

ESCOLA SESI REITOR MIGUEL CALMON

SISALTECH: Concepção de um maquinário Elétrico Autônomo com Implemento para Colheita Mecanizada da Biomassa de Agave Sisalana

Salvador, SA

2025



CAUÃ MENDES MASCARENHAS
CAIQUE MENDES MASCARENHAS

Diego Grimaldi De Queiroz

SISALTECH: Concepção de um maquinário Elétrico Autônomo com Implemento para Colheita Mecanizada da Biomassa de Agave Sisalana

Trabalho de iniciação científica voltada para
Agricultura Industrial.

Professor Orientador: Diego Grimaldi de
Queiroz, Bacharel em administração com ênfase
em análise de sistemas, Licenciatura em
Matemática, Pós-graduado em Metodologia do
Ensino da Matemática.

Instituição: Sesi Reitor Miguel Calmon -
Unidade Retiro, Praça Visconde de Monte Alegre
s/n - Fazenda Grande do Retiro, CEP: 40354-190.
Salvador – BA.

Cidade, Sigla Unidade Federação

2025



RESUMO

O presente projeto SISALTECH: Concepção de um Trator Elétrico Autônomo com Implemento para Colheita Mecanizada da Biomassa de Agave sisalana surgiu da necessidade de enfrentar os desafios estruturais da agricultura familiar no semiárido nordestino, marcada pela escassez de tecnologia, baixa mecanização e elevado esforço físico na colheita do sisal. Essa realidade compromete a produtividade e a saúde dos agricultores, além de gerar desperdício de aproximadamente 96% da planta após a extração das fibras, apesar de seu elevado potencial energético e biotecnológico. Diante disso, o projeto propõe a concepção de um trator elétrico autônomo e sustentável, desenvolvido para mecanizar o processo de colheita e otimizar o aproveitamento integral da biomassa. A metodologia adotada baseou-se em revisões bibliográficas sobre tratores elétricos e sistemas autônomos, associadas ao dimensionamento dos componentes principais, como o motor de propulsão de 9 kW, baterias de íon-lítio de alta densidade e um implemento multifuncional responsável pelas etapas de corte, destilação e armazenamento da biomassa. O controle do sistema é centralizado por meio de um protocolo CAN Bus, que integra sensores, câmeras e GPS para garantir precisão e segurança nas operações. Os resultados teóricos indicam que o modelo proposto apresenta viabilidade técnica e econômica, reduzindo custos operacionais, emissões de gases e riscos ocupacionais, além de ampliar a autonomia e a eficiência da produção. Conclui-se que o projeto constitui uma alternativa promissora para modernizar o setor sisaleiro, valorizar os resíduos agrícolas e fortalecer a agricultura familiar, promovendo uma transição tecnológica e energética alinhada aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

Palavras-chave: agave sisalana, trator elétrico, automatização agrícola.



SUMÁRIO

RESUMO.....	3
ABSTRACT.....	7
LISTA DE FIGURAS.....	8
LISTA DE ABREVIATURAS.....	12
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVOS.....	18
2.1 Geral.....	18
2.2 Específicos.....	18
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
3.1 Justificativa e problemática geral.....	19
3.2 Agricultura familiar.....	20
3.3 O Semiárido e os desafios socioeconômicos	22
3.4 A Cultura do Sisal e sua Relevância Econômica	24
3.5 O Cultivo da Agave sisalana.....	25
3.6 Desafios Ambientais e Sustentabilidade.....	27
3.7 O Papel do Projeto.....	29
4 METODOLOGIA.....	31
4.1 Estrutura do Sistema	32
4.2 Implemento de Colheita e Processamento	33
4.3 Processos Operacionais (Etapas do Fluxo de Trabalho)	35
4.3.1 Preparação e Planejamento da Operação	35
4.3.2 Navegação e Alinhamento (Fase Inicial)	36
4.3.3 Corte e Captação da Biomassa	37
4.3.4 Pré-processamento Mecânico (Trituramento / Prensagem)	38
4.3.5 (Módulo Experimental) Processamento Térmico / Extração (Destilação).....	39
4.3.6 Filtragem / Resfriamento e Separação (Quando Aplicável)	40
4.3.7 Armazenamento em Bordo e Gestão de Resíduos	41
4.3.8 Retorno e Sincronização de Dados	42
4.4 Análise e Dimensionamento Energético (Cálculos).....	43
4.5 Modelagem, Simulação e Testes (Metodologia)	44
4.5.1 Modelagem 3D	44
4.5.2 Simulações Estruturais (FEM)	45
4.5.3 Simulações Dinâmicas e de Tração	46
4.5.4 Simulações Térmicas	47
4.5.5 Ensaios de Bancada (HIL)	48
4.5.6 Ensaios de Campo Simulado	49
4.5.7 Validação de Sensores e Algoritmos	50
4.5.8 Etapas de Todos os Processos	51
4.6 Modelagem Econômica e Social (Impacto e Adoção)	52
5 RESULTADOS ESPERADOS	54
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS.....	62



9ª Feira Mineira de Iniciação Científica



1 INTRODUÇÃO

A história econômica e social do Nordeste brasileiro está intimamente ligada à agricultura e à capacidade de adaptação de seu povo às condições climáticas adversas. Desde o período colonial, a exploração do solo e o cultivo de plantas resistentes à seca foram essenciais para a sobrevivência e o desenvolvimento das comunidades rurais, constituindo-se como base da economia regional (BRASIL, 2019). Entre as espécies mais representativas desse processo está o Agave sisalana, originário do México e amplamente difundido na Bahia, cuja importância econômica se consolidou a partir da extração de suas fibras naturais, utilizadas em diversos segmentos industriais. Apesar de seu valor histórico e social, a cadeia produtiva do sisal permanece marcada pela baixa mecanização e pela dependência de processos manuais, que expõem os trabalhadores a condições insalubres e limitam o avanço produtivo da região.

O cultivo da Agave sisalana, majoritariamente conduzido pela agricultura familiar, enfrenta um conjunto de desafios estruturais que comprometem sua rentabilidade e eficiência. Conforme dados do Censo Agropecuário (IBGE, 2017) e do estudo “Um Novo Retrato da Agricultura Familiar” (UFV, 2023), apenas 1,3% dos estabelecimentos familiares do semiárido possuem tratores, e 92% não recebem assistência técnica. Além disso, menos de 10% contam com sistemas de irrigação, o que, somado à escassez de investimentos públicos e privados, reforça a precarização da atividade agrícola no semiárido nordestino. Essa ausência de infraestrutura tecnológica reflete-se na baixa produtividade, na falta de valorização dos resíduos agrícolas e na persistência de um modelo de produção manual, lento e exaustivo.

A colheita do sisal é uma das etapas mais críticas desse processo. O corte das folhas, realizado manualmente sob altas temperaturas e em terrenos acidentados, demanda esforço físico intenso e contínuo. Diversos estudos (SILVA et al., 2023; BARBOSA, 2020; CARVALHO et al., 2018) evidenciam que a seiva do Agave sisalana contém compostos tóxicos, como saponinas esteroidais e oxalatos de cálcio, capazes de causar dermatites, irritações oculares e problemas respiratórios. Essa combinação de sobrecarga física e



exposição química resulta em condições de trabalho precárias e riscos significativos à saúde dos agricultores, configurando uma problemática social e ocupacional de grande relevância.

Diante desse cenário, o Projeto sisaltech surge como uma resposta tecnológica e sustentável aos entraves da produção sisaleira. A proposta consiste na concepção de um trator elétrico autônomo de baixo custo, projetado por meio de modelagem tridimensional e equipado com implementos destinados à colheita mecanizada e ao aproveitamento máximos dos potenciais produtivos do agave sisalana. O objetivo central é reduzir a dependência do trabalho manual, otimizar o rendimento da colheita e transformar o resíduo vegetal — que atualmente representa cerca de 96% da planta descartada — em um recurso economicamente aproveitável. Pesquisas recentes (PACHECO, 2025; RIVA et al., 2025; TOSTA FILHO & DAMASCENO, 2024) comprovam que esse material é rico em celulose, hemicelulose e lignina, apresentando grande potencial para a produção de bio-óleo, biogás e etanol de segunda geração. A ausência de maquinário apropriado, portanto, representa uma lacuna tecnológica que o sisaltech busca preencher por meio da integração entre automação agrícola, energia limpa e inovação social.

A adoção de um sistema de propulsão elétrica encontra respaldo em diversos estudos que investigam a viabilidade técnica e energética de tratores elétricos (MELO, 2019; LI, LIU & XIE, 2014; ZHANG, 2017; RENIUS, 2020). Essas pesquisas demonstram que a eletrificação da maquinaria agrícola é capaz de reduzir custos operacionais, eliminar emissões de gases poluentes e simplificar os sistemas de transmissão mecânica. Além disso, o controle eletrônico de torque e o uso de sensores embarcados permitem maior eficiência na tração e melhor adaptação às irregularidades do terreno, tornando o modelo especialmente adequado às condições do semiárido baiano. A automação autônoma do trator baseia-se em tecnologias já testadas em equipamentos agrícolas de precisão (Agrishow, 2024; Werkey, 2025; Conecta Agro, 2024), que utilizam sistemas GNSS-RTK, LiDAR e sensores inerciais para navegação precisa, controle de rota e segurança operacional.

Sob o ponto de vista social, o projeto responde também à problemática do envelhecimento da população agrícola e à carência de sucessão geracional no campo. Entre 2006 e 2017, o número de jovens agricultores com menos de 25 anos reduziu-se em 47,3%, enquanto a presença de produtores com mais de 65 anos cresceu 37% (IBGE, 2017). Essa

transição etária representa um risco para a continuidade das práticas agrícolas e reforça a necessidade de inovação e capacitação tecnológica nas comunidades rurais. Assim, o sisaltech propõe-se não apenas como uma solução técnica, mas como um instrumento de inclusão social e valorização da agricultura familiar, oferecendo condições de trabalho mais seguras, modernas e sustentáveis.

Em síntese, o Projeto sisaltech fundamenta-se na busca por uma transformação estrutural da cadeia produtiva do sisal, aliando sustentabilidade, automação e eficiência energética. Sua relevância está na possibilidade de converter um modelo agrícola tradicionalmente exaustivo em uma atividade inovadora, autônoma e de baixo impacto ambiental. Ao integrar ciência, tecnologia e responsabilidade social, o projeto reafirma o papel da engenharia como ferramenta de desenvolvimento humano e de fortalecimento da economia regional, em conformidade com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7, 8, 9, 12 e 15) e as diretrizes da Década da Agricultura Familiar (2019–2028).



2 JUSTIFICATIVA

2.1 Justificativa e Problemática

A transição para um modelo energético mais sustentável tem impulsionado a busca por combustíveis renováveis capazes de reduzir os impactos ambientais da dependência dos fósseis. Nesse cenário, a biomassa se consolida como uma alternativa viável, abundante e de baixo impacto ambiental, desempenhando papel estratégico na diversificação da matriz energética. No Brasil, o cultivo do Agave sisalana, concentrado no semiárido nordestino, revela-se uma oportunidade promissora, tanto pela adaptação da planta às condições climáticas adversas quanto pelo seu potencial econômico. No entanto, essa cadeia produtiva ainda enfrenta limitações expressivas que comprometem seu aproveitamento integral. A colheita manual, realizada de maneira tradicional e com ferramentas rudimentares, é árdua, lenta e de elevado risco ocupacional, impactando diretamente a produtividade da agricultura familiar. Soma-se a isso o fato de que cerca de 96% da planta é descartada como resíduo, apesar de sua composição rica em celulose e lignina, elementos de grande interesse para a produção de biocombustíveis de segunda geração e de insumos industriais diversos. Essa lacuna tecnológica acaba restringindo tanto o valor agregado quanto a sustentabilidade da cultura do sisal, impedindo que a atividade alcance todo o seu potencial.

