

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Instituto de Ciências Agrárias**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais**

Rafael dos Santos Figueiredo

**FLORESTA 4.0: Automação e Supervisão do Processo de  
Carbonização da Madeira**

**Montes Claros**  
**2023**

Rafael dos Santos Figueiredo

**FLORESTA 4.0: Automação e Supervisão do Processo de  
Carbonização da Madeira**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Stanley Schettino.

Coorientador: Edy Eime Baraúna.

Coorientador: Fernando Colen.

**Montes Claros**

**2023**

Figueiredo, Rafael dos Santos.

F475f Floresta 4.0 [manuscrito]: automação e supervisão do processo de carbonização da  
2023 madeira / Rafael dos Santos Figueiredo. Montes Claros, 2023.  
42 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Ciências Florestais.  
Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Stanley Schettino

Banca examinadora: Edy Eime Pereira Baraúna, Maria Fernanda Lousada Antunes,  
Luciano José Minette.

Inclui referências: f. 36-38

1. Automação industrial -- Teses. 2. Carvão vegetal -- Teses. 3. Carbonização --  
Teses. 3. Recursos naturais renováveis -- Teses. I. Schettino, Stanley . II. Universidade  
Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 630

## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 21 dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e três, às 14:00 horas, sob a Presidência do Professor Stanley Schettino, D. Sc. (Orientador – UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Edy Eime Pereira Baraúna, D. Sc. (UFMG/ICA), Maria Fernanda Lousada Antunes, D. Sc. (UFMG/ICA) e Luciano José Minette, D. Sc. (UFV), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de Defesa de Dissertação de **Rafael dos Santos Figueiredo**, aluno do Curso de Mestrado em Ciências Florestais. Após a avaliação do referido aluno, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa da Dissertação intitulada: “**Floresta 4.0: automação e supervisão do processo de carbonização da madeira**”, sendo o aluno considerado **APROVADO**. E, para constar, eu, Professor Stanley Schettino, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: O aluno somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 74 do regulamento do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, conforme apresentado a seguir:

**Art. 74 – Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do colegiado do Curso, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação, no prazo de 60 (sessenta) dias.**

Montes Claros, 21 de março de 2023.

---

Stanley Schettino  
Orientador

---

Edy Eime Pereira Baraúna  
Membro

---

Maria Fernanda Lousada Antunes  
Membro

---

Luciano José Minette  
Membro

Dedico este Trabalho à minha Família, sobretudo aos meus Pais por contribuírem com a minha evolução; e a todos que acreditam no poder transformador do conhecimento e usam este mérito para transformar a existência.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Universidade Federal de Minas Gerais pela experiência enriquecedora. No âmbito do ensino, agradeço aos docentes, dos quais convivi durante o período do Mestrado, pelo conhecimento compartilhado.

No âmbito da Pesquisa, sou grato pelos ensinamentos, apoio e orientação do professor Stanley, como também da coorientação dos professores Edy Baraúna e Fernando Colen, ao longo do Mestrado, agradeço os responsáveis pelos Laboratórios de Física, Mecânica e em especial do Laboratório de Marcenaria, Serraria e Produção de Energia pela colaboração assídua no ICA/UFMG. A sinergia envolvida possibilitou superar os desafios do Mestrado. No âmbito da extensão, agradeço o Professor Orientador Stanley pelo incentivo na criação de conteúdo para disseminação da ciência.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG, pela oferta de bolsa no decorrer do Mestrado. Agradeço também o recurso destinado e investido, referente ao Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD, no qual proporcionou a prototipagem do então Projeto de Dissertação: “Floresta 4.0: Automação e Supervisão do Processo de Carbonização da Madeira”.

“O homem tem diante de si um futuro grandioso, que superará seu grandioso passado”.

*Erich Von Däniken*

## RESUMO

As tecnologias no cenário atual das indústrias permitem sofisticar os meios de produção, digitalizar e automatizar cada vez mais as atividades, otimizar as operações e gerenciar os recursos em tomadas de decisão. Embora a era digital esteja criando paradigmas, um dos desafios existentes, mundialmente, é o consumo de energia para se produzir. Com a sobrecarga do meio ambiente, pelo uso excessivo de energia não renovável, os impactos negativos tendem a colapsar a sociedade. Neste contexto, as fontes de energias renováveis estimulam estudos para viabilizar o uso na cadeia de produção das indústrias. No Brasil, o carvão vegetal tem sido utilizado no abastecimento da produção do setor siderúrgico. No entanto, os meios para obter essa matéria-prima são atrasados, sendo geralmente com uso de fornos rudimentares e controle do processo manual da carbonização da madeira. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo automatizar o processo de produção de carvão vegetal em fornos do tipo Fornos-Fornalha. Para tal, foram desenvolvidos dois protótipos de baixo custo, para controlar remotamente a vazão de entrada de ar para forno de carbonização. Faz-se o uso da linguagem de programação *Python*<sup>TM</sup> e os *hardwares Raspberry Pi* e *Arduino*, com o uso do sensor Termopar do tipo K, sendo este instalado no teto de um dos fornos (modelo Fornos-Fornalha) do Instituto de Ciências Agrárias ICA-UFMG. Após a construção dos componentes, para controle de vazão e aquisição de dados da temperatura, foi realizado a carbonização da madeira. Posteriormente, foi desenvolvido um sistema de supervisionamento com uso da plataforma *ThingSpeak*<sup>TM</sup> com compartilhamento e armazenamento de dados na nuvem, para acesso das informações do processo de produção do carvão vegetal, em tempo real; e um controle remoto de acionamento dos protótipos. Os dados de temperatura foram submetidos ao teste-t, para análise e comparação dos dados. Foram colhidas duas amostras da produção, sendo uma obtida do carvão produzido de forma convencional e a outra do carvão produzido após a implementação dos protótipos. Ambas foram analisadas em relação aos parâmetros de densidade relativa aparente, densidade relativa verdadeira e porosidade e os resultados comparados estatisticamente. A análise gráfica dos dados de temperatura, mostrou superioridade do método desenvolvido, o qual atingiu determinadas fases de carbonização em menos tempo, além de manter a temperatura alta durante o processo. O teste revelou possuir diferença estatística entre dos parâmetros das amostras de temperatura da carbonização de cada método. Com o aprimoramento das tecnologias aplicadas, na produção do carvão vegetal, é possível atingir uma padronização satisfatória e rendimento de carvão vegetal superior aos métodos convencionais. As tecnologias envolvidas promovem um rearranjo da dinâmica de operação, possibilitando funções automáticas na produção do carvão vegetal e reduzindo a exposição dos trabalhadores aos riscos ocupacionais envolvidos nos processos produtivos da carbonização.

