	3,55	2,0	0,11

Quanto à composição química o RPP apresentou como principais constituintes a sílica (67,48%) e o alumínio (17,91%) que somam, juntamente com o ferro, 86,4%,

permitindo que o material seja enquadrado como uma pozolana classe N pela NBR 12653/2014.

Apresentou ainda, em menores quantidades, os compostos cálcio, sódio, magnésio e potássio. A composição do RPP é semelhante à encontrada em resíduos de outras regiões.

4. Conclusão

Os resultados obtidos demonstram com clareza o potencial geotécnico do Resíduo do Polimento de Porcelanato (RPP) como material alternativo para a estabilização de solos lateríticos. A análise morfológica via MEV evidenciou partículas de geometria angular, superfície rugosa e distribuição irregular — características que favorecem o travamento mecânico entre partículas do solo, contribuindo para a melhoria da estrutura interna quando misturado à matriz do solo.

A análise mineralógica por DRX revelou a presença de quartzo, albita, mulita e carbetto de silício, minerais de elevada estabilidade térmica e química. Esses componentes não apenas conferem resistência física ao material, mas também indicam uma origem industrial controlada que contribui para a uniformidade composicional do resíduo.

As conclusões de FRX reforçam a viabilidade do RPP como material pozolânico, uma vez que os teores elevados de sílica (67,48%) e alumina (17,91%), juntamente com a presença de ferro, totalizando 86,4% da composição, enquadram o resíduo como uma pozolana classe N, de acordo com a NBR 12653/2014. Essa classificação técnica é de suma importância, pois valida o uso do RPP como agente estabilizante, capaz de reagir com hidróxidos de cálcio presentes no solo ou adicionados por ligantes (como cal ou cimento), formando compostos cimentantes que elevam a coesão e resistência mecânica do solo tratado.

Portanto, os dados físico-químicos apresentados confirmam a aptidão do RPP para aplicações geotécnicas, sobretudo na modificação estrutural de solos lateríticos, que possuem comportamento naturalmente desfavorável em função da alta plasticidade e instabilidade volumétrica. A combinação entre as propriedades físicas (morfologia particulada) e químicas (atividade pozolânica) do RPP constitui uma solução tecnicamente promissora e ambientalmente sustentável para o setor de

pavimentação, promovendo o reaproveitamento de resíduos industriais e o fortalecimento de técnicas de estabilização de solos tropicais no Brasil.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12653:2014. **Materiais pozolânicos — Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ARRUDA, Amanda Mendes. **Análise do comportamento à fadiga de solo laterítico fino estabilizado com cal e polímero**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2025.

BERNARDIN, A. M. et al. Caracterização física, estrutural e mecânica de cerâmicas expandidas obtidas a partir de resíduos de polimento de porcelanato. In: **PROCEEDINGS OF THE VIII WORLD CONGRESS ON CERAMIC TILE QUALITY**, 2006, Castellón. Anais [...]. Castellón, 2006. p. 191–198.

CARDOSO, Z. P.; PELISSER, F. Caracterização do resíduo de polimento de porcelanato. **Journal of Cleaner Production**, v. 100, p. 84–88, 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Brasil tem apenas 12,3% da malha rodoviária com pavimento**. Agência CNT de Notícias, 3 ago. 2016. Disponível em: <https://cnt.org.br/agencia-cnt/brasil-tem-apenas-12-da-malha-rodoviaria-com-pavimento>. Acesso em: 29 set. 2025.

FARIAS, Manoel Leandro Araújo e. **Estudo e classificação de solos lateríticos finos, arenosos e pedregulhosos naturais e melhorados com ligantes hidráulicos para utilização em camadas de pavimentos flexíveis**. 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2023.

MÉLO, V. da S. **Classificação e estabilização de solos lateríticos do Estado da Paraíba e do Rio Grande do Norte**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2011.

VILLIBOR, D. F.; NOGAMI, J. S. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos**. São Paulo: Arte & Ciência, 2009.

Abstract

This study aims to evaluate the potential of porcelain polishing residue (PPR) as a stabilizing agent for lateritic soils, which are widely distributed throughout Brazil and commonly used in road infrastructure projects. Physicochemical characterization tests were conducted, including Scanning Electron Microscopy with Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS), X-ray Fluorescence (XRF), and X-ray Diffraction (XRD). Results revealed irregular morphology with rough surfaces, high silica (67.48%) and

alumina (17.91%) content, and the presence of crystalline phases such as quartz, albite, and mullite. The chemical composition qualifies the PPR as a class N pozzolan, according to NBR 12653/2014. These properties confirm the reactivity of PPR in stabilization processes, improving mechanical resistance and durability of treated soils. The study highlights the technical and sustainable viability of using industrial ceramic residues as alternative materials in pavement engineering.

Keywords: Soil stabilization, lateritic soils, pozzolanic materials, physicochemical characterization.

RADIAÇÃO NUCLEAR: GAMAGRAFIA APLICADA AO CONTROLE DE QUALIDADE DE INDÚSTRIAS EM PEÇAS METÁLICAS

Luis Fernando dos Reis Souza ¹, Alyson Bruno Fonseca Neves ²
Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências de Balsas (CCBL)
coordenacaobictbalsas@ufma.br.

Resumo

Este trabalho apresenta uma revisão de literatura sobre a aplicação da radiação nuclear na gamagrafia industrial, com ênfase no controle de qualidade de peças metálicas. A técnica consiste na emissão de radiação ionizante por átomos instáveis, capaz de atravessar materiais e revelar falhas internas sem causar danos. Na indústria, essa característica permite inspecionar estruturas metálicas de forma precisa e segura. O objetivo é desmistificar o uso da radiação nuclear, evidenciando seus benefícios para o desenvolvimento tecnológico e a segurança industrial. O estudo aborda inicialmente a contextualização da gamagrafia, seguido dos fundamentos teóricos sobre a física da radiação, incluindo história, decaimentos nucleares e tipos de radiação. Por fim, discute a aplicação prática na indústria, destacando as fontes radioativas utilizadas, métodos e instrumentos empregados, ressaltando as vantagens dessa ferramenta no controle de qualidade industrial.

Palavras-chave: gamagrafia industrial; radiação nuclear; controle de qualidade.

1. Introdução

O presente estudo corresponde a uma pesquisa descritiva/exploratória que aborda o uso da radiação nuclear, destacando seus mitos, riscos e benefícios, com foco na técnica da gamagrafia aplicada ao controle de qualidade de peças metálicas. Historicamente, a energia nuclear esteve associada a armas e acidentes catastróficos, como os bombardeios de Hiroshima e Nagasaki, os acidentes de Chernobyl e Fukushima e, no Brasil, o caso do célio-137 em Goiânia. Esses episódios contribuíram para criar uma visão negativa e temerosa da radiação ionizante, geralmente associada a destruição e riscos à saúde. Contudo, a radiação também possibilitou avanços significativos em áreas essenciais, mostrando-se uma tecnologia de grande relevância quando utilizada de forma segura e controlada (Silva, 2010).

¹lfr.souza@discente.ufma.br

²alyson.bruno@ufma.br

Na medicina, a radiação é aplicada em radioterapias, diagnósticos por imagem e tratamentos de câncer, salvando milhares de vidas. Na agricultura, auxilia na conservação de alimentos e no controle de pragas, contribuindo para a segurança alimentar. Na área da saúde, destaca-se ainda a enfermagem radiológica, voltada ao cuidado de pacientes submetidos a procedimentos que envolvem radiação, o que reforça o papel da prática segura e responsável (Cardoso, 2008).

Na indústria, a aplicação mais expressiva é a gamagrafia, técnica de ensaio não destrutivo que utiliza radiação gama para inspecionar peças metálicas sem comprometer sua integridade. Ao atravessar os materiais, a radiação permite detectar falhas, fissuras e descontinuidades internas invisíveis ao olho humano, registrando os resultados em filmes fotográficos ou sistemas digitais. Isso garante documentação precisa e permanente, diferenciando-a de outros métodos, como o teste de partículas magnéticas ou o de resistência à tração, que não possibilitam o mesmo grau de registro e confiabilidade (Dawang, 2023).

A gamagrafia é amplamente empregada em setores estratégicos como o metalúrgico, o aeronáutico e o automobilístico. No setor aeronáutico, por exemplo, é utilizada na inspeção de asas, turbinas, rotores e hélices, partes submetidas a altas pressões e esforços mecânicos. Nesses casos, a técnica é essencial para detectar sinais de fadiga estrutural que poderiam comprometer a estabilidade da aeronave, prevenindo acidentes e garantindo a segurança de passageiros e tripulações (Silva, 2010). Também é aplicada na inspeção de soldas, dutos de transporte de líquidos e gases, além de metais fundidos e forjados, sempre com o objetivo de assegurar qualidade, confiabilidade e durabilidade (Rela, 1996).

Outro ponto de destaque é que a gamagrafia contribui para a sustentabilidade e a eficiência produtiva, uma vez que permite identificar defeitos antes da utilização dos materiais em etapas críticas da produção. Dessa forma, peças defeituosas podem ser descartadas ou recicladas, evitando falhas futuras e prejuízos maiores.

Ao revisitar a origem da radiação e a evolução da radioatividade, desde a descoberta dos raios X por Wilhelm Röntgen em 1895 até os estudos de Becquerel, Rutherford, Marie e Pierre Curie, e Paul Villard, é possível perceber o quanto esse campo avançou cientificamente. O entendimento acumulado ao longo do tempo viabilizou o uso seguro da radiação em diferentes setores, demonstrando que,

apesar dos riscos, os benefícios sociais e tecnológicos são expressivos (Xavier, 2007).

Portanto, este trabalho busca desmistificar a visão negativa em torno da radiação nuclear e evidenciar a importância da gamagrafia no contexto industrial. Essa técnica se mostra indispensável para o controle de qualidade, assegurando maior segurança, eficiência e confiabilidade em processos produtivos. Ao apresentar suas vantagens e aplicações, o estudo reforça a necessidade de compreender a radiação nuclear não apenas como ameaça, mas como recurso tecnológico essencial para o desenvolvimento da sociedade moderna.

2. Metodologia

Para execução da pesquisa, foi realizado, inicialmente, um levantamento bibliográfico em livros, artigos científicos e sites de internet, relacionados ao tema, abordando as interações fundamentais da natureza e a física dos processos radioativos, para uma descrição histórica da descoberta da radiação. e os processos de emissão da radiação para entendimento da gamagrafia. Em seguida, artigos foram utilizados com aplicação da técnica da gamagrafia em peças metálicas, bem como em outras áreas da tecnologia da radiação nuclear, mostrando de forma enfática e prática o que será necessário para a aplicação da gamagrafia na indústria.