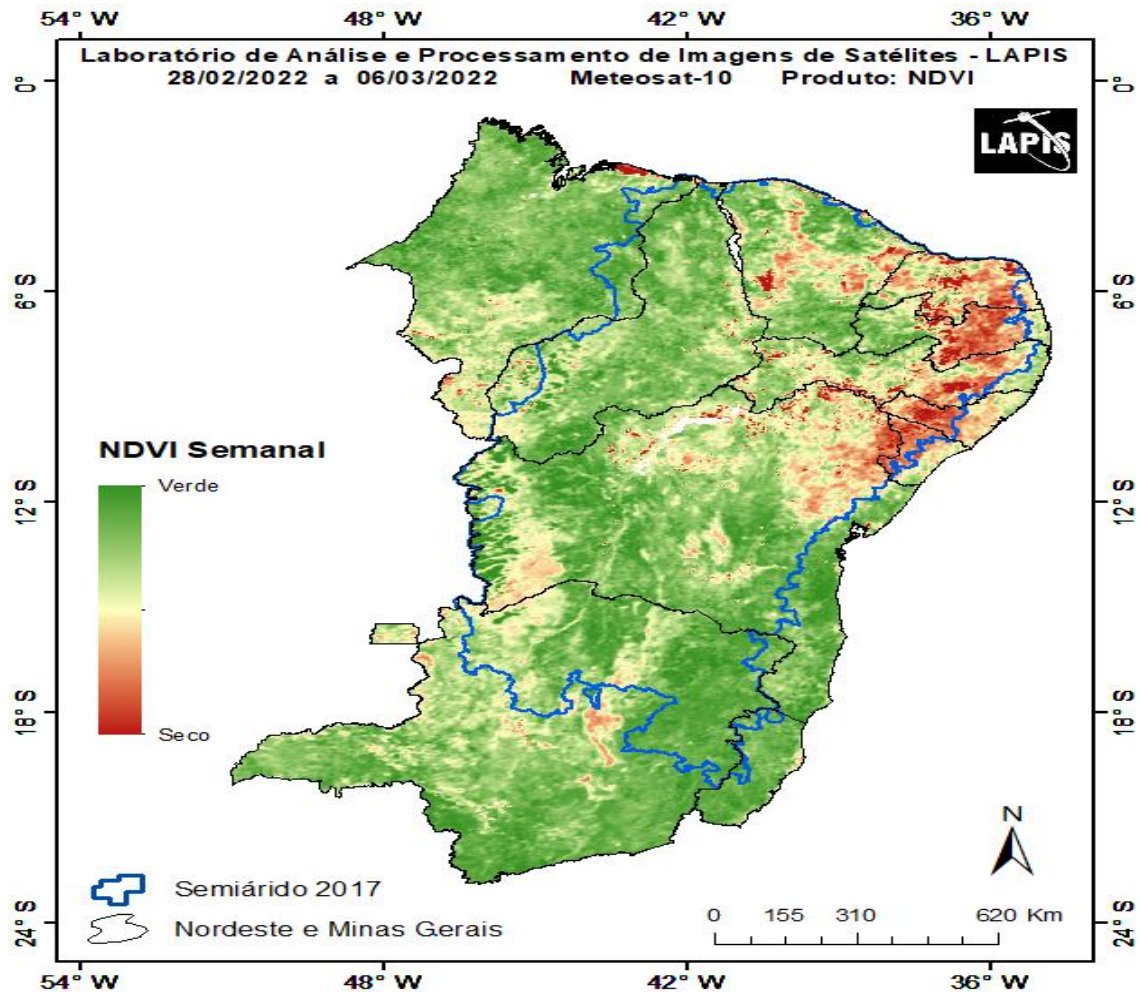


Nesse contexto, surge a proposta de desenvolvimento de um trator elétrico autônomo com implemento de colheita integrado, capaz de mecanizar a coleta de forma eficiente e

sustentável. O equipamento, ao reduzir a dependência da mão de obra manual e otimizar o processo produtivo, contribui diretamente para aliviar a carga de trabalho dos agricultores familiares, ao mesmo tempo em que amplia a competitividade da produção. Além disso, ao permitir o aproveitamento integral da biomassa, a mecanização viabiliza a destinação dos resíduos a diferentes cadeias produtivas, como a fabricação de biocombustíveis, fertilizantes, cosméticos e outros produtos de maior valor agregado. Outro ponto relevante é a proteção à saúde dos trabalhadores, já que a seiva do sisal contém substâncias que podem causar dermatites e problemas respiratórios. A mecanização reduz significativamente a exposição humana a esses riscos, promovendo melhores condições de trabalho. Trata-se, portanto, de uma inovação tecnológica capaz de articular eficiência produtiva, saúde ocupacional e valorização dos resíduos dentro de um modelo de economia circular adaptado ao semiárido.

Entretanto, a implementação desse projeto encontra obstáculos que ultrapassam a esfera tecnológica. A agricultura familiar no semiárido vive uma crise de sucessão geracional, marcada pela saída crescente dos jovens para as áreas urbanas em busca de melhores oportunidades de emprego, lazer e educação. Essa tendência reflete fatores como a baixa remuneração da atividade agrícola, a carência de serviços básicos no meio rural e a desvalorização social do trabalho no campo, historicamente associado à precariedade e à falta de perspectivas. A sucessão, além disso, pode gerar conflitos familiares, especialmente pela ausência de planejamento na gestão das propriedades, o que desestimula a participação dos mais jovens. A educação oferecida nas escolas, em muitos casos, pouco dialoga com a realidade rural e não valoriza a vida no campo, tampouco apresenta as possibilidades de inovação tecnológica que poderiam ressignificar a atividade agrícola para as novas gerações.

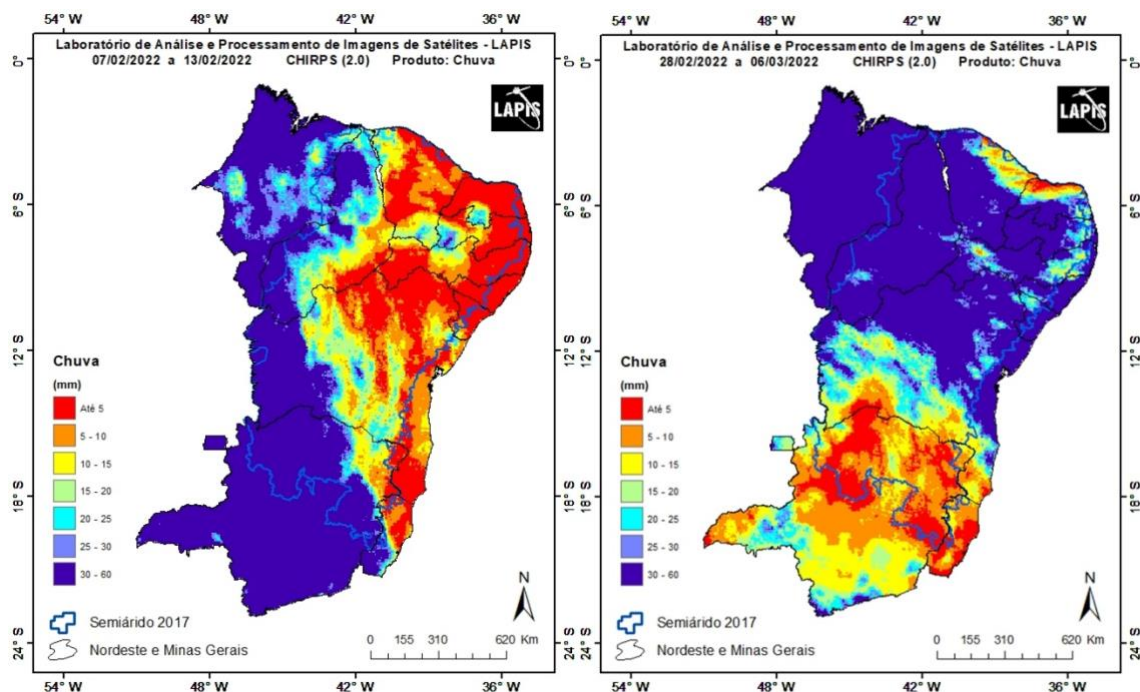
Outro entrave significativo está na deficiência da infraestrutura regional. Dados do Censo Demográfico de 2022 apontam que a taxa de analfabetismo no Nordeste atinge 14,2%, o dobro da média nacional. Esse índice revela a dimensão do desafio que é implementar maquinários mais modernos em propriedades onde muitas vezes faltam habilidades básicas de leitura e escrita. Além disso, a precariedade de estradas, transporte, energia elétrica e conectividade digital limita o acesso a tecnologias mais avançadas e compromete o escoamento da produção. Diante dessa realidade, o trator elétrico autônomo deve ser projetado com foco em simplicidade operacional e manutenção facilitada, com interface intuitiva e adequada ao perfil do agricultor familiar. Paralelamente, programas de capacitação e alfabetização se tornam indispensáveis, pois fornecem as competências técnicas necessárias para que os produtores possam operar os equipamentos e adotar novos modelos de gestão produtiva. Esse esforço, no entanto, precisa ser apoiado por políticas públicas consistentes e pela articulação entre diferentes setores da sociedade.



Mapa do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) do novo Semiárido. Em seguida, analisaremos a imagem de satélite da umidade do solo e da precipitação da região.

Na primeira semana de março, grande parte do novo Semiárido brasileiro apresentava vegetação verde. A exceção foi observada em algumas áreas em vermelho, localizadas no Rio Grande do Norte, na Paraíba, em Pernambuco, no Semiárido de Alagoas e no de Sergipe.

O mapa de NDVI é um dos indicadores baseados em dados de satélite mais utilizados para o monitoramento da seca, devido aos impactos diretos da escassez hídrica sobre a vegetação. Para saber mais sobre esse indicador, acesse este post.

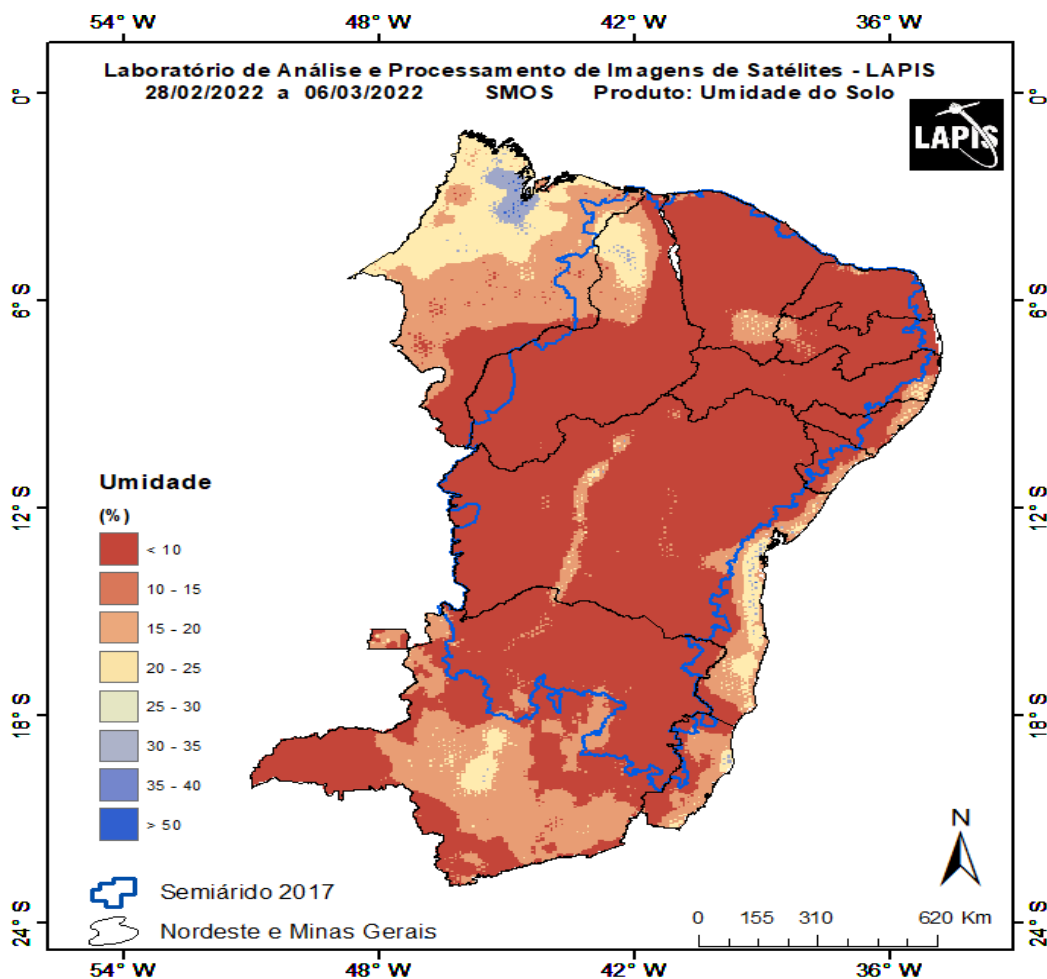


O mês de fevereiro, marcado por forte estiagem em grande parte do Semiárido brasileiro, resultou em um início de março com elevado estresse hídrico e baixos índices de umidade nos solos.