**Palavras-chave:** Energia da Madeira. Automatização. *Internet* das coisas. Obtenção de carbono.

## ABSTRACT

The technologies in the current scenario of industries allow to sophisticate the means of production, automate activities, optimize operations and manage resources in decision making. Although the digital age is creating paradigms, one of the existing challenges worldwide is energy consumption to produce. With the overload of the environment, due to the excessive use of non-renewable energy, the negative impacts tend to collapse society. In this context, renewable energy sources stimulate studies to enable their use in the industrial production chain. In Brazil, charcoal has been used to supply the production of the steel sector. However, the means to obtain this raw material are behind time, being usually with the use of rudimentary ovens and control of the manual process of wood carbonization. Given the above, this work aimed to automate the charcoal production process in ovens of the Ovens-Furnace type. To this end, they were developed two low-cost prototypes to remotely control the air intake leak to the carbonization oven. It is used the Python™ programming language and the Raspberry PI and Arduino hardware, with the use of the K-type Thermocouple sensor, being installed on the roof of the oven (Ovens-Furnace model) of the Instituto de Ciências Agrárias ICA-UFMG. After building the components, for flow control and temperature data acquisition, it was carried out the wood charred. Subsequently, a supervision system was developed using the ThingSpeak™ platform with sharing and storage of data in the cloud, for access to information on the charcoal production process, in real time, and remote control of the activation of the prototypes. Temperature data were submitted to the t-test for data analysis and comparison. They were taken two production samples, being one obtained from charcoal produced in a conventional way and the other from charcoal produced after the implementation of the prototypes. Both were analyzed in relation to apparent relative density, true relative density and porosity parameters, and the results were statistically compared. The analysis of the temperature data showed the superiority of the developed method, which reached certain stages of carbonization in less time, in addition to maintaining a high temperature during the process. The t-test revealed a statistical difference between the parameters of the carbonization temperature samples of each method. With the improvement of the applied technologies it is possible to reach a satisfactory standardization and charcoal yield superior to the conventional methods. The technologies involved promote a rearrangement of the operating dynamics, enabling automatic functions in charcoal production and reducing workers' exposure to occupational hazards involved in the production processes of carbonization.

**Key words:** Energy from Wood. Automatization. Internet of things. Obtaining carbon.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Tipos de Fornos para Carbonização da Madeira.....	17
Figura 2– Sistema Fornos-Fornalha.....	18
Figura 3– Identificação de cada elemento de controle do Forno de carbonização.....	24
Figura 4– Modelo 3D do Protótipo desenvolvido para implementação.....	26
Figura 5– Funcionamento do sistema de acionamento remoto dos protótipos.....	27
Figura 6– Funcionamento do sistema de aquisição de dados (IoT).....	28
Figura 7– Procedimentos do teste de Densidade Relativa Aparente.....	28
Figura 8– Procedimentos do teste de Densidade Relativa Verdadeira.....	29
Quadro 1– Instruções para operação do processo da Carbonização da madeira.....	29
Gráfico 1– Temperatura em relação ao tempo de carbonização de cada método.....	31
Gráfico 2– Temperatura interna do forno em relação ao tempo de processo.....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Período de uso do protótipo em teste.....	26
Tabela 2– Tempo de carbonização em relação as Fases do processo.....	32
Tabela 3– Resultado da análise da Densidade Relativa Aparente.....	32
Tabela 4– Resultado da análise da Densidade Relativa Verdadeira.....	32
Tabela 5– Resultado da análise de Porosidade.....	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

cm	Centímetros.
g	Gramas.
h	Horas.
H <sub>a</sub>	Hipótese.
H <sub>0</sub>	Hipótese Alternativa.
IoT	Internet das Coisas (Internet of thing).
Kg	Quilograma.
m	Metros.
Mc	Métodos Convencional (Relacionado ao tipo de carbonização).
Me	Método Empregado (Relacionado ao tipo de carbonização).
min	Minutos.
mesh	Número de Abertura por Polegada.
ml	Mililitros.
mm	Milímetros.
MSDs	Distúrbios Musculoesqueléticos.
PVC	Policloreto de Vinila.
VANTs	Veículos Aéreos não Tripulados.
°C	Graus Celsius.

## LISTA DE NOTAÇÕES OU SÍMBOLOS

™ Marca Comercial

% Por cento

## SUMÁRIO

1. <b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
2. <b>OBJETIVOS</b> .....	16
2.1. Objetivo Geral.....	16
2.2. Objetivos Específicos .....	16
3. <b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	17
3.1. Fornos de Carbonização .....	17
3.1.1. Dependências Envolvidas na Produção do Carvão Vegetal.....	17
3.1.2. Tecnologias Atribuídas na Produção do Carvão Vegetal no cenário atual.....	18
3.2. Produção do Carvão vegetal .....	18
3.2.1. Análise Qualitativa do Carvão vegetal .....	19
3.2.2. Aplicações do Carvão vegetal.....	19
3.3. Floresta 4.0.....	20
3.3.1. Robótica.....	20
3.3.2. Automação.....	20
3.3.3. Sistemas IoT.....	21
3.3.4. Sistemas Ciberfísicos .....	21
3.4. Ergonomia .....	21
3.5. Normas Regulamentadoras de Trabalho NR-17.....	22
4. <b>ARTIGO</b> .....	23
4.1. Artigo 1 – Desenvolvimento e Implementação de um Protótipo para Redução do Tempo de Carbonização da Madeira em Sistemas Fornos-Fornalha.....	23
4.2. <b>INTRODUÇÃO</b> .....	24
4.3. <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	25
4.3.1. Local e coleta de dados para estudo .....	25
4.3.2. Implementação do protótipo na carbonização .....	26
4.3.3. Sistema de acionamento remoto do protótipo.....	27
4.3.4. Sistema de aquisição e compartilhamento dos dados .....	27
4.3.5. Estudo do carvão vegetal .....	28
4.3.6. Análises dos dados .....	29
4.4. <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	30
5. <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	35
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	36
<b>ANEXOS</b> .....	39

## 1. INTRODUÇÃO

O domínio tecnológico atual permite moldar o comportamento da sociedade, contribuindo diretamente com a criação de novos paradigmas e, no cenário das indústrias, mostra-se iminente o surgimento de uma nova revolução industrial. A ascensão da “Indústria 4.0” e suas tecnologias, já presentes em outros setores, e a tendência de modernização dos processos e operações do setor florestal, concebem o conceito de “Floresta 4.0”.

Os avanços tecnológicos em *hardware* e *software* aumentaram o desempenho de retenção, processamento e transmissão de dados, promovendo a disseminação dessas tecnologias e, conseqüentemente, a redução dos custos de aquisição e implementação, viabilizando os investimentos dessa natureza. Várias publicações estão discutindo o potencial da “Indústria 4.0” para o setor florestal e como podem se beneficiar deste desenvolvimento (MÜLLER; JAEGER; HANEWILKE, 2019).

Embora a tecnologia seja um recurso estratégico para as indústrias, mantendo-as competitivas no mercado, um dos desafios globais é o consumo energético para a realização de suas produções. Neste contexto, as fontes de energias limpas tornam-se mais evidentes para o estudo e desenvolvimento de soluções disruptivas, com a finalidade de viabilizar a produção por meios sustentáveis.

