

RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE ALGODÃO: ESTRATÉGIAS ECO-RESPONSÁVEIS PARA GERAÇÃO DE BIOENERGIA

RESIDUOS DE LA INDUSTRIA ALGODONERA: ESTRATEGIAS ECO-RESPONSABLES PARA LA GENERACIÓN DE BIOENERGÍA

COTTON INDUSTRY WASTE: ECO-RESPONSIBLE STRATEGIES FOR BIOENERGY GENERATION

Carlos Rafael Silva de Oliveira¹; Júlia de Oliveira Martins Müller²; Patrícia Viera de Oliveira³ Afonso Henrique da Silva Júnior⁴; Tarcísio Wolff Leal⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/IIICIAGRO.0159>

RESUMO

Com base em estimativas atuais, a produção global de fibra de algodão é de aproximadamente 25 milhões de toneladas, gerando cerca de 50 milhões de toneladas de resíduos de biomassa. Diversas estratégias estão sendo exploradas para aproveitar esses resíduos, como compostagem, gaseificação, pirólise, fermentação (etanol), digestão anaeróbica e incineração direta. No entanto, os resíduos sólidos resultantes do processo de descaroçamento do algodão não podem ser diretamente utilizados nas fazendas devido a preocupações sanitárias. A compostagem, seja na própria fazenda ou em instalações de beneficiamento, tem sido considerada como uma opção viável para desinfetar patógenos e degradar pesticidas. No entanto, enfrenta desafios relacionados à demanda limitada no mercado e preocupações com doenças. Por outro lado, os resíduos de algodão desempenham um papel importante na redução da perda de carbono do solo, na manutenção do teor de carbono orgânico e na proteção da superfície do solo. A conversão desses resíduos em energia por meio de processos como gaseificação, pirólise e digestão anaeróbica permite uma redução da área necessária para o processamento, e a energia gerada pode compensar os altos custos de capital associados a esses métodos. O objetivo principal deste estudo é analisar o tamanho da indústria do algodão e seus subprodutos relacionados. Foram avaliados os pontos fortes, as fraquezas, as oportunidades e as ameaças das diferentes opções de aproveitamento dos resíduos de algodão durante o processo de beneficiamento. As considerações técnicas, ambientais e econômicas de cada opção de gerenciamento de resíduos forneceram as bases para as conclusões e recomendações deste estudo.

Palavras-Chave: Descaroçamento do algodão, Agricultura sustentável, Aproveitamento de resíduos, Resíduos de algodão.

RESUMEN

Según las estimaciones actuales, la producción mundial de fibra de algodón es de aproximadamente 25 millones de toneladas, lo que genera alrededor de 50 millones de toneladas de residuos de biomasa. Se

¹ Departamento de Engenharia Têxtil (DET-CTE), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), carlos.oliveira@ufsc.br

² Pós-graduação em Engenharia Química (PósENQ), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), julia.omm@posgrad.ufsc.br

³ Pós-graduação em Engenharia Química (PósENQ), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), p.v.oliveira@posgrad.ufsc.br

⁴ Pós-graduação em Engenharia Química (PósENQ), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), afonso.silva@posgrad.ufsc.br

⁵ Pós-graduação em Engenharia de Materiais (PIPE), Universidade Federal do Paraná (UFPR), tarcisio.leal@ufpr.br

están explorando varias estrategias para aprovechar estos residuos, como el compostaje, la gasificación, la pirólisis, la fermentación (etanol), la digestión anaeróbica y la incineración directa. Sin embargo, los desechos sólidos resultantes del proceso de desmotado de algodón no se pueden utilizar directamente en las granjas debido a problemas de salud. El compostaje, ya sea en la finca o en las instalaciones de procesamiento, se ha considerado como una opción viable para desinfectar patógenos y degradar pesticidas. Sin embargo, enfrenta desafíos relacionados con la demanda limitada del mercado y las preocupaciones por enfermedades. Por otro lado, los desechos de algodón juegan un papel importante en la reducción de la pérdida de carbono del suelo, manteniendo el contenido de carbono orgánico y protegiendo la superficie del suelo. La conversión de estos desechos en energía a través de procesos como la gasificación, la pirólisis y la digestión anaeróbica permite reducir el área requerida para el procesamiento y la energía generada puede compensar los altos costos de capital asociados con estos métodos. El objetivo principal de este estudio es analizar el tamaño de la industria algodonera y sus derivados relacionados. Se evaluaron las fortalezas, debilidades, oportunidades y amenazas de las diferentes opciones para el uso de residuos de algodón durante el proceso de procesamiento. Las consideraciones técnicas, ambientales y económicas de cada opción de gestión de desechos sirvieron de base para las conclusiones y recomendaciones de este estudio.

Palabras Clave: Desmotado de algodón, Agricultura sostenible, Aprovechamiento de residuos, Residuos de algodón.