Essa situação é evidenciada pela análise da umidade do solo no novo Semiárido, obtida a partir de imagens de satélite processadas no software QGIS, com dados fornecidos pelo satélite Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS).

De acordo com o mapa, na primeira semana de março, grande parte da região apresentava percentuais extremamente baixos de umidade do solo. Em outras palavras, os solos estavam secos, o que comprometeu o desenvolvimento das plantações agrícolas.

O mapa SIG de umidade do solo é um dos indicadores mais relevantes para orientar a produção agrícola, pois mostra, de forma imediata, o teor de água presente na camada superficial do solo, até uma profundidade de 5 cm. Essas informações são estimadas a partir de sensores de satélite, constituindo uma ferramenta essencial para o monitoramento da seca e para o planejamento do uso sustentável da terra no Semiárido.



A partir da comparação entre imagens de satélite dos meses de fevereiro e março, foram realizadas análises climáticas e de solo, com foco na distribuição da chuva no novo Semiárido. Os mapas foram processados no software QGIS pelo Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites (Lapis), utilizando dados do produto CHIRPS.

De acordo com os resultados, na primeira semana de fevereiro as chuvas se concentraram principalmente no Oeste e no sul do novo Semiárido. Entretanto, esse padrão de precipitação se modificou no início de março, quando as chuvas passaram a se concentrar na porção norte do Nordeste, apresentando maior regularidade em praticamente toda a região. A exceção ocorreu no sul da Bahia e no norte de Minas Gerais, que enfrentaram um período de estiagem mais prolongado durante o mês de março.

Esses mapas de precipitação, elaborado a partir de dados de satélite, constitui um produto agro meteorológico semanal desenvolvido pelo Laboratório Lapis. Trata-se de um indicador



fundamental para a compreensão das condições climáticas e de solo, auxiliando diretamente no planejamento da produção agrícola e na gestão sustentável dos recursos do Semiárido.

Para reverter o envelhecimento do campo e estimular a permanência dos jovens, não basta investir apenas em tecnologia: é necessário combinar inovação com políticas sociais de longo prazo. Linhas de crédito específicas para aquisição de equipamentos sustentáveis, programas de capacitação voltados ao empreendedorismo rural e incentivos para a criação de cooperativas são estratégias fundamentais. Da mesma forma, investimentos em serviços básicos, como saúde, educação, transporte e acesso à internet de qualidade, são condições essenciais para melhorar a qualidade de vida das famílias e tornar o campo mais atrativo para as novas gerações. O fortalecimento da produção sustentável, por meio de tecnologias de convivência com o semiárido, como sistemas de captação de água da chuva e aproveitamento de energias renováveis, também aumenta a resiliência das famílias frente à irregularidade climática. A regularização fundiária, por sua vez, é indispensável para garantir segurança jurídica às famílias agricultoras, condição que favorece tanto o acesso ao crédito quanto a continuidade das propriedades ao longo das gerações.

Ao mesmo tempo, a valorização do conhecimento local e das tradições culturais deve caminhar junto com a inovação. O sisal, para além de uma cultura agrícola, é também símbolo de resistência e identidade para o povo do semiárido. Reconhecer e resgatar esse valor fortalece o vínculo dos jovens com o meio rural e os motiva a buscar soluções inovadoras para transformar a realidade local. A integração entre saberes tradicionais e novas tecnologias podem gerar modelos produtivos mais inclusivos, sustentáveis e adaptados às condições regionais.

Em última análise, a transformação da cultura do sisal em um exemplo de sucesso para a agricultura familiar dependerá da cooperação entre setor privado, governo, instituições de pesquisa e comunidades locais. Somente por meio de um enfoque integrado e multidisciplinar será possível superar os obstáculos estruturais, ampliar o aproveitamento dos recursos disponíveis e criar um ambiente propício ao desenvolvimento. O trator elétrico de colheita mecanizada, ao mesmo tempo que moderniza o processo produtivo, também simboliza a possibilidade de alinhar inovação tecnológica, sustentabilidade ambiental e justiça social. Se bem implementado, o projeto pode contribuir para diversificar a matriz energética, reduzir impactos ambientais, valorizar resíduos e gerar novas oportunidades econômicas para o semiárido brasileiro, promovendo não apenas a permanência das famílias no campo, mas também uma nova perspectiva de futuro para toda a região.

2.2 Agricultura Familiar e Seus Desafios

A formação da economia brasileira está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento agrícola. Desde o período colonial, a exploração do solo e o cultivo de grandes extensões de terra sustentaram a renda e o poder dos grandes proprietários rurais. Com o passar do tempo, a agricultura nacional passou por processos de modernização em determinados aspectos, mas



manteve a concentração fundiária e a lógica produtiva voltada majoritariamente à exportação. Enquanto as grandes monoculturas, como soja e milho, continuam ocupando a maior parte das terras agricultáveis, centenas de milhares de pequenos produtores dividem, de forma desigual, uma pequena parcela — cerca de 23% do total de terras destinadas à agropecuária — dedicada à agricultura familiar (IBGE, 2017; BRASIL, 2019).

Nesse cenário de desigualdade, a agricultura familiar se consolida como o verdadeiro alicerce da segurança alimentar brasileira. É responsável pelo abastecimento interno e pela maior parte dos alimentos consumidos pela população. Segundo o Censo Agropecuário de 2017, 77% dos estabelecimentos agropecuários do país são familiares, proporção que chega a 79% no Semiárido nordestino. Apesar de sua relevância, o pequeno agricultor enfrenta restrições significativas no acesso a recursos tecnológicos, assistência técnica e infraestrutura, fatores que comprometem sua produtividade e estabilidade econômica.

As dificuldades são agravadas pelas condições climáticas do Semiárido, região caracterizada por restrições hídricas severas, longos períodos de estiagem e solos pedregosos e de baixa fertilidade. Essas condições naturais exigem resiliência e dedicação contínua dos agricultores, que dependem majoritariamente da mão de obra familiar para manter suas atividades produtivas. No entanto, observa-se uma transformação preocupante no perfil demográfico dessa população.

Entre os anos de 2006 e 2017, os dados revelam uma queda de 47,3% no número de jovens produtores com menos de 25 anos, enquanto o número de agricultores com mais de 65 anos aumentou 37% (IBGE, 2017). Essa mudança reflete o envelhecimento do campo e a ausência de políticas públicas voltadas à formação e permanência de novas gerações na agricultura. O êxodo rural juvenil, motivado pela busca de melhores oportunidades urbanas, gera uma lacuna na sucessão geracional, ameaçando a continuidade da produção familiar e a soberania alimentar regional.

Assim, a agricultura familiar no Semiárido encontra-se em um ponto de inflexão. Apesar de ser o segmento que mais emprega pessoas no campo e sustenta grande parte da alimentação nacional, é também o mais vulnerável às mudanças climáticas, à escassez de recursos e à ausência de modernização tecnológica. A falta de equipamentos adequados, o baixo nível de mecanização e o uso intensivo de trabalho manual tornam a produção menos competitiva e mais dependente das condições ambientais.

A modernização sustentável, por meio de tecnologias acessíveis e adaptadas à realidade local — como a proposta do Projeto sisaltech, que prevê o uso de tratores elétricos autônomos —, representa uma oportunidade de transformação. Ao integrar inovação, eficiência energética e inclusão social, iniciativas desse tipo podem estimular o retorno dos jovens ao campo, fortalecer a produtividade e garantir a continuidade da agricultura familiar, que historicamente alimenta o Brasil e sustenta a vida no Semiárido.

2.3 Contexto Socioeconômico do Semiárido

O Semiárido brasileiro constitui um dos sistemas ambientais mais complexos e singulares do país, abrangendo uma área de 1.007.438 km² distribuída por nove estados do Nordeste e parte de Minas Gerais, o que representa cerca de 64,5% da área total da região nordestina (SUDENE, 2017). Essa vasta extensão territorial é marcada por características climáticas específicas, como baixa pluviosidade, alta evaporação e déficit hídrico crônico, resultantes

da interação entre fatores atmosféricos, geográficos e biológicos. O clima semiárido apresenta chuvas escassas e mal distribuídas, alternando longos períodos de estiagem com curtos intervalos chuvosos irregulares, tornando-se um dos biomas mais desafiadores para a manutenção de atividades agrícolas regulares (TEODORO; AMORIM, 2008).

A dinâmica climática dessa região é fortemente influenciada pela radiação solar, pela movimentação dos ventos e pelas condições do relevo, fatores que afetam diretamente a disponibilidade hídrica e a capacidade produtiva do solo (PILLAR, 1995). As variações climáticas não se restringem apenas às mudanças de temperatura e umidade, mas também impactam a biodiversidade local, comprometendo a regeneração natural da vegetação e a manutenção da fertilidade do solo. De acordo com relatórios do IPCC (2007), o aumento das temperaturas médias e a intensificação de eventos climáticos extremos agravam as condições de aridez do Semiárido, ampliando a vulnerabilidade das comunidades que dependem da agricultura como principal fonte de renda e subsistência.

Essa vulnerabilidade climática reflete-se diretamente nos indicadores socioeconômicos da região. O Produto Interno Bruto (PIB) per capita da maioria dos municípios semiáridos é inferior a R\$ 15 mil, valor significativamente menor que a média nacional de R\$ 31.702,25, evidenciando uma disparidade estrutural persistente entre o interior e as áreas urbanizadas (IBGE, 2017). O baixo dinamismo econômico, aliado à escassez de investimentos públicos, perpetua um ciclo de pobreza rural que compromete o acesso a serviços essenciais, como saúde, educação, energia elétrica e abastecimento de água. A ausência de políticas públicas efetivas e de infraestrutura adequada faz com que as populações locais enfrentem longos períodos de seca sem apoio técnico ou econômico, agravando o quadro de vulnerabilidade social.

O êxodo rural, especialmente entre os jovens, é consequência direta da falta de oportunidades no campo. As gerações mais novas, diante da escassez de renda, educação e infraestrutura, migram para centros urbanos em busca de melhores condições de vida. Esse fenômeno provoca o envelhecimento da população rural e a consequente redução da força de trabalho agrícola, fragilizando a sustentabilidade produtiva da região.

Segundo o Censo Agropecuário (IBGE, 2017) e a Cartilha da Agricultura Familiar (UFV, 2023), a economia do Semiárido é sustentada majoritariamente pela agricultura familiar, responsável por cerca de 80% dos estabelecimentos agropecuários. Entretanto, essa agricultura ainda se caracteriza pela ausência de mecanização, pelo uso intensivo de mão de obra manual e pela baixa produtividade, resultantes da limitação tecnológica e da escassez de crédito e assistência técnica. Apenas 1,3% dos agricultores familiares possuem tratores, e menos de 10% dispõem de sistemas de irrigação. Dessa forma, a agricultura familiar, embora essencial, permanece vulnerável às variações do clima e à falta de apoio governamental, dependendo quase exclusivamente das condições naturais para o cultivo.

A carência de políticas públicas voltadas ao fortalecimento da agricultura e à adaptação tecnológica sustentável agrava o cenário social. A omissão histórica do poder público na implementação de programas permanentes de desenvolvimento rural impede a diversificação econômica e o aproveitamento pleno do potencial produtivo local. Como consequência, o ciclo de baixa renda e vulnerabilidade social se perpetua, dificultando o acesso das populações sertanejas à dignidade e à estabilidade econômica.



Diante desse quadro, torna-se imperativa a criação de alternativas socioeconômicas viáveis e sustentáveis, capazes de promover autonomia financeira e inclusão produtiva. A implantação de fontes de renda inovadoras, baseadas na mecanização agrícola acessível e no uso de tecnologias limpas, constitui passo fundamental para romper o ciclo de pobreza e estagnação. Nesse contexto, a agricultura mecanizada surge como ferramenta estratégica de transformação. O Projeto sisaltech, ao propor o desenvolvimento de tratores elétricos autônomos adaptados às condições do Semiárido, busca otimizar o uso dos recursos locais, reduzir o esforço físico humano e criar oportunidades de renda para as comunidades rurais em vulnerabilidade.

Assim, o Semiárido, apesar de seus desafios climáticos e socioeconômicos, representa também um território de grande potencial produtivo e inovação social. Com investimentos direcionados, acesso à tecnologia e incentivo à agricultura sustentável, é possível transformar essa região historicamente marcada pela escassez em um polo de desenvolvimento humano, tecnológico e ambiental, promovendo não apenas o crescimento econômico, mas também a preservação da vida e da dignidade no sertão brasileiro.