Tratando-se de produção limpa, as florestas plantadas ganham destaque pelo papel importante na conservação do meio ambiente e na produção sustentável, servindo de matéria-prima alternativa para suprir demandas energéticas, como a biomassa e o carvão vegetal, podendo ser amplamente aplicadas na indústria (NARYANTO et al., 2020).

Produtos de base florestal têm aquecido a economia brasileira (MACHADO et al., 2020), considerando que o país possui um grande potencial de produção, tendo em vista seu vasto território e as condições climáticas favoráveis para o rápido desenvolvimento florestal da *Eucalyptus spp* (RODRIGUES e BRAGHINI, 2019), uma das principais fontes de madeira para a produção do carvão vegetal. Além disso, atualmente, Minas Gerais é o maior estado produtor florestal do país, detendo 24% das plantações de eucalipto (RIBEIRO et al., 2020).

Embora seja favorável à difusão de energias limpas derivadas das florestas plantadas, com pujante demanda por inovações que reduzam os impactos ambientais e otimizam as atividades de carvoejamento (GOMES et al., 2020), o cenário de produção de carvão vegetal no Brasil ainda é precário, o que torna as atividades arriscadas para o operador de fornos e desestimula todo o engajamento para essa produção. No setor florestal, há um cenário no qual a mão de obra é cada vez mais escassa (MACHADO et al., 2020), e algumas atividades são realizadas de forma manual, como o transporte da madeira para o abastecimento dos fornos, a aferição de temperatura e a abertura do fluxo de ar para o controle da carbonização da madeira, mesmo no contexto de modelos de fornos mais avançados.

A temperatura e o tempo total de carbonização são relevantes, pois essas variáveis influenciam diretamente na qualidade do carvão vegetal, podendo surgir atijo em processos com baixas temperaturas ou a incineração do carvão pelo excesso de tempo de produção, agravados com o desbalanceamento do processo (SILVA et al., 2020). A precisão no controle das variáveis relacionadas ao processo de carbonização da madeira, demanda a necessidade de independência de mão de obra e do uso de

tecnologias para garantir o melhor controle do processo. Implementar sistemas que possam automatizar e controlar a carbonização, neste sentido, reduziria os erros e o tempo de produção, controlando, de forma autônoma, as variáveis envolvidas, dispensando as intervenções humanas.

Entende-se que implementar uma automação de processos na prática da carbonização da madeira vai empregar maior padronização e eficiência na produção do carvão vegetal, bem como evitar a insalubridade dessa operação, aplicando os conceitos presentes na “Indústria 4.0”. A integração de tecnologias como a *Internet of Things* (IoT - Internet das Coisas), junto a plataformas de supervisão e acionamentos remotos, pode possibilitar um melhor controle da produção, além do fornecimento de dados do processo em tempo real, a partir de sistemas embarcados acessíveis e adaptativos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Automatizar o sistema de aquisição de dados de temperatura para o processo de carbonização da madeira em Fornos-Fornalha.

### **2.2. Objetivos Específicos**

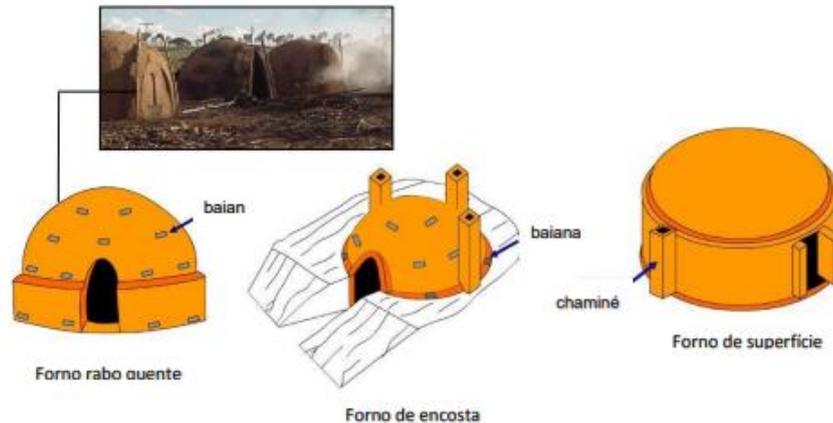
- Desenvolver sistema de aquisição de dados de temperatura.
- Implementar sistema de *Internet* das Coisas para a supervisão de dados.
- Construir protótipo de ventilação.
- Embarcar sistema para acionamento remoto do protótipo.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. Fornos de Carbonização

Na produção de carvão vegetal, a principal ferramenta para o desenvolvimento desse produto são os fornos de carbonização. Dos fornos de carbonização (Figura 1), Ribeiro et al., (2020) destacam três tipos que são comumente utilizados na prática, sendo os fornos de rabo-quente, os de encosta e de superfície (circular). Todos são exemplos de fornos considerados rudimentares.

Figura 1. Tipos de Fornos para Carbonização da Madeira.



Fonte: SANTI; GONÇALVES, 2019.

Esses sistemas de fornos rudimentares possuem características que desfavorecem a produção de carvão vegetal porque empregam um rendimento gravimétrico reduzido, uma maior emissão de gases de efeito estufa, e um menor controle do processo de carbonização (RIBEIRO et al., 2020) – fatores que degradam o meio ambiente e tornam o local insalubre para os seres humanos. Tais condições também são agravadas quando se considera produzir com maior número de fornos para atender a uma larga escala de produção.

##### 3.1.1. Dependências Envolvidas na Produção do Carvão Vegetal

Oliveira et al. (2013) afirmam que o carvão vegetal é dependente da tecnologia de conversão, ou seja, do tipo de forno a ser utilizado no processo; da mão de obra empregada, que necessita de instruções específicas para eventuais intervenções; e das características da madeira utilizada nos processos de carbonização.

Ainda em relação a essa questão tecnológica de conversão da madeira em carvão vegetal, a produção brasileira é, em grande parte, realizada em fornos rudimentares de alvenaria, com controle empírico da carbonização (OLIVEIRA et al., 2013). Sendo assim, substituir esses sistemas rudimentares pelos tecnológicos é um desafio do setor, dadas as peculiaridades inerentes ao processo, como a necessidade de energia elétrica e de acesso à *internet* nas frentes de carvoejamento, o que poderia inibir sua adoção por pequenos e médios produtores (SCHETTINI et al., 2021).