ABSTRACT

Based on current estimates, the global production of cotton fiber is approximately 25 million tons, resulting in about 50 million tons of biomass waste. Various strategies are being explored to utilize this waste, including composting, gasification, pyrolysis, fermentation (ethanol), anaerobic digestion, and direct incineration. However, due to sanitary concerns, the solid waste generated from the cotton ginning process cannot be directly used on farms. Composting, either on-farm or in processing facilities, has been considered a viable option for pathogen disinfection and pesticide degradation. However, it faces challenges related to limited market demand and disease concerns. On the other hand, cotton waste plays an important role in reducing soil carbon loss, maintaining organic carbon content, and protecting soil surface. Converting these waste materials into energy through gasification, pyrolysis, and anaerobic digestion reduces the processing area, and the generated energy can offset the high capital costs associated with these methods. The primary objective of this study is to analyze the size of the cotton industry and its related byproducts. Different cotton waste utilization options' strengths, weaknesses, opportunities, and threats during the processing stage have been evaluated. The technical, environmental, and economic considerations of each waste management option form the basis for the conclusions and recommendations of this study.

Keywords: Cotton ginning, Sustainable agriculture, Use of waste, Cotton waste.

INTRODUÇÃO

Durante o processo de descaroçamento do algodão, são removidos aproximadamente 50 a 60 kg de resíduos para cada fardo de algodão bruto produzido, que pesa cerca de 200 kg. Atualmente, o descarte desses resíduos tem se tornado um problema crescente para a indústria de beneficiamento do algodão em pluma. Normalmente, esses resíduos são armazenados em grandes leiras. Nesse contexto, os caules deixados no campo após a colheita do algodoeiro representam a principal fonte de biomassa residual (TERRAPON-PFAFF, 2012). De acordo com estimativas de Sharma-Shivappa e Chen (2008), entre 5,2 e 5,6 toneladas de caules por hectare são deixados no campo após cada colheita de algodão. Com o aumento da quantidade

de resíduos gerados a cada safra, a área necessária para o descarte desses resíduos também aumenta anualmente. Também é importante destacar que grandes estoques desses resíduos apresentam risco de combustão espontânea.

A reutilização direta dos resíduos de descaroçamento do algodão nos solos de cultivo de algodão é desencorajada devido ao risco de presença de patógenos e teores de pesticidas em algumas amostras de resíduos frescos, como a murcha de *Verticillium* (CUMAGUN, 2012). Por essa razão, a compostagem em leiras, seguindo os padrões especificados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA - *Environmental Protection Agency*), é considerada uma estratégia eficaz para a desinfecção dos patógenos (CUMAGUN, 2012). Nesse processo, a maioria dos resíduos de pesticidas se degrada rapidamente a níveis aceitáveis.

A utilização dos resíduos do beneficiamento do algodão como fonte de energia apresenta vantagens significativas, uma vez que o processo de descaroçamento demanda grandes quantidades de energia elétrica para operar os equipamentos de processamento, além do consumo elevado de energia térmica para a secagem do algodão bruto, o qual geralmente utiliza gás liquefeito de petróleo (GLP). A biomassa dos caules de algodão possui um teor energético considerável, sendo neutra em carbono e mais favorável em comparação aos combustíveis fósseis (VELMOUROUGANE et al., 2021). O uso adequado desses resíduos contribuiria para a redução dos custos de descarte, além de representar uma potencial fonte de energia renovável e carbono para o solo.

Apesar das limitações mencionadas, a biomassa presente nos campos de algodão representa simultaneamente uma valiosa fonte de energia para os produtores e uma oportunidade para reduzir os custos e os impactos ambientais dos atuais sistemas de descarte. Este estudo aborda as práticas utilizadas atualmente na cotonicultura para aproveitar esses resíduos, apresentando diversos métodos para a sua utilização na fazenda e após o processamento. O artigo discute as vantagens e desvantagens de cada um desses métodos, bem como a receita potencial gerada. Seu objetivo é auxiliar pesquisadores, agricultores e investidores na tomada de decisão em relação ao aproveitamento dos resíduos do algodão para fins energéticos.

REFERENCIAL TEÓRICO

O algodão é a fibra natural mais amplamente utilizada e teve uma produção global de aproximadamente 26,7 milhões de toneladas, com um consumo de cerca de 22,9 milhões de toneladas na temporada 2019/2020 (LOCKLEY, [s.d.]). O algodão é reconhecido como a fibra

natural mais economicamente importante. Essa fibra, composta principalmente de celulose, é obtida a partir das flores do algodoeiro (*Gossypium* sp.) (KIM et al., 2017). As flores do algodão uma vez fecundadas evoluem e formam as cápsulas/capulho de algodão, que contêm as fibras que envolvem as sementes de algodão. Após a colheita das cápsulas, as fibras são separadas das sementes através do processo de descaroçamento e, em seguida, são compactadas em fardos para uso nas etapas subsequentes da indústria, como a fiação (WANJURA et al., 2019).