2.4 Infraestrutura Produtiva e Tecnológica

A Agave sisalana, conhecida popularmente como sisal, é uma espécie vegetal de grande relevância econômica e ambiental, cuja adaptação ao clima semiárido a tornou uma das culturas mais representativas do Nordeste brasileiro. Sua capacidade de resistir à escassez hídrica e ao solo pedregoso consolidou a planta como um dos pilares da economia regional, especialmente em estados como a Bahia, responsável por expressiva parcela da produção nacional (CUNHA NETO; MARTINS, 2012). Historicamente, o cultivo do sisal desenvolveu-se em paralelo à ocupação do sertão nordestino, configurando-se não apenas como atividade agrícola, mas também como componente cultural e identitário das populações locais.

A relação entre a Agave sisalana e o Semiárido explica-se pela interação de fatores climáticos e edáficos — como alta incidência solar, baixa umidade relativa do ar e solos rasos — que condicionam o desenvolvimento da planta e delimitam as áreas favoráveis ao seu cultivo (PILLAR, 1995). O sisal demonstra, portanto, notável capacidade de adaptação, sobrevivendo em ambientes nos quais outras culturas não prosperam. Entretanto, essa resistência natural contrasta com a fragilidade socioeconômica das comunidades que o cultivam.

O Brasil ocupa posição de destaque entre os maiores produtores mundiais dessa fibra natural, amplamente utilizada na fabricação de cordas, tapetes, embalagens e compósitos industriais (MARTIN et al., 2009). Apesar de seu valor econômico e potencial de exportação, a cadeia produtiva do sisal permanece marcada por baixo nível de mecanização e elevada dependência do trabalho manual. As atividades de corte e desfibramento são realizadas majoritariamente por trabalhadores expostos a condições laborais insalubres, sem proteção adequada. A seiva liberada durante o manuseio.



2.5 O Cultivo da Agave Sisalana

A *Agave sisalana*, popularmente conhecida como sisal, possui extrema relevância histórica, econômica e social para o Semiárido brasileiro. Adaptada às condições áridas e de baixa fertilidade do solo, a planta apresenta elevada resistência ao estresse hídrico e ao calor intenso, características que a tornaram símbolo de sobrevivência e produtividade em uma das regiões mais desafiadoras do país (SUDENE, 2017). Assim como o clima determina a vegetação, o sisal consolidou-se como cultura predominante devido à sua capacidade de resistir às adversidades naturais e sustentar economias locais em contextos de escassez (TEODORO; AMORIM, 2008; PILLAR, 1995).

O Brasil destaca-se entre os maiores produtores mundiais dessa fibra natural, amplamente empregada na confecção de cordas, tapetes, tecidos rústicos e compósitos industriais. Entretanto, a cadeia produtiva ainda se caracteriza por baixo nível de mecanização e elevado esforço físico manual. As atividades de corte, transporte e desfibramento são realizadas por trabalhadores expostos à seiva irritante da planta — rica em compostos que podem causar dermatites e outros problemas de saúde — evidenciando vulnerabilidade social e ocupacional no campo.

A dependência de processos manuais e técnicas rudimentares compromete a produtividade e a rentabilidade do setor. A ausência de inovação tecnológica e de maquinário adequado impede a modernização das etapas de colheita e beneficiamento, mantendo o cultivo do sisal preso a um modelo produtivo historicamente ultrapassado. Grande parte da biomassa da planta — cerca de 96% — é desperdiçada após a extração da fibra, apesar de possuir alto potencial energético e industrial para produção de biocombustíveis e bio-óleo, reforçando o desperdício de um recurso valioso em uma região marcada pela escassez.

A queda da rentabilidade, somada à falta de investimentos em pesquisa e mecanização, ameaça a competitividade do sisal no mercado global. Enquanto outros países modernizam suas cadeias produtivas, o Brasil enfrenta dificuldades estruturais para integrar tecnologia e sustentabilidade ao setor. Essa defasagem tecnológica, aliada à precarização do trabalho, contribui para a diminuição do interesse das novas gerações pela cultura do sisal e, consequentemente, para o declínio gradual de uma atividade que, por décadas, sustentou o Semiárido.

A modernização da produção, por meio da introdução de mecanização acessível, autônoma e sustentável, é fundamental para restaurar a viabilidade econômica do setor, proteger a saúde dos trabalhadores e promover o desenvolvimento regional. Compreender a importância da *Agave sisalana* vai além do seu valor agrícola: trata-se de reconhecer sua centralidade como vetor de transformação socioeconômica e tecnológica no Semiárido brasileiro, alinhando tecnologia, sustentabilidade e inclusão social — princípios que norteiam o Projeto sisaltech.

2.6 Desafios Ambientais e Sustentabilidade

A agricultura familiar do Semiárido enfrenta limitações ambientais severas. A baixa disponibilidade de recursos hídricos compromete a resiliência das lavouras, enquanto os métodos de irrigação ainda utilizados apresentam elevado índice de desperdício. Apesar de avanços recentes, como a difusão de cisternas, existem ainda mais de 344 mil estabelecimentos familiares sem acesso a recursos hídricos adequados (IBGE, 2017). Nesse



contexto, soluções sustentáveis e adaptadas às condições climáticas são fundamentais para garantir a continuidade da produção agrícola.

A adoção de tecnologias apropriadas e práticas de manejo sustentável permite mitigar os efeitos da escassez hídrica e reduzir impactos ambientais, promovendo maior eficiência no uso dos recursos naturais. Estratégias como irrigação localizada, aproveitamento integral da biomassa e mecanização adequada contribuem para a redução do esforço humano, aumento da produtividade e preservação do solo.

A integração entre inovação tecnológica e sustentabilidade ambiental surge, portanto, como elemento essencial para fortalecer a agricultura familiar no Semiárido. Projetos voltados à mecanização sustentável, como o trator elétrico autônomo do Projeto sisaltech, exemplificam iniciativas capazes de conciliar eficiência produtiva, proteção ambiental e melhoria das condições de trabalho. Tais medidas representam alternativas concretas para promover desenvolvimento regional, resiliência climática e inclusão socioeconômica, consolidando o papel da agricultura familiar como vetor de sustentabilidade no sertão brasileiro.

2.7 O Papel Do Projeto

Diante desse contexto, o Projeto surge como uma resposta sistêmica e inovadora aos desafios da agricultura familiar no Semiárido. Trata-se de um Trator elétrico, autônomo e multifuncional, projetado para mecanizar o cultivo do sisal, reduzindo a dependência de mão de obra manual e aumentando a eficiência operacional. O uso de energia elétrica em substituição ao diesel promove redução das emissões e alinhamento às metas de sustentabilidade. A automação por GPS, sensores e sistemas inteligentes garante precisão, segurança e maior rendimento e levando em consideração que a região em questão possui um acúmulo de problemas estruturais que causam fragilização dessa população e o aumento da sucessão geracional e como consequência o aumento de uma população majoritariamente idosa.

2.8 Relevância Estratégica

O projeto contribuirá diretamente para:

Inovação tecnológica: introduz mecanização elétrica e autônoma inédita no Semiárido;

Sustentabilidade ambiental: reduz emissões de carbono e otimiza o uso de recursos naturais;

Valorização da agricultura familiar: amplia a produtividade e competitividade do sisal;

Inclusão social: possibilita condições de trabalho mais seguras, com menor esforço físico;

Convergência com políticas públicas: fortalece a Década da Agricultura Familiar (2019-2028) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).



2.9 Características Da Agave Sisalana



A estrutura da *Agave sisalana*, ou sisal, é caracterizada por um pseudocaule (tronco) curto e um aglomerado de folhas em roseta que se estendem para os lados em forma de espada, podendo atingir até 2 metros de altura. As folhas são carnudas, lanceoladas, com margens que perdem os espinhos à medida que amadurecem. A planta possui um alto nível de celulose e fibras, conferindo a ela uma grande resistência, e morre após florescer, geralmente entre 4 e 8 anos após o plantio.

Agave sisalana é uma planta perene de ciclo de vida longo, cuja produção e estrutura vegetal justificam seu uso como biomassa para bioprodutos. A planta, que cresce em



condições semiáridas, armazena água e nutrientes em suas folhas, que contêm as fibras e a biomassa.

COMPOSIÇÃO QUÍMICA E PROPRIEDADES:

As fibras e o bagaço do sisal possuem uma composição química que favorece o cultivo de microrganismos, com elevados índices de açúcares e minerais. O resíduo da planta é rico em celulose, hemicelulose e lignina, o que a torna uma excelente matéria-prima para a produção de bioetanol de segunda geração.

3.10 Estrutura Botânica

Pseudocaule/Tronco: A planta é acaulescente, ou seja, não tem um caule aéreo. O que parece ser um caule é, na verdade, um pseudocaule que serve de suporte para as folhas e como órgão de armazenamento.

- **Folhas:** São a parte mais visível e a que dá origem à fibra do sisal.
- **Roseta:** As folhas crescem em rosetas em torno do pseudocaule.
- **Formato:** As folhas são longas, estreitas, afiladas, em forma de espada e carnudas.
- **Margens:** Podem ter pequenos dentes que desaparecem com o amadurecimento da folha.
- **Composição:** As folhas contêm uma alta concentração de celulose, o que as torna ideal para a produção de fibras.

2.10 Outras Características Importantes

Resistência: A planta possui uma cutícula espessa e outras estruturas anatômicas que conferem um aspecto xeromórfico (adaptado a ambientes secos) e resistência a condições ambientais extremas.

Ciclo de Vida: O sisal é uma planta monospórica, o que significa que floresce apenas uma vez na vida. Após a floração, a planta mãe morre, e novas plantas são geradas por meio de brotos axilares que se desenvolvem em bulbos.

Fibras: A fibra do sisal é composta principalmente de celulose, lignina e hemicelulose, sendo uma das fibras vegetais mais importantes do mundo para aplicações industriais.



3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Desenvolver, por meio de um plano de pesquisa, a concepção de um trator elétrico com implemento acoplado para a colheita e processamento da biomassa do sisal, visando otimizar o processo e facilitar a produção de biocombustíveis e outros produtos, com foco na sustentabilidade e na viabilidade para a agricultura familiar do Nordeste brasileiro

3.2 Objetivos específicos

- Revisar a Literatura: Analisar a tecnologia de tratores elétricos e o potencial do sisal como biomassa, usando os documentos de referência para validar a premissa do projeto.
- Dimensionar o Sistema de Propulsão: Estudar e calcular as especificações de um motor elétrico, considerando a potência necessária para a locomoção e o acionamento do implemento de colheita.
- Projetar o Implemento de Colheita: Propor um design funcional e eficiente para o implemento que será acoplado ao trator, capaz de coletar e processar as folhas de sisal.
- Analisar a Viabilidade Econômica: Estimar o custo do projeto e comparar os benefícios econômicos e ambientais da mecanização da colheita com o método manual, considerando a produção de biocombustíveis.
- Criar o Plano de Protótipo: Elaborar um plano detalhado para a possível construção de um protótipo, incluindo as etapas de construção e os materiais a serem utilizados.



|4 METODOLOGIA

4.1 Estrutura Geral Da Metodologia

A metodologia adotada no projeto AGROTECH foi estruturada em etapas sequenciais que abrangeram desde o levantamento bibliográfico até o dimensionamento energético e a simulação computacional. O objetivo foi desenvolver, de forma sistemática e fundamentada, o conceito de um trator elétrico autônomo com implemento multifuncional, projetado para mecanizar a colheita e o pré-processamento da biomassa de Agave sisalana no semiárido nordestino.

O ponto de partida foi o levantamento bibliográfico e analítico, com base em literaturas técnicas sobre tratores elétricos, automação agrícola, sistemas embarcados e aproveitamento energético de biomassa (Buffington, 1918; Freitas, 2011; Li et al., 2014; Renius, 2020; Tosta Filho & Damasceno, 2024; Vogt, 2018). A partir dessa fundamentação, foram definidos os requisitos operacionais do sistema, considerando o terreno irregular, as condições climáticas do semiárido e as particularidades do cultivo do sisal.

Com base nesses dados, elaborou-se a arquitetura geral do trator e de seus subsistemas: estrutura mecânica, sistema elétrico de propulsão, automação embarcada, sensores de navegação e implemento modular de colheita. As simulações computacionais validaram o desempenho teórico de cada componente, incluindo esforços mecânicos, dissipação térmica, eficiência energética e autonomia operacional.

Por fim, foi conduzida uma análise de viabilidade técnica e econômica, relacionando os custos de implementação e manutenção do sistema elétrico em comparação com máquinas convencionais a combustão, demonstrando as vantagens ambientais e operacionais do modelo proposto. É necessário destacar, que todos os dados da metodologia são suposições teóricas que estão sujeitas a mudança, mas todos os sistemas como eletromecânicos e de software foram pensados e analisados com base na problemática.

