UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU RESIDÊNCIA EM PRÁTICAS AGRÍCOLAS, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL

ELIANE CRISTINA BRAGA MARTINS GONÇALVES

CONSTRUÇÃO DE FORNO TLUD VISANDO A PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO DE CASCA DE COCO PARA USO NA AGRICULTURA.

Niterói - RJ
2022

ELIANE CRISTINA BRAGA MARTINS GONÇALVES

CONSTRUÇÃO DE FORNO TLUD VISANDO A PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO DE CASCA DE COCO PARA USO NA AGRICULTURA.

Monografia apresentada ao Curso de Pós-graduação Lato Sensu Curso de Residência em Práticas Agrícolas e Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER), da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Especialização.

Linha de Pesquisa: Uso de resíduos orgânicos como adubação.

Orientadora: Profª Drª. Dirlane Carmo

Niterói - RJ

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

G635c Gonçalves, Eliane Cristina Braga Martins
Construção de forno TLUD visando a produção de biocarvão de casca de coco para uso na agricultura. : não tem / Eliane Cristina Braga Martins Gonçalves ; Dirlane de Fátima do Carmo, orientadora. Niterói, 2022.
55 f. : il.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2022.

DOI: http://dx.doi.org/10.22409/PGEB.2022.m.03796269699

1. Forno de pirólise de baixo custo. 2. Produção de biocarvão. 3. Casca de coco. 4. Agricultura. 5. Produção intelectual. I. Carmo, Dirlane de Fátima do, orientadora. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD -

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

ELIANE CRISTINA BRAGA DE MARTINS GONÇALVES

CONSTRUÇÃO DE FORNO TLUD VISANDO A PRODUÇÃO DE BIOCARVÃO DE CASCA DE COCO PARA USO NA AGRICULTURA.

Monografia apresentada ao Curso de Pós-graduação Lato Sensu Curso de Residência em Práticas Agrícolas e Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER), da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Especialização.

Linha de Pesquisa: Uso de resíduos orgânicos como adubação.

Aprovada em 20 de outubro de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr ª. Dirlane de Fátima do Carmo

UFF – Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr ª. Mariana Vezzone Tosta Rabello

UFF - Universidade Federal Fluminense

Fernando Cassimiro Tinoco França

Coordenador Técnico Estadual – Emater - MG

Niterói, RJ

2022

Para meu esposo Alessandro e meus amados filhos, Lavínea e Valter:

> “Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes”
>
> Marthin Luther King

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Prof. Dra Dirlane de Fátima do Carmo, pelo aceite na orientação; por todos os ensinamentos; por estar sempre disponível; por nunca “soltar a minha mão”. Agradeço pela amizade e confiança construída em todos esses anos de convivência.

À Universidade Federal Fluminense, minha universidade natal, pelo suporte e infraestrutura para a realização da pesquisa.

À coordenação do curso de Residência em Práticas Agrícolas e Assistência Técnica e Extensão Rural (ATER) e a todos os professores envolvidos nesse projeto, pelo suporte e pelo aprendizado adquirido durante esses 2 anos de curso.

Aos meus companheiros de curso e queridos amigos Marllus e Nathalia, cujo apoio e amizade foi fundamental para que eu não esmorecesse durante as fases mais críticas dessa jornada.

Meu especial agradecimento aos alunos de Iniciação Científica Patrick Matos e Lavínea Mickaella, cujo suporte foi fundamental para a execução desse projeto. E a todas as pessoas que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Angelino e Maria, por serem exemplo de vida.

Ao meu esposo, Alessandro, por ser meu alicerce e meu maior incentivador. Obrigada por sempre me apoiar e por dividir seus planos e sonhos comigo. Obrigada por todos esses anos de amor, amizade e companheirismo.

Aos meus filhos, Lavínea e Valter, razões do meu caminhar: Obrigada por me fazerem querer ser um ser humano melhor, todos os dias.

E a todos que fizeram ou fazem parte dessa etapa da minha vida, e que torceram pelo meu sucesso pessoal e profissional.

Meus sinceros e alegres agradecimentos!

Eliane Braga

“O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem”

Guimarães Rosa (Grande Sertão Veredas)

RESUMO

GONÇALVES, E.C.B.M.G. **Construção de forno TLUD visando a produção de biocarvão de casca de coco para uso na agricultura**. 2022. 55f. Monografia (Pós-Graduação em Residência em Práticas Agrícolas e Assistência Técnica e Extensão Rural) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2022.

A utilização da casca de coco para produção de biocarvão pode promover a sustentabilidade, uma vez que estimula a reinserção do resíduo no ciclo produtivo com potencial contribuição para a agricultura. Por sua vez, o biocarvão (BC) pode promover alterações benéficas nas características físicas, químicas e biológicas do solo quando incorporado neste. Para transformar a biomassa do coco em biocarvão, foi projetado e construído um forno do tipo TLUD (Top-Lit Updraft). O TLUD é um tipo de reator construído com materiais de baixo custo, mas capaz de produzir um biocarvão de alta qualidade e com baixa emissão de dióxido de carbono. Cinco experimentos de queima de casca de coco secas foram conduzidos com o intuito de avaliar características operacionais do forno TLUD, tais como funcionalidade, durabilidade e facilidade de operação. De acordo com os dados de funcionalidade coletados durante os experimentos, o tempo médio acompanhado da queima da biomassa foi de 186 minutos, apresentando uma temperatura média de pirólise de 332°C. O volume médio de preenchimento de biomassa seca no pirolisador foi de cerca de 84 litros e o volume final da biomassa carbonizada (entre cinzas e biocarvão) foi de aproximadamente 13 litros, o que representa um rendimento médio de 16% com uma massa total de biocarvão de cerca 2,5 Kg. O TLUD suportou bem as 5 queimas, não apresentando avarias aparentes após o uso, o que pode ser um bom indicativo de durabilidade. De maneira geral, o protótipo mostrou-se uma boa ferramenta para a pirólise de biomassas. Entretanto, em termos de eficiência de operação, observou-se que condições climáticas (temperatura, umidade e direção do vento) interferem diretamente no desempenho do sistema. Assim, recomenda-se o aperfeiçoamento do protótipo, visando reduzir a interferência dos fatores climáticos no desempenho do forno, bem como melhorar o rendimento de produção de biocarvão.

Palavras-chave: biochar, biomassa, pirólise, protótipo, reator.

ABSTRACT

GONÇALVES, E.C.B.M.G. **Construção de forno TLUD visando a produção de biocarvão de casca de coco para uso na agricultura**. 2022. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-Graduação em Residência em Práticas Agrícolas e Assistência Técnica e Extensão Rural) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2022.

Biochar can promote beneficial changes in the physical, chemical and biological characteristics of the soil, when incorporated into the soil. The use of coconut husk for biochar production can promote sustainability since it stimulates the reinsertion of the residue in the productive cycle with potential contribution to agriculture. A TLUD type oven was designed and built to transform coconut biomass into biochar. The TLUD is a type of reactor built with low-cost materials, but capable of producing high-quality biochar with low CO_2 emissions. Five dry coconut husk burning experiments were carried out in an order to evaluate operational characteristics of the TLUD oven, such as functionality, durability, and efficient of operation. According to the functionality data collected during the experiments, the average time to complete the biomass burning was 186 minutes. The average pyrolysis temperature was 332°C. The average volume of dry biomass filling in the pyrolyzer was about 84 liters. The final volume of carbonized biomass (ash and biochar) was approximately 13 liters, which represents an average yield of 16%. The total mass of biochar obtained was about 2.5 kg. The TLUD oven showed no apparent damage after use, supporting the 5 firings, which can be a good indicator of durability. In general, the prototype showed to be a good tool for the pyrolysis of biomass. However, in terms of operating efficiency, it was observed that weather conditions (temperature, humidity, and wind direction) directly interfere with the performance of the TLUD. Thus, the improvement of the prototype is recommended, aiming to reduce the interference of climatic factors in the performance of the furnace, as well as to improve the yield of biochar production.

Keywords: biochar, biomass, pyrolysis, prototype, reactor.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Ilustração detalhando as camadas da fruta do coqueiro. 9
Figura 2. Esquema de um forno tipo TLUD formado por dois recipientes cilíndricos. 15
Figura 3. Exemplo de sensor termopar utilizado para coleta de dados de temperatura: Modelo Termopar tipo K. 16
Figura 4. Preparação da biomassa utilizada no experimento de combustão. 19
Figura 5. Preenchimento do reator com biomassa durante os ensaios de combustão 20
Figura 6. Composição do forno de combustão: Adaptado do modelo TLUD. 21
Figura 7. Fabricação e montagem do forno TLUD. 22
Figura 8. Detalhamento da Câmara de combustão. 23
Figura 9. Detalhamento do Pós combustor 23
Figura 10. Detalhamento da Câmara de ar primário. 24
Figura 11. Detalhamento da Câmara de pirólise. 25
Figura 12. Sequência de montagem do forno TLUD para queima da biomassa. 26
Figura 13. Detalhamento da instrumentação de medição de temperatura. 26
Figura 14. Dados de precipitação coletados na Estação Niterói (A627), referentes ao mês de fevereiro de 2022. 29
Figura 15. Características visuais dos subprodutos sólidos gerados pela queima da casca de coco no TLUD. 30

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1. Custos de fabricação do TLUD a partir do escopo projetado. _____ 27
Tabela 2. Dados de temperatura e tempo de queima dos ensaios de combustão da casca de coco. _____ 28
Tabela 3. Dados de produtividade de biocarvão no TLUD. _____ 30

LISTA DE SIGLAS

Al – Alumínio**.**

ATER – Residência em Práticas Agrícolas e Assistência Técnica e Extensão Rural.

B – Boro.

BC - biocarvão

Ca – Cálcio.

Cd – Cádmio.

CE – Condutividade Elétrica.

CH_4 – Metano.

CO – Carbono orgânico.

CO_2 – Dióxido de carbono.

CTC – Capacidade de Troca Catiônica.

Cu – Cobre.

FAO – *Food and Agriculture Organization* (Organização para Alimentação e Agricultura).

GEE – Emissão de gases de efeito estufa.

IBI - *International Biochar Initiative.*

K^+ - Potássio.

LABPAS - Laboratório de Práticas Agrícolas Sustentáveis.

Mg – Magnésio.

MO – Matéria orgânica.

Mo - Molibdênio

Na^+ - Sódio.

N_2O – Óxido nitroso.

P – Fósforo.

pH – Potencial hidrogeniônico.

TLUD – *Top-lit Updraft biochar unit* (Forno Gaseificador).

TPIs - Terras Pretas dos Índios.

UFF – Universidade Federal Fluminense.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 4
1.1. Objetivos 5
1.1.1 Objetivo principal 5
1.1.2 Objetivos específicos 5
2. JUSTIFICATIVA 6
3. REFERENCIAL TEÓRICO 8
3.1 Biocarvão 8
3.2 Biomassa para produção de biocarvão 8
3.3 Resíduos de coco como fonte de biomassa 9
3.4 Biocarvão para uso agrícola 11
3.5 Formas de produção de biocarvão 14
3.5.1 Forno TLUD 14
3.5.1 Instrumentação para monitoramento da temperatura do TLUD em campo 16
4. Materiais e Métodos 18
4.1 Local do Experimento 18
4.2 Projeto e construção do forno TLUD 18
4.3 Ensaios de combustão da casca de coco no forno TLUD 19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 21
5.1 Projeto e construção do sistema 21
5.1.1 Elaboração do projeto 21
5.1.2 Fabricação e montagem do forno 22
5.1.3 Termopar e Sensores de medição de temperatura 26
5.2 Custos envolvidos na fabricação do TLUD 27
5.3 Características operacionais do TLUD 28
5.4 Análise da eficiência de operação do forno projetado 30
5.5 Sugestões de melhorias 31
6. Considerações finais 34
7. Referências BIBLIOGRÁFICAS 35
8. Anexos 42
8.1. Escopo do projeto de fabricação do forno TLUD 42

1. INTRODUÇÃO

A porção superficial do solo é considerada a camada fértil, devido à maior presença de nutrientes e de matéria orgânica (MO), contribuindo para a fixação de carbono. Uma das formas de incorporar e manter os níveis de matéria orgânica no solo é pela adição de biomassa carbonizada (PACHECO; PEREIRA; FABIANO, 2011), sendo o biocarvão um exemplo. Portanto, o biocarvão é um insumo gerado a partir da pirólise da biomassa, que consiste na decomposição térmica (300 a 700°C) da matéria-prima em ausência total ou parcial de oxigênio. É comum a utilização do termo "biochar" para se referir ao biocarvão, sendo resultante da junção das palavras em inglês "biomass" e "charcoal", biomassa e carvão.

As propriedades químicas e estruturais do biochar são bastante heterogêneas e dependem do tipo de matéria-prima e da temperatura de degradação térmica (TRAZZI *et al.*, 2018). Fatores como composição química e morfológica da biomassa, associados às condições da pirólise, influenciam diretamente nas características do biocarvão produzido. Essas características, por sua vez, repercutem no ecossistema agrícola, quando da aplicação do biocarvão no solo (MAIA, 2018).

Após a descoberta das Terras Pretas de Índios na Amazônia, o uso de biomassa carbonizada como condicionante vem sendo estudado pela comunidade científica mundial. Nas últimas décadas, pesquisas vêm sendo conduzidas com o intuito de avaliar os efeitos da aplicação do biocarvão e os possíveis impactos positivos sobre a composição física, química e biológica do solo, e, consequentemente, sobre a produtividade do plantio (PETTER *et al.*, 2016).