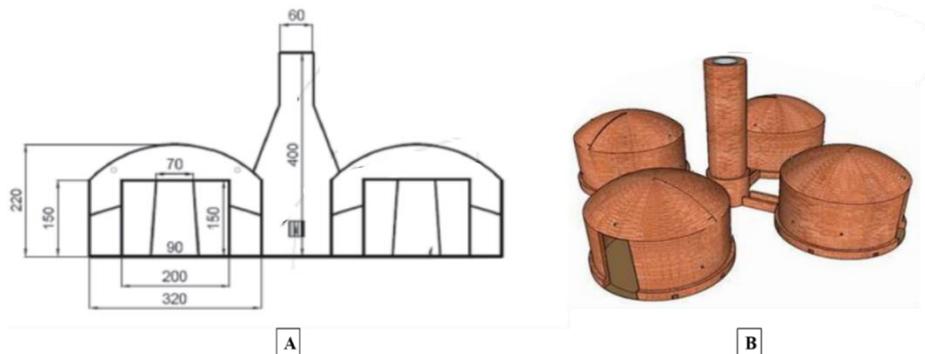
Em termos de avaliações objetivas, envolvidas com o uso de fornos rudimentares, é possível destacar, além do baixo rendimento gravimétrico, os possíveis impactos sociais, econômicos e ambientais

por consequência da carência tecnológica na produção de carvão vegetal (OLIVEIRA et al., 2013).

### 3.1.2. Tecnologias Atribuídas na Produção do Carvão Vegetal no cenário atual

Ao contrário desses fornos tradicionais que usam processos subjetivos para controlar a carbonização, com o uso da observação da cor da fumaça e a sensibilidade da temperatura externa da parede do forno ao toque, o sistema Fornos-Fornalha (Figura 2), desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa - UFV, apresenta curvas de carbonização definidas, com medições de temperatura por pirometria, além de possuir fornalha para queima dos gases de carbonização (RIBEIRO et al., 2020). Assim, este modelo sustentável proporciona também obtenção de coprodutos, derivados do carvão vegetal, como o licor pirolenhoso e o alcatrão, bem como o aproveitamento da energia térmica (OLIVEIRA et al., 2013).

Figura 2 – Sistema Fornos-Fornalha.



Vista frontal do sistema (A), medidas em cm. Modelo 3D do sistema forno-fornalha usado em propriedades rurais (B).

Fonte: OLIVEIRA et al., 2013; SCHETTINI et al., 2021.

Uma das alternativas mais interessantes, para a produção do carvão vegetal atualmente, tem sido o uso de modelos com combustão dos gases em fornaldas, como o sistema Fornos-Fornalha (OLIVEIRA et al., 2013). Este tipo de forno, para uso na carbonização da madeira, proporciona melhores condições de trabalho e a obtenção da energia térmica. Desde modo, a energia térmica obtida pode ser aproveitada para secar a madeira, com a integração de um sistema que possa distribuir para uma plataforma de secagem compatível.

## 3.2. Produção do Carvão vegetal

A produção de carvão vegetal requer um local relativamente nivelado, sob o qual a pilha de madeira (uma pilha em camadas de madeiras temperada) é construída para o abastecimento dos fornos (POWELL; WHEELER; BATT, 2021). Essa característica se faz relevante principalmente quando se produz carvão vegetal em larga escala, favorecendo a logística envolvida. Conforme observado na literatura e em relação ao processo de carbonização, Powell; Wheeler; Batt, (2021) explicam que, a transformação da madeira em carvão vegetal é dividida em três fases: (i) secagem (quando a umidade é removida da pilha de madeira); (ii) pirólise (a decomposição térmica da madeira para formar carvão e subprodutos consistindo de gases voláteis, bem como o alcatrão, líquidos ácidos e cinzas) e (iii) resfriamento do carvão após o processo.

Powell; Wheeler; Batt (2021) também ressaltam que no processo de carbonização, a entrada de oxigênio precisa ser limitada de tal modo, que o controle adequado evite a combustão descontrolada. As condições da matéria-prima a ser utilizada no processo de carbonização também são um ponto relevante a ser considerado, pois a alta umidade tem um impacto negativo na taxa de aquecimento interno da madeira, uma vez que o calor latente é necessário para a evaporação da água presente (OVEISI et al., 2018).

Contudo, o rendimento e a qualidade final do carvão vegetal estão relacionados à qualidade da madeira, ao forno de carbonização e ao controle de todo o processo (RODRIGUES e BRAGHINI, 2019). Como recomendam Silva et al., (2018), o carvão vegetal deve ter suas propriedades estabelecidas de acordo com a origem e a qualidade da matéria-prima, e com a influência da temperatura final de carbonização.

### 3.2.1. Análise Qualitativa do Carvão vegetal

Dentre as variáveis que podem prever a qualidade do carvão vegetal, destacam-se a Densidade Relativa Aparente, a Densidade Relativa Verdadeira, Porosidade, Umidade, Composição Química Imediata, Rendimento Gravimétrico, Índice de Quebra, Carbono Fixo, o Poder Calorífico, entre outros (SILVA et al., 2018). Neste contexto, dependendo da finalidade de uso do carvão vegetal, é relevante que um maior número possível de variáveis apresente resultados satisfatórios, principalmente no que tange a sua atribuição na substituição de um produto.

A temperatura e a velocidade de aquecimento do processo de pirólise também podem influenciar na qualidade e no rendimento do carvão vegetal (SILVA et al., 2018). Ainda neste contexto, o poder calorífico, a densidade básica, a composição química e a umidade da madeira são os principais critérios de classificação da madeira para essa finalidade. Os autores afirmam que quanto maior a densidade aparente do carvão vegetal, melhor será o aproveitamento do volume útil no alto-forno siderúrgico.

### 3.2.2. Aplicações do Carvão vegetal

O carvão vegetal é uma importante fonte de energia renovável, que possui quatro usos principais, sendo eles: doméstico, químico, agrícola e industrial (RODRIGUES e BRAGHINI, 2019). Neste sentido, o conhecimento das qualidades da madeira é relevante quando se tem o objetivo final de produzir um carvão vegetal de elevada qualidade e alto rendimento (SILVA et al., 2018). Do ponto de vista econômico, o uso de carvão vegetal oferece vantagens na siderurgia, se comparado ao coque (subproduto do carvão mineral), por apresentar baixo teor de cinzas, baixo teor de enxofre e de fósforo, sendo também mais reativo (SILVA et al., 2018).

A partir da produção do carvão vegetal o alcatrão de madeira, coproduto derivado do processo, pode ser aplicado na recuperação de recursos e, conforme estudos de Zhang et al. (2020), também ser utilizado como rejuvenecedor de asfalto e no tratamento inofensivo de resíduos agrícolas e florestais. Os produtos obtidos com a produção do carvão vegetal também são capazes de produzir benefícios econômicos, ambientais e sociais, com outras aplicações, embora ainda não exista uma cadeia sólida e sustentável abrangendo a produção, o coprocessamento e o consumo desses subprodutos (OLIVEIRA et al., 2013).

### 3.3. Floresta 4.0

Embora o potencial econômico da “Indústria 4.0, aplicado na agricultura e na silvicultura, tenha um aumento de valor agregado bruto estimado em 15%, este valor é inferior ao potencial de outros setores. No entanto, novas soluções digitais oferecem a chance de gerenciar melhor a produção e os recursos (MÜLLER; JAEGER; HANEWINKEL, 2019), à medida em que a tecnologia da “Indústria 4.0” dissemina, a cada dia, o seu conceito de produção e economia dos recursos para os demais setores.