3. Resultados e discussão

Durante o processo da gamagrafia industrial, uma das formas mais utilizadas dentre as aplicações nucleares, a peça a ser inspecionada é submetida a uma fonte radioativa, que pode ser de raios gama ou raios X, dependendo da natureza do material, da geometria do objeto e das condições de inspeção conforme é exemplificado na Figura 1. A radiação emitida possui alto poder de penetração, interagindo com os átomos do metal de modo a revelar imperfeições internas, como trincas, fissuras, porosidades ou descontinuidades. Parte dessa radiação é absorvida pelas regiões mais densas do material, enquanto a fração restante atravessa a peça e atinge o filme radiográfico posicionado do lado oposto.

O filme registra essas variações de absorção como diferentes níveis de escurecimento, permitindo identificar áreas de menor e maior densidade óptica, evidenciando defeitos, impurezas ou falhas internas do material. Essa interação detalhada entre radiação e matéria possibilita uma análise precisa da integridade da peça, garantindo que falhas críticas não possam passar despercebidas (Sánchez, 1967).

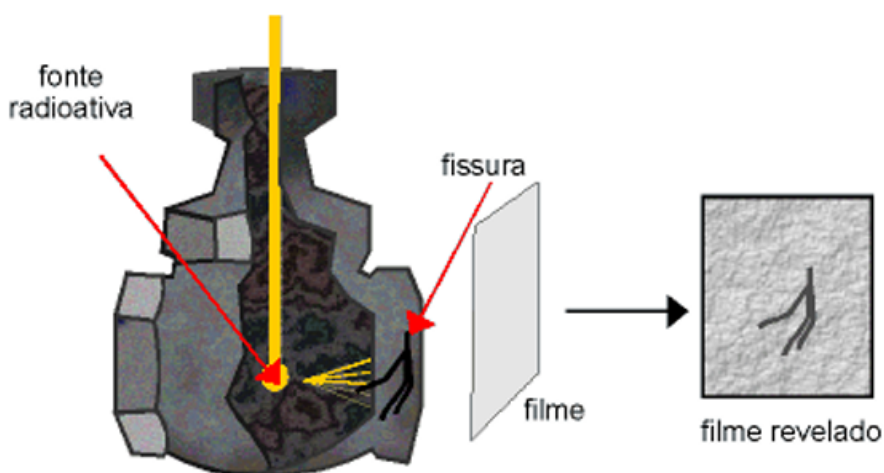


Figura 1. Demonstração e impressão do processo da gamagrafia.

Em filmes radiográficos, a gamagrafia revela que a técnica permite observar diferenças sutis na densidade interna dos materiais, assegurando a confiabilidade do controle de qualidade. A eficiência desse processo se deve não apenas à capacidade de detectar falhas invisíveis a olho nu, mas também à possibilidade de registrar permanentemente os resultados, permitindo comparações futuras e avaliações de histórico de inspeção (Rodrigues, 2016).

A escolha entre raios gama e raios X, como fontes de radiação, depende de critérios técnicos como espessura do material, acessibilidade da peça, tempo disponível para inspeção e densidade do objeto. Raios X, gerados artificialmente por colisão de elétrons com alvos metálicos, são indicados para situações com fornecimento de energia elétrica disponível e materiais de menor espessura. Já os raios gama, provenientes do decaimento de radioisótopos como Irídio-192, Cobalto-60 e Selênio-75, oferecem maior flexibilidade e mobilidade, sendo ideais

para locais remotos ou de difícil acesso, não necessitando de energia elétrica para emissão da radiação (Sánchez, 1974).

Ao longo do nosso estudo foi observado que os diferentes radioisótopos empregados possuem características específicas que influenciam diretamente a escolha do método mais adequado. O Irídio-192, com meia-vida curta, é indicado para materiais de espessura intermediária, exigindo reposições periódicas; o Cobalto-60, com longa meia-vida e alta intensidade de radiação, é mais adequado para inspeções prolongadas e peças de grande dimensão; enquanto o Selênio-75 apresenta vantagens em inspeções rápidas e materiais mais finos.

A comparação entre os métodos de raios gama e raios X indica que ambos possuem vantagens e limitações, devendo a escolha considerar critérios técnicos, econômicos e de segurança radiológica. Raios X permitem inspeções rápidas, mas dependem de energia elétrica e exigem manutenção frequente, enquanto raios gama oferecem maior portabilidade e durabilidade das fontes, embora necessitem de blindagem adequada e rigoroso controle operacional (Sánchez, 1967).

Conforme Sánchez (1974), os resultados reforçam que a gamagrafia industrial contribui significativamente para a segurança, eficiência e sustentabilidade na produção industrial. A detecção precoce de falhas evita perdas materiais e financeiras, garantindo integridade estrutural e prevenindo acidentes. Além disso, a técnica evidencia a importância da educação científica para desmistificar a radiação nuclear e promover o uso seguro e responsável desta tecnologia em benefício da sociedade.

4. Conclusão

Este estudo demonstrou a importância da gamagrafia industrial como método de controle de qualidade de peças metálicas, evidenciando sua eficiência na detecção de falhas internas sem causar danos aos materiais. Foram abordados os conceitos fundamentais da radiação nuclear, destacando a utilização de fontes como Irídio-192, Cobalto-60 e Selênio-75, bem como a comparação entre os métodos de raios gama e raios X, evidenciando suas características, aplicações e requisitos operacionais (Sánchez, 1974).

Observou-se que a escolha da fonte e do método depende da espessura, geometria e acessibilidade do material, assim como do tempo de exposição necessário. Raios gama oferecem maior portabilidade e independência de energia elétrica, enquanto os raios X são indicados para inspeções rápidas em locais com fornecimento de energia. Além disso, a gamagrafia se mostrou economicamente vantajosa, segura e aplicável em diversas indústrias estratégicas, desde o setor aeronáutico até o petroquímico.

Portanto, este trabalho permitiu compreender a importância da gamagrafia industrial como uma das técnicas mais eficientes de ensaio não destrutivo aplicadas no controle de qualidade de materiais metálicos, além de reforçar a importância da educação científica para desmistificar os receios relacionados à radiação nuclear, evidenciando que seu uso controlado é seguro e fundamental para garantir a qualidade, segurança e confiabilidade das estruturas industriais.

Agradecimentos

Agradeço o Prof. Dr. Alyson Bruno Fonseca Neves, pela orientação, e à Universidade Federal do Maranhão (UFMA) pelo suporte necessário à condução da pesquisa.

Referências

SILVA, Paulo Roberto Bairos da. **Energia nuclear: mitos e conflitos**. 2010

CARDOSO, Eliezer de Moura. **Aplicações da energia nuclear**. 2008. Disponível em:
<<https://www.gov.br/cnen/pt-br/material-divulgacao-videos-imagens-publicacoes/publicacoes-1/aplicacoesdaenergianuclear.pdf>>. Acesso em 22 mar. 2023.

DAWANG. **"Fundições de qualidade: 9 métodos de inspeção de fundição de uma peça de metal."** 2023. Disponível em:
<<https://dawangcasting.com/pt/blog/quality-castings-9-casting-inspection-methods-of-metal-part/>> . Acesso em 6 abr. 2024.

RELA, Paulo Roberto et al. Sealed radiation sources production in Brazil for industrial applications; **Produção de fontes seladas no Brasil para aplicações industriais**. 1996. Disponível em:
<<https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/662725>>. Acesso em: 02 fev. 2025

XAVIER, Allan Moreira et al. **Marcos da história da radioatividade e tendências atuais**. Química Nova, v. 30, p. 83-91, 2007. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/c4djyQQXBCLfrZNfFNWB7nC/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em 28 fev. 2024.

SÁNCHEZ, Wladimyr; PENTEADO FILHO, Azor Camargo. **Gamagrafia**. 1967. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/iea/IEA_INF_8.pdf> . Acesso em 2 mar. 2024.

SÁNCHEZ, W.; OKI, H. **Técnicas de gamagrafia aplicadas ao controle de qualidade de soldas em tubulações de sistemas adutores de água**. 1974. Disponível em: <<https://repositorio-api.ipen.br/server/api/core/bitstreams/40e5e408-661a-4224-bf36-10217f8c9902/content>>. Acesso em 10 mar. 2024.

RODRIGUES, Esequiel Biasi. **Alternativas de projeto de bunker para gamagrafia industrial objetivando a otimização da radioproteção**. 2016. Disponível em: <https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17477/1/CT_CEEEST_XXXII_2016_13.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2025.

Abstract

This work presents a literature review on the application of nuclear radiation in industrial radiography, with emphasis on quality control of metallic components. The technique consists of the emission of ionizing radiation by unstable atoms, capable of penetrating materials and revealing internal defects without causing damage. In industry, this property enables precise and safe inspection of metallic structures. The objective is to demystify the use of nuclear radiation, highlighting its benefits for technological development and industrial safety. The study initially addresses the contextualization of radiography, followed by the theoretical foundations of radiation physics, including history, nuclear decay, and radiation types. Finally, it discusses practical applications in industry, emphasizing the radioactive sources, methods, and instruments employed, and underscoring the advantages of this tool in industrial quality control.

Keywords: industrial radiography; nuclear radiation; quality control.

REDE DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO MARANHÃO (REDE ACV-MA) PARA O ENSINO, TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

Diego Lima Medeiros ¹, Júlio César Moraes Silva ¹, Gislane Pinho de Oliveira ¹
& Solange da Silva Nunes Boni ¹

¹ Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Resumo

A quantificação do desempenho ambiental de cadeias de produção e consumo é fundamental para apoiar a tomada de decisão em direção ao desenvolvimento sustentável. A formação de redes de trabalho é uma estratégia utilizada para conduzir atividades que envolvem várias partes interessadas. O objetivo deste trabalho é estruturar a Rede de Avaliação do Ciclo de Vida do Maranhão (Rede ACV-MA) para promover a pesquisa, desenvolvimento e inovação em organizações governamentais, empresariais, academia e sociedade civil. Para tanto, propõe-se identificar as partes interessadas em compor a Rede ACV-MA, ofertar cursos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e orientar trabalhos para a geração de produtos inovadores.

Palavras-chave: Desempenho Ambiental; Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Economia Circular; Ecologia Industrial.