Embora haja muitos estudos experimentais sobre o uso agrícola do biocarvão (BC) produzidos a partir de diferentes tipos de biomassas, é necessário pensar em uma alternativa para que o produtor rural possa fabricar o biocarvão em sua propriedade, utilizando os resíduos de biomassa oriundos de sua produção. Dessa forma, a construção de fornos de pirólise, a partir de materiais de baixo custo, torna a produção de biocarvão uma alternativa para a carbonização de tais resíduos, capaz de promover a sustentabilidade, uma vez que estimula a reinserção desses resíduos como biomassa no ciclo produtivo, com potencial contribuição para a agricultura.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal deste estudo foi projetar e construir um forno de baixo custo tipo TLUD para produção de biocarvão de casca de coco para uso como condicionante de solo.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar as etapas para a construção do sistema com materiais de baixo custo locais;
- ✓ Avaliar os custos envolvidos na fabricação do TLUD
- ✓ Determinar as características operacionais do sistema;
- ✓ Avaliar a eficiência de operação do forno projetado, em termos de rendimento de produção de biocarvão de casca de coco;
- ✓ Apontar sugestões de melhoria do sistema.

2. JUSTIFICATIVA

Essa pesquisa foi desenvolvida com o intuito de buscar alternativas para a utilização e valoração de resíduos de produção de coco anão do Sítio Canto Belo, de propriedade do Sr. Leonardo. O referido produtor possui uma área de cultivo de coco orgânico, variedade coco anão, com cerca de 500 coqueiros plantados. Os resíduos gerados nessa produção, segundo relatado pelo produtor, são cascas de coco verde, fibra de coco e folhas secas.

O coco é um fruto do coqueiro, com múltiplas funcionalidades. No mercado mundial é cultivado especialmente para produção de óleo e coco desidratado. No Brasil, seu cultivo destina-se essencialmente para produção de coco seco *in natura*, leite de coco, coco ralado. óleo de coco e água de coco. Entretanto, todas as partes do fruto do coqueiro podem ser aproveitadas (CASTILHOS, 2011; BRAINER, 2018).

Segundo dados da FAO – *Food and Agriculture Organization* (2017), o Brasil ocupa a quinta posição no *ranking* mundial de produção de coco, com uma área plantada de 216 mil de hectares e produção de cerca de 2,3 milhões de toneladas por ano. Nos últimos anos, o mercado de coco verde tem crescido no país, especialmente devido ao consumo da água do fruto imaturo, acarretando um aumento considerável na geração de resíduos de casca de coco, que correspondem, em média, a cerca de 85% da massa do fruto. O acúmulo desses resíduos causam problemas de gestão urbana e rural, com potencial de acarretar problemas ambientais e de saúde pública (MARCELINO; DE MELO; TORRES, 2017). Além disso, a dificuldade de beneficiamento do resíduo, devido ao elevado teor de tanino presente na casca do coco, é um empecilho para a correta destinação deste material.

Portanto, a transformação desse resíduo em biovarvão torna-se interessante sob o ponto de visto de seu aproveitamento. As características físico-químicas do fruto, tais como bom rendimento gravimétrico e elevados teor de carbono, lignina e celulose, conferem boa qualidade ao biocarvão, comprovando o potencial de uso energético e/ou agrícola (ANDRADE *et al*., 2017). A utilização da fibra de coco para produção de biomassa carbonizada também promove a sustentabilidade na agricultura, uma vez que estimula a reinserção do resíduo no ciclo produtivo.

No Brasil, estudos sobre o uso do biocarvão no solo ainda são pouco difundidos. A aplicação da biomassa carbonizada em solos brasileiros traz vantagens importantes, uma vez que promovem a estocagem de carbono, contribuindo para a estruturação e estabilidade, bem

como facilitando interações entre as propriedades físico-químicas e biológicas do solo. Além do mais, estudos apontam que o envelhecimento da biomassa carbonizada no solo pode melhorar a qualidade do mesmo (PEI *et al*., 2021).

O biocarvão é um insumo gerado a partir da pirólise da biomassa, que consiste na decomposição térmica da matéria-prima, na ausência total ou parcial de oxigênio. A pirólise lenta é um tipo de processo em que a queima da biomassa que ocorre em temperaturas geralmente em torno de 400°C (350 a 500°C) com um tempo medido em horas ou até mesmo dias. Trata-se de um processo térmico, com inserção de calor, ou catalítico, realizado sob a ação de um catalisador (MONTALVAN, 2017).

A produção de biochar via pirólise lenta pode ser feita em fornos artesanais, de preferência com a utilização de matéria-prima de baixo custo. Dessa forma, visando reutilizar o resíduo da casca de coco, agregando valor agrícola, o presente trabalho teve como objetivo projetar e construir um forno de baixo custo do tipo TLUD visando a produção de biocarvão a partir da casca de coco. Além disso, buscou-se avaliar o desempenho do forno, a partir de critérios de funcionalidade, durabilidade e viabilidade.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Biocarvão

O biocarvão é produzido a partir de um processo denominado pirólise. A pirólise (pyr = fogo + lýsis = quebra, dissolução) consiste na decomposição térmica da biomassa, em temperaturas relativamente baixas (< 700^{o}C) e ausência total ou parcial de oxigênio. A queima da matéria orgânica resulta na formação de líquidos condensáveis (bio-óleo), gases condensáveis (biogás) e biocarvão. O uso desses subprodutos vem sendo estimulado, especialmente nas últimas décadas, por se tratarem de fontes de energia renováveis e ambientalmente mais limpas e sustentáveis que o petróleo e seus derivados (LIMA, 2016).

O biocarvão é um material sólido, rico em *Black* C (carbono negro) e representa cerca de 25% da massa total da matéria-prima utilizada no processo de pirólise (LIMA, 2016). Apesar de não ser um produto novo, apenas recentemente, com a descoberta das Terras Pretas dos Índios (TPIs), o uso do biocarvão na agricultura vem sendo estudado e estimulado (LABEGALINI, 2013).

Estudos sobre as TPIs revelaram que essas terras são ricas em matéria orgânica e nutrientes, com elevado teor de carbono estável em sua fração orgânica (MAIA, 2018). Tais revelações despertaram o interesse internacional, levando à criação da *International Biochar Initiative* (IBI), que apoia pesquisas locais e projetos aplicáveis na Europa, Ásia, Oceania, América do Norte, América Central e Caribe, envolvendo produção e caracterização de biocarvão para fins agrícolas e energéticos (IBI, [s.d.]).

3.2 Biomassa para produção de biocarvão

O termo biomassa refere-se a qualquer tipo de matéria orgânica, oriunda de organismos vegetais ou animais, que possa ser convertida em energia mecânica, elétrica ou térmica (GONÇALVES, 2019).

As propriedades químicas e estruturais do biocarvão são bastante heterogêneas e dependem do tipo de biomassa utilizada em sua fabricação, bem como das condições da degradação térmica a que foi submetido (TRAZZI *et al*., 2018). Fatores como composição bromatológica (extrativos, lignina, celulose e hemicelulose) e morfologia da biomassa, associados às condições da pirólise, influenciam diretamente nas características físico-químicas do biocarvão produzido, tais como porosidade, pH (potencial hidrogeniônico), recalcitrância, CTC (Capacidade de Troca Catiônica), teor de carbono fixo e cinzas, entre

outras. Essas características, por sua vez, repercutem no ecossistema agrícola, quando da aplicação do biocarvão no solo (MAIA, 2018).

A constituição físico-química do biocarvão depende principalmente da temperatura de pirólise. Temperaturas muito elevadas comprometem o rendimento do biocarvão, com menores quantidades de biomassa carbonizada, mas de elevada área superficial e porosidade. Por outro lado, maiores temperaturas resultam em biocarvão com elevado CTC, maior recalcitrância e estabilidade e, portanto, são mais indicados para o armazenamento de carbono no solo e degradação de contaminantes (meio líquido ou sólido) (REZENDE *et al*., 2011).

3.3 Resíduos de coco como fonte de biomassa

O coqueiro (*Cocos nucifera* L.) é a única espécie do gênero cocos, pertencente à família Palmae. O fruto do coqueiro (Figura 1), conhecido como coco, é uma drupa, formado basicamente por epicarpo, mesocarpo e endocarpo e semente. O epicarpo envolve o mesocarpo, camada mais espessa e fibrosa do fruto. O endocarpo, ou casca rígida, tem por função proteger a semente, constituída de tegumento e albúmen (endosperma) sólido e líquido. O tegumento, também conhecido por copra, é formado por camada branca e carnosa do coco, rica em óleo, envolvida por uma fina cobertura amarronzada. No interior do tegumento encontra-se o albúmen líquido e o embrião, envolvido pelo albúmen sólido (FONTES; FERREIRA, 2006).

Figura 1. Ilustração detalhando as camadas da fruta do coqueiro.

Fonte: (nibrajr.wordpress.com)

O coco é conhecido mundialmente por suas múltiplas funcionalidades. Grande parte dos países produtores cultivam o coco visando a exploração da copra para produção de óleo e coco desidratado. No Brasil, o coqueiro é cultivado principalmente para produção de coco seco *in natura*, leite de coco, coco ralado. óleo de coco e água de coco. Entretanto, todas as partes do fruto do coqueiro, verde ou seco, processado ou *in natura*, tem valor econômico agregado (CASTILHOS, 2011).

A fibra de coco possui propriedades mecânicas particulares (baixa densidade, não-abrasividade, elasticidade superior a outras fibras vegetais, facilidade de modificação perante agentes químicos, elevada resistência à umidade) que a tornam interessante do ponto de vista de seu reaproveitamento nas indústrias têxteis, automobilísticas e até mesmo como substrato agrícola (CASTILHOS, 2011; BRAINER, 2018). Apesar de toda a sua versatilidade como matéria prima, a elevada produção de coco no país, bem como problemas associados ao beneficiamento do resíduo são um empecilho para a correta destinação deste material.

O alto teor de taninos totais e condensados presente na casca do coco é um dos grandes entraves para o reaproveitamento da fibra pelas indústrias. O tanino é um composto recalcitrante, resistente à degradação microbiana e o efluente proveniente da prensagem da casca de coco pode apresentar problemas de toxicidade (LEITÃO et al., 2010). Da mesma forma, o uso de fibra in natura como condicionante de solo necessita de cuidados, uma vez que o tanino pode ser tóxico para alguns organismos e plantas. Quando em excesso, pode causar queimaduras nas raízes, e comprometer o desenvolvimento do cultivo (SOUSA, 2007). Assim, a transformação desse resíduo em biocarvão torna-se interessante, sob o ponto de visto de seu aproveitamento.

O carvão vegetal de resíduos de coco apresenta bons rendimentos gravimétricos (31 a 35%), baixos teores de cinzas (1 a 11%) e materiais voláteis (9 a 25%), bem como teores de carbono fixo (68 a 81%, dependendo da parte do fruto carbonizado e da temperatura de pirólise) equiparados aos apresentados por carvões de madeiras lenhosas, como eucalipto (ANDRADE et al., 2004). As propriedades bromatológicas do fruto do coqueiro são também uma vantagem. O coco apresenta elevados teores de lignina (35 a 45%) e celulose (23 a 43%) em sua composição, o que propicia um biocarvão de alto grau de estabilidade. Tais características conferem boa qualidade ao biocarvão, comprovando o potencial de uso tanto como insumo energético quanto como insumo agrícola (CARRIJO; LIZ; MAKISHIMA, 2002; ANDRADE *et al.*, 2017) .

3.4 Biocarvão para uso agrícola

A porção superficial do solo é considerada a camada fértil, por apresentar maiores conteúdos de matéria orgânica (MO) e nutrientes. A matéria orgânica possui importância fundamental para as propriedades físicas e químicas do solo, sendo responsável por grande parte da CTC da superfície do solo, sobretudo em solos mais intemperizados (RONQUIM, 2010). Além disso, a incorporação e manutenção dos níveis de MO contribuem para a fixação de carbono no solo e, consequentemente, para redução do efeito estufa. Uma das maneiras de incorporar e manter os níveis de matéria orgânica no solo é através da adição do biocarvão (PACHECO; PEREIRA; FABIANO, 2011). Contudo, devido às características estruturais, o comportamento do biocarvão no solo é diferenciado quando comparado aos demais compartimentos do carbono do solo (TRAZZI *et al.*, 2018).

O biocarvão, quando incorporado ao solo, é capaz de alterações benéficas nas características físicas, químicas e biológicas do solo e, consequentemente, levar a melhorias na qualidade e produtividade do cultivo (GONÇALVES, 2019). Estudos sobre o uso de biocarvão na agricultura vêm sendo conduzidos com o intuito de avaliar os efeitos de sua aplicação na melhoria da saúde e qualidade do solo e do cultivo.

Comparados a solos não corrigidos, a adição de biocarvão leva a uma redução na densidade aparente e dispersão da argila, um aumento do volume total dos poros, do potencial hidrogeniônico (pH) e do teor de água (até 15%) no ponto de murcha permanente (LAIRD *et al*., 2010b; BECK; JOHNSON; SPOLEK, 2011; ABEL *et al*., 2013; ZHAO; COLES; WU, 2015; HANSEN *et al*., 2016).

Correlações significativas entre o aumento da respiração, da temperatura e da umidade do solo foram observadas, quando da aplicação do biocarvão no solo (JONES *et al*., 2012; LU *et al*., 2014b). A presença da biomassa carbonizada elevou a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo ao aumentar o estoque de carbono total, propiciando, também, uma maior estabilidade do carbono orgânico do solo (EL-NAGGAR *et al*., 2018).

Por outro lado, em estudos realizados com biocarvão produzido a partir de resíduos de coco, foi relatado por Lima (2016) e Cavalcante (2017), um aumento da condutividade elétrica (CE) da solução do solo, causado principalmente pela elevação do pH e teor de água, bem como uma maior concentração de potássio (K^+) e sódio (Na^+). O aumento da CE pode ser um fator limitante para o uso desse biocarvão em grandes quantidades (LIMA, 2016; CAVALCANTE, 2017).