No contexto da indústria e dos serviços, o termo “Indústria 4.0” molda a discussão em torno do desenvolvimento da digitalização crescente (MÜLLER; JAEGER; HANEWINKEL, 2019). Ligada à conectividade dos dados, ao sensorial, à automatização, à robótica e à inteligência artificial, a “Floresta 4.0” visa a eficiência no gerenciamento dos recursos, como também produtividade e segurança das atividades (SIMÃO, 2019).

#### 3.3.1. Robótica

Atualmente, há uma ampla variedade de robôs na execução de tarefas. Cada máquina possui uma característica específica, sendo rodas e esteiras as configurações mais comuns. No entanto, quando a tarefa exige uma maior precisão na locomoção, o uso de “pernas” se mostra mais adequado. Nos ambientes florestais, onde há maior dificuldade para locomoção de tais máquinas, robôs com pernas não costumam ter boa performance. Como relatam Oliveira; Moreira e Silva (2021), em uma aplicação na Floresta Amazônica, onde certos ambientes se caracterizam por serem locais desestruturados e de difícil acesso, uma vantagem em usar robôs com “pernas” é que a locomoção das máquinas se adapta ao desnível do terreno.

As aplicações de robótica na área florestal estão divididas nas seguintes subseções: preservação e monitoramento ambiental; combate a incêndios florestais; operações de inventário; plantio; poda e colheita florestal (OLIVEIRA; MOREIRA; SILVA, 2021). A robótica aérea também é um exemplo de aplicação, com o uso de drones e de Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs), os quais se destacam em aplicações estratégicas, como mapeamento aéreo de florestas afetadas por patógenos, detecção individual de árvores, avaliação da estrutura de árvores, além de outras tarefas de inspeção.

#### 3.3.2. Automação

A automatização das informações no setor de colheita florestal vem obtendo resultados satisfatórios, aumentando tanto a produtividade quanto a rapidez no processamento e lançamento de dados de produção (SANTOS; NETO; SANTOS, R. W., 2021). A aplicação desta tecnologia possibilita a integração de outros sistemas, como a otimização em tarefas mecanizadas. Os autores explicam, ainda, que a automatização permite que o trabalho realizado por máquinas seja controlado automaticamente através de sensores, equipamentos eletrônicos, sem a interferência humana.

A redução de desperdício é uma das vantagens do uso de sistemas de gerenciamento autônomo aplicados no controle de processos e na cadeia de abastecimento de matéria-prima (a madeira), visto que as indústrias madeireiras geram grandes quantidades de resíduos, ocasionando sérios problemas de poluição (SILVA et al., 2018). Embora observações manuais detalhadas sejam necessárias em algumas circunstâncias, desenvolvimentos recentes na tecnologia de computador de bordo permitem a

automatização de funções, possibilitando observações altamente detalhadas das ações do operador, que podem ser usadas para treinar operadores novos ou com desempenho inferior (BROWN et al., 2020).

### 3.3.3. Sistemas IoT

Em relação aos sistemas de comunicações IoT (*Internet Of Thing* ou pela tradução livre, internet das coisas), Feng e Audy (2020) os descrevem como uma rede com objetos conectados e dispositivos incorporados a sensores e identificadores exclusivos. Essa tecnologia possibilita a comunicação entre os componentes envolvidos em uma plataforma comum, sem a necessidade de interações humanas.

Conforme Singh et al. (2019), a tecnologia IoT trabalha em tempo real, influenciando a tomada de decisão de muitas indústrias, se mostrando uma tecnologia transformadora. Além disso, as comunicações pelos sistemas IoT e ciberfísicos foram estabelecidas para auxiliar na fabricação, manutenção, rastreamento de estoque e digitalização de operações (FENG; AUDY, 2020). Em termos de aplicação, a IoT na floresta, é possível implementar o monitoramento em tempo real do ambiente florestal, como o rastreamento de acidentes de incêndio, monitoramento da saúde da colheita, avaliação contínua da vegetação e rastreamento em tempo real da extração florestal (SINGH et al., 2019).

### 3.3.4. Sistemas Ciberfísicos

Os sistemas ciberfísicos estão entre os principais recursos da “Indústria 4.0”. Feng e Audy (2020) explicam que sistemas dessa natureza criam a fusão entre o mundo físico e o virtual, ao integrar computação, rede e processo físico; possibilitando que computadores e redes embutidas monitorem e controlem o processo físico por meios de algoritmos.

Nos sistemas ciberfísicos, os elementos físicos e computacionais são altamente coordenados e profundamente interligados, sendo aplicados em sistemas automotivos autônomos, no controle de processo, e nos robóticos (FENG; AUDY, 2020). Esta comunicação entre sistemas é relevante, considerando as dimensões das operações florestais envolvidas. O protocolo de comunicação sem fio permite transmitir os dados sensoriais da floresta para o servidor de nuvem, permitindo o monitoramento e a análise, em tempo real, das atividades que estão sendo processadas na floresta (SINGH et al., 2019).

## 3.4. Ergonomia

Manuseio manual de materiais, que é qualquer tarefa que envolva trabalho pesado, pode ter um alto risco de desenvolvimento de doenças ocupacionais (OGEDENGBE et al, 2023). Nesse sentido, pela amplitude e aplicabilidade, a ergonomia se faz presente nas atividades nas atividades manuais. De acordo com os autores Ogedengbe et al., (2023) as tarefas manuais que envolvem escalar, levantar, empurrar e girar, tudo isso pode causar distúrbios musculoesqueléticos (MSDs) no corpo.

O trabalho de conduzir a carbonização da madeira, bem como várias outras atividades do setor florestal, envolve operações manuais. Neste contexto, os fatores de riscos biomecânicos geralmente relatados são os distúrbios musculoesqueléticos, os quais estão diretamente relacionados com a repetição excessiva de funções na jornada de trabalho (SIMON; ALEMI; ASBECK, 2021).

Dentre os problemas relacionados com a ergonomia, a Lombalgia (lesões lombares) é um dos principais problemas de saúde que se desenvolve pelo excesso da postura incorreta, causando sofrimento

pessoal. A saúde e o bem-estar dos operadores de máquinas e trabalhadores florestais podem ter impactos significativos na qualidade e eficiência do trabalho. Neste sentido, a ergonomia se faz presente nessa situação por meio de recomendações, de modo que estas possam auxiliar e prevenir o aparecimento de problemas (BALTRUSCH et al., 2018; BROWN et al., 2020; FERREIRA et al., 2019).

No campo das recomendações, apresentam-se a mecanização de atividade física, as pausas na jornada de trabalho e a utilização dos equipamentos de proteção individual (FERREIRA et al., 2019). Conforme Machado et al. (2020), diante dos progressos e com o desenvolvimento da indústria mecânica, nos últimos tempos os sistemas de colheita semimecanizados puderam ser substituídos por sistemas mecanizados. Deste modo, o problema ergonômico em atividades que exigiam muito esforço braçal foi amenizado. Neste sentido, as operações foram se adaptando com a utilização de máquinas de grande porte, obtendo mais eficiência e produtividade.