Do momento da colheita até o descaroçamento, são produzidos três principais subprodutos: os caules do algodoeiro, os resíduos do descaroçamento e as sementes de algodão. Os caules do algodoeiro são os restos das plantas deixados no campo após a colheita das cápsulas de algodão. Os resíduos do descaroçamento são gerados durante as etapas de limpeza do algodão, que envolvem o beneficiamento da pluma (VELMOUROUGANE et al., 2021). Por outro lado, as sementes de algodão são coletadas após o descaroçamento, quando as fibras são separadas das sementes. Embora as sementes de algodão sejam utilizadas como matéria-prima nas indústrias de óleo de algodão e para o cultivo de novas plantas de algodão, os caules do algodoeiro e os resíduos do descaroçamento são considerados resíduos que precisam ser descartados pelos produtores da fibra (VELMOUROUGANE et al., 2021).

Dentre esses resíduos, os resíduos do descaroçamento são especialmente complexos, pois consistem em uma mistura heterogênea de restos de cápsulas de algodão, fibras de algodão, sementes imaturas e quebradas, galhos, pedaços de folhas e outras partículas finas. A quantidade de resíduos do descaroçamento gerada varia consideravelmente e depende de vários fatores, como o método de colheita, as técnicas de descaroçamento e a origem e variedade do algodão. As práticas comuns de descarte desses resíduos incluem o aterro e a compostagem (para melhorar o solo). Em um estudo realizado nos Estados Unidos em 2001, um descaroçador relatou a produção de 14.437 toneladas de resíduos, com um custo de aproximadamente US\$ 110.000 para o descarte, enquanto produzia 55.000 fardos de algodão. Portanto, como o aumento populacional e da produção mundial, os resíduos do descaroçamento do algodão representam um desafio significativo para as indústrias de beneficiamento de algodão em todo o mundo (G. A. HOLT et al., 2004).

METODOLOGIA

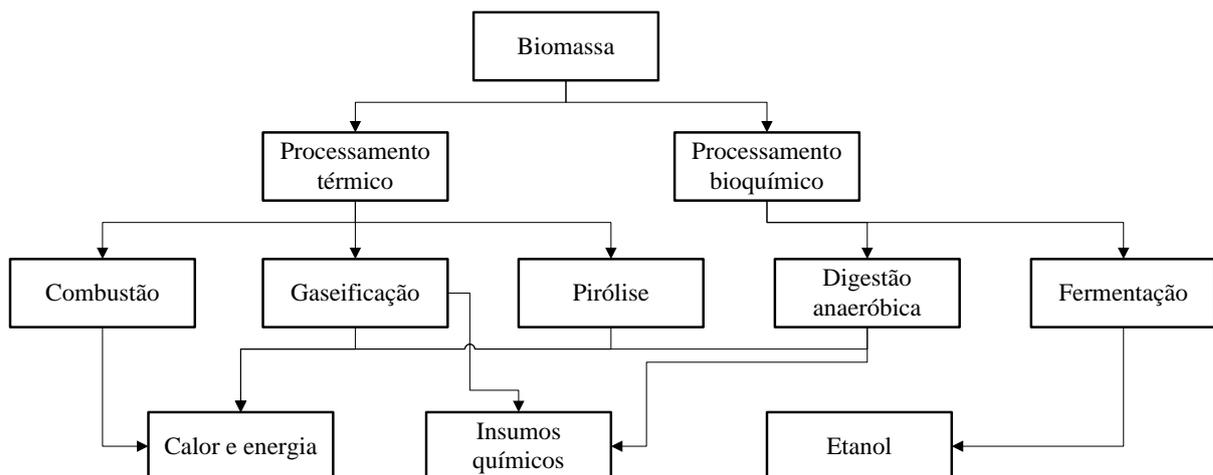
Para o desenvolvimento deste artigo foram realizadas buscas nas bases científicas *ScienceDirect*, *Scopus*, *Google Scholar*, *Springer* e *Wiley Online Library*. As palavras-chave utilizadas foram: algodão (*cotton*), resíduos de descaroçamento (*ginning waste*), produção mais

limpa (*cleaner production*), aproveitamento de resíduos (*waste utilization*) e agricultura sustentável (*sustainable agriculture*). Todas as buscas foram executadas em inglês. A seleção dos trabalhos considerados ocorreu por meio da leitura dos títulos e resumos dos trabalhos encontrados. Foram incluídas as publicações que estavam dentro do escopo do tema aqui proposto. Portanto, nessa revisão o objetivo foi o de abordar a relação entre a produção sustentável de algodão e o correto destino dos resíduos gerados pela indústria de beneficiamento de pluma, enfatizando o potencial uso desses resíduos para a geração de bioenergia e os consequentes ganhos econômicos, sociais e ambientais.