A adição de biocarvão no solo pode provocar substanciais mudanças na qualidade e fertilidade dos solos agrícolas (LAIRD *et al*., 2010b). Diversos autores observaram que a adição da biomassa carbonizada propiciou maior retenção e ciclagem de nutrientes, com consequente redução da lixiviação dos minerais (BARONTI *et al*., 2010; LAIRD *et al*., 2010a; HASS *et al*., 2012; EL-NAGGAR *et al*., 2015; LIMA, 2016; CAVALCANTE, 2017; KELLY *et al*., 2017; GONZAGA *et al*., 2018; PANWAR; PAWAR; SALVI, 2019). Aumentos na disponibilidade de fósforo (P), cálcio (Ca), potássio (K), magnésio (Mg), boro (B) e molibdênio (Mo), foram relatados (GASKIN *et al*., 2010; LAIRD *et al*., 2010a; CUI *et al*., 2011; HASS *et al*., 2012; ALLING *et al*., 2014; EL-NAGGAR *et al*., 2015). Também foi observado um aumento da eficácia do fertilizante à base de nitrogênio, fósforo e potássio - NPK (20 - 30%) em solos com mistura biocarvão e fertilizante, quando comparado a solos com aplicação de fertilizantes somente (OLMO *et al*., 2016).

A biomassa carbonizada possui potencial de elevar a fixação biológica de nitrogênio no solo. Há relatos também de aumento dos teores de N-amônio e N-nitrato e nitrogênio total (LAIRD *et al*., 2010b; HASS *et al*., 2012; MALGHANI *et al*., 2015; WANG *et al*., 2015; JIANG *et al*., 2016; CUI *et al*., 2017b; GONZAGA *et al*., 2018).

Quando aplicado ao solo, o carvão vegetal pode promover um acréscimo do teor de carbono total. Alguns autores relataram um aumento significativo na concentração de biomassa carbonácea, bem como uma maior conversão da matéria-orgânica em carbono solúvel (LUO *et al*., 2013; WANG *et al*., 2016; SANDHU *et al*., 2017). Os resultados também mostraram que o conteúdo de carbono orgânico nativo do solo (CO) foi maior nos solos corrigidos com biocarvão, evidenciando um incremento na mineralização do CO nativo (LAIRD *et al*., 2010b; GENESIO *et al*., 2012; YU *et al*., 2013; LU *et al*., 2014a; FANG; SINGH; SINGH, 2015; HERNANDEZ-SORIANO *et al*., 2016; CUI *et al*., 2017a; LIU *et al*., 2018; MIKULA *et al*., 2020).

A presença do biocarvão é capaz de alterar beneficamente a fauna do solo. Pesquisadores relataram um aumento da população de fungos micorrízicos, propiciado pela alteração das propriedades físico-químicas no solo, especialmente pelo aumento na disponibilidade de água e nutrientes (PETTER, 2010; LEHMANN *et al*., 2011; ZIMMERMAN; GAO; AHN, 2011; JONES *et al*., 2012; ZHAO; COLES; WU, 2015; JIANG *et al*., 2016; SINGH *et al*., 2018; PEI *et al*., 2020). Também foram observados aumento do teor da matéria orgânica, da atividade enzimática e do componente húmico, esse

último associado ao acúmulo de carbono aromático (WANG *et al.*, 2015, 2016; HERNANDEZ-SORIANO *et al*., 2016; SANDHU *et al.*, 2017).

Por sua natureza recalcitrante, a aplicação de biocarvão pode ser uma técnica viável de sequestro de carbono no solo (JONES *et al*., 2011; GENESIO *et al*., 2012; HASS *et al*., 2012; FANG; SINGH; SINGH, 2014; RITTL *et al*., 2015; HANSEN *et al*., 2016), com consequente redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO_2) óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4) (BARONTI *et al.*, 2010; ALHO *et al*., 2012; DEMPSTER *et al.*, 2012; YU *et al.*, 2013; EL-NAGGAR *et al*., 2015; RITTL *et al*., 2015; HERATH *et al*., 2015; ZHAO; COLES; WU, 2015; OUYANG *et al*., 2016; CUI *et al*., 2017a; FENG; ZHU, 2017).

O biocarvão pode ser usado para melhorar a fitoestabilização de metais de solos contaminados. Estudos apontaram redução significativa das concentrações de alumínio (Al), cádmio (Cd) e cobre (Cu) (HASS *et al*., 2012; ALLING *et al*., 2014; AL-WABEL *et al*., 2015; LIMA, 2016; CHOUDHURY *et al*., 2017). A presença da biomassa carbonizada no solo também propiciou a redução da descarga de fosfato e nitrato (BECK; JOHNSON; SPOLEK, 2011). Em solos contaminados com pesticidas, o biocarvão teve efeitos positivos na degradação de organoclorados, principalmente os Bifenilos Policlorados (PCBs) (HUANG *et al*., 2018).

No que diz respeito às implicações para a melhoria da qualidade e produtividade do cultivo, a incorporação do biocarvão no solo levou a um aumento da massa fresca e seca da planta, e, consequentemente, no rendimento e produtividade do cultivo (BARONTI *et al*., 2010; GRABER *et al*., 2010; ALHO *et al*., 2012; GENESIO *et al*., 2012; PETTER *et al*., 2016; CHOUDHURY *et al*., 2017; GONZAGA *et al*., 2018). Um maior crescimento da raiz e da parte aérea do cultivar foi observado, devido a uma maior disponibilidade de nutrientes na região do enraizamento (GRABER *et al*., 2010; GENESIO *et al*., 2012; OLMO *et al*., 2016; PETTER *et al*., 2016; JOSEPH *et al*., 2020). Além disso, os cultivares apresentaram maior produção de flores e frutos (GRABER *et al*., 2010; JOSEPH *et al*., 2020).

O biocarvão também pode atuar como agente supressor de doenças. Harel et al. (2012) estudaram o desenvolvimento de doenças em morangos cultivados em solo com biocarvão, especificamente causadas pelos fungos *B. cinérea*, *C. acutatum*, *P. aphanis* . Os autores comprovaram que a aplicação de 1 e 3% de biocarvão suprimiu doenças causadas pelos três fungos, bem como induziu a expressão do gene relacionado à defesa após infecção do cultivo por *B. cinérea* e *P. aphanis* (HAREL *et al*., 2012).

Embora tenha-se comprovado a eficácia do biocarvão como condicionante de solo, estudos são necessários para esclarecer questões que ainda permanecem obscuras. Variáveis como a influência do tipo de biomassa, temperatura ideal de pirólise, taxa de aplicação, tipo de solo podem impactar na eficácia do biocarvão como condicionante. Além disso, uma vez que o biocarvão é frequentemente produzido a partir da queima de resíduos orgânicos, é recomendável investigar a presença de possíveis contaminantes no insumo gerado, antes de incorporá-lo ao solo. Contaminantes metálicos podem impactar negativamente a comunidade micorrízica do solo e o crescimento vegetal. Mudanças bruscas no pH do solo, na disponibilidade de nutrientes e CTC também devem ser consideradas para evitar consequências indesejadas para a produtividade.

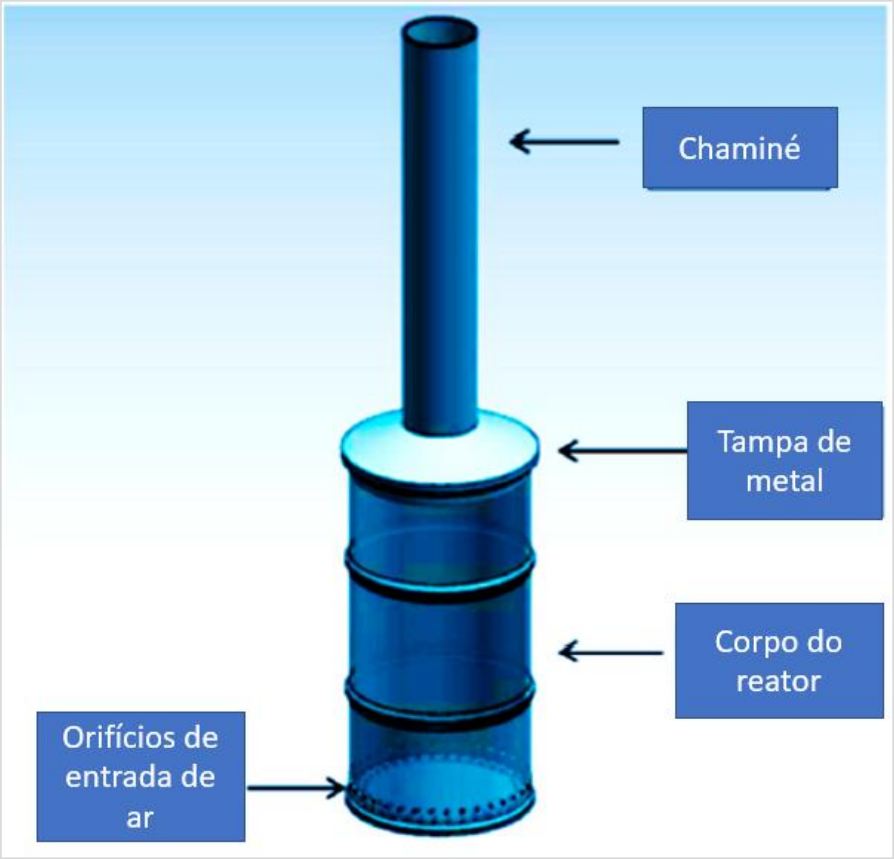
3.5 Formas de produção de biocarvão

3.5.1 Forno TLUD

O forno TLUD é um tipo de reator gaseificador de corrente ascendente, que queima a madeira ou qualquer outro tipo de biomassa, em ausência total ou limitada de oxigênio, para produzir biocarvão. Além disso, o calor fornecido durante a combustão da biomassa nesse tipo de processo, é muitas vezes aproveitado para cocção de alimentos (McLAUGHLIN, 2010).

Um TLUD geralmente é construído com dois recipientes cilíndricos concêntricos, um externo e outro interno (Figura 2). O cilindro interno é o reator de combustão, onde a biomassa é acondicionada e onde de fato ocorre o processo de pirólise. O cilindro externo pode fazer o papel de combustor ou de condutor de calor. Ambos os cilindros são dotados de orifícios concêntricos na base e no topo, para entra da e saída de ar (McLAUGHLIN, 2010).

Figura 2. Esquema de um forno tipo TLUD formado por dois recipientes cilíndricos.



Fonte: OBENG *et al*. (2020)

Durante o processo de combustão, a onda de calor provocada pela queima do combustível move-se lentamente da parte inferior para a parte superior, aumentando a temperatura interna, à medida em que avança pela pilha de biomassa. Altas temperaturas (350 a 1200°C) vão garantir que o processo de pirólise ocorra no interior do reator (WINTER, 2021).

No processo de queima do material orgânico pelo TLUD são gerados subprodutos sólidos e voláteis. Os sólidos gerados representam cerca de 10 a 25% do peso da biomassa original e são constituídos principalmente por cinzas e biocarvão. A prevalência do biocarvão sobre as cinzas produzidas (em proporção) indica o um bom funcionamento do TLUD (WINTER, 2021).

A relação entre a quantidade de biomassa utilizada no processo de conversão e a produção de biocarvão varia de acordo com as características do processo de combustão e o

teor de umidade do material de origem. Em geral, o BC produzido em um TLUD representa, em média entre ¼ (um quarto) a 1/10 (um décimo) da massa da biomassa original (MIRANDA, 2017).

As cinzas de biomassas lignocelulósicas possuem em sua composição basicamente silício, ferro, cálcio e potássio (FONSECA e HANISCH, 2018). O biocarvão é composto basicamente por carbono, mas pode conter outros elementos químicos cuja composição depende principalmente do material orgânico de origem. Ambos os "resíduos sólidos" podem ser aproveitados na agricultura como condicionante de solo (OBENG *et al*., 2020)

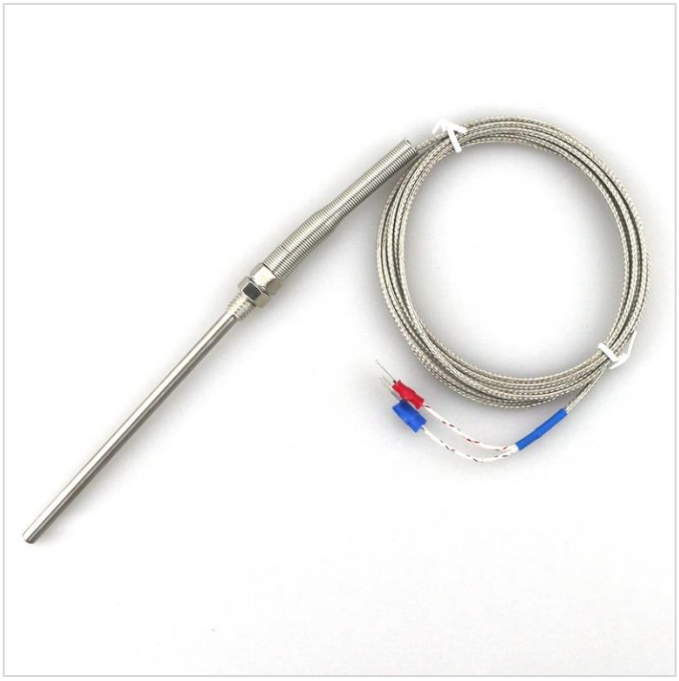
Os voláteis pirolisados são caracterizados pela formação de 'fumaça branca", formada principalmente por gases como hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos leves, além de gotículas de alcatrão e sólidos suspensos de fina granulometria. Cerca de 25% dos voláteis produzidos durante o processo são queimados na frente de ignição, auxiliando na geração de calor que impulsiona a pirólise da biomassa (WINTER 2021).

3.5.1 Instrumentação para monitoramento da temperatura do TLUD em campo

O monitoramento da temperatura de trabalho do TLUD em campo é importante para averiguar a eficiência térmica do forno durante o processo de pirólise. Tal monitoramento pode ser feito com o uso de sensores tipo termopar. O termopar é a definição para um transdutor constituído da junção entre dois tipos de metais diferentes que, ao serem submetidos a um gradiente de temperatura gera uma certa tensão que pode ser mensurada (NOWICKI, 2014).