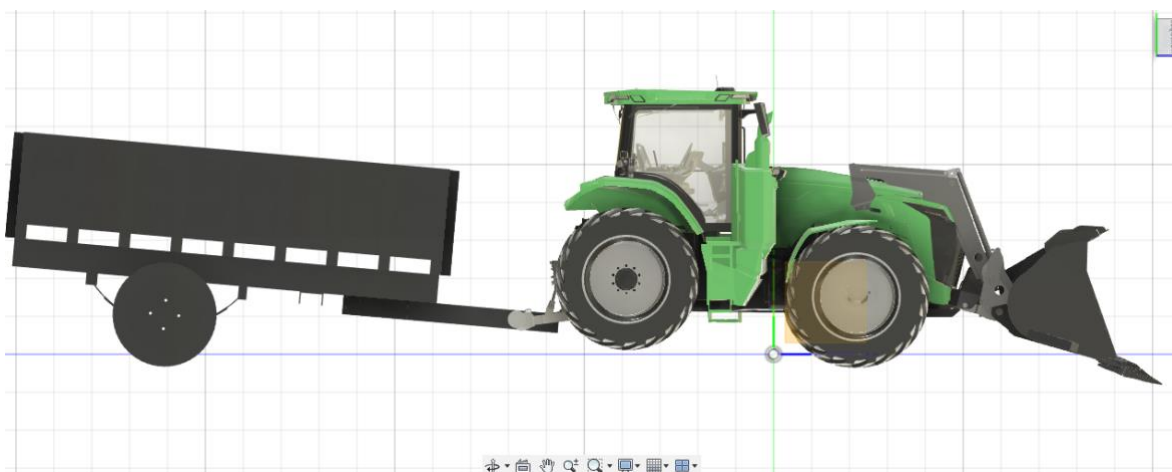
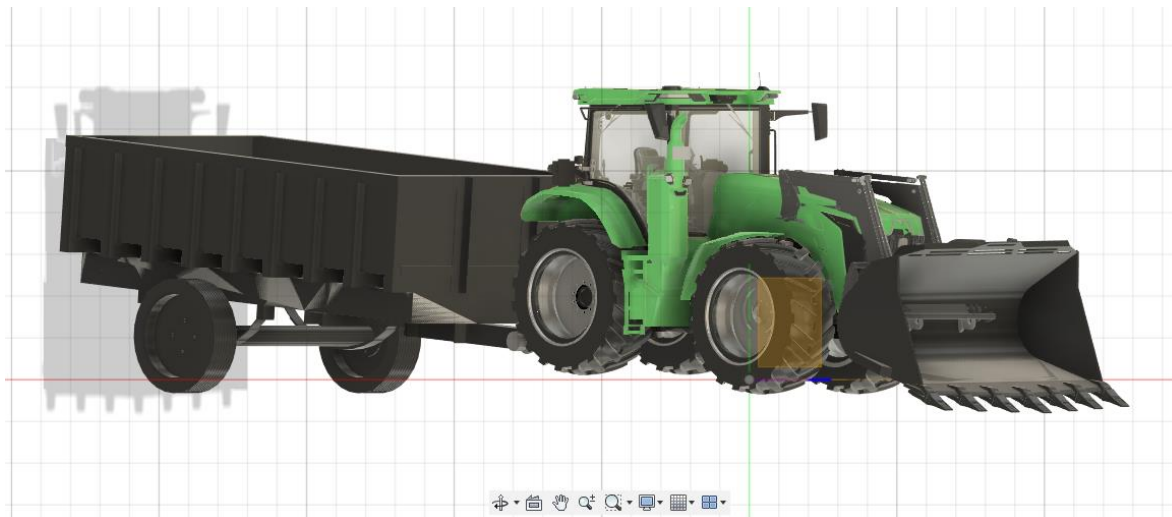
Etapas sequenciais (resumo):

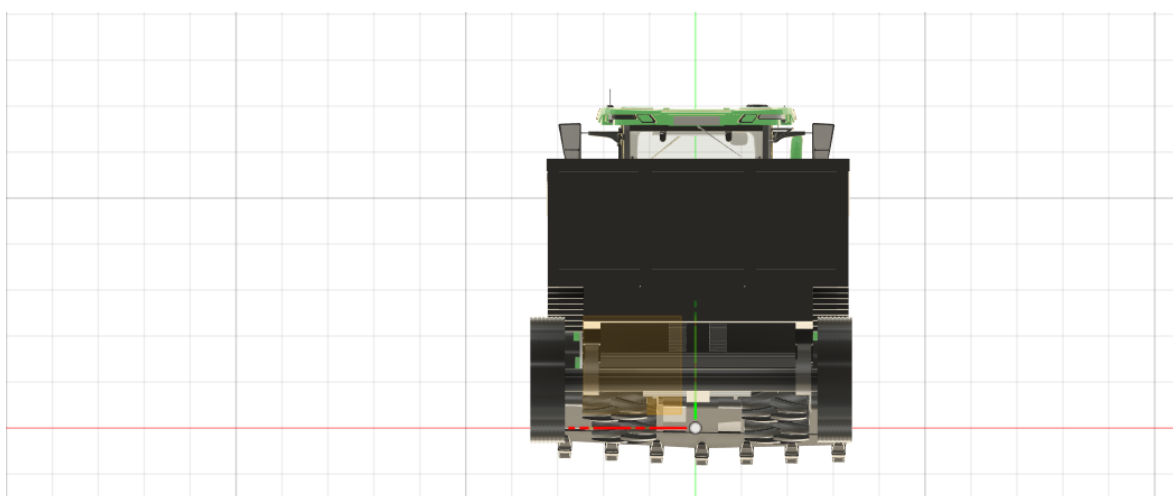
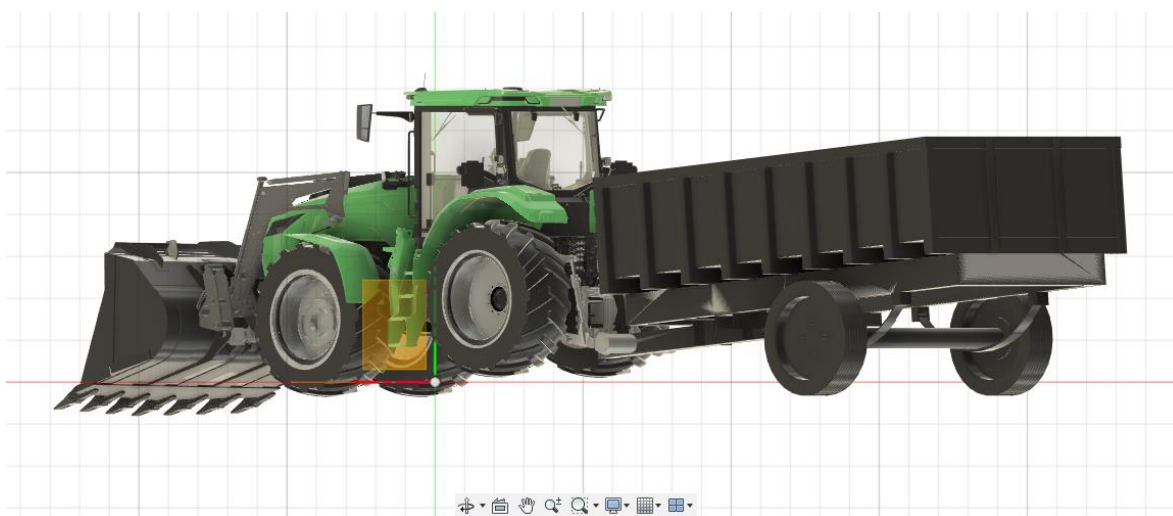
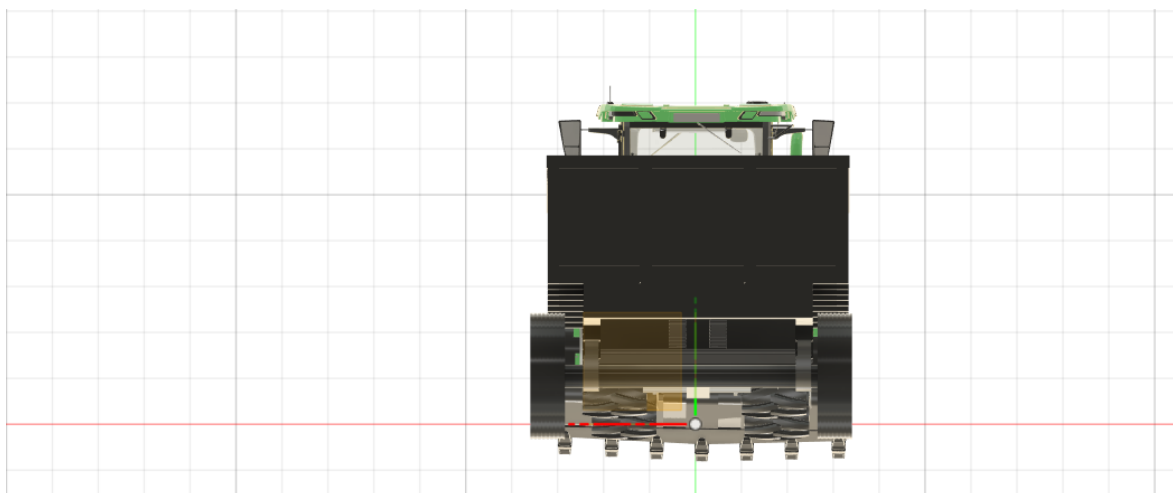


- 4.1.2 Levantamento bibliográfico e analítico (literatura técnica sobre tratores elétricos, automação, sistemas embarcados, processos de conversão da biomassa do sisal).
- 4.1.3 Definição dos requisitos operacionais (condições do Semiárido, tamanhos de talhões, características das plantas, rendimento de biomassa por área).
- 4.1.4 Arquitetura do trator e do implemento: lista de subsistemas e componentes com especificações alvo. (Descrição detalhada em 9.2 e 9.3)
- 4.1.5 Cálculo e dimensionamento energético (cenários operacionais e sensibilidade). (Ver 9.4)
- 4.1.6 Projeto mecânico/eletromecânico e modelagem 3D (chassi, suspensão, pontos de fixação do implemento).
- 4.1.7 Projeto elétrico e eletrônico (banco de baterias, BMS, inversor, controladores, CAN Bus).
- 4.1.8 Projeto de automação e percepção (sensores, PLC/MCU, arquitetura de software para autonomia).
- 4.1.9 Modelagem e simulação (multibody para tração; CFD/termodinâmica para sistema de processamento, se aplicável; simulação do fluxo de trabalho do implemento).
- 4.1.10 Ensaios de bancada (testes de motor, inversor, atuadores; validação de troca de dados via CAN; validação de HMI e telemetria).
- 4.1.11 Ensaios de campo simulado (tele operado e em modo autônomo em ambiente controlado — sem construção física: uso de maquetes em escala, rigs e simulação HIL quando necessário).
- 4.1.12 Análise de viabilidade econômica e proposta de modelo de adoção social (capacitação, uso cooperativo).
- 4.1.13 Redação final e recomendações para fases posteriores (incluindo recomendações de quando e como migrar para prototipagem física com parceiros).



4.2 Descrições Detalhada e Especificações Dos Subsistemas Do Trator







4.2.1 Chassi, Estrutura e Interface com Implemento

Chassi: Plataforma concebida para suportar massa do pack de baterias, motor de tração, inversor e implemento modular. Em modelagem 3D considerar centro de gravidade baixo, reforço nas áreas de fixação do implemento, pontos de manutenção acessíveis. Dimensionamento estrutural realizará análise FEM para verificar tensões nas regiões de acoplamento.

Suspensão e pneus: Rodas e pneus adequados para terreno irregular do Semiárido; considerar pneus com banda de rodagem para solos pedregosos e com possibilidade de baixa pressão para reduzir compactação.

Acoplamento do implemento: Sistema rígido e modular com pontos de encaixe padrão (para permitir troca do implemento de colheita por outros implementos futuros). Fixações com travas de segurança e sensores de reconhecimento do implemento via CAN.

4.2.2 Sistemas De Propulsão Elétrica (Motor, Inversor, Transmissão Elétrica)

Motor de propulsão: especificação base do projeto — 9 kW (valor do documento original). O motor selecionado deve ser brushless (PMAC ou síncrono de ímã permanente) ou motor de indução com controle por inversor; os critérios incluem torque de arrancada, eficiência em faixa útil, facilidade de refrigeração e custo.