TIPOS DE RESÍDUOS DE ALGODÃO E SEU POTENCIAL DE UTILIZAÇÃO

Há uma grande variedade de resíduos gerados como subprodutos da colheita e processamento do algodão. Esses resíduos podem ser classificados em resíduos agrícolas e industriais. A biomassa derivada desses resíduos pode ser transformada em diferentes tipos de biocombustíveis, como bioetanol e biogás. O bioetanol pode ser usado como alternativa à gasolina, enquanto o biogás pode substituir o gás natural nas atividades agrícolas. Nesta seção, são abordadas apenas as estratégias de aproveitamento dos resíduos agrícolas. Os resíduos de origem industrial serão discutidos em uma seção seguinte. A Figura 1 apresenta uma classificação abrangente das opções de processamento da biomassa.

Figura 1: Classificação de processamento da biomassa.



Fonte: Adaptado de (SCHUCK, 2007).

Os resíduos do plantio de algodão, como caules e folhas das plantas, são considerados subprodutos após a colheita. Antes da colheita, as plantas de algodão são desfolhadas e a

maioria das folhas caem naturalmente no chão. Os caules e raízes restantes possuem uma composição bastante lenhosa. Nesse contexto, existem opiniões divergentes sobre a utilização direta (sem prévia compostagem) desses resíduos após a colheita. Geralmente, esses resíduos são enterrados no solo durante as operações de preparação. No entanto, essa prática requer grande quantidade de energia e pode resultar na degradação da estrutura do solo. Por essas razões, os resíduos de algodão são considerados uma biomassa de valor negativo para aplicações diretas no solo, mas em contrapartida são uma fonte promissora para a produção de bioenergia (COATES, 2000; GEMTOS, 1999).

A energia específica dos caules de algodão varia de 14,5 a 18,1 MJ/kg (COATES, 2000; TWIDELL, 2021), o que é comparável à energia específica da madeira, que varia de 17,4 a 18,6 MJ/kg. Para obter resultados energéticos ideais, são necessários pré-tratamentos para a queima dos caules do algodoeiro. Durante a queima, são gerados subprodutos como SO₂, NO_x, CO e CO₂. Um estudo realizado por Sun et al. (2008) demonstrou que a queima dos caules de algodão em um reator de leito fluidizado resulta em concentrações de NO₂ inferiores a 1 ppm. As emissões de SO₂ e NO podem variar de 32 a 55 ppm e 110 a 153 ppm, respectivamente. Com uma concentração de oxigênio de 6%, a eficiência da combustão varia de 98,52% a 99,81%.

O Quadro 1 apresenta a composição química dos resíduos de caules em base seca. Essas propriedades tornam os caules de algodão uma fonte de energia considerada importante entre os resíduos agrícolas, especialmente em países com produção em grande escala, como Austrália, China, Brasil, Índia, Paquistão e Turquia (ISCI; DEMIRER, 2007). Os cinco maiores produtores de algodão do mundo (China, Índia, EUA, Paquistão e Brasil) foram responsáveis por cerca de 80% da produção global em 2015 e 2016. Atualmente, Índia e China juntas representam mais de 50% da produção mundial de algodão. Devido a essa alta produção, a quantidade de resíduos das plantas de algodão (caules, folhas e cascas) também é significativa nos principais países produtores de algodão, incluindo o Brasil como um dos cinco maiores produtores do mundo. À medida que o potencial dos resíduos de algodão tem despertado interesse entre os pesquisadores, a viabilidade de suas várias aplicações tem sido objeto de muitos estudos nos últimos anos (TUNÇ; TANACI; AKSU, 2009).

Quadro 1: Composição típica dos resíduos de caule de algodoeiro.

Nutrientes	Caule de algodoeiro (%)
Compostos orgânicos voláteis (COVs)	65,4
Conteúdo de cinzas	17,3

Carbono fixo	17,3
Teor de umidade	23 – 62,3
Calor bruto de combustão	15,84 MJ/kg
Composição elementar	
Carbono	39,47
Hidrogênio	5,07
Oxigênio	39,1
Nitrogênio	1,2
Enxofre	0,02
Cinza residual	15,1

Fonte: Adaptado de (GORDON et al., 2001)