A junção entre os diferentes metais, dada em uma pequena área, permite a medição da variação da temperatura em pontos limitados e a um intervalo pequeno de tempo, possibilitando uma rápida e segura resposta nas medições (NOWICKI, 2014). Outras vantagens atribuídas aos sensores termopar são o baixo custo, a ampla aplicação, fácil acesso e manuseio e ampla cobertura, que variam entre -200°C a 1200°C (MATTEDE, 2021).

Figura 3. Exemplo de sensor termopar utilizado para coleta de dados de temperatura: Modelo Termopar tipo K.



Fonte: www.mercadolivre.com

A eficiência térmica de um gaseificador é medida pela diferença entre o comportamento térmico externo e interno do forno. No caso do TLUD, essa diferença pode ser medida a partir das variações entre a temperatura do reator interno, a temperatura da parede externa do reator e a temperatura da parede externa do forno (MIRANDA, 2017).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Local do Experimento

O projeto foi desenvolvido no Laboratório de Práticas Agrícolas Sustentáveis (LABPAS), Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Fluminense, localizado no Campus da Praia Vermelha, Niterói - RJ, coordenadas geográficas 22° 54' 23.36'' de latitude Sul e 43° 7' 57.65" de longitude Oeste.

A região está inserida na área intertropical, com regime tropical tipo AW` segundo classificação Köeppen, com regime de precipitação concentrando-se principalmente durante a primavera e verão. A média pluviométrica anual, de 1141.4 mm, é influenciada pelos ventos oceânicos e pela zona das planícies e maciços costeiros. O clima em Niterói é quente e úmido, com média anual de temperatura de 23^{o}C e 69% de umidade relativa. A média anual de evapotranspiração potencial, de 1.747 mm, é favorecida pela intensa radiação solar e pela proximidade com o Oceano Atlântico.

Os testes de produção de biocarvão que serão abordados aqui nesta monografia foram realizados através de um Projeto de Iniciação Científica (IC), fruto deste estudo, que investigou a produção e uso agrícola do biocarvão de fibra de coco (MATOS, 2022). O projeto de IC foi orientado pela prof. Dra. Dirlane de Fátima do Carmo e teve a participação do aluno de graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental (UFF), Patrick Gonçalves Matos. O projeto foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e foi realizado de setembro de 2021 a setembro de 2022.

4.2 Projeto e construção do forno TLUD

Para que o projeto e construção do forno tipo TLUD fosse concebido, uma revisão abrangente da literatura foi conduzida em banco de dados da Web of Science (webofknowledge.com), PubMed (pubmed.gov) e Periódicos Capes (periódicos.capes.gov.br). As palavras-chaves usadas para os termos de busca foram: 'biochar', 'biochar production', 'biochar + 'pyrolysis', 'low cost oven + biochar', 'biochar + TLUD'.

Além das buscas em periódicos, também foram consultados sites de organizações não governamentais como *International Biochar Initiative* (IBI) (https://biochar-international.org/) e *CarbonZero* (https://www.carbonzero.cc/projects*)*, vídeos no youtube

(www.youtube.com). Todas as informações relevantes coletadas na literatura foram organizadas em banco de dados.

Para a concepção do projeto do forno, além das características operacionais, adotou-se como critério o custo, a facilidade de construção e montagem e a disponibilidade de matéria-prima local.

4.2.1 Custos envolvidos

Na projeção dos custos envolvidos na fabricação do forno TLUD levou-se em conta os custos com os insumos, ou seja, a matéria-prima necessária para a montagem do forno, os custos com a instrumentação para acompanhamento da temperatura e os custos com serviços, como frete e mão de obra.

4.3 Ensaios de combustão da casca de coco no forno TLUD

Para os experimentos de combustão foram utilizados resíduos de cocos verdes coletados em comércios e quiosques localizados no Horto do Fonseca e nas praias de Niterói. Os cocos foram ensacados e transportados para o LABPAS, onde foram abertos, limpos e expostos para secagem. As cascas de coco foram secas em ambiente protegido da chuva, mas com circulação de ar natural e exposição solar, por um período aproximado de 30 dias (Fig. 12). Foram utilizados 300 cocos em todo o experimento.

Figura 4. Preparação da biomassa utilizada no experimento de combustão.

a) Casca de coco verde no início da secagem ao natural. b) casca de coco após uma mês da secagem ao natural. Foto de Patrick Gonçalves Matos. Fonte: MATOS (2022).

Os ensaios de combustão foram realizados no Laboratório de Práticas Agrícolas Sustentáveis, entre dezembro de 2021 e março de 2022. Ao todo 5 testes foram realizados com o reator de queima da casca de coco no TLUD. Três dos cinco testes foram realizados alimentando o reator pela metade. Os outros dois testes foram feitos com a ocupando todo o volume do reator (Fig. 13). Como combustível de ignição foram utilizadas galhos e folhas secas recolhidas no entorno do Laboratório.

Figura 5. Preenchimento do reator com biomassa durante os ensaios de combustão

a) Reator alimentado com coco seco até metade de seu volume (experimentos 1 a 3). b) coco seco preenchendo todo o volume do reator (experimentos 4 e 5) Foto de Patrick Gonçalves Matos. Fonte: MATOS (2022).

Para a avaliação das características de operação do forno TLUD, tais como funcionalidade, durabilidade e facilidade de operação foram considerados dados quantitativos (temperatura, umidade) e qualitativos (observações visuais) coletados durante os ensaios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Projeto e construção do sistema

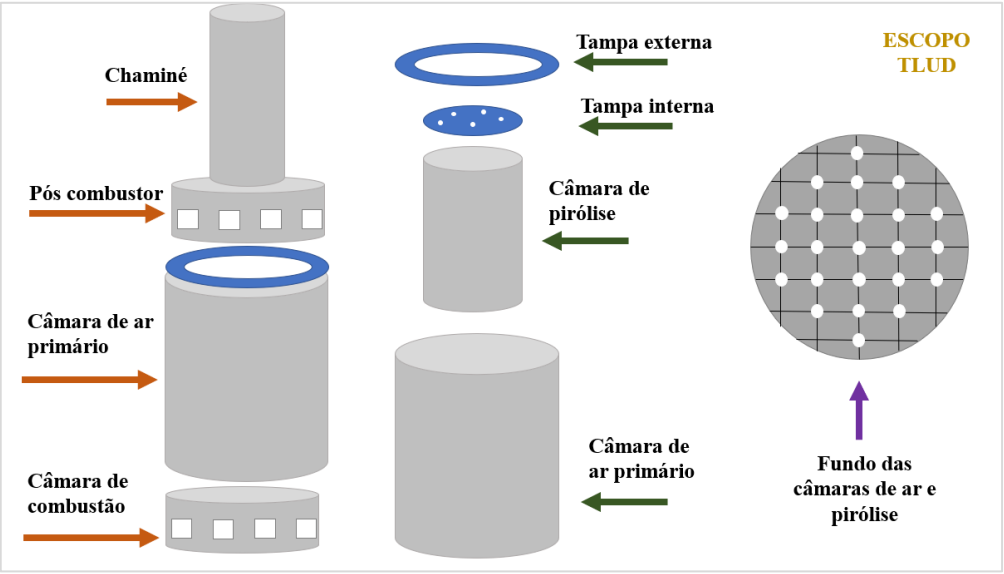
5.1.1 Elaboração do projeto

O projeto do protótipo do TLUD foi desenvolvido com base no projeto de fabricação de forno de biocarvão em pequena escala (Small Scala Biochar Kiln) desenvolvido pela ®CarbonZero Sagl (CARBONZERO, [s.d]) e por Karl J. Frogner, PhD (BIOCHARPROJECT, [s.d]) e adaptado de acordo com materiais disponíveis localmente, que pudessem ser facilmente obtidos por agricultores.

Embora o modelo desenvolvido pela CarbonZero possua câmara de ar primário, combustor e chaminé, a diferença deste para o modelo projetado neste trabalho, o TLUD desenvolvido pela CarbonZero é um forno fixo, construído a partir de tijolos refratários. Já o forno projetado por Frogner, apensar de ser construído com tambores metálicos, não possui câmara de ar primário.

O design do TLUD foi projetado com quatro partes distintas (Figura 4), denominadas Câmara de combustão, Câmara de ar primário, Câmara de pirólise e Pós-combustor. A Câmara de combustão foi projetada para receber o combustível de ignição do processo de pirólise.

Figura 6. Composição do forno de combustão: Adaptado do modelo TLUD.



Fonte: A própria autora

A Câmara de ar primário (câmara externa) foi projetada para ser acoplada à Câmara de combustão e ao Pós-Combustor. Essa Câmara possui a função de receber e circular o ar quente produzido pela queima do combustível de ignição e, consequentemente, transferir o calor para o reator disposto em seu interior. Além disso, a câmera externa serve como uma barreira de proteção do reator, minimizando os impactos das condições climáticas do ambiente externo sobre o processo de pirólise.

A Câmara de pirólise é o reator propriamente dito, onde a biomassa é transformada pelo processo de combustão, em subprodutos sólidos e voláteis. O pós-combustor foi projetada com uma câmara de entrada de entrada de ar e uma chaminé, para expulsão do material volátil produzido no reator.

5.1.2 Fabricação e montagem do forno

Tambores cilíndricos metálicos com tampa removível de 200 L e 120 L foram utilizados na montagem do forno TLUD (Figura 5). Um dos tambores de 200 L foi cortado ao meio, sendo parte a inferior reservada para a montagem da Câmara de combustão e a parte superior para o Pós combustor. O outro tambor de 200 L foi utilizado para a montagem da Câmara de ar primário e o tambor de 120 L foi reservado para a montagem do reator.

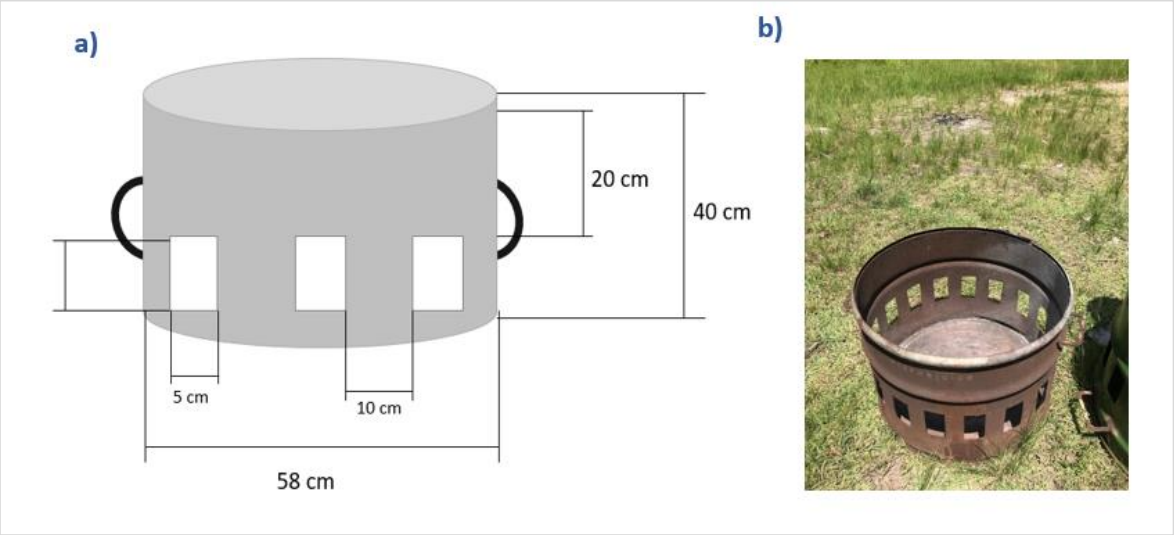
Figura 7. Fabricação e montagem do forno TLUD.

a) Tambores metálicos utilizados na fabricação do forno. b) TLUD montando, já em uso.

Fonte: A própria autora. Foto de Patrick Gonçalves Matos.

Na metade inferior do tambor, reservada para a Câmara de Combustão, foram feitos cortes retangulares de 5x10 cm, conforme detalhado na Figura 6. Os furos funcionam como alimentadores para o combustível de ignição. Duas alças de vergalhão foram soldadas em lados opostos do cilindro para servir como suporte de transporte e junção com a Câmara de ar primário.

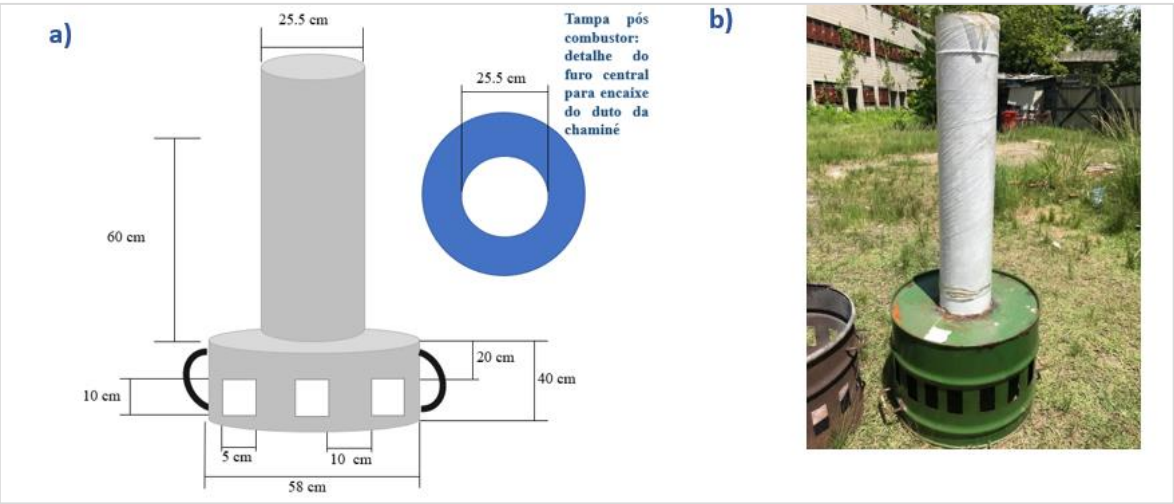
Figura 8. Detalhamento da Câmara de combustão.



a) Detalhamento da planta da Câmara de combustão. b) foto tirada em campo, do combustor construído, já em uso. Foto de Patrick Gonçalves Matos. Fonte: A própria autora

Para a montagem do Pós combustor foi utilizada a outra metade do tambor de 200 L. Ao longo da base circular do Pós combustor foram feitos 6 furos retangulares de 5x10 cm. Na tampa do tambor foi feito um corte circular central para o encaixe do duto da chaminé. Para o duto da chaminé foi utilizado um cano galvanizado de 8 polegadas e 1 m de comprimento, que foi soldado na tampa do Pós combustor (Figura 7).