1. Introdução

Os limites planetários de resiliência natural do planeta Terra foram ultrapassados em 6 de 9 categorias devido as atividades humanas (Richardson *et al.*, 2023). A temperatura média mundial em 2024 foi 1,5 °C maior que àquela do período de 1850–1900 (WMO, 2025). Dessa forma, a quantificação do desempenho ambiental da cadeia de produção e consumo de bens e serviços é requerida para apoiar a ecoinovação – inovação com melhoria ambiental.

A Ecologia Industrial é uma área do conhecimento da sustentabilidade que propõe várias técnicas para quantificar o desempenho ambiental de processos e produtos e apoiar a proposição de soluções mais sustentáveis (Lifset; Graedel, 2015). A Economia Circular é um modelo econômico que faz parte do desenvolvimento sustentável e emerge como opção à uma economia linear (Van Ewijk *et al.*, 2023), a qual é apoiada pela Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). A ACV é utilizada para avaliar os aspectos e impactos ambientais da cadeia de produção e consumo de um produto segundo a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009). Sendo assim, a pesquisa,

¹ Av. dos Portugueses, 1966, Bacanga, CEP 65080-805, São Luís-MA. E-mail: diego.lm@ufma.br, julio.cms@discente.ufma.br, gislane.oliveira@ufma.br & solange.boni@ufma.br, respectivamente.

desenvolvimento e inovação com uso da ACV apoia a melhoria ambiental das atividades humanas.

Este trabalho objetiva propor a estruturação da Rede de Avaliação do Ciclo de Vida do Maranhão (Rede ACV-MA) para promover a pesquisa, desenvolvimento e inovação em organizações governamentais, empresariais, academia e sociedade civil. Para tanto, necessita-se considerar a identificação das partes interessadas em compor a Rede ACV-MA, oferta de cursos de ACV e orientação de trabalhos para a geração de produtos inovadores. Sendo assim, a presente proposta contribui para o atendimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 12 da Organização das Nações Unidas (ONU) referente ao consumo e produção responsáveis.

2. Metodologia

O procedimento metodológico da proposta de estruturação da Rede ACV-MA consiste nas atividades contidas na Figura 1.

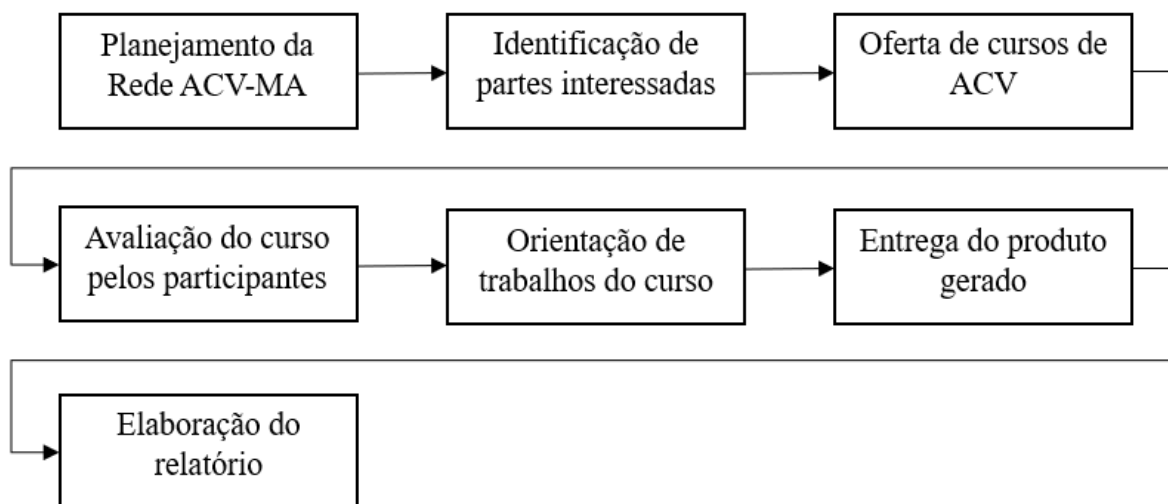


Figura 1. Procedimento metodológico das etapas de estruturação da Rede de Avaliação do Ciclo de Vida do Maranhão (Rede ACV-MA).

O planejamento da Rede ACV-MA é uma atividade que apoia as demais atividades desta proposta. Desta forma, o planejamento abrange a preparação da infraestrutura a ser utilizada, instalação de software e base de dados, elaboração de conteúdo e instrumentos avaliativos, avaliação de desempenho dos participantes, entre outras. A identificação de partes interessadas consiste no contato de organizações governamentais, empresariais, academia e sociedade civil do Maranhão para identificar os interessados em participar de atividades da Rede ACV-MA. A oferta

do curso é programada para duas turmas de treinamento. A avaliação do curso pelos participantes via questionários visa identificar a experiência dos participantes ao longo deste percurso formativo. Em seguida, considera-se um período de orientação de trabalhos do curso para gerar produtos inovadores na forma de artigo, plano ou ferramenta de ACV. Por fim, elaboram-se os relatórios parcial e final para a prestação de contas.

O percurso formativo da implementação da Rede ACV-MA integra conhecimentos teóricos e práticos de modo interdisciplinar para propor soluções aos problemas ambientais em diferentes atividades da sociedade. A interação entre participantes de várias organizações com projetos em diferentes temas apoia a troca de experiências e desenvolvimento de novos conhecimentos técnico-científicos. Neste contexto, foi elaborada uma revisão narrativa da literatura para apoiar a discussão sobre o tema, assim como resultados preliminares da estruturação da Rede ACV-MA, para apoiar a etapa de planejamento da Rede ACV-MA.

3. Resultados e discussão

A revisão narrativa da literatura sobre redes de trabalho em ACV e discussão da proposta da Rede ACV-MA são apresentadas nas seções a seguir.

3.1. Redes de trabalho em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A ecoinovação é necessária para atender os ODS até 2030 (Hauschild *et al.*, 2020). Neste contexto, a ACV contribui na otimização ambiental desde a concepção de um processo até a sua pós-operação, a fim de identificar oportunidades de melhoria ambiental ao longo do ciclo de vida. O Brasil conta com várias ações relacionadas à ACV, tais como:

- Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida – PBACV (<https://acv.ibict.br/pbacv/>);
- Associação Brasileira de Ciclo de Vida – ABCV (<http://abcvbrasil.org.br>);
- Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida – Rede ACV (<https://redeacv.org.br/>);
- Banco Nacional de Inventários do Ciclo de Vida – SICV Brasil (<https://sicv.acv.ibict.br/>);

- Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida – LALCA (<https://revista.ibict.br/lalca>);
- Políticas com abordagem de ciclo de vida:
 - Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei nº 12.305 de 2010;
 - Política Nacional de Biocombustíveis – Lei nº 13.576 de 2017;
 - Lei de Licitações e Contratos Administrativos – Lei nº 14.133 de 2021;
 - Estratégia Nacional de Economia Circular – Decreto nº 12.082 de 2024.
- Declarações com abordagem de ciclo de vida:
 - Programa da Pegada de Carbono (<https://www.abntonline.com.br/sustentabilidade/Pegada/>);
 - Programa Selo Verde Brasil (<https://www.gov.br/participamaisbrasil/programa-seloverde-brasil>).

Neste contexto, a estruturação de redes de trabalho contribui para atuar nestas ações de forma colaborativa. Governos, empresas, academia e sociedade civil tem se articulado em redes de trabalho para apoiar a implementação da ACV em políticas públicas, estratégias empresariais, pesquisa e inovação, e rotulagem ambiental. Algumas redes de trabalho em ACV têm sido formadas: Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida (Rede ACV) desde 2013 e Rede de Pesquisa em Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (RAICV) desde 2014. Ademais, organizações setoriais têm considerado a ACV em suas atuações, a exemplo do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS).

3.2. Rede ACV-MA

O envolvimento de vários grupos de organizações é fundamental para colaborar na Rede ACV-MA em uma coevolução contínua (Figura 2).



Figura 2. Grupos de organizações para colaborar na Rede de Avaliação do Ciclo de Vida do Maranhão (Rede ACV-MA).

A Rede ACV-MA está alinhada ao Plano Maranhão 2050 (SEPLAN, 2024), contribuindo diretamente para a Área de Resultado 3 – Meio Ambiente Valorizado e Resiliente – principalmente nos Desafios Estratégicos a seguir:

- 12. Estruturar a gestão dos recursos naturais e mitigar impactos decorrentes das mudanças climáticas;
- 14. Potencializar o desenvolvimento da economia verde e transversalizar a educação ambiental.

O trabalho da Rede ACV-MA deve gerar vários produtos, tais como artigos técnico-científicos de ACV aplicada a diferentes atividades humanas, planos de integração da ACV em organizações públicas e privadas, e ferramentas para simplificar a aplicação da ACV em setores específicos da economia. Ademais, a Rede ACV-MA contribui na formação de recursos humanos qualificados para atuarem em projetos de ACV e áreas correlatas, aumentando a competitividade das organizações para alcançar investimentos, incentivos, certificações e entrada em mercados de baixo carbono.

4. Conclusão

Para suprir a carência de recursos humanos qualificados e simplificar a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em diferentes atividades da sociedade, este trabalho propõe estruturação da Rede de Avaliação do Ciclo de Vida do Maranhão (Rede ACV-MA) para o ensino, tecnologia e gestão ambiental. Os impactos potenciais desta proposta são os seguintes: geração de informação ambiental

qualificada para apoiar o planejamento estratégico e tomada de decisão de organizações públicas e privadas; redução dos impactos ambientais de cadeias de produção e consumo de produtos e serviços; apoio para alcançar as metas ambientais de organizações, estado e país. Desta forma, a Rede ACV-MA contribui para a promoção da pesquisa, desenvolvimento e inovação em organizações governamentais, empresariais, academia e sociedade civil.

Agradecimentos

Este estudo foi iniciado no Projeto de Pesquisa intitulado “Otimização de processo com ênfase na Prevenção da Poluição e Ecologia Industrial: contribuições para o avanço em Ensino, Tecnologia e Gestão” (Código: PVBAL3376-2023) da Universidade Federal do Maranhão, sendo submetido a agências de fomento para apoiar a sua execução.