Durante o processo de descaroçamento do algodão bruto, é comum haver a presença de aproximadamente 10% de material indesejado, conhecido como resíduo de descaroçamento de algodão (STUCLEY et al., 2004). Esse resíduo é composto por fragmentos secos de capulho, caules, caroços imaturos, fibrilas, fragmentos de folhas e outras sujidades. Apesar de ser descartado, o resíduo de descaroçamento possui valor nutricional e bioenergético. No entanto, o seu descarte é atualmente um desafio para as indústrias de beneficiamento de pluma de algodão. Existem várias formas comuns de descartar esse resíduo, como a aplicação direta no solo após a compostagem ou o uso como alimento de baixo valor nutricional para o gado bovino. A composição nutricional do resíduo de descaroçamento varia de acordo com cada fazenda. Em uma análise realizada com amostras de resíduos de descaroçamento coletadas de 26 unidades de descaroçamento de algodão na Geórgia (EUA), durante a safra de 1997, foi constatada uma variação no teor de proteína bruta de 2% a 16%, no teor de NDT (Nutrientes Digestíveis Totais) de 16% a 62%, e na umidade de 8% a 60% (MYER, 2008). Para fins energéticos, o resíduo de descaroçamento com menor teor de umidade é mais favorável. Portanto, é recomendado que o armazenamento desses resíduos seja realizado em áreas cobertas a fim de protegê-los das condições climáticas regionais. O Quadro 2 apresenta a composição química do resíduo de descaroçamento de algodão em comparação com o feno de capim.

Quadro 2: Composição típica de resíduos de descaroçamento de algodão x feno de capim seco.

Nutrientes (%)	Resíduos de descaroçamento	Feno de capim
Matéria seca	90	90

Proteína bruta	7	8
Fibra	40	33
Lignina	14	9
Lipídios	2	2
Cinzas	10	8
Nutriente digestível total	44	50
Cálcio	0,8	0,5
Fósforo	0,2	0,2
Potássio	1,2	1,5
Magnésio	0,2	0,2
Sódio	0,1	0,1

Fonte: Adaptado de (MYER, 2008).

APROVEITAMENTO DE RESTOS DE ALGODÃO

CAULES DO ALGODOEIRO

Alimentação do gado

O aproveitamento de caules e galhos de algodoeiro como alimento para bovinos não é recomendado por diversos motivos. Em primeiro lugar, existe o risco de contaminação dos animais pelo endossulfan, um inseticida e acaricida comumente utilizado nas plantações de algodão. Além disso, esses resíduos possuem baixo valor nutritivo quando comparados a outras fontes alternativas de alimentação. Na Austrália, um memorando estabelecido entre o Cattle Council of Australia e a indústria de algodão local proíbe o acesso do gado às áreas de cultivo de algodão, o que significa que em alguns países o uso desses resíduos como alimento para o gado já é explicitamente desconsiderado (MYER, 2008).

Compostagem

A compostagem dos caules de algodoeiro envolve a coleta das plantas após a colheita utilizando um equipamento de corte específico e posterior empilhamento dos galhos. Para o processo de compostagem, é possível picar os caules de algodoeiro após a colheita. A pilha de biomassa deve ser mantida úmida e passar por um período de compostagem de

aproximadamente 3 a 5 meses, atingindo uma temperatura de maturidade em torno de 60 °C (RILEY, 2012). Existem dois métodos distintos de compostagem: a compostagem passiva (armazenamento), que resulta em um produto com variação considerável e de pouco valor comercial, e a compostagem ativa, que leva à obtenção de um composto curado de maior valor. É preferível realizar compostagens de alta qualidade para atender às exigências do paisagismo urbano e do mercado de jardinagem.

Incineração

Para o aproveitamento dos caules de algodoeiro também é possível utilizá-los como uma fonte de energia. Diversos estudos indicam que esses caules apresentam uma eficiência e um tempo de queima superiores em comparação com a palha de milho e os resíduos de soja. Quanto maior a densidade dos caules, mais prolongada é a combustão. Um estudo conduzido por Sumner et al. (1981) revelou que o calor disponível da queima correspondia de 45% a 64% da energia total da biomassa, conforme determinado por testes calorimétricos. A coleta de resíduos para a geração de energia tem se mostrado eficiente, uma vez que a quantidade de energia necessária para coletar e processar esses resíduos é apenas uma pequena fração do conteúdo energético presente neles (COATES, 2000). No estudo de Coates (2000), foi demonstrado que é possível combinar os resíduos da planta de algodoeiro com cascas de noz-pecã para produzir briquetes que são comercialmente aceitáveis. Considerando o teor de energia dos caules de algodoeiro de 14,5 MJ/kg e a quantidade anual de caules produzidos (cerca de 5,2 toneladas por hectare), estima-se que seja possível obter aproximadamente 24,8 PJ de energia por meio da queima desses caules. Se considerarmos que uma tonelada de carvão preto pode produzir 28 GJ de energia a um preço de US\$ 110 por tonelada, o ganho potencial com a queima dos caules de algodoeiro pode chegar a cerca de US\$ 97,5 milhões.