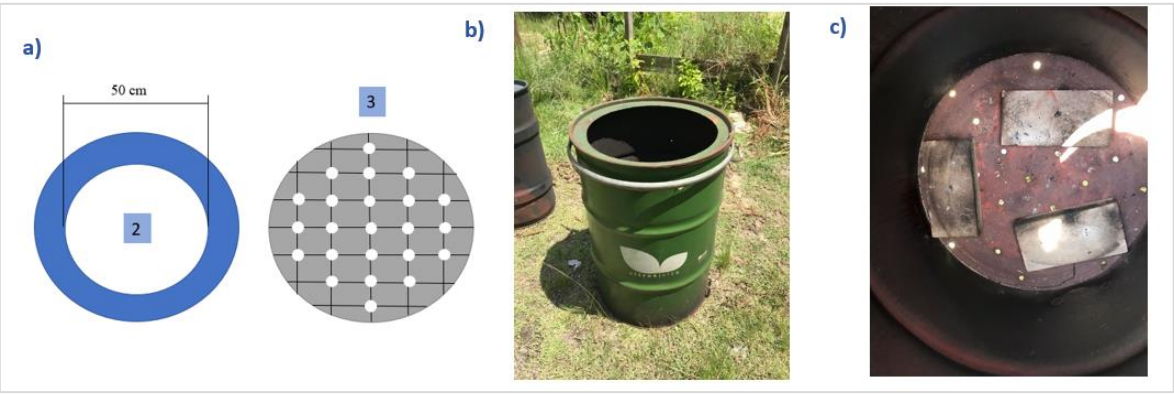
Figura 9. Detalhamento do Pós combustor



a) Detalhamento da planta do Pós combustor. b) foto tirada em campo, do pós-combustor construído, já em uso. Foto de Patrick Gonçalves Matos. Fonte: A própria autora

A Câmara de ar primário foi montada com um tambor de 200 L inteiro. Na parte inferior do tambor foram feitas perfurações circulares de 13 mm de diâmetro, igualmente espaçadas. Os furos têm por função permitir a passagem do ar quente produzido pela queima do combustível de ignição no Pós-combustor (Figura 8). Duas alças de vergalhão foram soldadas na parte inferior e superior da Câmara, para suporte de transporte e junção com o Combustor (parte inferior) e o Pós Combustor (parte superior). Na tampa removível foi retirada uma área circular de 50 cm de diâmetro, medida a partir do centro da tampa. Essa abertura serve para o encaixe do reator.

Figura 10. Detalhamento da Câmara de ar primário.

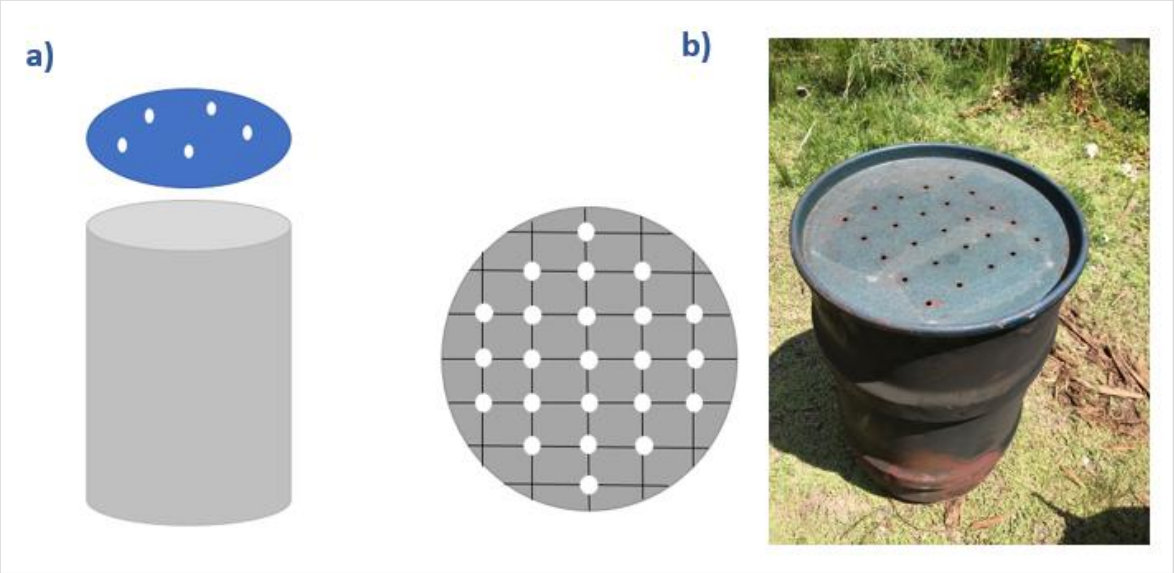


a) Detalhamento da planta da Câmara de ar primário. b) foto tirada em campo, da Câmara de ar primário. c) detalhe dos tijolos refratários colocados no interior da Câmara, para suporte do reator durante o uso. Foto de Patrick Gonçalves Matos. Fonte: A própria autora

A Câmara de pirólise precisa estar elevada da base da Câmara de ar primário durante a queima da biomassa, para permitir a entrada de ar quente no reator, mas a altura do suporte tem que permitir que ambas as câmaras (reator e ar primário) possam ser vedadas juntas. Como estrutura de apoio para a câmara de pirolise foram utilizados três tijolos refratários.

O tambor metálico de 120 L foi utilizado na montagem da Câmara ou reator de pirólise. Da mesma forma que na Câmara de ar primário, na parte inferior do reator foram feitas perfurações circulares de 13 mm de diâmetro, igualmente espaçadas, para permitir a entrada de calor. Na tampa removível foram feitas perfurações circulares com diâmetros de 10 mm, para permitir a saída dos gases voláteis formados durante o processo de combustão da biomassa (Figura 9).

Figura 11. Detalhamento da Câmara de pirólise.



a) Detalhamento da planta da Câmara de pirólise. b) foto tirada em campo, do reator construído, já em uso. Foto de Patrick Gonçalves Matos. Fonte: A própria autora.

A montagem do TLUD no campo é feita por etapas. Primeiramente, a Câmara de ar primário é acoplada à Câmara de combustão. Em seguida os tijolos refratários são colocados no interior da Câmara de ar primário, posicionados de forma triangular. Após, o reator, carregado com a biomassa, é inserido na Câmara de ar primário, encaixado em cima dos tijolos. O reator e a câmara são vedados com suas respectivas tampas e, por fim, o Pós-Combustor é acoplado ao equipamento (Figura 10).

Os encaixes entre as Câmaras de Combustão, ar primário e Pós combustão possuem travas de segurança para garantir o perfeito encaixe entre os equipamentos, bem como a segurança do equipamento, impedindo movimentação e queda durante o processo de combustão. Além disso, para reforçar a segurança na manipulação do equipamento, todas as partes do TLUD são amarradas entre si com fios de aço metálico reforçado. A amarração é feita entre as alças de suporte localizadas nas Câmaras de combustão, ar primário e pós combustão.

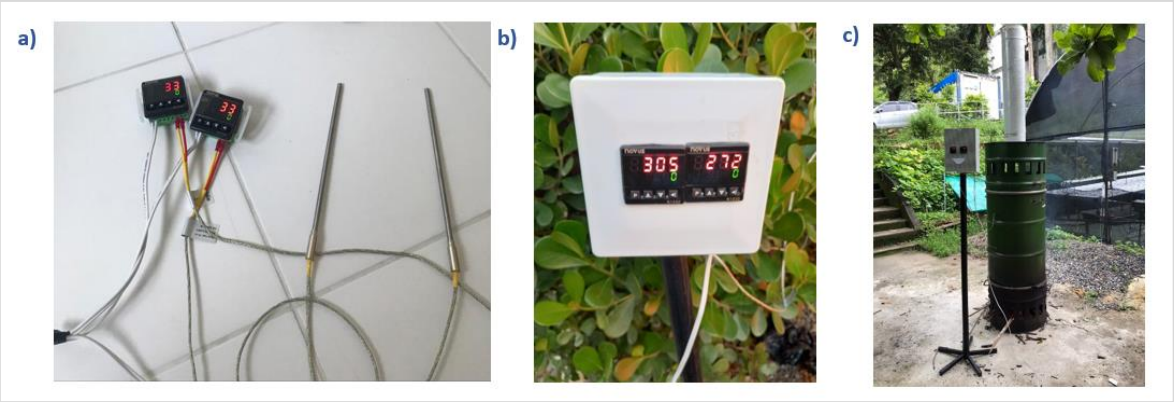
Figura 12. Sequência de montagem do forno TLUD para queima da biomassa.

Fotos de Patrick Gonçalves Matos.

5.1.3 Termopar e Sensores de medição de temperatura

Para a medição da temperatura do forno durante o processo de queima foi utilizado um sistema controlador modelo Novus N1030, que faz o tratamento da leitura gerada pelo sensor termopar e apresenta essa leitura no visor. Para o acompanhamento da temperatura durante a queima foram utilizados dois termopares tipo K, encaixados na parte superior e inferior do reator, através de furos circulares estrategicamente perfurados para o perfeito encaixe dos sensores. O sistema controlador foi acoplado a uma caixa de passagem elétrica, apoiada a uma haste metálica, capaz de suportar temperaturas de até 600°C (Figura 11).

Figura 13. Detalhamento da instrumentação de medição de temperatura.



a) Sistema controlador Novos N1030 e termopar tipo K. b) Detalhe da caixa de passagem e visor de leitura do controlador, indicando as temperaturas superior e inferior do reator durante o uso, respectivamente. c) TLUD montado com o sistema de medição de temperatura. Foto de Patrick Gonçalves Matos. Fonte: A própria autora.

5.2 Custos envolvidos na fabricação do TLUD

Os custos envolvidos na fabricação do modelo TLUD apresentado neste projeto estão detalhados na Tabela 1.

Tabela 1. Custos de fabricação do TLUD a partir do escopo projetado.

Descrição	Valor unitário (R$)	Quantidade	Total (R$)	%
INSUMOS				
Tambor metálico 200 L com tampa removível	90	2	180	11,23
Tambor metálico 120 L com tampa removível	80	1	80	4,99
Duto galvanizado, 8", 1 m	159,9	1	159,9	9,98
Tijolo refratário 23 x 11,5 x 5	4,99	3	14,97	0,93
Vergalhão CA-50 10 mm (3/8´´)	36,9	1	36,9	2,30
Total Custos Insumos			**471,77**	**29,44**
INSTRUMENTAÇÃO				
Sensor termopar tipo K	112,9	2	225,8	14,09
Sistema controlador modelo Novus n1030	247,33	2	494,66	30,87
Caixa de Passagem elétrica	39,99	1	39,99	2,50
Total Custos Instrumentação			**760,45**	**47,46**
SERVIÇOS				
Mão de obra serralheria	200	1	200	12,48
Frete	170	1	170	10,61
Total Custos Serviços			**370**	**23,09**
TOTAL			**1602,22**	**100,00**

Fonte: A própria autora

O custo total da montagem do TLUD foi de R$ 1.602,22. É possível observar que custos com a instrumentação do forno foram os que mais impactaram os custos,

representando quase metade do valor total investido no projeto. Não obstante, considera-se o custo de produção desse modelo de forno bastante viável, principalmente quando comparado a outros tipos de fornos convencionais. Além disso, o TLUD é um forno móvel, pequeno e leve, que pode ser transportado para o local de queima com relativa facilidade, o que facilita a operação e reduz os custos com transporte da biomassa.

5.3 Características operacionais do TLUD

A Tabela 2 apresenta os dados de temperatura e tempo de queima relativos aos cinco ensaios de combustão da casca de coco realizados no TLUD entre os períodos de dezembro de 2021 a março de 2022.

Tabela 2. Dados de temperatura e tempo de queima dos ensaios de combustão da casca de coco.