Inversor/drive (controle de motor): Conversor bidirecional capaz de gerenciamento de torque e de frenagem regenerativa; comunicação com BMS e com a ECU principal via CAN.

Transmissão: solução de redução de torque por caixa de engrenagens (reductor) ou motor-rodas (direct drive) dependendo da escolha do motor e critérios de manutenção. Projeto em 3D e simulações para verificar esforços de tração.

Especificações elétricas de corrente (exemplificativo): para referência de projeto elétrico, a potência de 9 kW traduz correntes substanciais em tensões baixa (ex.: ~187,5 A e 48 V) e correntes reduzidas em tensões altas (ex.: ~22,5 A e 400 V) informação importante para definição de cablagem, fusíveis e proteção. (Cálculo de referência no item 9.4).



4.2.3 Bancos de Baterias e bms

Tecnologia: baterias de íon-lítio (química a definir — LiFePO_4 , NMC etc.) dimensionadas para atender cenários operacionais com DoD útil considerado (80% sugerido).

Capacidade estimada (cenários) ver cálculos em 9.4: cenários mostram necessidade de bancos entre ≈ 40 kWh (caso médio) até ~ 108 kWh (caso pior/8h full Power); massa estimada do pack varia por densidade energética (100–150 Wh/kg) isto implica packs com massa entre ~ 270 kg e mais de 1.000 kg dependendo do cenário (ver 9.4 para números exatos). Esses valores guiam análise estrutural e custo.

BMS: gestão de células (balanceamento, monitorização de temperatura, proteção contra sobrecorrente, comunicação via CAN, logging de dados). A arquitetura BMS deverá prever redundância mínima para garantir segurança.

4.2.4 Sistemas De Recarga e Infraestrutura Elétrica Embarcada

Carregamento: especificar ponto de carga AC (modo 2/3) e possibilidade de recarga rápida DC (se for viável). Incluir conversor DC/DC para alimentar subsistemas 12/24 V e cargas auxiliares.

Regeneração: frenagem regenerativa com inversor bidirecional para recuperar energia durante desacelerações e reduzir consumo.

4.2.5 Sistemas De Transmissão De Força, Freios e Segurança

Freio de serviço: freios hidráulicos ou a disco dimensionados para o peso operacional do veículo.

Freio de estacionamento e de emergência: independentes, com atuação automática em condições de perda de sinal ou detecção de falha. Estudo e dimensionamento baseiam-se nas referências técnicas listadas no plano.

Proteções mecânicas: grades, escudos em áreas de corte e pontos quentes, barreiras para operadores e dispositivos de bloqueio para manutenção.



4.2.6 Sistemas De Direção e Controle De Estabilidade

Direção elétrica assistida: atuadores elétricos com sensores de posição; capacidade de integração com piloto automático.

IMU e sensores de atitude: para estabilidade em terrenos inclinados e para controle do sistema de navegação.

4.2.7 Sistemas De Automação, Percepção e Telecomunicações

Stack de sensores mínimo: GNSS com correção RTK (para precisão de centímetros nas linhas de plantio), LiDAR para percepção 3D e detecção de obstáculos, câmeras estéreas RGB/IR para segmentação das plantas, ultrassônicos para proximidade, IMU para navegação inercial. Unidade de processamento: GPU/CPU embarcada para inferência (visão), controlador real-time/PLC para comandos críticos, e uma ECU principal que coordena navegação, atuação e segurança.

Comunicação: CAN Bus para dados de baixa latência entre subsistemas; LTE/4G/LoRaWAN para telemetria e envio de dados IoT para plataforma web.

Segurança funcional: geofence virtual, parada de emergência por perda de comunicações, múltiplas camadas de detecção de presença humana (LiDAR + câmeras + botão de emergência).

O sistema de automação e percepção do trator é responsável pela navegação autônoma, detecção de obstáculos, controle dos implementos e comunicação entre subsistemas, garantindo a operação segura e eficiente no campo.

Sua arquitetura é composta por sensores embarcados, controladores eletrônicos, uma rede de comunicação CAN Bus, e softwares de controle e monitoramento baseados em camadas de processamento hierárquico.

Sensores Embarcados

Os sensores são os responsáveis pela coleta contínua de dados do ambiente e dos componentes do trator. Cada tipo de sensor cumpre uma função específica:



GNSS com correção RTK: fornece posicionamento geográfico com precisão centimétrica, permitindo que o trator siga as linhas de plantio do sisal com exatidão. O sistema RTK (Real Time Kinematic) utiliza um sinal diferencial de correção que elimina os erros comuns do GNSS convencional, garantindo alinhamento em trajetórias retilíneas e manobras precisas.

LiDAR (Light Detection and Ranging): sensor de varredura tridimensional que emite pulsos de luz e mede o tempo de retorno para construir um mapa 3D do entorno. No AGROTECH, o LiDAR detecta obstáculos, mede distâncias e identifica irregularidades do terreno, permitindo que o software de navegação ajuste a rota e evite colisões.

Câmeras estéreas RGB/IR: compostas por duas lentes que capturam imagens simultâneas, possibilitando a geração de mapas de profundidade. As câmeras visíveis (RGB) são usadas para a segmentação visual das plantas e o reconhecimento das fileiras de sisal, enquanto as câmeras infravermelhas (IR) auxiliam na operação em baixa luminosidade e na detecção térmica de obstáculos.

Sensores ultrassônicos: medem a distância entre o trator e objetos próximos, funcionando como redundância ao LiDAR em curtas distâncias. São usados principalmente na aproximação de implementos e nas manobras automáticas.

IMU (Unidade de Medição Inercial): combina acelerômetros e giroscópios para medir aceleração linear e rotação angular. A IMU fornece dados sobre inclinação, velocidade e direção, permitindo correções na trajetória quando há perda temporária do sinal GNSS.

Sensores de torque e velocidade: instalados nos eixos e nas lâminas do implemento, medem o esforço mecânico aplicado. Esses dados alimentam o controle do motor de corte, que ajusta automaticamente a rotação para evitar sobrecargas.



Sensores de carga e nível: posicionados na esteira de transporte e no compartimento de armazenamento, monitoram a quantidade de biomassa processada. O sistema interrompe a alimentação quando o limite é atingido, evitando sobrepeso.

Sensores térmicos e de corrente: presentes no banco de baterias e no motor, registram temperatura e consumo elétrico em tempo real, protegendo contra sobreaquecimento e sobrecarga.

Arquitetura de Software e Controle

O software embarcado do maquinário será estruturado em camadas de controle hierárquicas, integrando automação, percepção e comunicação.

O sistema é composto por três níveis funcionais, cada um com uma função específica dentro da operação do trator:

1. Camada de Controle em Tempo Real (RT Control Layer):

Responsável por executar comandos diretos aos atuadores — como motores, direção elétrica e freios. Essa camada opera com um controlador lógico programável (PLC) ou microcontrolador (MCU) dedicado, que recebe sinais dos sensores e envia respostas imediatas aos sistemas mecânicos e elétricos.

Exemplo: ao detectar aumento de torque nas lâminas de corte, o controlador reduz momentaneamente a velocidade do motor para evitar travamento.

2. Camada de Percepção e Planejamento (Perception Layer):

- Essa camada é processada em uma unidade de alta capacidade (CPU/GPU embarcada), que interpreta as informações visuais e espaciais recebidas dos sensores GNSS, LiDAR e câmeras.



- O software combina os dados para gerar um mapa de ocupação 3D e planeja rotas livres de obstáculos.
- Também é responsável por reconhecer padrões vegetais e delimitar automaticamente as linhas de corte.

3. Camada de Interface e Monitoramento (Interface Layer):

Concentra as funções de interação com o operador humano. O sistema de HMI (Human Machine Interface) inclui uma tela touchscreen embarcada que exibe o status do trator (energia, posição, produtividade) e botões de emergência físicos.

- A comunicação com a nuvem é feita via telemetria LoRaWAN e LTE/4G, transmitindo dados de operação e desempenho para uma plataforma web.
- A interface remota apresenta mapas georreferenciados e relatórios automáticos de rendimento, consumo energético (kWh/ha), e áreas já colhidas.

Comunicação e Segurança Funcional

Toda a rede de controle é interligada pelo protocolo CAN Bus, garantindo baixa latência na troca de dados entre módulos críticos — como o motor, o BMS, os sensores e a ECU principal.

O sistema adota camadas redundantes de segurança, com:

- Geofence virtual: delimita áreas de operação permitidas.
- Parada de emergência automática: acionada em caso de falha de comunicação ou detecção de presença humana.



- Monitoramento remoto contínuo: garante rastreabilidade e controle em tempo real.
- Integração com os Processos Operacionais
- Durante o funcionamento do trator, os sensores e softwares atuam de forma coordenada:

1. Antes da operação:

- O mapa da área e as linhas de plantio são carregados na interface HMI.
- O sistema valida os limites da área (geofence) e calcula a rota inicial.

2. Durante a operação:

- O GNSS e a IMU orientam a navegação.
- O LiDAR e as câmeras estéreas monitoram o entorno para evitar obstáculos.
- Sensores de torque e carga controlam a alimentação e o corte da biomassa.

3. Após a operação:

- Os dados são sincronizados com o servidor remoto, permitindo gerar relatórios automáticos de produtividade, eficiência energética e uso do implemento.

Resumo Funcional do Sistema de Automação

- Componente Função Principal Interação com o Software



- GNSS RTK Posicionamento e navegação precisam Geração de trajetórias e correção de rota
- LiDAR Mapeamento 3D e detecção de obstáculos Criação de mapa de ocupação e evasão automática
- Câmeras estéreas RGB/IR Visão e segmentação de plantas Identificação de linhas de cultivo
- Ultrassônicos Detecção de proximidade Redundância de segurança
- IMU Medição de inclinação e aceleração Correção de trajetória e estabilidade
- Sensores de torque e carga Medição de esforço e peso da biomassa Controle automático da alimentação
- BMS Monitoramento das células da bateria Envio de dados via CAN Bus
- HMI Interface homem-máquina Exibição de status, alertas e mapas
- ECU principal Coordenação dos subsistemas Controle geral da missão autônoma

Com essa integração entre sensores, softwares e sistemas embarcados, o maquinário é capaz de operar autonomamente com precisão, monitorar variáveis críticas em tempo real e garantir segurança operacional sem necessidade de supervisão constante no campo.

4.2.8 HMI

HMI — Interface com operador Painel local: tela touchscreen para monitorização e parametrização, indicadores LED para estados críticos, botões físicos de emergência.

Plataforma remota: dashboard web para monitorização do histórico, mapas georreferenciados das áreas colhidas e telemetria.

4.2.9 Implementos Multifuncional (módulos) Especificação Detalhada

O implemento deve ser modular, com três blocos principais plug & play:

Módulo A Corte frontal (colheita)



Conjunto de lâminas/ navalhas (aço endurecido), ajuste de altura e proteção de entrada. Projetado para cortar folhas rente ao pseudocaule, com geometria adaptada à largura e densidade de roseta do sisal. Sensores de carga para detecção de encravamento.

Módulo B Transporte e alimentação para processamento

Sistema de rolos ou esteira que dirige o material cortado para dentro do implemento; transportadores dimensionados para evitar bloqueio e controlar taxa de alimentação. Sensores de nível da esteira.

Módulo Mecânico (Desfibrilador / Prensa)

Triturador/desfibrilador que reduz volume; opcional prensa mecânica para redução de umidade por compressão (preferível a destilação embarcada do ponto de vista energético). A unidade será projetada com dissipação térmica e proteção de sobrecarga.

Módulo D (Opcional/Experimental) Unidade De Extração Volátil / Destilador

No plano original consta um destilador embarcado para extração do líquido/vapor (bio-óleo), mas este dispositivo demanda alta energia térmica e complexidade (ver análise energética em 9.4). Para viabilidade energética, o projeto especifica este módulo de plug-in experimental (será modelado e simulado; sua implantação física depende de validação energética).

Módulo E (Armazenamento e Espalhador De Palha)

Recipientes para biomassa sólida triturada, com balanceamento de peso. Sistema de distribuição/espalhador para reintegração de matéria orgânica no campo (como adubo). Sensores de massa e nível.

Integração: cada módulo comunica com a ECU via CAN (status, leituras, alarmes); o sistema permite desconexão rápida para transporte e manutenção.



4.3 PROCESSOS OPERACIONAIS (ETAPAS DO FLUXO DE TRABALHO)

4.3.1 Preparação e Planejamento Da Operação

Definição de talhões, mapas GNSS, arquivo de linhas de plantio. Parâmetros de operação: velocidade de deslocamento, regime de corte, taxa de alimentação do implemento.