### **3.5. Normas Regulamentadoras de Trabalho NR-17**

Paiva et al. (2020) descrevem a Norma Regulamentadora (NR-17), do Ministério do Trabalho, como uma norma que tem por objetivo adotar as devidas adequações que proporcionem saúde, segurança física e mental ao trabalhador. No que se refere às atividades manuais, a NR-17 emprega medidas de prevenções que servem para evitar os danos à saúde humana (NR-17, 2022).

No Brasil, a legislação trabalhista exige dos empregadores que seus funcionários usem determinados dispositivos de proteção contra possíveis acidentes, enquanto executam suas atividades (MACHADO et al., 2020). Conforme descrito no documento, essas medidas de prevenção são aplicadas a partir de análise ergonômica preliminar, a qual tem a finalidade de evitar que os trabalhadores, ao realizarem suas atividades, não sejam obrigados a efetuarem, de forma contínua e repetitiva:

Posturas extremas ou nocivas do tronco, do pescoço, da cabeça, dos membros superiores e/ou dos membros inferiores; movimentos bruscos de impacto dos membros superiores; uso excessivo de força muscular; bem como, frequência de movimentos dos membros superiores ou inferiores que possam comprometer a segurança e a saúde do trabalhador, ressaltando a exigência cognitiva que possa comprometer a segurança e saúde do trabalhador (NR-17, 2022).

No setor florestal, os riscos estão em toda a cadeia produtiva, e a exposição dos trabalhadores a eles é inevitável (SORANSO et al., 2019). Por isso, as empresas do setor devem estar sempre capacitando seus operadores, num processo complexo, que envolve vários aspectos simultaneamente (MACHADO et al., 2020). Assim, acredita-se que as empresas realizam estudos ergonômicos, que são apresentados na forma de um laudo ou uma Análise Ergonômica do Trabalho (AET) (MACHADO et al., 2020; SORANSO et al., 2019).

No cenário em que foi possível mecanizar algumas atividades, os cuidados com a ergonomia do colaborador também são revistos para evitar o surgimento de problemas de saúde. Como descrevem Machado et al., (2020) sobre o devido cuidado com questões ergonômicas em situação ideal, a ergonomia deve ser aplicada nas etapas primárias do projeto de uma máquina, priorizando a qualidade e as condições do trabalho no momento da sua utilização, incluindo o ser humano como principal componente.

#### 4. ARTIGO

##### 4.1. Artigo 1 – Desenvolvimento e Implementação de um Protótipo para Redução do Tempo de Carbonização da Madeira em Sistemas Fornos-Fornalha

Este artigo foi elaborado conforme normas da *Energy for Sustainable Development*

**RESUMO:** No setor florestal, os fornos de carbonização são ferramentas que produzem o carvão vegetal e a crescente demanda por este produto, impulsionada pela conscientização e importância do uso de energias renováveis para conservação do meio ambiente, ressalta a importância da otimização do processo envolvido, para maior produção em menor tempo. Com base no contexto, este estudo objetivou-se em avaliar o desempenho de um sistema de ventilação controlada na prática da carbonização no sistema Fornos-Fornalha e comparar com o método convencional de produção do carvão vegetal, com vistas a redução do tempo de carbonização. Para o desenvolvimento da pesquisa, foi implementada uma metodologia para aplicar dois protótipos de ventilação controlada, na dinâmica de controle da carbonização. Com o uso de plataformas de fonte aberta, foi desenvolvido um sistema de aquisição e compartilhamento dos dados de temperatura do processo de carbonização, além de possibilitar o acionamento remoto do protótipo. O carvão vegetal produzido foi submetido aos testes de Densidade Relativa Aparente, Densidade Relativa Verdadeira e Porosidade. Os dados provenientes de uma carbonização convencional e pelo método empregado foram comparados e, verificou-se que o tempo resultante evidenciou positivamente o uso do protótipo de ventilação controlada, no processo de carbonização. Estatisticamente, considerando uma confiabilidade de 5% para resultado satisfatório, o teste-t aplicado revelou haver diferença estatística nos dados. Na análise das amostras colhidas, duas obtiveram resultados satisfatórios nas análises submetidas, constatando que o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias para otimizar o processo da carbonização desempenham papel fundamental na produção de carvão vegetal de qualidade. E o baixo custo envolvido na metodologia empregada proporciona sua fácil disseminação, bem como a melhora das condições de trabalho, deixando o ambiente mais seguro.

**Palavras-chave:** Energia da Madeira. Obtenção de carbono. Controle de temperatura. Fornos de carbonização. Floresta 4.0.

**ABSTRACT:** In the forest sector, carbonization ovens are tools that produce charcoal and the growing demand for this product, driven by awareness and the importance of using renewable energy for environmental conservation, underscores the importance of optimizing the process involved, for greater production in less time. Based on the context, this study aimed to evaluate the performance of a controlled ventilation system in the practice of carbonization in the Oven-Furnace system and compare it with the conventional method of charcoal production, with a view to reducing the carbonization time. For the development of the research, it was implemented a methodology to apply two prototypes of controlled ventilation, in the dynamics of carbonization control. With the use of open source platforms, it was developed a system for acquiring and sharing temperature data from the carbonization process, in addition to enabling the remote activation of the prototype. The charcoal produced was submitted to Apparent Relative Density, True Relative Density and Porosity tests. Data provinient from a conventional carbonization and the method employed were compared and the resulting time positively evidenced the use of the controlled ventilation prototype in the carbonization process. Statistically, considering a 5% reliability for a satisfactory result, the applied t-test revealed to be a statistical difference in the data. In the analysis of the collected samples, two obtained satisfactory results in the submitted analyses. The development and application of technologies to optimize the carbonization process plays a fundamental role in the production of quality products. The low cost involved in the methodology employed, provides its easy dissemination, as well as the improvement of working conditions, making the environment safer.

**Key words:** Energy from Wood. Obtaining carbon. Temperature control. Carbonization ovens. Forest 4.0.

## 4.2. INTRODUÇÃO

O consumo global sempre estimulou uma alta demanda de produção das indústrias e os impactos causados pelas formas de produzir afetaram diretamente o meio ambiente. Neste sentido, as emissões de gases de efeito estufa se tornaram um problema mundial, afetando o planeta com as mudanças climáticas. No entanto, a forte dependência de recursos fósseis não afeta apenas o meio ambiente e a segurança, mas também influencia a sustentabilidade e a economia, principalmente, em países que precisam importar os combustíveis fósseis (SAKULKIT et al. 2020).

As fontes de energia limpa são estudadas para que se possa continuar atendendo à demanda global e viabilizando uma produção de forma sustentável, evitando, assim, o colapso do meio ambiente, e uma alternativa promissora é a madeira de florestas plantadas. Nos dias atuais, existe uma gama de produtos que derivam desse recurso, como compensados, celulose, lignina, biomassa, carvão vegetal, entre outros, que possibilitam uma viabilidade de consumo sustentável.