Referências

- ABNT. **NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.
- HAUSCHILD, M. Z.; KARA, S.; RØPKE, I. **Absolute sustainability**: Challenges to life cycle engineering. *CIRP Annals*, vol. 69, no. 2, p. 533–553, 2020.
- LIFSET, R.; GRAEDEL, T. E. Industrial Ecology. In: WRIGHT, J. D. **International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences**. Oxford: Elsevier, 2015.
- RICHARDSON, K. *et al.* **Earth beyond six of nine planetary boundaries**. *Science Advances*, vol. 9, no. 37, p. 1–16, 2023.
- SEPLAN. Plano Maranhão 2050. **Secretaria de Estado do Planejamento e Orçamento**, 2024. Disponível em: <https://www.seplan.ma.gov.br/programas-ou-campanhas/plano-maranhao-2050>. Acesso em: 09 set. 2025.
- VAN EWIJK, S. *et al.* **Ten insights from industrial ecology for the circular economy**. Leiden: International Society for Industrial Ecology, 2023.
- WMO. WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. **World Meteorological Organization**, 2025. Disponível em: <https://wmo.int/media/news/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-abovepre-industrial-level>. Acesso em: 02 mar. 2025.

Abstract

Quantifying the environmental performance of production and consumption chains is essential to support decision-making toward sustainable development. Networking is a strategy used to conduct activities involving multiple stakeholders. The objective of this work is to structure the Maranhao Life Cycle Assessment Network (ACV-MA Network) to promote research, development, and innovation in government, business, academic, and civil society organizations. To this end, it is proposed identifying stakeholders interested in joining the ACV-MA Network, offering life cycle assessment (LCA) courses, and guiding efforts to generate innovative products.

Keywords: Environmental Performance; Life Cycle Assessment (LCA); Circular Economy; Industrial Ecology.

SÍNTESE, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÃO DE COMPLEXO FOTOSSENSIBILIZADOR EM CÉLULA SOLAR

Gabryelle Sousa de Araújo ¹, Ellen Carmo da Silva ⁱ, Jailton Romão Viana ⁱⁱ & Regina M. M. Oliveira ^{1,2}

¹Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências de Balsas (CCBL)

²UFMA, Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGC&TAmb)

³UFMA, Centro de Ciências de Imperatriz (CCIM)

Resumo

As células solares sensibilizadas por corantes (DSSC) são uma alternativa promissora para fontes renováveis de energia, por aliarem baixo custo, funcionamento em baixa luminosidade e flexibilidade de design. Assim, o objetivo da pesquisa foi sintetizar o composto cloreto de 1,8-dihidroxi-4,5-dinitro-antraquinona(bis)2,2'-bipiridinacobre(II), BINI, e investigar as propriedades eletrônicas para aplicação em DSSC. O produto foi caracterizado por técnicas espectroscópicas, microanálise, condutividade e análise térmica, e o seu potencial como sensibilizador solar foi avaliado. Os espectros no UV-Vis revelam que a coordenação da antraquinona ao cobre(II) deslocou a banda de absorção para comprimento de onda mais alto (559nm; $\epsilon = 8160 \text{ L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$) em comparação à antraquinona livre (535nm; $\epsilon = 3145 \text{ L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$), indicando maior capacidade de absorção de luz. As células com BINI apresentam valores de tensão elétrica superiores e maior estabilidade. Portanto, o composto BINI é mais eficiente na conversão de energia solar em energia elétrica do que o corante natural antraquinona.

Palavras-chave: célula solar; energia renovável, DSSC.

1. Introdução

O aumento populacional e o desenvolvimento tecnológico geram maior demanda no consumo de energia no mundo. A busca por tecnologia energética solar mais eficiente é investigada para tornar a energia renovável acessível e disponível para os consumidores (Grätzel, 2004), já que os fótons solares são uma fonte de energia abundante. Porém, cerca de 45% e 50% da luz do Sol que incide sobre a superfície da Terra, na faixa do espectro de 400-780 nm, ocorre na região do visível (VIS) e do infravermelho, respectivamente. Já no ultravioleta (UV) o percentual de fótons é de cerca de 5%, os quais são necessários para a fotoexcitação na banda de condução de muitos semicondutores. Essa restrição é superada na célula solar sensibilizada por corante (DSSC) modificando a superfície semicondutora com um

¹ Rodovia MA-140, Km 4, s/n, CEP 65.800-000, Balsas-MA. E-mail: gabryelle.sousa@discente.ufma.br, ellen.carmo@discente.ufma.br & regina.oliveira@ufma.br, respectivamente.

² Av. dos Portugueses, 1966, Bacanga, CEP 65.080-805, São Luís-MA. E-mail: ellen.carmo@discente.ufma.br & regina.oliveira@ufma.br, respectivamente

³ Av. da Universidade, s/n, Dom Afonso Felipe Gregory, CEP 65.915-240, Imperatriz-MA. E-mail: jailton.viana@ufma.br.

corante que possui um estado fundamental abaixo da banda de condução e um estado excitado acima da banda de condução do semiconductor. A DSSC é um dispositivo fotoeletroquímico cujo funcionamento imita a fotossíntese nas plantas (Grätzel, 2004).

Segundo Boro *et al.* (2018), a DSSC é a tecnologia fotovoltaica alternativa mais promissora porque possibilita baixo custo, funcionamento mesmo sob baixa luminosidade, emissão menos atóxica durante a fabricação e maior flexibilidade no design. Porém, há problemas como a rápida degradação do corante (Pallikkara; Ramakrishnan, 2021) e uso principalmente de compostos à base de elementos rutênio como corante fotossensibilizador e platina no contraeletrodo da célula, os quais são caros e relativamente raros na natureza (Briscoe; Dunn, 2016).

Diante da necessidade do desenvolvimento de dispositivos solares mais eficientes e economicamente viáveis, nesta pesquisa buscou-se sintetizar e caracterizar um complexo do tipo metal(II)-antraquinona-diimina e investigar suas propriedades eletrônicas e funcionamento como sensibilizador nas células DSSC.

2. Metodologia

2.1. Síntese do complexo precursor $[\text{Cu}(\text{bipy})_2\text{Cl}_2] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

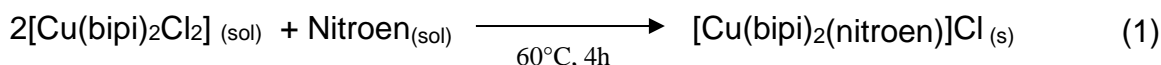
O complexo $[\text{Cu}(\text{bipy})_2\text{Cl}_2] \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ foi sintetizado conforme o método descrito na literatura (Sotomayor; Tanaka; Kubota, 2003), com modificações. Em um balão de fundo redondo de duas bocas contendo 10 mL de etanol e 0,25 g de cloreto de cobre ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), foi adicionada por gotejamento 10 mL da solução etanólica de 2,2'-bipiridina (0,46 g, 2,94 mmol) à temperatura ambiente. A mistura foi agitada por 4 h e resfriada a $-20\text{ }^\circ\text{C}$ por 24 h. Os cristais azuis foram filtrados em funil de vidro sinterizado e lavado com etanol gelado.

2.2. Síntese do fotossensibilizador $[\text{Cu}(\text{bipy})_2(\text{Nitroen})]\text{Cl}$ (BINI)

Em um balão de duas bocas contendo 30 mL de metanol e 0,199805 g (0,2500 mmol) do complexo precursor, foi adicionado 0,08668 g (0,2626 mmol, 5% em excesso) de 1,8-dihidroxi-4,5-dinitro-antraquinona (nitroen). A mistura permaneceu sob refluxo e agitação por 4 h. Depois, ao atingir a temperatura ambiente, o precipitado foi filtrado a vácuo em funil de vidro sinterizado tipo 4. O produto foi lavado com metal gelado, seco em dessecador e armazenado. A Figura 1 mostra imagens de etapas de obtenção de BINI, cuja estequiometria da reação de síntese (Equação 1) e o cálculo do rendimento do composto (Equação 2) são apresentados a seguir.



Figura 1. Imagens de algumas etapas da síntese de BINI, filtração e secagem.



$$\text{Rendimento (\%)} = (\text{massa prática} / \text{massa teórica}) \times 100 \quad (2)$$

2.3. Caracterização de BINI

Os espectros eletrônicos foram obtidos em dimetilformamida (DMF) na região UV-VIS de 300 a 800 nm em um espectrofotômetro UV-5100S e celas de quartzo. Os valores de absorvidade molar (ϵ) foram determinados a partir da relação linear entre a absorbância (A) e a concentração (c), conforme a lei de Beer-Lambert (Equação 3):

$$A = \epsilon \times b \times c \quad (3)$$

Os espectros vibracionais foram obtidos no estado sólido por Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), de 400 a 4000 cm^{-1} . Na análise elementar, utilizou-se o equipamento FISIONS para determinar os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio (C,H,N). A condutividade molar foi obtida em triplicata em dimetilsulfóxido (DMSO) em um condutivímetro Meter ÍON DDS-12DW com cela de platina. Os valores das condutividades elétrica (K_e) e molar (Λ_m) foram calculados pelas Equações 4 e 5, respectivamente, com base na concentração do composto (C):

$$K_e = K_{\text{solução}} - K_{\text{solvente}}, \text{ em } \mu\text{S cm}^{-1} \quad (4)$$

$$\Lambda_m = K_e (\text{S cm}^{-1}) / C (\text{mol cm}^{-3}) \quad (5)$$

A estabilidade térmica foi avaliada a partir de curvas termoanalíticas DSC, em que foi utilizado um analisador térmico da Shimadzu Instruments, modelo DTA-60, utilizando 2,00 mg da amostra em cadinho de platina, e como referência um cadinho vazio de mesma composição. A análise foi realizada em atmosfera de gás nitrogênio com vazão de 100 mL/min e razão de aquecimento de 10 $^\circ\text{C}/\text{min}$ e temperatura de 27 a 400 $^\circ\text{C}$.

2.4. Preparação do eletrodo de TiO_2 e contra eletrodo

Utilizou-se placas de vidro-ITO com dimensões de 2,5 cm x 2,5 cm para a preparação dos fotoanodos e contraeletrodos. Para o fotoanodo, foi depositada uma

pasta de óxido de titânio (TiO_2), seguida de aquecimento em forno mufla a $500\text{ }^\circ\text{C}$ / 45 min, resultando em uma camada com área ativa de 3 cm^2 . Já os contraeletrodos foram preparados depositando-se pasta de níquel sobre a placa de vidro e aquecendo a $300\text{ }^\circ\text{C}$ / 30 min (Figura 2(a)). Para a finalização do fotoanodos, as placas vidro-ITO- TiO_2 sinterizadas foram imersas nas soluções das amostras sensibilizadoras em concentração $1 \times 10^{-4}\text{ mol L}^{-1}$, e posterior secagem em dessecador.