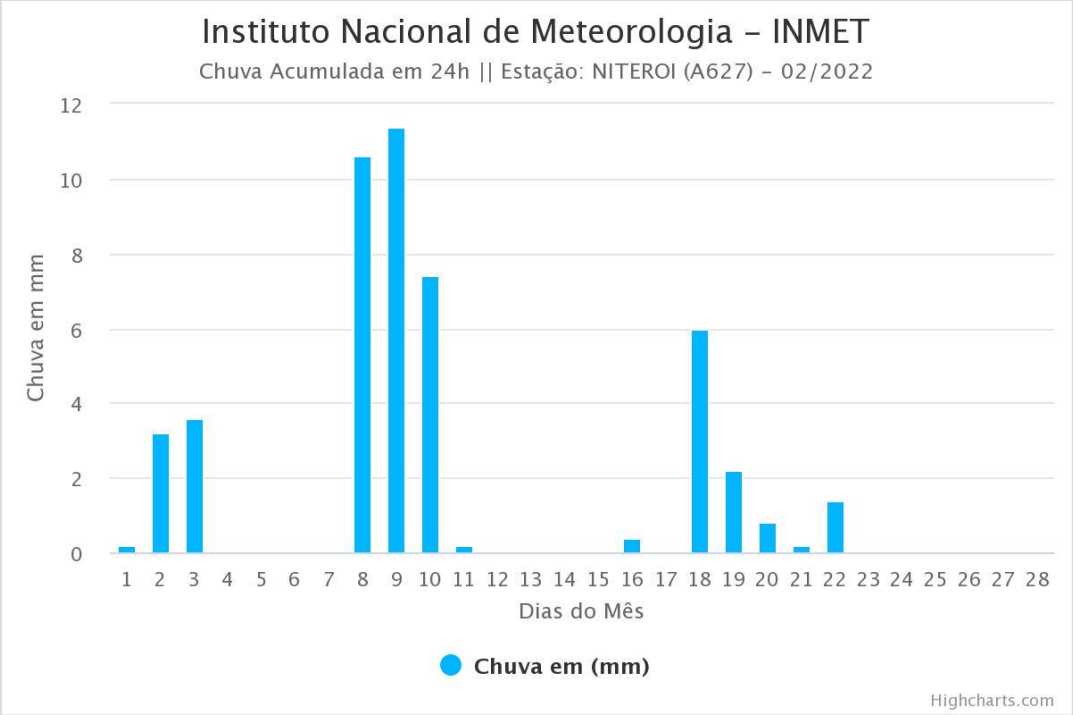
#	Data	Temperatura no reator		Tempo de queima
		Inferior (°C)	Superior (°C)	(minutos)
1	15/12/2021	154	531	130
2	09/02/2022	200	260	210
3	11/02/2022	300	350	220
4	23/02/2022	300	325	180
5	08/03/2022	150	200	180
	Média	**220.8**	**333.2**	**184**

Fonte: Adaptado de MATOS (2022)

O tempo de queima foi acompanhado até que a temperatura fosse considerada ideal para o processo de produção de BC de casca de coco (superior a 300°C). No primeiro ensaio, o fogo do combustor parou de ser alimentado após a temperatura do sensor inferior apresentar 154°C. No experimento 2, o fogo foi alimentado durante as 3 horas e 30 minutos em que o processo foi acompanhado, entretanto a temperatura máxima não alcançou os 300°C nesse período de acompanhamento. Por outro lado, a formação de carvão e cinzas no experimento dois indicou que o processo de pirólise foi bem-sucedido. O tempo médio acompanhado durante a queima da biomassa foi de 186 minutos e a temperatura média de pirólise foi de 332°C.

Durante os experimentos também foi observada a interferência das condições climáticas na operação do forno, sobretudo no experimento dois, quando foi relatado uma grande dificuldade de elevação da temperatura de queima. A maior parte dos experimentos de produção de BC foram realizados em fevereiro de 2022, em períodos chuvosos, conforme mostram os dados coletados na Estação Meteorológica de Niterói (Figura 14).

Figura 14. Dados de precipitação coletados na Estação Niterói (A627), referentes ao mês de fevereiro de 2022.



Fonte: INMET (2022)

Os dias de fevereiro em que foram realizados os experimentos, apresentavam, em média umidade relativa em torno de 88% e temperatura média de 25°C (INMET, 2022). Ademais, o fato de ter chovido nos dias que antecederam os ensaios de queima de BC dificultaram a coleta de galhos secos para alimentar a Câmara de combustão. O uso de material úmido como combustível de ignição contribuiu para o aumento da emissão de fumaça durante o processo de pirólise.

O excesso de umidade no material combustível pode reduzir seu poder calorífico em até 37%, segundo estudos de Nonnenmacher *et al*. (2011). A redução do poder calorífico do combustível de ignição interfere também no processo de pirólise, uma vez que parte do calor produzido é “desperdiçado” para vaporizar a água presente no material. Portanto, o excesso de umidade do material combustível acaba por interferir na transferência de calor da Câmara de combustão para as Câmaras de ar primário e de pirólise, aumentando o tempo de queima e prejudicando a operação do TLUD.

5.4 Análise da eficiência de operação do forno projetado

Os valores referentes a produtividade média de biocarvão de casca de coco produzido no TLUD, de acordo com os dados coletados durante os experimentos realizados pelo aluno de IC Patrick Gonçalves Matos, estão apresentados na Tabela 3.

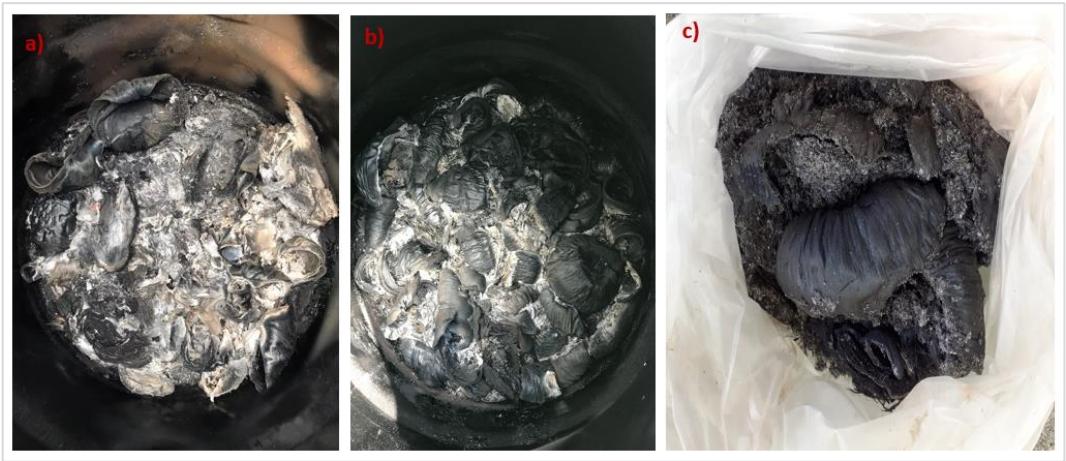
Tabela 3. Dados de produtividade de biocarvão no TLUD.

Descrição	**Unidade**	**Valor**
Ensaios	Unid	5
Cocos frescos utilizados	Unid	300
Massa média coco fresco	Kg	0.9
Massa total biomassa fresca	Kg	270
Teor de umidade	(% b.s.)	12.08
Massa média biomassa seca	Kg	32.62
Massa média BC produzido	Kg	2.5
Rendimento biocarvão	%	7.7

Fonte: Adaptado de MATOS (2022)

De acordo com as observações do aluno de IC, no primeiro ensaio a produção de cinzas foi visualmente maior que a quantidade de *biochar* (Figura15a). Além disso, o volume de BC produzido representou cerca de 1/5 do volume de biomassa inserida no reator no início do processo. Os demais testes mostraram, visualmente, maior proporção de biocarvão gerado em relação às cinzas (Figura 15b). No quinto teste, que foi realizado com o reator completamente cheio, o volume de subproduto sólido resultante da combustão foi cerca de 1/8 do volume do reator. A produção média total de subprodutos sólidos resultantes das cinco queimas de casca de coco foi de carca de 2,5 kg (Figura 15c).

Figura 15. Características visuais dos subprodutos sólidos gerados pela queima da casca de coco no TLUD.



a) Resultados da queima no ensaio 1. b) Resultados da queima no ensaio 5. c) massa total de subprodutos produzidos nos 5 ensaios. Foto de Patrick Gonçalves Matos. Fonte: MATOS (2022).

O volume médio de preenchimento de biomassa seca no pirolisador foi de cerca de 84 litros e o volume final da biomassa carbonizada (entre cinzas e biocarvão) foi de aproximadamente 13 litros, representando um rendimento médio de 8%.

Segundo Winter (2021), os sólidos gerados pela combustão em fornos tipo TLUD devem representar de 10 a 25% do peso da biomassa original, entretanto esses resultados não foram alcançados durante os ensaios promovidos pelo TLUD neste projeto. Além disso, a eficiência média da produção de biocarvão foi inferior aos valores das eficiências (média 14%) encontradas no estudo de Alexandre (2019), que estudou a produção de BC de coco-babão em TLUD. Também foi muito inferior aos rendimentos obtidos por Matias Júnior (2021), na produção de BC de bucha de dendê (média de 29%).

Uma vez que o processo de observação dos ensaios de queima foi essencialmente empírico, é importante salientar a necessidade de uma maior familiarização com as particularidades inerentes à operação do equipamento. Também é importante dizer que os parâmetros, tempo de operação e temperatura do TLUD, foram acompanhados apenas até o ponto em que o processo de pirólise é considerado ideal para a biomassa em estudo (350°C). Entretanto, após a biomassa ser completamente pirolisada, o calor permanece no reator. Assim, é possível que o forno tenha continuado em processo de combustão após o período monitorado, gerando cinzas ao invés de carvão e comprometendo o rendimento final de BC no forno, conforme observado por Imbroisi (2015), em seu estudo.

No que diz respeito à funcionalidade, é possível afirmar, dado os resultados dos cinco testes realizados, que o TLUD projetado foi capaz de completar o processo de pirólise, transformando a biomassa em subprodutos sólidos e voláteis, mesmo com interferências de operação relatadas. Sobre a resistência do material utilizado na construção do forno, observou-se que o TLUD suportou bem as cinco queimas, não apresentando avarias aparentes após ouso, o que pode ser um bom indicativo de durabilidade.

5.5 Sugestões de melhorias

De acordo com os problemas de operacionalidade do TLUD identificados ao longo dos experimentos de queima, sugere-se:

- Analisar as características físico-químicas do biocarvão de coco produzido, visando atestar sua qualidade, em termos de aproveitamento para uso agrícola.

- Promover um rígido controle sobre as variáveis e ruídos do processo de queima de biomassa no TLUD. Variáveis são etapas do processo que podem ser medidas e controladas. Ruídos são variáveis que não podem ser controladas, mas podem ser medidas.

- Variáveis que devem ser medidas durante o processo de queima: volume e/ou peso da biomassa inserida no sistema, teor de umidade da biomassa, volume e/ou peso do biocarvão e cinzas produzidos, temperatura do forno ao longo do processo de queima, volume e/ou peso total do combustível (lenha) utilizado durante a queima, teor de umidade do combustível. Ruídos que devem ser medidos durante o processo: umidade relativa do ar, precipitação, velocidade do ar.

- É desejável que o combustível, assim como a biomassa, apresente um teor de umidade inferior a 10%, para melhor aproveitamento do calor gerado. Uma solução para manter o combustível em condições ideais é promover a secagem dele juntamente com a biomassa e manter ambos em condições ideais de armazenamento.

- O uso de um controlador lógico programável de baixa potência, como o ESP8266, acoplado aos sensores termopar, para registrar as leituras de temperatura. Essas informações podem ser enviadas por wi-fi, o que permitirá o acompanhamento à distância do equipamento e um melhor entendimento do processo de produção de BC. O registro e acompanhamento das informações também são úteis para estimar o tempo total da queima da biomassa.

- O monitoramento do processo em um tempo superior ao momento do início do processo de pirólise (que seria facilitado com o uso do controlado acima citado). Esse monitoramento ajudará a entender, por exemplo, por quanto tempo mais a biomassa segue queimando após o término da pirólise.

- Interromper o processo de queima após o término da pirólise. O ideal é que o forno seja desacoplado logo após a transformação da biomassa em biocarvão, para evitar a formação indesejável de cinzas.

- Propor e implementar soluções para minimizar a interferência das condições climáticas no desempenho do TLUD. Uma possível solução seria a instalação de uma manta isolante entre a Câmara de ar primário e o reator.

- Testar a combustão de diferentes materiais orgânicos para verificar se o desempenho do TLUD, em termos de rendimento de BC, será diferente do que foi obtido na produção de casca de coco.

- Avaliar a emissão de gases durante a queima de BC pelo TLUD. Tal avaliação pode ser feita adaptando-se um lavador de gases ao sistema e servirá como base para estudos e projeções relativos à gases de efeito estufa (GEE) emitidos durante a fabricação do BC x sequestro de carbono pelo solo quando incorporado o biocarvão.

- Avaliar se a produção de carvão a partir do TLUD projetado é viável financeiramente ao agricultor, em termos de rendimento de biocarvão produzido.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O TLUD é um forno artesanal, que pode ser construído com materiais de baixo custo e foi capaz de produzir um carvão de ótima qualidade. Além do custo relativamente baixo, o TLUD projetado foi capaz de transformar a biomassa em biocarvão. Entretanto, a qualidade do BC produzido ainda precisa ser atestada.

O material utilizado na fabricação do TLUD foi resistente ao calor. Apesar de ter aguentado os cinco testes de queima sem avarias aparentes, mais estudos são necessários para estimar o tempo de vida útil do forno.

As condições climáticas (temperatura, umidade e vento) interferem diretamente no desempenho operacional do TLUD. Verificou-se que o clima interfere no desempenho operacional do TLUD operado em campo, sobretudo em condições de precipitação e elevada umidade do ar.

Os dois anos de pandemia vividos no decorrer deste trabalho acabaram por dificultar e até mesmo impossibilitar o andamento deste projeto da maneira como ele foi concebido inicialmente. Mas, de maneira geral, o protótipo mostrou-se uma boa ferramenta para a pirólise de biomassas e pode ser recomendado para que o produtor rural possa fabricar o biocarvão em sua propriedade.

Considerando que, em termos de eficiência de operação, tenha sido observado que as condições climáticas interferem diretamente no desempenho do TLUD, recomenda-se o aperfeiçoamento do protótipo, visando reduzir a interferência dos fatores climáticos no desempenho do forno, bem como melhorar o rendimento de produção de biocarvão Da mesma forma, recomenda-se a continuidade dos estudos com o TLUD, até mesmo com outras biomassas, para melhor entendimento de sua capacidade operacional.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEL, S. *et al*. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. **Geoderma**, v. 202–203, p. 183–191, 2013.