Pirólise

A pirólise é um processo de conversão de biomassa em energia, no qual os materiais de biomassa são decompostos termicamente em altas temperaturas, sem presença de oxigênio. A fração volátil liberada de um reator de pirólise é direcionada para um reator de craqueamento, onde moléculas orgânicas complexas são quebradas em moléculas mais simples e posteriormente condensadas em um condensador. A pirólise pode gerar diversos produtos, como gás combustível, carvão vegetal e bio-óleo (R. R. SHARMA-SHIVAPPA; Y. CHEN,

2008). Em um estudo realizado pela Universidade do Arizona, galhos de algodoeiro foram submetidos à liquefação em um sistema de pirólise. Esse processo resultou na produção de um combustível líquido, conhecido como bio-óleo, com um poder calorífico de aproximadamente 37,2 MJ/kg, o dobro do poder calorífico da biomassa inicial. Para obter um bom desempenho do processo, é necessário realizar um pré-tratamento, como a secagem da biomassa para reduzir a umidade a menos de 10-15%, antes de realizar a pirólise. Além disso, o tamanho das partículas alimentadas normalmente varia entre 20 e 80 mm no sistema (MCKENDRY, 2002). No entanto, manter a consistência do produto é um desafio significativo nesse processo.

RESÍDUOS DO DESCAROÇAMENTO DE ALGODÃO

Existem diversas opções disponíveis para o aproveitamento dos subprodutos provenientes do algodoeiro, como a disposição em resíduos sólidos, a incorporação no solo, a compostagem, a incineração e a utilização como matéria-prima para outros produtos. Apesar dos esforços em encontrar aplicações alternativas para os resíduos do descaroçamento, a maior parte desses resíduos ainda é descartada nos campos. Em termos gerais, os resíduos do descaroçamento de algodão são compostos por galhos, folhas, cascas, partículas de solo, outros materiais vegetais, pequenos detritos e fibras de algodão. A proporção aproximada desses componentes nos resíduos é de 11,1% para fibras de algodão, 48,6% para cascas de capulho, 8,4% para galhos e 32,1% para partículas vegetais finas (com tamanho inferior a 5 mm) (JEOH, 1998).

Gaseificação e formação de carvão

Recentes estudos testaram a gaseificação de resíduos provenientes do descaroçamento de algodão utilizando um reator de leito fluidizado. Considerando aspectos econômicos, o Sistema de Conversão Termoquímica de Biomassa (SCTB) apresentou uma baixa lucratividade líquida dos produtos gasificados em comparação ao custo-benefício do gás natural. No entanto, a pesquisa revelou que o subproduto resultante do processo tem potencial para ser utilizado como carvão ativado em estações de tratamento de água e esgoto. Foi relatado que o carvão ativado produzido a partir dos resíduos de descaroçamento de algodão pode ser comercializado por US\$ 200 por tonelada, o que representa um décimo do preço do carvão ativado disponível comercialmente. Essa vantagem financeira do carvão ativado proveniente dos resíduos do descaroçamento do algodão representa uma oportunidade promissora para a utilização desses

resíduos (R. R. SHARMA-SHIVAPPA; Y. CHEN, 2008).

No estudo conduzido por Figueroa et al. (2013), foi evidenciado que a gaseificação de cada tonelada de material lignocelulósico seco, como o bagaço, pode gerar aproximadamente 145 kg de gases (hidrogênio, monóxido de carbono e metano), enquanto o restante consiste em carvão, alcatrão e dióxido de carbono. O dióxido de carbono representa uma parcela significativa da produção, estimada em cerca de 184 kg por tonelada de material seco. O Quadro 3 apresenta uma receita potencial para esse processo, chegando a até US\$ 6,8 milhões, não considerando os custos de capital e operacionais. O Quadro 3 considera um teor médio de umidade de 30% para o material sólido alimentado ao reator, que será perdido durante o processo, e 20% de resíduo de cinzas (sujeira, minerais) que não participa da reação. Portanto, apenas 50% do substrato está diretamente envolvido na produção desses produtos.

Quadro 3: Potencial de energia e receita de gaseificação a 900 °C e 60 min.

Método	RDA^a (kg/t)	Valor total (t)	Energia (kJ/kg)	Energia total (GJ)	Valor (\$)
Carvão vegetal (US\$ 250/t)	35	230.000			2.012.000
Alcatrão	135				
H ₂	23,75		142.000	775.675	3.048.403
CO	105,25		10.100	244.495	960.868
CH ₄	16,85		55.500	215.090	845.304
CO ₂	184,15				
Total	500				6.866.000

^aRDA: Resíduos de descaroçamento de algodão.

Fonte: Adaptado de (FIGUEROA et al., 2013).

Etanol

Os resíduos provenientes do processo de descaroçamento do algodão possuem uma quantidade de açúcar fermentável presente nos caules. Além disso, a fibra de algodão, composta em sua maioria por celulose, contribui para o teor potencial de glicose (JEOH, 1998). O Quadro 4 mostra o tipo e a porcentagem de açúcar presente nos resíduos comuns do descaroçamento do algodão. Desde 1979, pesquisadores da *Texas Tech University* têm investigado a possibilidade de utilizar esses resíduos como matéria-prima para a produção de etanol por meio

da fermentação. Nesse processo, a fração de celulose é convertida em etanol, enquanto a fração de hemicelulose é convertida em furfural.