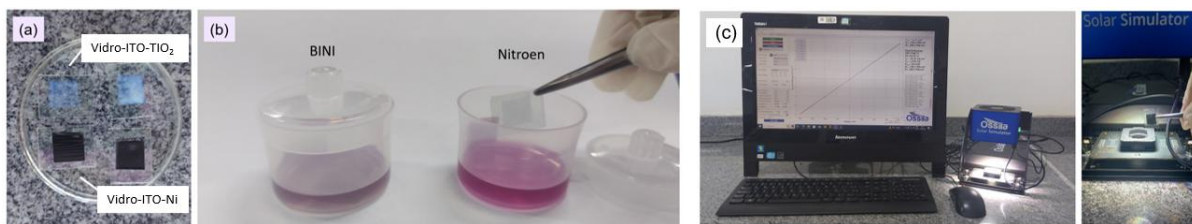


Figura 2. (a) placas vidro-ITO- TiO_2 e vidro-ITO-Ni; (b) imersão do vidro-ITO- TiO_2 sinterizado nas soluções das amostras; (c) instrumentação usada nas medições elétricas das DSSCs.

2.5. Montagem das DSSCs

O procedimento de montagem das DSSCs foi baseado no método Grätzel (2004), com modificações. Assim, combinou-se o fotoanodo e o contraeletrodo face-a-face com *surlyn* com espaçador inerte de $66\text{ }\mu\text{m}$ entre eles, formando filme aderente após selagem a quente. Em seguida, a solução do eletrólito iodeto/triiodeto (I_3^-/I^-) foi introduzida com o uso de seringa por um orifício, que depois foi vedado com araldite.

2.6. Medições elétricas das DSSCs

As células DSSC foram caracterizadas a partir da obtenção dos parâmetros fotovoltaicos, usando-se um simulador solar AM 1.5 (modelo S211 da Ossila), conectado a um computador. As medidas de tensão em função do tempo (s) foram realizadas em um multímetro digital HM-1001 (Figura 2(c)).

3. Resultados e discussão

3.1. Síntese e Caracterização de BINI

O composto de coordenação cloreto de 1,8-dihidroxi-4,5-dinitro-antraquinona(bis)2,2'-bipiridinacobre(II) de fórmula $[\text{Cu}(\text{bipi})_2(\text{nitroen})]\text{Cl}$ (BINI) foi obtido como sólido roxo com características cristalinas com rendimento de 69,42 %. Os espectros eletrônicos do ligante nitroen livre, do complexo precursor e de BINI em DMF são mostrados na Figura 3(a), 3(b) e 3(c), respectivamente, cujos valores de absortividade molar (ϵ) nos espectros foram calculados a partir da Equação 3.

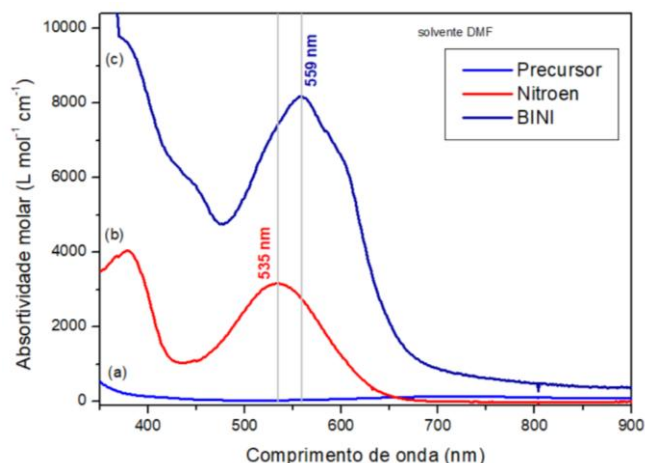


Figura 3. Espectros eletrônicos no UV-Vis (absortividade molar vs. comprimento de onda) dos compostos: precursor (a); nitroen (b); e BINI (c) em DMF, à $25 \pm 0,1$ °C.

Na região do visível o ligante nitroen livre possui banda de absorção em 380 e 535 nm, atribuída às transições $\pi \rightarrow \pi^*$ dos grupos cromóforos da molécula. O espectro eletrônico de BINI (Figura 3(c)) mostra banda de absorção máxima em 559 nm atribuída à transição $\pi \rightarrow \pi^*$ no ligante nitroento (HAnt⁻) coordenado, sendo deslocada para regiões de menor energia em comparação à sua forma livre. Esse deslocamento batocrômico indica a presença do monoânion da nitroen na molécula do complexo, de acordo com a literatura (Oliveira; Ferreira; Cardoso, 2020). As transições eletrônicas em BINI são mais permitidas, indicado pelo maior valor da absortividade molar. Já o complexo precursor não apresenta banda na região de 300 a 600 nm. Assim, os dados corroboram com a formulação proposta para o complexo mononuclear.

Os espectros vibracionais FTIR do complexo precursor, do ligante nitroen livre e de BINI são apresentados nas Figuras 4(a), 4(b) e 4(c), respectivamente.

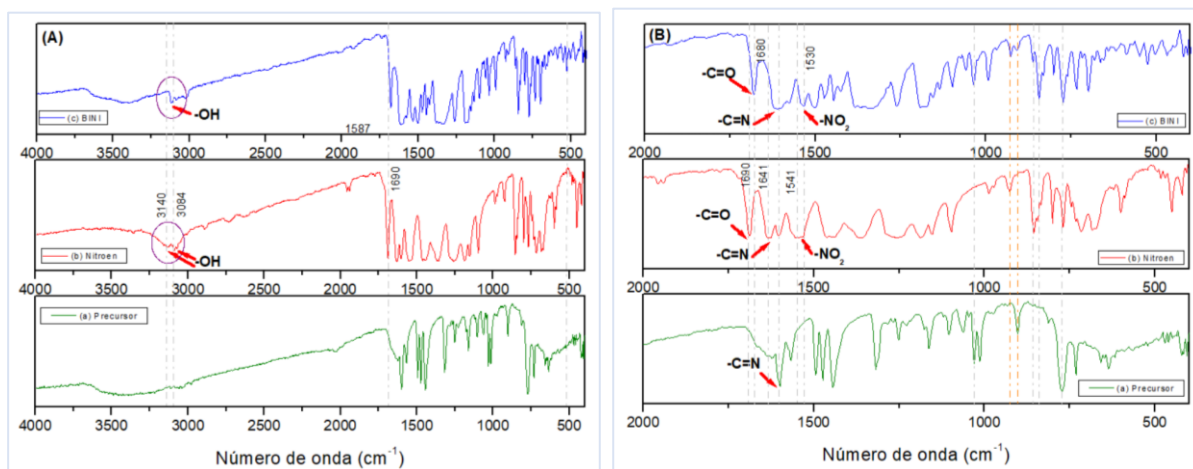


Figura 4. Espectros vibracionais FTIR do nitroen (a), do precursor (b) e do composto BINI (c), nas faixas de 4000 a 400 cm^{-1} (A) e de 2000 a 400 cm^{-1} (B).

Em nitroen os picos do grupo (-OH) aparecem em 3140 e 3084 cm^{-1} , além dos picos e 1690, 1641 e 1541 cm^{-1} referentes aos estiramentos (-C=O), (-C=N) (-NO₂), respectivamente (Figura 5). No espectro de BINI o pico em 3140 cm^{-1} do grupo hidroxila está ausente, e o pico da carbonila deslocou para 1680 cm^{-1} , indicando o enfraquecimento da ligação C=O por ter formado ligação coordenada com o metal Cu (Jesus *et al.*, 2025). Além disso, no espectro de BINI não aparece a banda fraca em 3140 cm^{-1} de um dos grupos O-H, indicando a desprotonação e ligação ao Cu(II).

Os valores teóricos para a formulação proposta para BINI, $\text{CuC}_{34}\text{H}_{21}\text{N}_6\text{O}_8\text{Cl}$, são descritos na Tabela 1, assim como os dados experimentais obtidos, cujos valores são bastante próximos e indica coerência na formulação sugerida.

Tabela 1. Percentuais dos teores de C, N e H, experimentais e teóricos para BINI.

Elementos	Percentuais		
	Teórico (%)	Experimental (%)	Erro (%)
Carbono (C)	55,14	54,96	0,32
Hidrogênio (H)	2,86	2,79	2,44
Nitrogênio (N)	11,35	11,27	0,70

O valor da condutividade molar (Λ_m) em DMSO foi obtido como sendo 88,5 $\Omega \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{mol}^{-1}$ a $27,0 \pm 0,1$ °C para uma solução em concentração de $1,46 \times 10^{-4}$ mol L⁻¹. Este dado está próximo ao descrito por Velho (2006) conforme seus estudos estatísticos ao que é considerado um eletrólito 1:1, isto é: um cátion complexo $[\text{Cu}(\text{bipi})_2(\text{nitroen})]^+$ e um ânion cloreto (Cl⁻), como proposto nesta pesquisa. Portanto, com base nos dados das caracterizações realizadas, a estrutura sugerida para BINI é a mostrada na Figura 5(a).

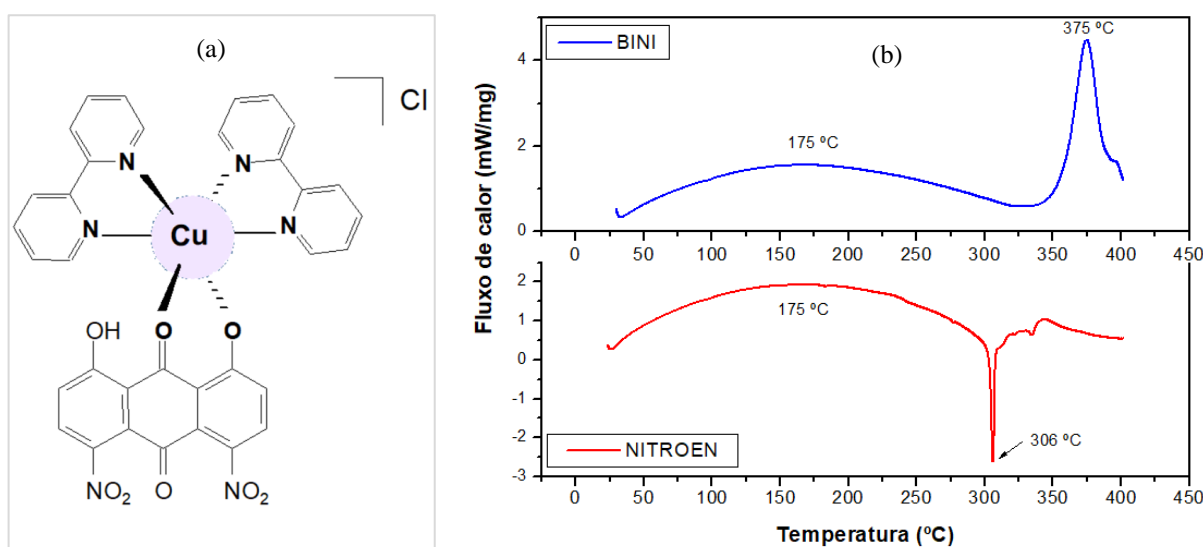


Figura 5. (a) Estrutura sugerida para a molécula BINI; (b) curvas DSC de nitroen livre e de BINI.