Neste cenário, as florestas plantadas desempenham um papel importante, evitando diretamente o desmatamento de florestas nativas. Embora a madeira tenha ampla aplicação na indústria, o carvão vegetal se destaca como uma fonte de energia alternativa para suprir as necessidades energéticas de outros setores. Schettini et al. (2021) afirmam que o Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal, e as indústrias de ferro-gusa, ferro-liga e aço são responsáveis por consumir 84% do total disponível. Deste modo, ainda segundo os autores, em 2018, o consumo brasileiro no setor siderúrgico foi de 4,6 milhões de toneladas. Portanto, a produção do carvão vegetal é atrativa para o abastecimento do setor siderúrgico, visto que é uma fonte de energia limpa e renovável.

Embora existam estudos aplicados com foco no melhoramento da qualidade da madeira para se obter um melhor rendimento do carvão vegetal, Gomes et al. (2020) destacam que o cenário de produção de carvão vegetal no Brasil, e em outros países em desenvolvimento, é precário, pois boa parte dessa produção é realizada em fornos rudimentares (RIBEIRO et al., 2020). Estes fornos, geralmente, são construídos em alvenaria e o processo de carbonização da madeira é controlado inteiramente de forma manual, fazendo uso de parâmetros subjetivos para tomada de decisão. Um exemplo é o controle a partir da cor da fumaça. Importante ressaltar que, deste modo, a produção do carvão vegetal é um tanto quanto arriscada para a saúde humana, bem como nociva para o meio ambiente, devido à liberação de gases poluentes como o metano, monóxido de carbono, e gases condensáveis (BRASIL, 2019).

Como forma de tornar sustentável a produção do carvão vegetal e de empregar uma melhor padronização de qualidade ao produto final, o sistema Fornos-Fornalha foi desenvolvido. O sistema apresenta curvas de carbonização definidas, com medições de temperatura por Pirometria, além de possuir uma fornalha para queima dos gases poluentes, conforme indicam Ribeiro et al. (2020), tornando-se, assim, uma produção do carvão vegetal com menor risco de falhas no processo, possibilitando uma produção totalmente sustentável.

No sistema Fornos-Fornalha, a temperatura do forno é controlada com abertura e obstrução das entradas de ar, e a carbonização da madeira pode durar, em média, 3 dias para completar o processo e mais 3 dias para o resfriamento do forno (BRASIL, 2019). Neste contexto, é observada a possibilidade de redução do tempo e otimização da produção do carvão vegetal, controlando a temperatura a partir do uso

de um protótipo que possa fornecer, de forma controlada, ventilação nas entradas de ar do forno.

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo avaliar o desenvolvimento de um sistema de ventilação controlada e compará-lo ao método convencional de produção do carvão vegetal, usando o sistema Fornos-Fornalha, com vistas à redução do tempo de carbonização e à manutenção da qualidade do carvão produzido.

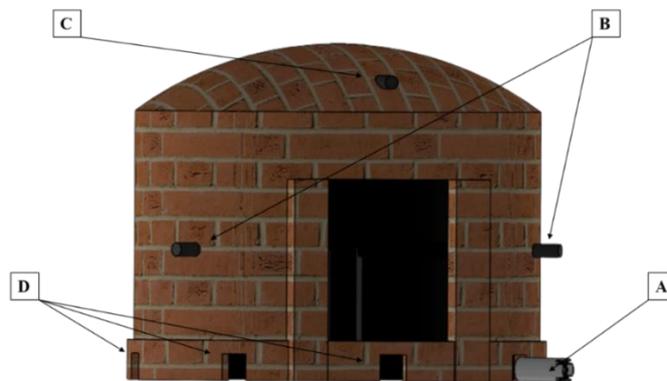
### 4.3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 4.3.1. Local e coleta de dados para estudo

A coleta dos dados foi realizada no Forno A, do conjunto de fornos integrados ao sistema Fornos-Fornalha, localizado no Instituto de Ciências Agrárias - ICA, da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Campus Montes Claros-MG, Brasil, instalado em ambiente aberto. Os dados coletados foram referentes as temperaturas que o forno atingiu durante as fases do processo da carbonização da madeira, variável que começou a ser obtida após a ignição do processo.

O forno possui 6 cilindros distribuídos pela sua estrutura, para aferição de temperatura com o Pirômetro, sendo 4 para as paredes (2 cilindros para o lado esquerdo e 2 para o lado direito) e 2 para a cúpula. Foi instalado na parte interna da cúpula do forno, a 3 cm de distância do cilindro frontal, um sensor Termopar do tipo K que possui faixa de aferição de 0°C a 800°C. Este sensor foi instalado com a finalidade de auxiliar na observação do comportamento do processo. Foi inserido também o protótipo de ventilação logo nas entradas de ar do forno. A Figura 3 descreve as funções de cada elemento envolvido.

Figura 3 - Identificação de cada elemento de controle do Forno de carbonização.



Posição do protótipo (A). Cilindros de parede (B). Cilindro frontal da cúpula, região onde foi instalado o sensor Termopar (C). Entradas de ar do forno (D).

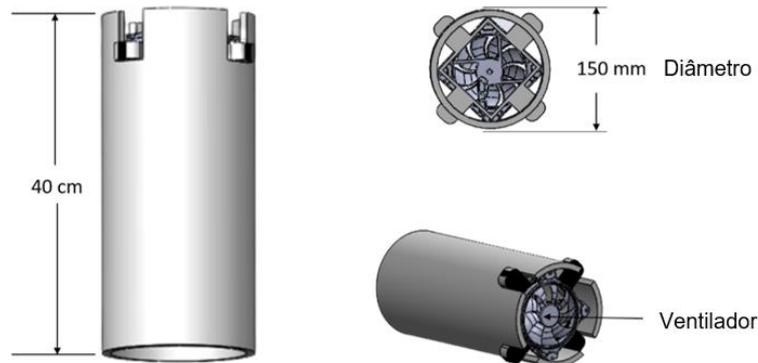
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Durante o processo, a temperatura dos cilindros de cúpula (na qual serve de referência para observar o comportamento) é o principal parâmetro para o desenvolvimento e conclusão da carbonização da madeira (BRASIL, 2019). Embora não exista a presença de oxigênio no processo de pirólise, no qual se utiliza para produzir o carvão vegetal (SAKULKIT et al., 2020), as fases de carbonização do sistema Fornos-Fornalha são atingidas com níveis de temperatura, controlada com a dinâmica de ações para uniformizar a produção.

#### 4.3.2. Implementação do protótipo na carbonização

O processo de Carbonização iniciou com a ignição do forno ocorrendo às 08h00min do dia 14/03/2022. O sensor Termopar começou a coletar os dados de temperatura no momento da ignição, as aferições por Pirômetro foram iniciadas as 09h30min. Neste processo, a carbonização foi realizada com o auxílio de 2 protótipos para controle de vazão, construídos a partir de Cano PVC (150 mm de diâmetro e 40 cm de comprimento cada) e *Cooler Fan*, conforme Figura 4.