AL-WABEL, M. I. *et al*. Conocarpus biochar as a soil amendment for reducing heavy metal availability and uptake by maize plants. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 22, n. 4, p. 503–511, 2015.

ALEXANDRE, J. W. da S. **Protótipo de forno de baixo custo para produção de biocarvão da biomassa de coco-babão (*Syagrus Cearensis*)**. 2019, 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2019.

ALHO, C. F. B. V. *et al*. Biochar and soil nitrous oxide emissions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 5, p. 722–725, 2012.

ALLING, V. *et al*. The role of biochar in retaining nutrients in amended tropical soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, n. 5, p. 671–680, 2014.

ANDRADE, A. M. de *et al*. Pirólise de resíduos do coco-da-baía (Cocos nucifera Linn) e análise do carvão vegetal. **Revista Árvore**, v. 28, n. 5, p. 707–714, 2004.

ANDRADE, R. G. S. A. *et al*. **Estudo Da Influência Da Temperatura De Pirólise No Biocarvão Obtido a Partir Do Mesocarpo Do Coco (Cocos Nucifera L.)**. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 12, 2017, São Carlos. **Anais** [...] São Carlos: COBEQIC, 2017.

BARONTI, S. *et al*. The biochar option to improve plant yields: first results from some field and pot experiments in Italy. **Italy Journal of Agronomy**, v. 5, n. 1, p. 3–11, 2010.

BECK, D. A.; JOHNSON, G. R.; SPOLEK, G. A. Amending greenroof soil with biochar to affect runoff water quantity and quality. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 8–9, p. 2111–2118, 2011.

BIOCHAR in developing countries. **IBI** - International Biochar Initiative, New York (United States), [s.d]. Disponível em: https://biochar-international.org/biochar-in-developing-countries/. Acesso em: 9 nov. 2020.

BRAINER, M. S. C. P. Produção de coco: o nordeste é destaque nacional. **Caderno Setorial ETENE**, v. 3, n. 61, p. 1–25, 2018.

CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S. de; MAKISHIMA, N. Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 4, p. 533–535, 2002.

CASTILHOS, L. F. F. de. **Dossiê Técnico:** aproveitamento da fibra de coco. [Curitiba]: Instituo de Tecnologia do Paraná- TECPAR, 2011.

CAVALCANTE, R. R. **Efeito da Adição de doses de biocarvão no movimento de íons em colunas de solo.** 2017. 47 f. Monografia (Graduação em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

CHOUDHURY, B. U. et al. Acid drainage from coal mining: Effect on paddy soil and productivity of rice. **Science of the Total Environment**, v. 583, p. 344–351, 2017.

CUI, H. J. *et al*. Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar. **Journal of Soils and Sediments**, v. 11, n. 7, p. 1135–1141, 2011.

CUI, J. *et al*. Interactions between biochar and litter priming: A three-source 14C and δ13C partitioning study. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 104, p. 49–58, 2017a.

CUI, Y. FENG *et al*. Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 5, p. 1064–1074, 2017b.

DEMPSTER, D. N. *et al*. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. **Plant and Soil**, v. 354, n. 1–2, p. 311–324, 2012.

EL-NAGGAR, A. H. et al. Carbon mineralization and nutrient availability in calcareous sandy soils amended with woody waste biochar. **Chemosphere**, v. 138, p. 67–73, 2015.

EL-NAGGAR, A. H. *et al*. Biochar influences soil carbon pools and facilitates interactions with soil: A field investigation. **Land Degradation and Development**, v. 29, n. 7, p. 2162–2171, 2018.

FANG, Y.; SINGH, B. P.; SINGH, B. Temperature sensitivity of biochar and native carbon mineralisation in biochar-amended soils. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 191, p. 158–167, 2014.

FANG, Y.; SINGH, B.; SINGH, B. P. Effect of temperature on biochar priming effects and its stability in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 80, p. 136–145, 2015.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **World Production 2017**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 26 set, 2020.

FENG, Z.; ZHU, L. Impact of biochar on soil N2O emissions under different biochar-carbon/fertilizer-nitrogen ratios at a constant moisture condition on a silt loam soil. **Science of the Total Environment**, v. 584–585, p. 776–782, 2017.

FONSECA, J. F. da; HANISCH, A. L. Cinza de biomassa é um produto eficiente para uso em sistema de produção de cereais em base agroecológica? **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 17, n. 4, p. 454-461, 2018.

FONTES, H. R.; FERREIRA, J. M. S. **A cultura do coco**. Brasilília: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 108 p. (Embrapa Informação Tecnológica, Coleção Plantar, 48).

GASKIN, J. W. *et al*. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. **Agronomy Journal**, v. 102, n. 2, p. 623–633, 2010.

GENESIO, L. *et al*. Surface albedo following biochar application in durum wheat. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 1, 2012.

GONÇALVES, E. C. B. M. **Caracterização de biomassas de macrófitas crassipes e Salvinia auriculata : potencialidade do uso de resíduos de podas de wetlands em processos de termoconversão.** 2019. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos Químicos e Metalúrgicos) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, 2019.

GONZAGA, M. I. S. *et al*. Positive and negative effects of biochar from coconut husks, orange bagasse and pine wood chips on maize (Zea mays L.) growth and nutrition. **Catena**, v. 162, n. October 2016, p. 414–420, 2018.

GRABER, E. R. *et al*. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. **Plant and Soil**, v. 337, n. 1, p. 481–496, 2010.

HANSEN, V. *et al*. The effect of straw and wood gasification biochar on carbon sequestration, selected soil fertility indicators and functional groups in soil: An incubation study. **Geoderma**, v. 269, p. 99–107, 2016.

HAREL, Y. M. *et al*. Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. **Plant and Soil**, v. 357, n. 1, p. 245–257, 2012.

HASS, A. *et al*. Chicken Manure Biochar as Liming and Nutrient Source for Acid Appalachian Soil. **Journal of Environmental Quality**, v. 41, n. 4, p. 1096–1106, 2012.

HERATH, H. M. S. K. *et al*. Experimental evidence for sequestering C with biochar by avoidance of CO2 emissions from original feedstock and protection of native soil organic matter. **GCB Bioenergy**, v. 7, n. 3, p. 512–526, 2015.

HERNANDEZ-SORIANO, M. C. *et al*. Biochar affects carbon composition and stability in soil: A combined spectroscopy-microscopy study. **Scientific Reports**, v. 6, n. October 2015, p. 1–13, 2016.

HUANG, S. *et al*. Dynamic changes of polychlorinated biphenyls (PCBs) degradation and adsorption to biochar as affected by soil organic carbon content. **Chemosphere**, v. 211, p. 120–127, 2018.

IMBROISI, B. de A. **Uso de bambu nativo acreano *Guadua weberbaueri* Pilger para o desenvolvimento de um carvão funcional em um sistema de baixo custo**. 2015, 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia) - Universidade Federal do Acre, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Gráficos diários de Estações Meteorológicas. Disponível em: https://tempo.inmet.gov.br/Graficos/A001. Acesso em 30 set. 2022.

JIANG, X. *et al*. Controls and dynamics of biochar decomposition and soil microbial abundance, composition, and carbon use efficiency during long-term biochar-amended soil incubations. **Biology and Fertility of Soils**, v. 52, n. 1, p. 1–14, 2016.

JONES, D. L. *et al*. Short-term biochar-induced increase in soil CO2 release is both biotically and abiotically mediated. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 8, p. 1723–1731, 2011.

JONES, D. L. *et al*. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 45, p. 113–124, 2012.

JOSEPH, S. *et al*. Biochar increases soil organic carbon, avocado yields and economic return over 4 years of cultivation. **Science of the Total Environment**, v. 724, p. 138153, 2020.

KELLY, C. N. *et al*. Incorporation of Biochar Carbon into Stable Soil Aggregates: The Role of Clay Mineralogy and Other Soil Characteristics. **Pedosphere**, v. 27, n. 4, p. 694–704, 2017.

LABEGALINI, A. **Obtenção de biochar a partir da pirólise rápida de torta de pinhão manso: uso como adsorvente e suporte**. 2013. 117 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Lavras, 2013.

LAIRD, D. *et al*. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, v. 158, n. 3–4, p. 436–442, 2010a.

LAIRD, D. A. *et al*. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. **Geoderma**, v. 158, n. 3–4, p. 443–449, 2010b.

LEHMANN, J. *et al*. Biochar effects on soil biota - A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 9, p. 1812–1836, 2011.

LEITÃO, R. C. *et al*. **Tratamento biológico do líquido da casca do coco-verde**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2010. 125 p. (Embrapa Agroindústria Tropical, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 39).

LIMA, I. da S. **Parâmetros físico-hídricos do solo, lixiviação de nutrientes e desenvolvimento do girassol (Helianthus annuus L) em argissolo amarelo tratado com biocarvão.** 2016. 79 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Sergipe, 2016.

LIU, Y. *et al*. Negative priming effect of three kinds of biochar on the mineralization of native soil organic carbon. **Land Degradation and Development**, v. 29, n. 11, p. 3985–3994, 2018.

LU, N. *et al*. Effect of biochar on soil respiration in the maize growing season after 5 years of consecutive application. **Soil Research**, v. 52, n. 5, p. 505–512, 2014a.

LU, W. *et al*. Biochar suppressed the decomposition of organic carbon in a cultivated sandy loam soil: A negative priming effect. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 76, p. 12–21, 2014b.

LUO, Y. *et al*. Microbial biomass growth, following incorporation of biochars produced at 350 °C or 700 °C, in a silty-clay loam soil of high and low pH. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 57, p. 513–523, 2013.

MAIA, C. M. B. de F. **Produção de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa**. *In*: ENCONTRO BRASILEIRO DE SUBSTÂNCIAS HÚMICAS, 9, 2018, Aracaju.**Anais** [...]. Aracaju: EBSH, 2018.

MALGHANI, S. *et al*. Carbon sequestration potential of hydrothermal carbonization char (hydrochar) in two contrasting soils; results of a 1-year field study. **Biology and Fertility of Soils**, v. 51, n. 1, p. 123–134, 2015.

MARCELINO, M. M.; DE MELO, S. A. B.; TORRES, E. A. Caracterização da biomassa da casca de coco para obtenção de energia. **Bahia Análise & Dados**, v. 27, n. 1, p. 337–355, 2017.

MATIAS JR., M. V. R. **Análise de eficiência de um forno artesanal para produção de biocarvão**. 2021, 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2021.

MATOS, Patrick Gonçalves. **Produção e uso agrícola do biocarvão de fibra de coco**. Relatório Final. Rio de Janeiro: Faperj, 2022.

MATTEDE, H. O que é um termopar? Mundo da Eletríca, Belo Horizonte, 2021. Disponível em: //www.mundodaeletrica.com.br/o-que-e-um-termopar/. Acesso em 29 set. 2022.

McLAUGHLIN, H. **1G Toucan TLUD for biochar production**: Introduction to biochar and TLUD pyrolysis. Alterna Biocarbon Inc, 2010.

MIKULA, K. *et al*. Carbon sequestration in support of the “4 per 1000” initiative using compost and stable biochar from hazelnut shells and sunflower husks. **Processes**, v. 8, n. 7, p. 1–13, 2020.

MIRANDA, M. R. da S. **Investigação da pirólise de biomassas do Cerrado para aplicação à sistemas de gaseificação estagiada**. 2017, 170 f. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília, 2017.

MONTALVAN, R. A. V. **Aspectos ambientais do processo de pirólise lenta de biomassa florestal no contexto da agricultura familiar em Santa Catarina**. 2017, 171 f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

NONNENMACHER, H. *et al*. Análise da influência do teor de umidade no poder calorífico em combustível sólido para geração de vapor d'água. In: SALÃO DE ENSINO E EXTENSÃO, 2011. **Anais** [...], UNISC, 2011.

NOWICKI, L. S. **Uso de tecnologia de redes de sensores sem fio para levantamento do perfil da temperatura em um forno tipo túnel experimental**. 2014, 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos , Universidade de São Paulo, 2014.

OBENG, G. Y. *et al*. Coconut wastes as bioresource for sustainable energy: quantifying wastes, calorific values and emissions in Ghana. **Energies**, v. 13, n. 2178, p. 1-13, 2020.

OLMO, M. *et al*. Changes in soil nutrient availability explain biochar's impact on wheat root development. **Plant and Soil**, v. 399, n. 1–2, p. 333–343, 2016.

OUYANG, W. *et al*. Soil respiration characteristics in different land uses and response of soil organic carbon to biochar addition in high-latitude agricultural area. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 23, n. 3, p. 2279–2287, 2016.

PACHECO; PEREIRA, L.; FABIANO, P. Benefits of Cover Crops in Soybean Plantation in Brazilian Cerrados. **Soybean - Applications and Technology**, 2011.

PANWAR, N. L.; PAWAR, A.; SALVI, B. L. Comprehensive review on production and utilization of biochar. **SN Applied Sciences**, v. 1, n. 2, p. 1–19, 2019.

PEI, J. *et al*. Biochar-induced reductions in the rhizosphere priming effect are weaker under elevated CO2. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 142, n. April 2019, p. 107700, 2020.

PEI, J. *et al*. Biochar aging increased microbial carbon use efficiency but decreased biomass turnover time. **Geoderma**, v. 382, n. July 2020, 2021.

PETTER, F. A. **Biomassa carbonizada como condicionador de solo: aspectos agronômicos e ambientais do seu uso em solos de Cerrado.** 2010. 130 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, 2010.

PETTER, F. A. *et al*. **Biocarvão no solo: aspectos agronômicos e ambientais**. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGROPECUÁRIA SUSTENTÁVEL, 8; INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE AGRICULTURE, 5, 2016. **Anais** [...]. Sinop: SIMBRAS, 2016.

REZENDE, E. I. P. *et al*. Biochar & carbon sequestration. **Revista Virtual de Quimica**, v. 3, n. 5, p. 426–433, 2011.