3.2. Estabilidade térmica - curva DSC

As curvas DSC do ligante 1,8-dihidroxi-4,5-dinitro-antraquinona (nitroen) e do complexo BINI são apresentadas na Figura 5(b) e mostram diferenças térmicas claras entre o ligante livre e o complexo BINI, indicando que a complexação altera significativamente o comportamento térmico. Em ambas as curvas se observa um evento amplo com máximo em 175 °C, o que pode refletir perda de pequena quantidade de solvente/água adsorvida, relaxação conformacional ou reorganizações intermoleculares semelhantes. Mas o evento principal de degradação do ligante livre ocorre a uma temperatura mais baixa (em 306 °C, pico acentuado), enquanto o complexo BINI apresenta um pico térmico bem definido deslocado para 375 °C e de maior intensidade, evidenciando que a decomposição do complexo acontece a temperaturas superiores. O deslocamento para temperaturas mais altas e a maior energia envolvida no evento principal do BINI sugerem aumento da estabilidade térmica provocado pela coordenação do ligante ao íon cobre, com maior estabilização eletrônica dos anéis aromáticos/nitro. Assim, a formação do complexo eleva a resistência térmica e modifica o perfil de degradação em relação ao ligante livre.

3.3. Caracterização fotoelétrica de BINI e das DSSCs

Em geral, compostos de coordenação são atraentes para aplicação fotovoltaica em caso de apresentar banda de absorção de luz na faixa espectral visível e do infravermelho próximo, que é abundante em fótons. Perfis de absorção do corante sensibilizador deslocado para regiões de maiores comprimentos de onda na região do visível é importante para aumentar a performance de DSSC (Oliveira; Ferreira; Cardoso, 2020). Na Figura 6A é apresentado o espectro de irradiação solar (AM 1.5).

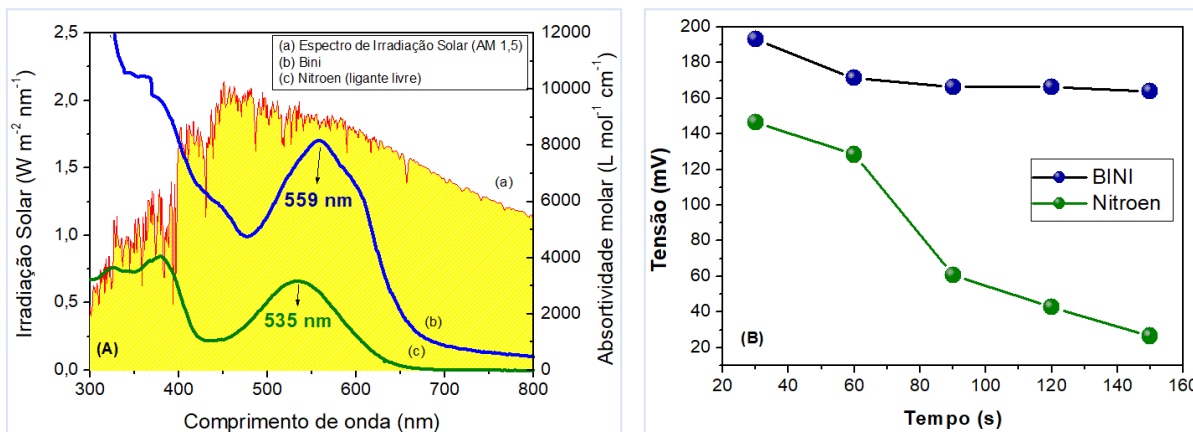


Figura 6. A) Espectros de irradiação solar (AM 1.5) (NREL, 2019) (a), de absorção no UV-Vis de BINI (b) e do ligante nitroen livre (c), em DMF; B) medidas de tensão (mV) versus tempo (s) a partir da irradiação solar das DSSCs contendo: BINI (a) e nitroen (b).

Conforme a Figura 6, o espectro de irradiação solar está na mesma faixa de comprimento de onda de estudo dos corantes sensibilizadores (nitroen livre e BINI). Observa-se que a coordenação do ligante nitroen ao Cu(II) ampliou a capacidade de absorção de luz em BINI, por meio do deslocamento da banda de absorção para a região de maior comprimento de onda, com diferença de 24 nm da banda máxima de BINI (559 nm) em relação à nitroen livre (535 nm). De acordo com a teoria quântica de Planck, a energia de um único fóton, E (eV), é descrita pelas Equações 6 e 7:

$$E = h\nu \quad (6)$$

$$E = h(c/\lambda) \quad (7)$$

onde: h = constante de Planck ($4,13566733 \cdot 10^{-15}$ eV.s); ν = frequência (s^{-1}); c = velocidade da luz ($2,99792458 \cdot 10^{17}$ nm/s) e λ = comprimento de (nm).

A partir das Equações 6 e 7 calculou-se a energia do fóton na banda máxima da nitroen livre (535 nm) e do complexo BINI (559 nm), cujos valores correspondem a 2,175 eV e 2,218 eV, respectivamente. A energia dos fótons absorvidos por nitroen é relativamente maior que a dos absorvidos pelo complexo BINI. Teoricamente, a geração de maior tensão elétrica em uma célula solar pode ser beneficiada por fótons de maior energia, uma vez que são proporcionais. No entanto, a absortividade molar reflete a capacidade de um composto de absorver luz, de modo que o valor mais alto apresentado por BINI ($8160 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) em comparação com o nitroen ($3145 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$), significa que o complexo absorve significativamente mais fótons por unidade de concentração. Assim, o complexo BINI pode oferecer maior vantagem para aplicação como corante sensibilizador em uma célula solar do tipo DSSC, pois a sua absortividade molar muito superior é um fator importante para maximizar a captação de luz, podendo resultar em maiores valores de eficiência.

Na Figura 6B é apresentado o gráfico de tensão gerada vs. tempo medidos quando as células foram submetidas à irradiação em um simulador solar. A célula em que o complexo BINI é o sensibilizador apresenta maiores valores de tensão elétrica, indicando maior eficiência na conversão de energia solar em elétrica. Além disso, na célula contendo nitroen como sensibilizador há queda no valor de tensão, quando comparado a BINI. Isso pode indicar que a ligação coordenada deste ligante ao cobre (II) favorece a sua estabilidade e eficiência na conversão de energia solar em elétrica, sendo este mais um aspecto positivo do sensibilizador BINI. Ressalta-se que

estabilidade do corante é também um requisito importante para aplicação solar (Silva; Viana; Oliveira, 2025).

4. Conclusão

Conclui-se que: *i)* neste trabalho foi sintetizado o novo composto de coordenação $[\text{Cu}(\text{bipy})_2(\text{nitroen})]\text{Cl}$ (BINI), com formulação $\text{CuC}_{34}\text{H}_{21}\text{N}_6\text{O}_8\text{Cl}$ e peso molecular de 740,57 g/mol; *ii)* a coordenação do ligante nitroen ao cobre(II) no composto BINI ampliou a capacidade de absorção de luz em comprimentos de onda maiores em comparação ao ligante livre; *iii)* o complexo BINI apresenta maior absorvidade molar ($8160 \text{ L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) em comparação ao nitroen ($3145 \text{ L mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$), indicando maior capacidade de absorver fótons por unidade de concentração. Essa característica é vantajosa para aplicação como corante sensibilizador em células solares DSSC; *iv)* células solares utilizando o composto BINI como corante sensibilizador apresentaram maiores valores de tensão elétrica em comparação àquelas sensibilizadas com nitroen livre, sugerindo maior eficiência na conversão de energia solar em elétrica; *v)* a ligação coordenada do ligante nitroen ao cobre(II) no complexo BINI parece favorecer sua estabilidade e eficiência na conversão de energia solar, um requisito importante para aplicação em células solares.

Agradecimentos

À FAPEMA/EMAP/ITAQUI, pelo auxílio financeiro (processo: APP-04778/23) e bolsa pesquisador (processo: ACC-8-07192/23) e ao CNPq e à CAPES pelas bolsas concedidas de Iniciação Científica (processo: 168178/2024-9) e de Mestrado (processo: 88887.151664/2025-00), respectivamente.

Referências

- BORO, B.; RAJBONGSHI, B.M.; SAMDARSHI, S.K. Synthesis and fabrication of $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ nanocomposite based solid state dye sensitized solar cell. **J Mater Sci: Mater Electron.**, 27, 9929-40, 2016. doi: 10.1007/s10854-016-5062-8
- BRISCOE, J.; DUNN, S. Dye-sensitized solar cells: the future of using earth-abundant elements in counter electrodes for dye-sensitized solar cells. **Advanced Materials**, 28(20), 3976-3976, 2016. doi: 10.1002/adma.201670140
- GRÄTZEL, M. conversion of sunlight into electrical energy by nanocrystalline dye-sensitized solar cells. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, 164, 3-14, 2024. doi: 10.1016/j.jphotochem.2004.02.023

JESUS, N. C.; ABREU, D. L. G.; VIANA, J. R.; OLIVEIRA, R. M. M. Síntese, caracterização e aplicação como sensibilizador solar de um novo composto de coordenação de Cu(II) com ligantes 2,2'-bipiridina e antrarufina. **Cuadernos De Educación Y Desarrollo**, 17(3), e7811, 2025. doi: 10.55905/cuadv17n3-084

OLIVEIRA, R. M. M.; FERREIRA, L. C.; CARDOSO, F. M. N. Complexo Zinco-produto natural: desenvolvimento e aplicação como fotossensibilizador para célula solar / Zinc-natural product complex: development and application as a photosensitizer for solar cells. **Brazilian Journal of Development**, 6(11), 87828-87842, 2020. doi: 10.34117/bjdv6n11-270

PALLIKKARA, A.; RAMAKRISHNAN, K. Efficient charge collection of photoanodes and light absorption of photosensitizers: A review. **International Journal of Energy Research**, Vol.45(2), pp.1425-1448, 2021. doi: 10.1002/er.5941