Carregamento das variáveis de trabalho no HMI / envio ao veículo via rede para iniciar missão autônoma.

4.3.2 Navegação e Alinhamento (Fase Inicial)

Início do serviço em modo supervisionado; GNSS+RTK alinha a plataforma com a linha de plantio. IMU complementa quando houver perda temporária de sinal GNSS. LIDAR/câmeras servem para confirmação visual e detecção de obstáculos inesperados.

4.3.3 Corte e Captação Da Biomassa

Sistema de corte frontal age de forma contínua; sensores medem torque e velocidade das lâminas para detectar entupimentos; rolos de alimentação conduzem folhas cortadas para o canal de processamento.

4.3.4 Pré-Processamento Mecânico (Trituramento / Prensagem)

Primeira fase de redução de volume: triturador/desfibrilador reduz tamanho do material; prensa (quando presente) diminui umidade por compressão, reduzindo necessidade de energia térmica. Este passo é crítico para diminuir massa a ser transportada e para eventual processamento termoquímico off-board.

4.3.5 (Módulo Experimental) Processamento Térmico/Extração (Destilação) Observação Crítica

O plano original descreve uma destilação embarcada que gera vapor e bio-óleo. No documento metodológico esta etapa será simulada e energeticamente avaliada (possível apenas como módulo experimental). Dada a elevada demanda térmica, o projeto prioriza o pré-processamento mecânico a bordo e o transporte para uma unidade fixa de conversão



(economicamente mais viável) salvo se simulações indicarem viabilidade do módulo embarcado.

4.3.6 Filtragem/ Resfriamento e Separação (Quando Aplicável)

Se houver extração volátil, vapor coletado passará por condensador e filtro; líquido resultante (bio-óleo) será quantificado e acondicionado gases não condensáveis serão tratados/condenados conforme normas ambientais.

4.3.7 Armazenamentos Em Bordo e Gestão De Resíduos

Biomassa sólida reduzida armazenada em compartimentos; sensores de massa indicam quando transportar material ou descarregar no ponto de coleta; o espalhador de palha distribuirá parte do resíduo como adubo quando configurado.

4.3.8 Retorno e Sincronização De Dados

Ao final da missão o registro georreferenciado da área colhida é enviado ao servidor; relatórios de Produtividade (kg/ha), consumo energético (kWh/ha), tempo de operação, paradas por bloqueio são gerados automaticamente.

4.4 Análise e Dimensionamento Energético (Cálculos Detalhados e Resultados)

Pressupostos de projeto usados nos cálculos

Motor de propulsão nominal: 9 kW.

Margem para auxiliares (bomba hidráulica, inversor, bombas do implemento, eletrônica, sensores): +20% sobre energia do motor de tração.

Profundidade de descarga útil (DoD) considerada para baterias: 80% (DoD útil recomendado para vida útil).

Dois perfis operacionais: pior caso (9 kW contínuos) e caso médio (50% de carga média).

Possibilidade de destilador térmico embarcado (exemplo energético): consumo adicional de 5 kW por 2 h = 10 kWh (valor ilustrativo para análise de sensibilidade).

Cálculos (resultados valores apresentados arredondados para uso prático)



(Valores calculados a partir dos pressupostos acima e todos os números aqui são calculados para orientar o dimensionamento do pack de baterias e a estrutura do chassi.)

1) pior caso — 9 kW contínuos

Energia do motor em 6 h = $9 \text{ kW} \times 6 \text{ h} = 54,0 \text{ kWh}$.

Acrescentando 20% para auxiliares: $54,0 \times 1,20 = 64,8 \text{ kWh}$.

Capacidade nominal da bateria (DoD 80%): $64,8 / 0,80 = 81,0 \text{ kWh}$.

Para 8 h: motor = $9 \times 8 = 72,0 \text{ kWh}$; com auxiliares = $72,0 \times 1,20 = 86,4 \text{ kWh}$; bateria nominal = $86,4 / 0,80 = 108,0 \text{ kWh}$.

2) Caso mais provável — 50% carga média (4,5 kW)

6 h: motor = $4,5 \times 6 = 27,0 \text{ kWh}$; com auxiliares = $27,0 \times 1,20 = 32,4 \text{ kWh}$; bateria nominal = $32,4 / 0,80 = 40,5 \text{ kWh}$.

8 h: motor = $4,5 \times 8 = 36,0 \text{ kWh}$; com auxiliares = $36,0 \times 1,20 = 43,2 \text{ kWh}$; bateria nominal = $43,2 / 0,80 = 54,0 \text{ kWh}$.

3) Caso médio com destilador (exemplo de consumo térmico)

Adicionando 5 kW por 2 h (10 kWh) ao cenário 50%/6h: total com auxiliares = $32,4 + 10 = 42,4 \text{ kWh}$; bateria nominal = $42,4 / 0,80 = 53,0 \text{ kWh}$.

Implicações de massa do pack (densidades típicas comerciais 100–150 Wh/kg)

Para 40,5 kWh → massa estimada entre 270 kg (150 Wh/kg) e 405 kg (100 Wh/kg).

Para 81,0 kWh → massa estimada entre 540 kg e 810 kg.

Para 108,0 kWh → massa estimada entre 720 kg e 1.080 kg.

Para 53,0 kWh (com destilador no exemplo) → massa estimada entre $\approx 353 \text{ kg}$ e $\approx 530 \text{ kg}$.

Correntes exemplificativas (para questões de projeto de fiação e proteção)

9 kW em 48 V $\Rightarrow I \approx 9.000 \text{ W} / 48 \text{ V} = 187,5 \text{ A}$ (alta corrente, exige cabos grossos e proteções adequadas).

9 kW em 400 V $\Rightarrow I \approx 9.000 \text{ W} / 400 \text{ V} = 22,5 \text{ A}$ (correntes mais manejáveis, mas exige isolamento e invólucro apropriado).



CONCLUSÃO

A presença de um processo térmico intensivo embarcado (destilação) aumenta significativamente a capacidade de bateria necessária, aumentando massa, custo e impactos estruturais. Por isso, o projeto prioriza pré-processamento mecânico embarcado (tritador/prensa) e propõe a avaliação por simulação e comparação com a alternativa de processamento off-board em unidade fixa (unidade de conversão centralizada), que tende a ser energeticamente economicamente mais eficiente. Estes cálculos orientam o trade-off entre autonomia, massa e custo e serão formalizados em tabelas e planilhas anexas (cenários sensíveis). O projeto está alinhado a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, em especial: ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), ODS 8 (Trabalho Decente e Crescimento Econômico), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), bem como aos ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e ODS 15 (Vida Terrestre). Dessa forma, o projeto contribui não apenas para a modernização tecnológica e a valorização da agricultura familiar, mas também para a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento socioeconômico do semiárido nordestino.

4.5 Modelagem, Simulação e Testes (Metodologia)

- 4.5.1 Modelagem 3D: CAD completo do chassi, implemento e componentes. Interfaces padronizadas, fasteners especificados.
- 4.5.2 Simulações estruturais (FEM): verificação de tensões e fadiga nos pontos de fixação do implemento e sob massa do pack de baterias.
- 4.5.3 Simulações dinâmicas e de tração: simulação multibody para estimar torque necessário em diferentes condições de solo e inclinação.
- 4.5.4 Simulações térmicas: dimensionamento de trocadores de calor para inversor e, se aplicável, para módulo de destilação (se simulado).
- 4.5.5 Ensaios de bancada (HIL): testagem de controladores, validação de mensagens CAN, verificação de frenagem regenerativa, e ensaios em condições controladas de tração com rolos.



- 4.5.6 Ensaios de campo simulado: em ambiente controlado, usar veículos de escala, rigs e testes de teleoperação e de algoritmos de navegação autônoma em cenário representativo (sem construir o veículo final).
- 4.5.7 Validação de sensores e algoritmos: treinar e testar modelos de visão (segmentação do sisal, detecção de obstáculos) usando dados coletados em campo (vídeo e lidar).

4.5.8 Etapas De Todos Os Processos

- Levantamento inicial e definição de requisitos:
- Coleta de dados: topografia de talhões, espaçamento entre plantas, altura média das rosetas, densidade por hectare, parâmetros climáticos (radiação, temperatura, evaporação).
- Requisitos de operação: autonomia (6–8 h alvo), velocidade de deslocamento, largura de corte, capacidade de armazenamento de biomassa por ciclo.
- Requisitos de segurança: geofence, paradas de emergência, proteções mecânicas.
- Projeto conceitual (arquitetura do sistema)
- Desenho do fluxo de energia (bateria → inversor → motor; regeneração → bateria).
- Desenho do fluxo de material (corte → transporte → pré-processamento → armazenamento/espalhador).

Projeto Detalhado Dos Subsistemas (Mecânico e Elétrico)

CAD detalhado de componentes, lista de materiais (BOM), especificações mecânicas e elétricas.

Especificação do BMS (topologia de balanceamento, comunicação CAN, sensores térmicos).

Projeto De Automação e Software

- Arquitetura de software: ROS ou arquitetura embarcada similar; camada de controle real-time, camada de percepção/planejamento e camada de interface/monitoramento.



- Algoritmos de navegação: GNSS+RTK para alinhamento; RTK/INS fusion; LiDAR+visão para detecção de obstáculos; planejamento de trajetórias em linhas retas e curvas. (Referências técnicas e exemplos práticos no material de apoio).
- Simulação e análise de desempenho
- Simulações de consumo (energético), dinâmica e produtividade (kg/h, ha/h).
- Simulações de carga térmica (se houver processamento térmico).

Ensaio De Bancada (Componentes)

Testes de motor e inversor com dinamômetro; ensaios de BMS com bancos de células; testes de comunicação CAN; verificação de proteção e fusíveis; ensaio de frenagem regenerativa.

ENSAIOS INTEGRADOS EM RIG/HIL (SEM CONSTRUÇÃO FINAL)

Integração de sensores, atuadores e ECU em bancada; HIL para testes de falhas; simulação de áreas com obstáculos e verificação de respostas de segurança.

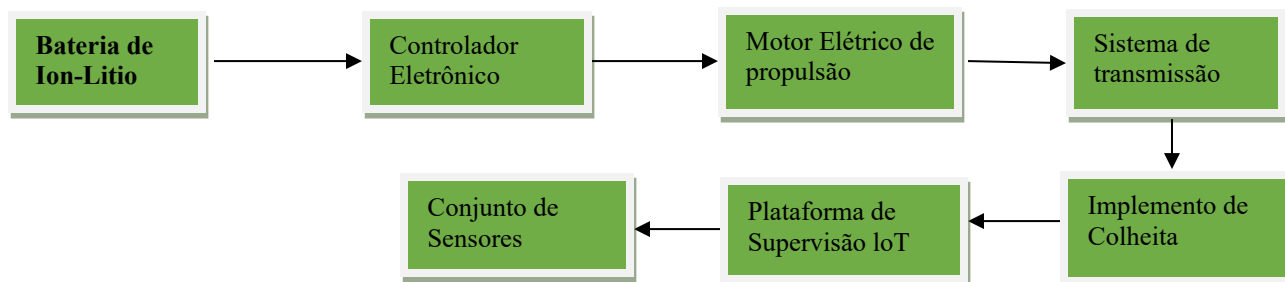
5 RESULTADOS OBTIDOS

O desenvolvimento do projeto sisaltech resultou na consolidação de uma proposta tecnológica inovadora voltada a mecanização sustentável da colheita da Agave sisalana. Ao longo do processo de pesquisa e modelagem, foi possível estruturar e validar, de forma conceitual e funcional, um sistema agrícola elétrico e autônomo, concebido para atuar de maneira eficiente, segura e ambientalmente responsável no contexto do Semiárido nordestino.

O protótipo conceitual foi desenvolvido em ambiente CAD tridimensional, no software Autodesk Fusion 360, abrangendo o chassi, o sistema de propulsão elétrica, o conjunto de transmissão e o implemento de colheita acoplado. Essa etapa permitiu avaliar de forma precisa parâmetros como distribuição de massa, estabilidade, ergonomia e integração entre os sistemas mecânicos e eletrônicos, assegurando coerência técnica e viabilidade construtiva.