Geralmente, os resíduos do descaroçamento de algodão consistem em cerca de 40% de celulose, 30% de hemicelulose e 25% de lignina, o que pode resultar em um rendimento de aproximadamente 37,8 galões de etanol por tonelada de resíduos (R. R. SHARMA-SHIVAPPA; Y. CHEN, 2008). É importante ressaltar que a maioria da biomassa não é fermentável sem um pré-tratamento que permita o acesso aos açúcares. Os açúcares fermentáveis estão presentes na forma de polissacarídeos, e o pré-tratamento é necessário para quebrá-los em açúcares individuais (di e monossacarídeos), tornando-os disponíveis para a fermentação por microrganismos (JEOH, 1998).

Diversos métodos de pré-tratamento têm sido investigados para os resíduos do descaroçamento de algodão, sendo os mais comuns a hidrólise ácida e a explosão de vapor/hidrólise enzimática (JEOH, 1998). No entanto, é importante destacar que a produção de etanol a partir desses resíduos, bem como os processos de pré-tratamento e fermentação, podem demandar um alto consumo de energia. O uso dos resíduos do descaroçamento para a produção de etanol envolve três etapas principais: pré-tratamento com ácido sulfúrico diluído para converter o material lignocelulósico em amido, utilização de enzimas amilases para converter o amido em açúcares simples e fermentação da biomassa por meio de leveduras. Estima-se que seja possível obter um rendimento potencial de 143 litros de etanol por tonelada de resíduo do descaroçador, considerando uma quantidade de resíduos entre 230.000 e 330.000 toneladas, o que resultaria em uma produção de 33 a 47 milhões de litros de etanol. Levando em conta um valor calórico de aproximadamente 29 MJ/kg, isso corresponderia a um total de 755.000 a 1.075.000 GJ de energia.

Quadro 4: Composição típica de resíduos de descaroçamento de algodão cru em base seca.

Componentes	(%)
Xilana	7
Mannan	1,1
Cinzas	44
Galactana	40
Arabina	90
Açúcar total	2
Resíduos insolúveis em ácido	10

Glucano	14
Álcoois	0,8
Total	0,2

Fonte: Adaptado de (MYER, 2008).

DIGESTÃO ANAERÓBICA DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS

O biogás é um combustível gasoso obtido através da decomposição de resíduos biológicos na ausência de oxigênio. Geralmente, o biogás é composto por 50 a 60% de metano e é coletado em locais como aterros sanitários, estações de tratamento de esgoto, instalações pecuárias e resíduos agrícolas. No contexto da cotonicultura, o biogás pode ser utilizado como combustível para a secagem do algodão, que atualmente é realizada utilizando GLP (gás liquefeito de petróleo), ou para a geração de energia elétrica. Após a produção do metano, são necessárias apenas pequenas modificações nas instalações para utilizar o biogás em substituição ao GLP. Pesquisas também estão sendo conduzidas para investigar o uso do biogás como combustível para motores de combustão. Algumas questões específicas incluem a adição de outros combustíveis de alta energia para melhorar a velocidade de combustão.

Em um estudo realizado por Isci e Demirer (ISCI; DEMIRER, 2007), três tipos diferentes de resíduos do algodoeiro foram analisados: caules de algodão, cascas de caroço de algodão e farelo de caroço de algodão, a fim de investigar sua adequação ao processo de digestão anaeróbia. Além disso, o potencial de produção de metano a partir desses resíduos foi determinado através de testes de potencial bioquímico de metano. Os resultados demonstraram que os resíduos do algodoeiro podem ser tratados em um digestor anaeróbio e são uma excelente fonte de biogás. Aproximadamente 65 mL, 86 mL e 78 mL de CH₄ (metano) foram produzidos em 23 dias a partir de 1 g de caules, cascas de caroço e farelo de caroço de algodão, respectivamente, quando utilizou-se um meio basal (MB). A adição do MB teve um impacto significativamente positivo na produção de biogás (ISCI; DEMIRER, 2007). Na ausência do MB, os caules de algodão produziram 44 mL de CH₄ por 1 g de caule em 23 dias.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em conclusão, este estudo ressaltou a importância da gestão adequada dos resíduos de algodão, que representam uma parte significativa dos resíduos agrícolas. Diversas abordagens foram discutidas para o aproveitamento desses resíduos, abrangendo desde métodos de

conversão energética a partir de caules do algodoeiro, até a produção de etanol a partir dos resíduos do descaroçamento.