SILVA, E. C.; VIANA, J. R.; OLIVEIRA, R. M. M. (2025). Corante antociânico de baixo custo da flor de faveira (*Parkia platycephala*) para DSSC livre de Pt. **Scientia Plena**, 21(7), 2025. doi: 10.14808/sci.plena.2025.077202

SOTOMAYOR, M. D. P. T.; TANAKA, A. A.; KUBOTA, L. T. Desenvolvimento de um sensor amperométrico altamente seletivo para a determinação de dopamina e compostos análogos usando o complexo de cloreto de bis(2,2'-bipiridil)cobre(II). **Electroanalysis**, 15, 787-796, 2003. doi: 10.1002/elan.200390097

Abstract

Dye-sensitized solar cells (DSSCs) are a promising alternative for renewable energy sources, combining low cost, low-light operation, and design flexibility. Thus, the objective of this research was to synthesize the compound 1,8-dihydroxy-4,5-dinitro-anthraquinone(bis)2,2'-bipyridinecopper(II) chloride, BINI, and investigate its electronic properties for application in DSSC. The product was characterized by spectroscopic techniques, microanalysis, conductivity, and thermal analysis, and its potential as a solar sensitizer was evaluated. UV-Vis spectra reveal that the coordination of anthraquinone to copper(II) shifted the absorption band to a higher wavelength (559nm; $\epsilon = 8160\text{L.mol}^{-1}\text{.cm}^{-1}$) compared to free anthraquinone (535nm; $\epsilon = 3145\text{L.mol}^{-1}\text{.cm}^{-1}$), indicating a greater light absorption capacity. Cells with BINI exhibit higher voltage values and greater stability. Therefore, the BINI compound is more efficient in converting solar energy into electrical energy than the natural dye anthraquinone.

Keywords: solar cell; renewable energy; DSSC.

VALIDAÇÃO DO TESTE UNIVERSAL DE ENVELHECIMENTO SIMPLES (USAT) PARA ESTUDO DO EFEITO DO ENVELHECIMENTO EM LIGANTES ASFÁLTICOS

Brenda Maria Barreto de Souza¹, Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça², Chrysttyn Thalles Ribeiro Félix³, Auanny Alícia Alves da Silva⁴, Thiago Lucena Dias⁵, Arthur Nóbrega de Sousa⁶ Cáyra Vitória Brito de Sousa e Silva⁷

¹²³⁴⁵⁶⁷ Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Centro de Ciência e Tecnologia (CCT)

Resumo

O envelhecimento de ligantes asfálticos é um processo crucial para avaliar a durabilidade dos pavimentos. Este estudo teve como objetivo comparar o ligante convencional CAP 50/70 com o modificado AMP 55/75. A metodologia empregou o ensaio RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) para simular o envelhecimento a curto prazo, avaliando propriedades como penetração, ponto de amolecimento, viscosidade e recuperação elástica antes e depois do processo. Os resultados demonstram que o envelhecimento promoveu a rigidez de ambos os materiais. O ligante modificado AMP 55/75 exibiu um aumento expressivo na viscosidade e no ponto de amolecimento, proporcionando melhor desempenho em altas temperaturas e sob tráfego intenso. O RTFOT é uma ferramenta útil para a avaliação de curto prazo, embora necessite de ensaios complementares como o PAV para uma análise completa.

Palavras-chave: Pavimentos; RTFO; Rigidez; Tráfego.

1. Introdução

O estudo da pavimentação asfáltica é essencial para o aprimoramento do desempenho, da durabilidade e dos custos de manutenção das infraestruturas rodoviárias na área da engenharia civil. Compreender os mecanismos envolvidos nesse processo é essencial para o desenvolvimento de materiais mais resistentes e sustentáveis, diante disso, nota-se a importância de investigar mais a fundo o envelhecimento dos ligantes asfálticos, levando em conta influências ambientais, tais como variações térmicas e cargas de tráfego, a fim de minimizar impactos da rigidez, fragilidade e susceptibilidade à fadiga e ao trincamento térmico do ligante asfáltico,

¹ Universidade Federal de Campina Grande. E-mail: brenda.barreto@estudante.ufcg.edu.br

² Universidade Federal de Campina Grande. E-mail: ana.duartemendoca@professor.ufcg.edu.br

³ Universidade Federal de Campina Grande. E-mail: Chrysttyn.thalles@estudante.ufcg.edu.br

⁴ Universidade Federal de Campina Grande. E-mail: auanny.alicia@estudante.ufcg.edu.br

⁵ Universidade Federal de Campina Grande. E-mail: thiago.lucena@estudante.ufcg.edu.br

⁶ Universidade Federal de Campina Grande. E-mail: arthur.nobrega@estudante.ufcg.edu.br

⁷ Universidade Federal de Campina Grande. E-mail: cayra.vitoria@estudante.ufcg.edu.br

visto que esses efeitos comprometem a performance estrutural e reduzem a vida útil da pavimentação.

Diante disso, são feitos testes de simulação de envelhecimento acelerado em ligantes asfálticos, o Ensaio de Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT) é o mais utilizado. Este método tem sido amplamente aceito devido à sua capacidade de reproduzir as condições de envelhecimento que ocorrem durante a mistura e a pavimentação (AASHTO, 2013). No entanto, o RTFOT apresenta algumas limitações, incluindo a incapacidade de simular completamente os efeitos do envelhecimento que ocorrem ao longo da vida útil do pavimento (Kandhal & Mallick, 1997).

Nesse cenário, a reologia se destaca como ferramenta fundamental, pois permite investigar o comportamento dos ligantes sob diferentes condições de esforço, considerando propriedades como penetração, ponto de amolecimento, viscosidade e elasticidade. Esses parâmetros são fundamentais para compreender as mudanças provocadas pelo envelhecimento e para avaliar a eficiência de aditivos modificadores incorporados ao ligante.

A pesquisa considera a aplicação de modificadores como polímeros, capazes de melhorar as características reológicas e a durabilidade do material. Entre eles, destaca-se o PET (politereftalato de etileno), um polímero termoplástico de natureza poliéster, conhecido por sua resistência mecânica, química e ao desgaste, além de seu papel estratégico na sustentabilidade devido à possibilidade de reaproveitamento de resíduos plásticos. O EMA-GMA (etileno-metacrilato-glicidil metacrilato), por sua vez, é um copolímero que confere maior resistência ao impacto e aprimora propriedades de desempenho. E o PPA (poliftalamida), pertencente à família das poliamidas, é utilizado por sua elevada resistência térmica e pela capacidade de aumentar a viscosidade do ligante.

Assim, este estudo tem como objetivo principal comparar os resultados obtidos a partir da investigação do envelhecimento de ligantes modificados pelo método tradicional Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) realizado no CAP 50/70 e no AMP 55/75, que possui a incorporação de modificadores poliméricos visando maior durabilidade e sustentabilidade do material.

2. Metodologia

2.1 Materiais

O desenvolvimento e estudo do projeto de pesquisa, realizado no Laboratório de Reologia de Cimentos Asfálticos de Petróleo (LRCAP/LEP/UAEC/CTRN/UFCG), envolve o uso de um ligante asfáltico de controle CAP 50/70 e um AMP 55/75. O ligante asfáltico de controle empregado foi o CAP 50/70 da CBA, sendo o mais utilizado atualmente nos serviços de pavimentação asfáltica no Brasil, com o objetivo de aprimorar suas propriedades, esse ligante foi modificado com a adição de Ácido Polifosfórico (PPA116%) como catalisador e dois tipos de polímeros: um Terpolímero Reativo (RET) de Etileno Metacrilato e Glicidil Metacrilato (EMA-GMA), com 20% de conteúdo em massa de metacrilato de metila e 6% de glicidil metacrilato, comercialmente denominado Polimul S74®, e um Polietileno tereftalato (PET), um produto reciclado e micronizado.

A Figura 1 ilustra os modificadores utilizados, onde as proporções de cada componente foram derivadas das pesquisas conduzidas por Guedes (2024), que estabeleceu as seguintes proporções: 97,75% de CAP 50/70, 1,80% de EMA-GMA, 0,3% de PET e 0,15% de PPA. Ao final dos parágrafos e entre parênteses:

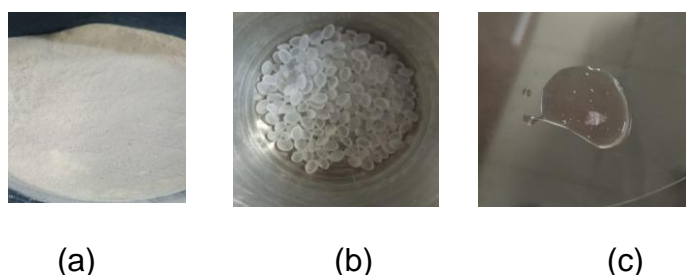


Figura 1 - Modificadores do ligante asfáltico: (a) PET, (b) EMA-GMA, (c) PPA116%.

2.2 Métodos

A Figura 2 apresenta o fluxograma das atividades desenvolvidas para a realização deste estudo.

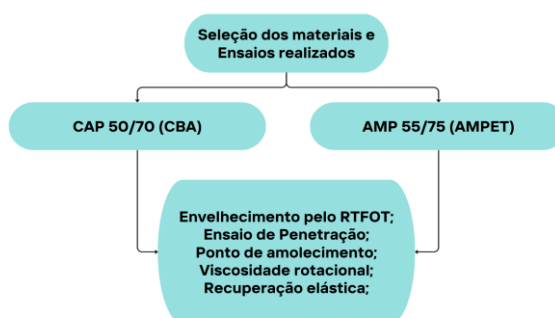


Figura 2 - Fluxograma de atividades desenvolvidas.

O processo de modificação do ligante asfáltico de controle pelos aditivos propostos para a determinação das propriedades físicas empíricas e reológicas foi realizado em laboratório usando um agitador mecânico com rotação de 500 rpm, mantendo a temperatura do ligante asfáltico entre 160°C e 165°C, conforme mostra a Figura 3.



Figura 3 - Agitador mecânico com rotação de 500 rpm.

Fonte: Autor, 2025.

Os modificadores foram adicionados aos teores propostos ao ligante de controle pré-aquecido seguindo a ordem de prioridade: EMA-GMA por 1 hora, PET por 30 minutos e PPA116% por 30 minutos. Após a mistura, os ligantes modificados foram transferidos para uma estufa a 160°C por 12 horas, simulando o processo de espera industrial para aplicação em campo, todas as amostras modificadas não apresentaram separação de fase, apresentando uma mistura homogênea com o ligante de controle, como é possível observar na Figura 4.