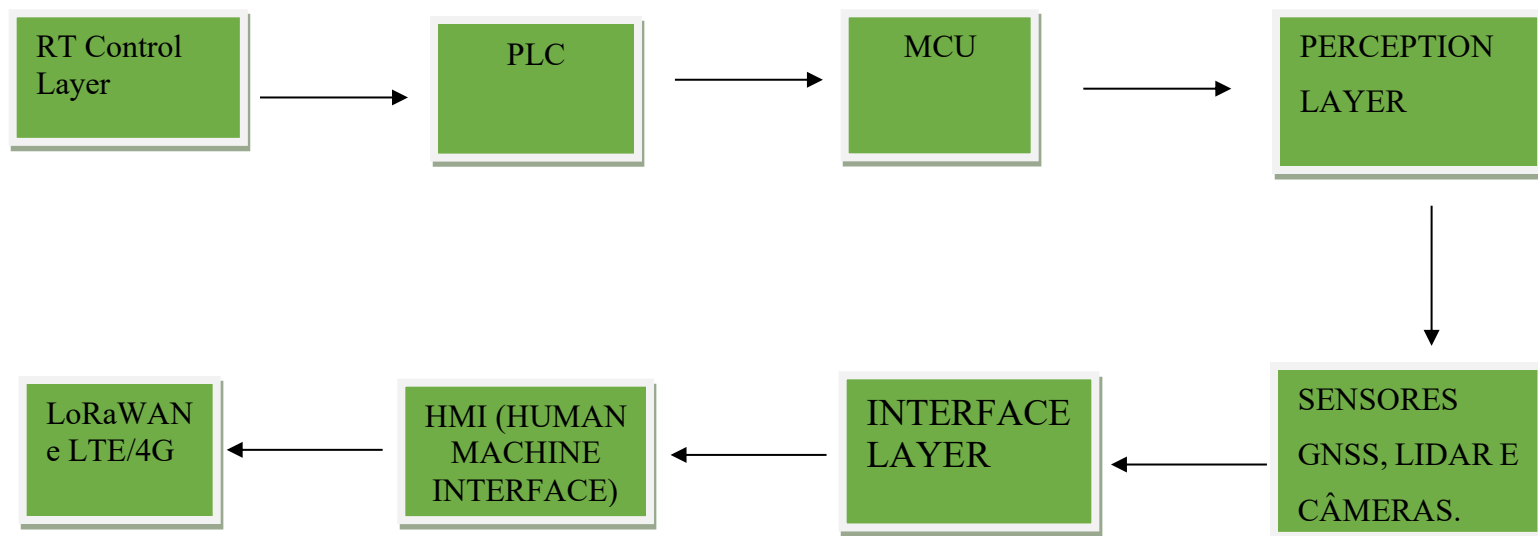


Figura 1 – Diagrama em blocos
Funcionamento Sistemas Elétricos



O sistema elétrico será composto por baterias de íon-lítio de alta densidade energética, responsáveis pela alimentação do controlador e do motor de tração de 9 kW. O conjunto de transmissão converte a energia elétrica em movimento mecânico, transmitindo o torque necessário para a locomoção do trator e o acionamento do implemento de colheita. Esse implemento realiza o corte, a coleta e o direcionamento da biomassa do Agave sisalana, enquanto sensores embarcados monitoram dados de desempenho e enviam informações em tempo real à plataforma de supervisão via Internet das Coisas (IoT).

Figura 1 – Diagrama em blocos
Funcionamento Sistema de software e telecomunicações



Os sistemas de software e de telecomunicações operam a partir da análise de dados, realizada integralmente pelo próprio sistema. Esse processo abrange o mapeamento detalhado do terreno, o planejamento completo da operação e o cálculo otimizado das rotas. A interface do sistema poderá ser controlada por um operador, dispondo, entretanto, de um painel interativo de comando, projetado para simplificar e tornar mais eficiente a operação.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto SISALTECH: Concepção de um Trator Elétrico Autônomo com Implemento para Colheita Mecanizada da Biomassa de Agave sisalana demonstrou elevado potencial técnico e científico ao longo de sua concepção teórica. Os resultados obtidos até o momento indicam a viabilidade do sistema proposto, que alia eficiência energética, sustentabilidade ambiental e inovação tecnológica aplicada à agricultura familiar. O desenvolvimento do modelo tridimensional do trator elétrico e de seus subsistemas permitiu criar parâmetros para o desenvolvimento teórico e a integração dos componentes elétricos, eletrônicos e estruturais, demonstrando que o conceito pode atender de forma satisfatória às demandas operacionais da colheita do sisal no semiárido nordestino.

A automatização do equipamento apresentou-se como um diferencial expressivo para o contexto agrícola regional, visto que o sistema autônomo de navegação, associado ao controle centralizado via protocolo CAN Bus, garante precisão no deslocamento, segurança nas manobras e estabilidade no processo de corte e trituração da biomassa. Além disso, a análise energética indicou que o sistema de propulsão elétrica, composto por um motor de 9 kW alimentado por baterias de íon-lítio, oferece autonomia operacional de 6 a 8 horas, o que viabiliza o trabalho contínuo em campo sem a necessidade de recarga imediata. Essa autonomia é suficiente para operações de colheita em pequenas e médias propriedades, reduzindo significativamente a dependência de combustíveis fósseis e o impacto ambiental associado às emissões de gases poluentes.

A concepção do implemento multifuncional — responsável pelas etapas de corte, trituração, destilação e armazenamento da biomassa — evidenciou a versatilidade e eficiência do sistema, permitindo o aproveitamento integral da planta do Agave sisalana. O processo de destilação e filtragem do vapor resultante viabiliza a obtenção de bio-óleo, enquanto o material sólido triturado pode ser destinado à produção de ração animal ou biofertilizante, contribuindo diretamente para a adoção de práticas sustentáveis e de economia circular. Dessa forma, o projeto confirma a possibilidade de transformar um ciclo de produção tradicionalmente exaustivo e de baixo aproveitamento em um processo mecanizado, produtivo e ambientalmente responsável.

Sob a perspectiva social, o AGROTECH reforça seu compromisso com o fortalecimento da agricultura familiar, que representa 77% dos estabelecimentos agropecuários brasileiros e 79% no semiárido (IBGE, 2017), mas que ainda carece de recursos tecnológicos e mecanização adequada. A substituição das práticas manuais por sistemas autônomos e elétricos tem o potencial de reduzir o esforço físico dos agricultores, minimizar os riscos ocupacionais decorrentes do contato direto com a seiva do sisal — que pode causar dermatites e outras lesões — e ampliar as oportunidades de geração de renda. Nesse sentido, o projeto contribui para a permanência das famílias no campo, favorecendo a sucessão geracional e a estabilidade socioeconômica das comunidades rurais.

Do ponto de vista ambiental, o projeto apresenta resultados promissores ao propor a substituição de motores a combustão por sistemas elétricos alimentados por energia limpa. Essa mudança representa um avanço significativo na redução das emissões de dióxido de carbono e no uso racional dos recursos naturais, conforme as diretrizes do Acordo de Paris e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Além disso, o reaproveitamento integral da biomassa do sisal reduz o volume de resíduos descartados e promove o uso eficiente de subprodutos, fortalecendo a transição para uma agricultura de baixo impacto ambiental.

A fundamentação técnica, baseada em autores como Buffington (1918), Freitas (2011), Renius (2020) e Li et al. (2014), sustentou a concepção de um equipamento coerente com as condições operacionais do semiárido. O projeto validou, por meio de análises teóricas e simulações computacionais, a possibilidade de operação eficiente em terrenos irregulares, com equilíbrio estrutural e consumo energético otimizado. Tais resultados corroboram a viabilidade de um sistema autônomo robusto e de baixo custo, adequado às características da agricultura familiar nordestina.

Como perspectivas futuras, pretende-se dar continuidade às etapas de validação computacional e otimização dos modelos dinâmicos e térmicos, seguidas da prototipagem física do trator e dos implementos. Essa fase será essencial para confirmar empiricamente os resultados obtidos e para aperfeiçoar os parâmetros de eficiência energética e operacional. Também se prevê a consolidação de parcerias com instituições de ensino, pesquisa e extensão rural, visando a difusão tecnológica e o fortalecimento da mecanização sustentável no campo.

Conclui-se, portanto, que o SISALTECH, ainda em desenvolvimento, representa uma proposta de alto impacto científico, social e ambiental. Sua implementação completa poderá redefinir a dinâmica produtiva do sisal no semiárido brasileiro, promovendo maior autonomia tecnológica, redução dos impactos ambientais e melhoria das condições de trabalho no meio rural. Ao integrar inovação, sustentabilidade e inclusão social, o projeto se consolida como um marco promissor na trajetória da agricultura de base familiar e na modernização das práticas agrícolas sustentáveis no Brasil.



REFERÊNCIAS

Buffington, H. C. (1918). Fundamentals of Tractor Engine Design. SAE Transactions, 13(I), 208-219.

Cunha Neto, I. L., & Martins, F. M. (2012). Anatomia dos Órgãos Vegetativos de Agave sisalana Perrine ex Engelm (Agavaceae). Revista Caatinga, 25(2), 72-78.

Gomes, H. P. (2024). Dimensionamento do freio de emergência para um trator elétrico voltado para a agricultura familiar. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual de Campinas, SP.

Li, S., Liu, T., & Xie, B. (2014). The Control System Design of Middle Horsepower Electric Tractor Based on CAN Bus. The Open Automation and Control Systems Journal, 6, 1541-1546.

Lima, R. R. F. de, Santos, C. T., & Bispo, J. L. P. (2023). Perspectivas de aplicações do produto e dos coprodutos da Agave sisalana Perrine ex. Engelm. (Asparagaceae). Perspectivas da Ciência e Tecnologia, 15(7).

Magalhães, R. O., Assunção, M. V., Santos, J. P. M., Silva, E. V., Júnior, L. G. F., Magalhães, R. R., & Ferreira, D. D. (2017). Revisão sobre aplicações de veículos elétricos no campo. Ciência Rural, 47(7), e20161076.

Martin, A. R. et al. (2009). Caracterização química e estrutural de fibra de sisal da variedade Agave sisalana. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 19, nº 1, p. 40-46.

Matos, M. B. de. (2023). Dimensionamento de um sistema de embreagem para trator elétrico. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Estadual de Campinas, SP.

Melo, R. R. de. (2019). Concepção de um sistema de propulsão elétrica para um trator de 9 kW adequado para agricultura familiar. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, CE.

Pacheco, E. A. (2025). Hidrodesoxigenação catalítica do bio-óleo do resíduo de sisal (Agave sisalana) empregando platina suportada em H-ZSM-5 com diferentes porosidades. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, BA.

Renius, K. T. (2020). Fundamentals of Tractor Design. Springer.

Riva, M., Cecchin, D., Paes, J. L., & Siqueira, G. B. (2025). Potencial dos resíduos de Agave sisalana na produção de biocombustíveis de segunda geração: revisão sistemática. Revista Sítio Novo Palmas, 9(1), e1686.

Thomas, H. Y., Cavalcante, J. D. N., dos Santos, W. M., de Santana Souza, D. F., de Araújo Padilha, C. E., Menezes, R. S. C., de Souza, R. B., & Dutra, E. D. (2024). Production of Sugars and Ethanol from Acid-Alkaline-Pretreated Agave sisalana Residue. *Reactions*, 5(4), 765-777.

Tosta Filho, C. D., & Damasceno, M. M. (2024). Análise comparativa da viabilidade e sustentabilidade do agave sisalana como matéria-prima para biocombustíveis: uma perspectiva para a diversificação da matriz energética brasileira. Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de São Paulo, SP.

Zhang X. (2017). Design Theory and Performance Analysis of Electric Tractor Drive System. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 6(10).

Silva, A. R. et al. (2023). Toxicity and Anti-Inflammatory Effects of Agave sisalana Extract Derived from Agroindustrial Residue. *Plants*, 12(7), 1523. <https://doi.org/10.3390/plants12071523>

Barbosa, A. R. A. (2020). Efeitos do extrato de Agave sisalana Perrine sobre a toxicidade ovariana e uterina, fertilidade e parâmetros fetais de ratas. Dissertação (Mestrado) — UNESP.

Carvalho, T. et al. (2018). Saponin-rich fraction from Agave sisalana: effect against malignant astrocytic cells. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 18(1), 43. <https://doi.org/10.1186/s12906-018-2118-4>

Riva, M., Cecchin, D., Paes, J. L., & Siqueira, G. B. (2025). Potencial dos resíduos de Agave sisalana na produção de biocombustíveis de segunda geração: revisão sistemática. *Revista Sítio Novo Palmas*, 9(1), e1686.

Letras Ambientais. (2023). Situação climática do novo semiárido brasileiro a partir de mapas. *Letras Ambientais*. Disponível em: <https://www.letrasambientais.org.br/posts/situacao-climatica-do-novo-semiarido-brasileiro-a-partir-de-mapas>. Acesso em: 26 set. 2025.

Título do projeto