Os caules do algodoeiro se apresentam como uma opção promissora para a produção de recursos energéticos que podem ser utilizados para geração de energia elétrica em usinas. Além disso, a produção de etanol a partir dos resíduos do descaroçamento tem apresentado resultados encorajadores e empolgantes. No entanto, para a implementação dessas tecnologias aqui mencionadas é necessário avaliar cuidadosamente a quantidade de resíduo de algodão que pode ser removida sem prejudicar a qualidade do solo.

Em suma, este estudo oferece uma visão abrangente das possibilidades de aproveitamento dos resíduos de algodão, mas é essencial realizar estudos adicionais para comprovar a viabilidade técnica, econômica e ambiental dessas abordagens. O aproveitamento eficiente dos resíduos de algodão não apenas pode contribuir para a sustentabilidade da indústria do algodão, mas também oferecer oportunidades para a produção de energia renovável e redução do impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

- COATES, W. Using cotton plant residue to produce briquettes. **Biomass and Bioenergy**, v. 18, n. 3, p. 201–208, mar. 2000.
- CUMAGUN, C. J. **Plant Pathology**. [s.l.] IntechOpen, 2012.
- FIGUEROA, J. E. J. et al. Evaluation of pyrolysis and steam gasification processes of sugarcane bagasse in a fixed bed reactor. **Chemical Engineering Transactions**, v. 32, p. 925–930, 2013.
- G. A. HOLT et al. UTILIZATION OF COTTON GIN BY-PRODUCTS FOR THE MANUFACTURING OF FUEL PELLETS: AN ECONOMIC PERSPECTIVE. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 4, 2004.
- GEMTOS, T. Harvesting of cotton residue for energy production. **Biomass and Bioenergy**, v. 16, n. 1, p. 51–59, jan. 1999.
- GORDON, E. et al. TWO METHODS OF COMPOSTING GIN TRASH. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 32, n. 3–4, p. 491–507, 31 mar. 2001.
- ISCI, A.; DEMIRER, G. N. Biogas production potential from cotton wastes. **Renewable Energy**, v. 32, n. 5, p. 750–757, abr. 2007.
- JEOH, T. Steam Explosion Pretreatment of Cotton Gin Waste for Fuel Ethanol Production. **Thesis**, p. 153, 1998.
- KIM, H. J. et al. Comparative physical and chemical analyses of cotton fibers from two near isogenic upland lines differing in fiber wall thickness. **Cellulose**, v. 24, n. 6, p. 2385–2401,

2017.

LOCKLEY, L. C. **Monthly Economic Letter**. [s.l.] University of Southern California School of Commerce, [s.d.].

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 55–63, maio 2002.

MYER, R. O. Cotton Gin Trash: Alternative Roughage Feed for Beef Cattle. **EDIS**, v. 2008, n. 1, p. 1–3, 24 jan. 2008.

R. R. SHARMA-SHIVAPPA; Y. CHEN. Conversion of Cotton Wastes to Bioenergy and Value-Added Products. **Transactions of the ASABE**, v. 51, n. 6, p. 2239–2246, 2008.

RILEY, E. D. **Cotton Stalks and Cotton Gin Trash, Renewable Alternative Substrates for the Nursery Industry**. [s.l.] Raleigh, North Carolina, 2012.

SCHUCK, S. Bioenergy as a Sustainable Energy Source. **Australian Journal of Multi-Disciplinary Engineering**, v. 5, n. 1, p. 69–74, 22 jan. 2007.

STUCLEY, C. R. et al. Biomass energy production in Australia: Status, costs and opportunities for major technologies. **A report for the Joint Venture Agroforestry Program (in conjunction with the Australian Greenhouse Office)**, n. 04, p. 1, 2004.

SUMNER, H. R. et al. Energy available from biomass for grain drying. **Energy available from biomass for grain drying.**, n. 81–3014, 1981.

SUN, Z.-A. et al. Experimental study on cotton stalk combustion in a circulating fluidized bed. **Applied Energy**, v. 85, n. 11, p. 1027–1040, nov. 2008.

TERRAPON-PFAFF, J. C. Linking Energy- and Land-Use Systems: Energy Potentials and Environmental Risks of Using Agricultural Residues in Tanzania. **Sustainability**, v. 4, n. 3, p. 278–293, 27 fev. 2012.

TUNÇ, Ö.; TANACI, H.; AKSU, Z. Potential use of cotton plant wastes for the removal of Remazol Black B reactive dye. **Journal of Hazardous Materials**, v. 163, n. 1, p. 187–198, abr. 2009.

TWIDELL, J. **Renewable Energy Resources**. London: Routledge, 2021.

VELMOUROUGANE, K. et al. Valorization of cotton wastes for agricultural and industrial applications: present status and future prospects. In: **Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products**. [s.l.] Elsevier, 2021. p. 665–692.

WANJURA, J. D. et al. Effects of harvesting and ginning practices on Southern High Plains cotton: fiber quality. **Textile Research Journal**, v. 89, n. 23–24, p. 4938–4958, 29 dez. 2019.