RITTL, T. F. *et al*. Negative priming of native soil organic carbon mineralization by oilseed biochars of contrasting quality. **European Journal of Soil Science**, v. 66, n. 4, p. 714–721, 2015.

RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais.** Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélites, 2010. 30 p. (Embrapa Monitoramento por Satélites. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 8).

SANDHU, S. S. *et al*. Analyzing the impacts of three types of biochar on soil carbon fractions and physiochemical properties in a corn-soybean rotation. **Chemosphere**, v. 184, p. 473–481, 2017.

SINGH, C. *et al*. The effect of rice husk biochar on soil nutrient status, microbial biomass and paddy productivity of nutrient poor agriculture soils. **Catena**, v. 171, n. April, p. 485–493, 2018.

SMALL scale biochar kiln: Do-it-yourself low temperature biochar kiln. **CarbonZero**, Astano (Switzerland), [s.d]. Disponível em: http://biochar.info/?p=en.small_scale_biochar_kiln. Acesso em 29 set. 2022.

SOUSA, O. L. de. **Tratamento do líquido gerado no beneficiamento da casca de coco verde em**

sistema de lodos ativados. 2007. 115 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, 2007.

TEIXEIRA, P. C. *et al*. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2017. 577 p.

TLUD gassifier with awesome mods by Karl J. Frogner, PhD. **BiocharProject,** Kunghur (Australia), 2011. Disponível em: http://biocharproject.org/charmasters-log/tlud-gassifier-awesome-modifications-karl-frogner-phd/.Acesso em 10 out. 2020.

TRAZZI, P. A. *et al.* Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 875–887, 2018.

WANG, D. *et al.* Impact of biochar amendment on soil water soluble carbon in the context of extreme hydrological events. **Chemosphere**, v. 160, p. 287–292, 2016.

WANG, X. *et al*. Characteristics of maize biochar with different pyrolysis temperatures and its effects on organic carbon, nitrogen and enzymatic activities after addition to fluvo-aquic soil. **Science of the Total Environment**, v. 538, p. 137–144, 2015.

WINTER, Julien. Cookstove-biochar ecosystems for a clean cooking and soil restoration in Bangladesh. Bangladesh Biochar Initiative, 26 Jul. 2021. Disponível em: https://panorama.solutions/en/solution/cookstove-biochar-ecosystems-clean-cooking-and-soil-restoration-bangladesh. Acesso em: 29 set. 2022.

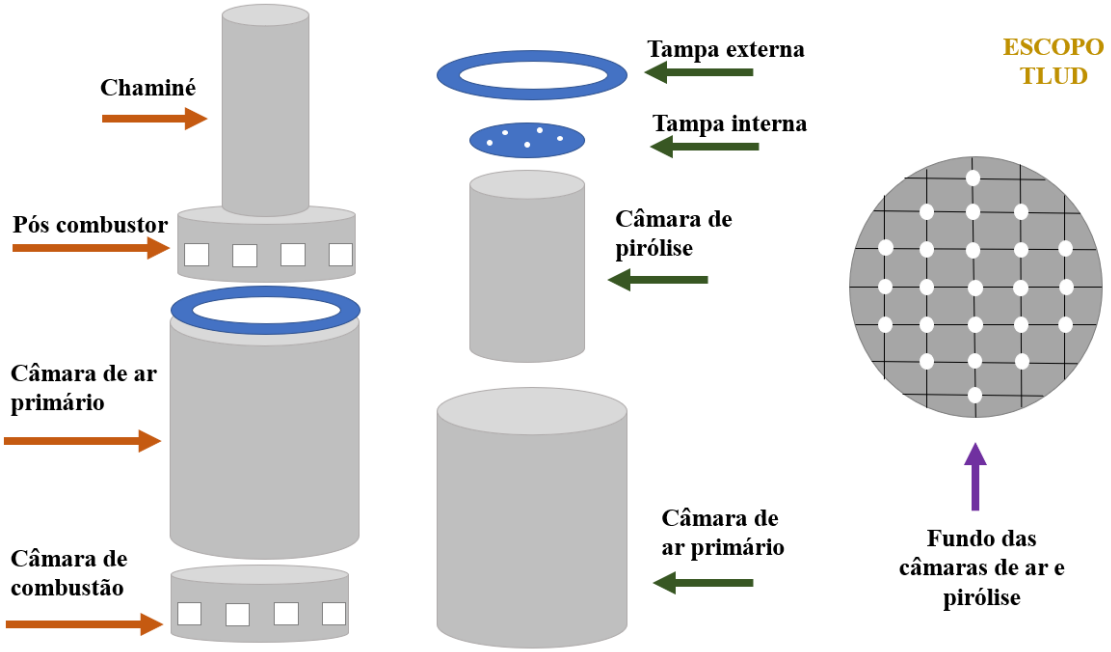
YU, L. *et al*. Effects of biochar application on soil methane emission at different soil moisture levels. **Biology and Fertility of Soils**, v. 49, n. 2, p. 119–128, 2013.

ZHAO, R.; COLES, N.; WU, J. Soil carbon mineralization following biochar addition associated with external nitrogen. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 75, n. 4, p. 465–471, 2015.

ZIMMERMAN, A. R.; GAO, B.; AHN, M. Y. Positive and negative carbon mineralization priming effects among a variety of biochar-amended soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 43, n. 6, p. 1169–1179, 2011.

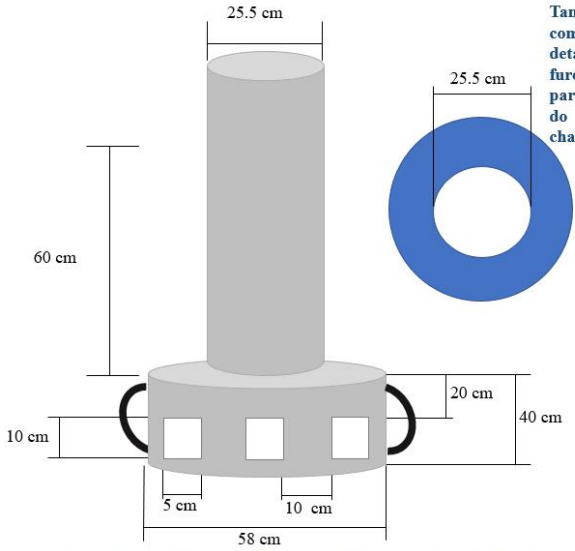
8. ANEXOS

8.1. Escopo do projeto de fabricação do forno TLUD



Pós combustor

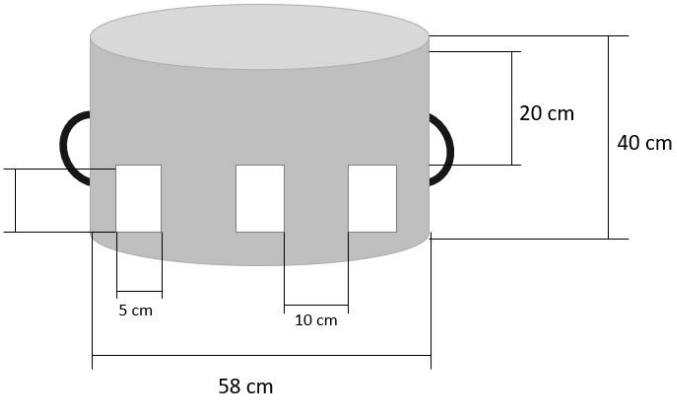
1. Usar sobras do tambor cortado para fazer a tampa da chaminé. Ela deve ser soldada de forma que dê para controlar a abertura.
2. Tampa do pós combustor. O duto da chaminé deve ser soldado na tampa.
3. Alça metálica soldada.



Tampa pós combustor: detalhe do furo central para encaixe do duto da chaminé

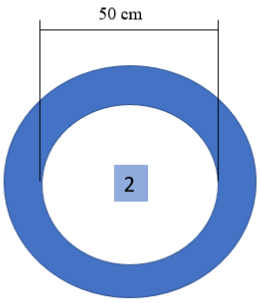
Pós combustor: Usar a parte superior de um tambor de 200 litros cortado ao meio, sentido do comprimento (cada metade com 45 cm). Lixar bem as bordas cortadas. Os furos do pós combustor são quadrados de 5x10 cm, com cerca de 10 cm entre eles. São 6 furos no total (3 em cada face/lado).

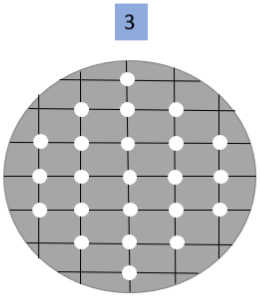
Câmara de combustão

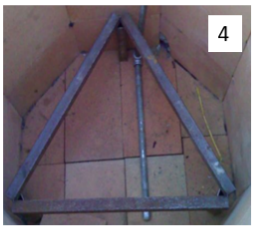


Usar a parte inferior do tambor cortado. Lixar bem as bordas cortadas. Os furos do pós combustor são cortes de 5x10 cm, com cerca de 10 cm entre eles. São 6 furos no total (3 em cada face). Soldar alças metálicas para o transporte.

Câmera de ar primário

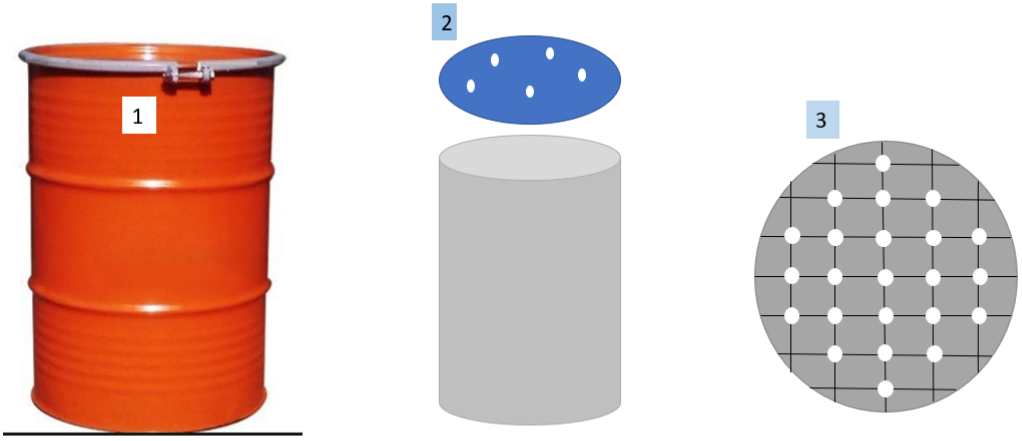


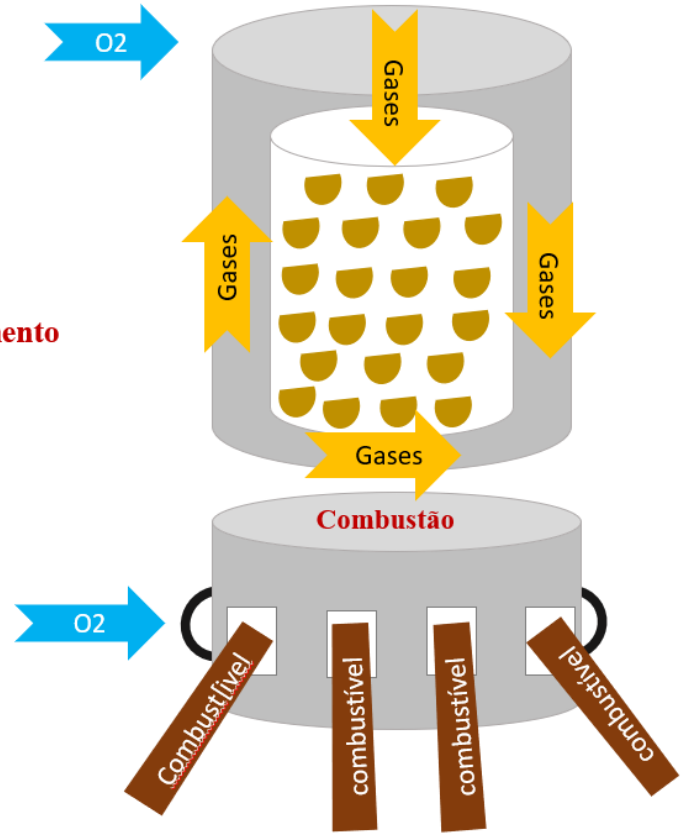




1. **Tambor de 200 litros com tampa removível. (58 cm diâmetro x 90 cm comprimento)**
2. **Tampa da câmera de ar primário**: A tampa da câmera de ar deve ser um anel circular, com abertura interna de 50 cm de diâmetro. Marcar o centro da tampa. A partir do centro da tampa, marcar uma área circular de 50 cm de diâmetro. Retirar essa área circular da tampa do tambor e lixar para dar acabamento.
3. **Detalhe da parte inferior do tambor.** Deve-se fazer linhas de grade de mesma dimensão e na junção delas, fazer os furos. Cada furo com cerca de 13 mm de diâmetro. São aproximadamente 48 furos.
4. **Estrutura de apoio para a câmera de pirólise**: estrutura triangular de aço, com base de altura máxima de 5-7 cm (O tambor interno tem que ficar um pouco elevado, para garantir a entrada de ar quente, mas a altura do suporte tem que permitir que o tambor interno e externo possam ser vedados. Outra opção para o suporte é montar uma malha de grade, com vergalhão, e soldar na altura especificada (Medir a altura com o tambor interno).

Câmera de pirólise



1. **Tambor de120 litros com tampa removível. (47x 83 cm)**
2. **Tampa da câmera de combustão**: Deve-se fazer linhas de grade de mesma dimensão e na junção delas, fazer os furos. Cada furo com cerca de 8-10 mm de diâmetro.
3. **Detalhe da parte inferior do tambor.** Deve-se fazer linhas de grade de mesma dimensão e na junção delas, fazer os furos. Cada furo com cerca de 13 mm de diâmetro.

Funcionamento