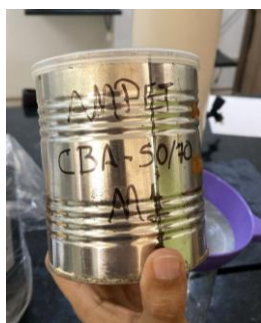


Figura 4 - Ligante asfáltico modificado.

Fonte: Autor, 2025.

Para a caracterização física e reológica do ligante, foram realizadas análises antes e após a sua exposição ao processo de envelhecimento no Forno de Filme Fino Rotativo (RTFOT), de acordo com a norma NBR 14950. As análises incluíram o ensaio de penetração, conforme a NBR 6576, a determinação do ponto de amolecimento segundo a NBR 6560, a medição da viscosidade rotacional pela NBR 15184, e por fim o ensaio de recuperação elástica de acordo com a DNIT 135/2018 – ME. Para cada ensaio foi necessário separar amostras específicas do ligante, conforme a Figura 5.

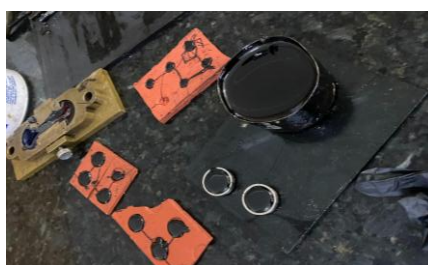


Figura 5 - Amostras do ligante após o processo de RTFOT.

Fonte: Autor, 2025.

3. Resultados e discussão

Nesta seção, serão apresentados os resultados finais obtidos com a pesquisa, como é possível observar na Tabela 1.

Tabela 1 - Ensaio físicos e reológicos dos ligantes asfálticos.

Procedimento	CAP 50/70		AMP 55/75	
Antes do RTFO	Resultado	Especificação	Resultado	Especificação
(Penetração (25°C, 5s, 100g), dmm)	57,7	50 a 70	39,6	45 a 70
Ponto de amolecimento, °C	48,5	-	61	-
Viscosidade rotacional 135°C SP 21 20 rpm, cP	458,67	>/ 274	2043,75	</ 3000
Viscosidade rotacional 142°C SP 21 35 rpm, cP	325,36	-	1317,86	-
Viscosidade rotacional 150°C SP 21 50 rpm,	227,79	>/ 112	845	</ 2000

cP				
Viscosidade rotacional 165°C SP 21 75 rpm, cP	125,86	-	411,66	-
Viscosidade rotacional 177°C SP 21 100 rpm, cP	83,09	57 a 285	245	</ 1000
Recuperação elástica (25°C, 20cm), %	-	-	77	>/ 75
Após do RTFO	Resultado	Especificação	Resultado	Especificação
Penetração (25°C, 5s, 100g), dmm	29,6	>/ 55	23	>/ 60
Ponto de amolecimento, °C	54,5	-	74,5	-
Viscosidade rotacional 135°C SP 21 20 rpm, cP	715,02	-	4100	-
Viscosidade rotacional 142°C SP 21 35 rpm, cP	493,24	-	2521,43	-
Viscosidade rotacional 150°C SP 21 50 rpm, cP	334,69	-	1510	-
Viscosidade rotacional 165°C SP 21 75 rpm, cP	177,54	-	663,33	-
Viscosidade rotacional 177°C SP 21 100 rpm, cP	112,94	-	367,5	-
Recuperação elástica (25°C, 20cm), %	-	-	73,5	>/ 80

Fonte: Autores (2025).

Na Figura 6 visualiza-se um gráfico acerca dos resultados de viscosidade rotacional em ambos os ligantes, antes e após o processo de RTFOT.

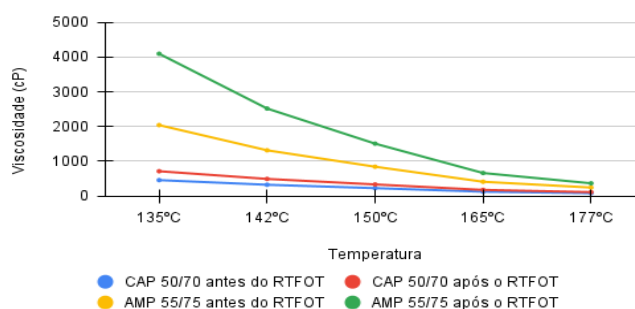


Figura 6 – Gráfico de viscosidade rotacional.

Os resultados obtidos nesta pesquisa estão dentro do esperado para as normas vigentes. A literatura, por sua vez, sugere que o envelhecimento a curto prazo, simulado pelo RTFOT, aumenta a rigidez do ligante asfáltico. Essa rigidez é evidenciada pela redução da penetração, pelo aumento do ponto de amolecimento e pela elevação da viscosidade rotacional. No caso do CAP 50/70, a penetração caiu de 57,7 dmm para 29,6 dmm após o RTFOT, e o ponto de amolecimento subiu de 48,5°C para 54,5°C. Da mesma forma, a viscosidade rotacional do CAP 50/70 a 135°C aumentou de 458,67 cP para 715,02 cP. No ligante modificado AMP 55/75, essa tendência foi ainda mais pronunciada. A penetração diminuiu de 39,6 dmm para 23 dmm, enquanto o ponto de amolecimento subiu de 61°C para 74,5°C. A viscosidade a 135°C foi de 2043,75 cP para 4100 cP, um aumento significativo. Esses resultados mostram que ambos os ligantes se tornaram mais rígidos e resistentes termicamente após o envelhecimento, mas o ligante modificado demonstrou uma resistência superior em altas temperaturas e sob esforços de deformação.

Os resultados evidenciam que de fato o uso de modificadores do ligante asfáltico CAP 50/70 como os polímeros PET, EMA-GMA e PPA, aumentam a resistência do material a impactos e melhora as características reológicas. O ligante AMP 55/75, já antes do envelhecimento, apresentava um ponto de amolecimento e viscosidade superiores ao CAP 50/70, indicando maior resistência a altas temperaturas e deformações. Após o RTFOT, as propriedades do AMP 55/75 mostraram-se mais robustas, o que o torna mais indicado para pavimentos que exigem alta performance. Embora tenha havido uma leve redução na recuperação elástica, de 77% para 73,5%, o ligante ainda demonstrou boa capacidade de recuperação, superando o valor mínimo de 75% exigido antes do envelhecimento, mas ficando ligeiramente abaixo dos 80% exigidos após o processo.

4. Conclusão

Os ensaios conduzidos demonstraram que o RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) induz o envelhecimento de curto prazo em ligantes asfálticos. Esse processo resulta em uma diminuição da penetração, um acréscimo na temperatura do ponto de amolecimento e um aumento de quase o dobro nos valores de viscosidade rotacional, indicando maior rigidez e resistência térmica após o procedimento. No ligante CAP

50/70, o efeito do RTFOT foi menos acentuado, permitindo que o material mantivesse uma boa trabalhabilidade. Por outro lado, no ligante modificado AMP 55/75, foi observado um aumento substancial nos testes de ponto de amolecimento e viscosidade. Isso reflete uma maior resistência térmica e uma capacidade superior de suportar deformações permanentes, embora tenha ocorrido uma ligeira diminuição na recuperação elástica.

A comparação entre os ligantes revelou que, enquanto o CAP 50/70 oferece facilidade de manuseio devido à sua menor viscosidade, o AMP 55/75 modificado confere um desempenho aprimorado sob altas temperaturas, tráfego intenso e tensões de deformação. Dessa forma, o AMP 55/75 é mais apropriado para a aplicação em pavimentos que enfrentam exigências rigorosas.

O RTFOT se mostrou uma ferramenta valiosa para simular o envelhecimento de curto prazo e avaliar as alterações nas propriedades dos materiais. No entanto, o método possui limitações, uma vez que não replica integralmente o envelhecimento de longo prazo ou os efeitos ambientais encontrados em campo. Portanto, o seu uso é recomendado em conjunto com ensaios complementares, como o PAV (Pressure Aging Vessel), para uma previsão mais precisa do desempenho duradouro do ligante e para o planejamento adequado de sua aplicação em pavimentos.

Referências

AASHTO. (2013). Standard method of test for effect of heat and air on a moving film of asphalt binder (Rolling Thin-Film Oven Test). **AASHTO T 240-13**.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14950: Ligantes asfálticos – Determinação da perda por aquecimento em estufa de filme fino rotativo**. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15184: Derivados de petróleo – Determinação da viscosidade de ligantes asfálticos pelo viscosímetro Brookfield**. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6576: Materiais betuminosos – Determinação da penetração**. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6560: Materiais betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola**. Rio de Janeiro, 2008.

CBAA - ASFALTOS LTDA - CAP 50/70. Disponível em: <https://cbaa-asfaltos.com.br/produtos/cap-50-70/>. Acesso em: 15 jul. 2025.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes. **DNIT 135/2018 – ME: Misturas asfálticas – Determinação da recuperação elástica de ligantes asfálticos modificados por polímero.** Rio de Janeiro, 2018.

GUEDES, Leonardo Rodrigues. **Estudo de misturas asfálticas modificadas por polímero utilizando o modelo S-VECD.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2024.

Kandhal, P. S., & Mallick, R. B. (1997). Pavement recycling guidelines for state and local governments. Participant's Reference Book. Report No. **FHWA-SA-98-042.**

Abstract

The aging of asphalt binders is a crucial process for assessing pavement durability. This study compared the conventional CAP 50/70 binder with the modified AMP 55/75 binder. The methodology employed the Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) to simulate short-term aging, evaluating properties such as penetration, softening point, viscosity, and elastic recovery before and after the process. The results demonstrate that aging promoted stiffness in both materials. The modified AMP 55/75 binder exhibited a significant increase in viscosity and softening point, providing better performance at high temperatures and under heavy traffic. The RTFOT is a useful tool for short-term assessment, although it requires complementary tests such as the PAV for a complete analysis.

Keywords: Pavements; RTFO; Stiffness; Traffic.



II CONTEC MATOPIBA

Centro de Ciências de Balsas (CCBL)

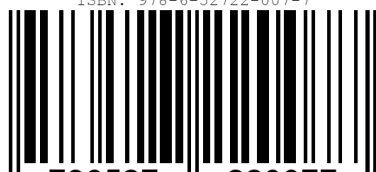
Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

MA-140, Km 04, s/n, CEP 65.800-000, Balsas-MA

Telefone: (98) 3272-9721

E-mail: contecmatopiba@ufma.br

ISBN: 978-6-52722-007-7



9 786527 220077