Figura 4 - Modelo 3D do Protótipo desenvolvido para implementação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O protótipo foi posicionado, inicialmente, a uma distância de 40 cm da abertura inferior da porta do forno. O acionamento e o uso do protótipo foram condicionados às ações de controle da carbonização, conforme a metodologia descrita na Cartilha de Operações (BRASIL, 2019). O protótipo foi alimentado com 12 Volts de tensão, e a ventilação gerada foi de 0,5 m/s, aferida com um anemômetro digital, com faixa de 0,4 a 30m/s e resolução de 0.1 m/s. A velocidade aferida foi posteriormente usada para obter a vazão volumétrica, de acordo com as Equações 1 e 2.

$$Q = A \cdot V \quad (1)$$

$$Q = 0,25 \cdot (\pi \cdot A^2) \cdot V \quad (2)$$

Onde  $Q$  representa a vazão,  $A$  área em metro e  $V$  é a velocidade em m/s.

Após a ignição, o uso do protótipo durante a carbonização seguiu os procedimentos descritos da Tabela 1. O processo de Carbonização de teste 1 finalizou às 15h30min do dia 17/03/2022. Conforme os procedimentos para finalização do processo de Carbonização, a borboleta foi fechada e em seguida a fornalha, para resfriamento do forno.

Tabela 1 - Período de uso do protótipo em teste.

Carbonização	Tempo aplicado	Velocidade (m/s)	Vazão mássica (kg/m <sup>3</sup> )
14/03/2022	1h	0,5	0,011
	3h	1,2	0,026
15/03/2022	13h43min	1,2	0,026
	7h47min	1,5	0,032
16/03/2022	24h	1,5	0,032
17/03/2022	13h15min	1,5	0,032

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

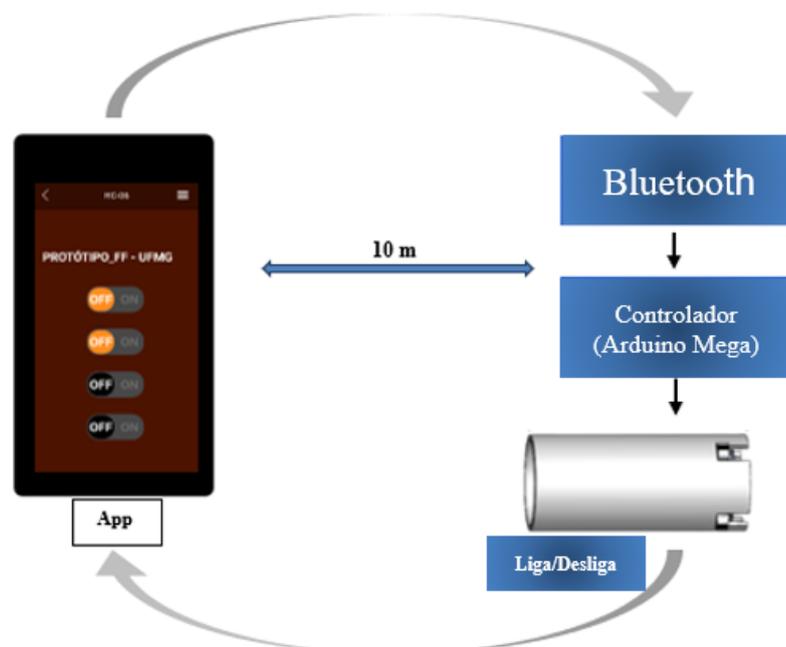
No dia 14/03/2022, às 09h09min o protótipo foi ajustado para 20cm. No dia 15/03/2022 às 17h35min, protótipo foi posicionado de forma a tocar a abertura de ar do forno. Vazão volumétrica calculada com a densidade do ar  $1,225 \text{ kg/m}^3$ , para gerar a vazão mássica.

#### 4.3.3. Sistema de acionamento remoto do protótipo

Com o uso de um dispositivo móvel compatível, o acionamento do protótipo de ventilação é controlado, ou seja, ligado e desligado por meio do *bluetooth*. A comunicação entre os dispositivos envolvidos foi desenvolvida com o auxílio das plataformas gratuitas *RemoteXY: Remote Control Arduino*, nas quais é possível criar um aplicativo para a utilização. Nesta parte, foi usada a linguagem de programação *c++* (Anexo A).

Conforme as configurações de *hardware*, o alcance de sinal do Bluetooth é de 10 metros. O controlador utilizado foi o Arduino Mega 2560, no qual se conecta ao dispositivo físico *Bluetooth* para receber os comandos. A figura 5 descreve o esquema de funcionamento deste controle, bem como a interface do aplicativo gerado.

Figura 5 - Funcionamento do sistema de acionamento remoto dos protótipos.

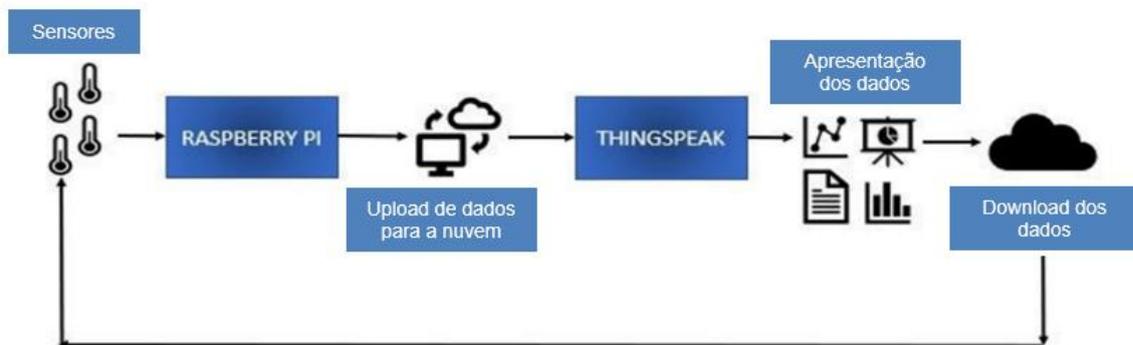


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

#### 4.3.4. Sistema de aquisição e compartilhamento dos dados

A comunicação dos sensores de temperatura é realizada por meio do conversor MAX6675, o qual se conecta ao controlador *Raspberry Pi*. Com o *Raspberry Pi* conectado à rede *internet*, os dados são enviados, ou seja, é feito o *upload*, para a plataforma *ThingSpeak™*, na qual são armazenadas as informações, e representadas de forma gráfica, com o uso de recursos de *Widgets* (elemento de interação). A figura 6 descreve o esquema da dinâmica de funcionamento do sistema.

Figura 6 - Funcionamento do sistema de aquisição de dados (IoT).



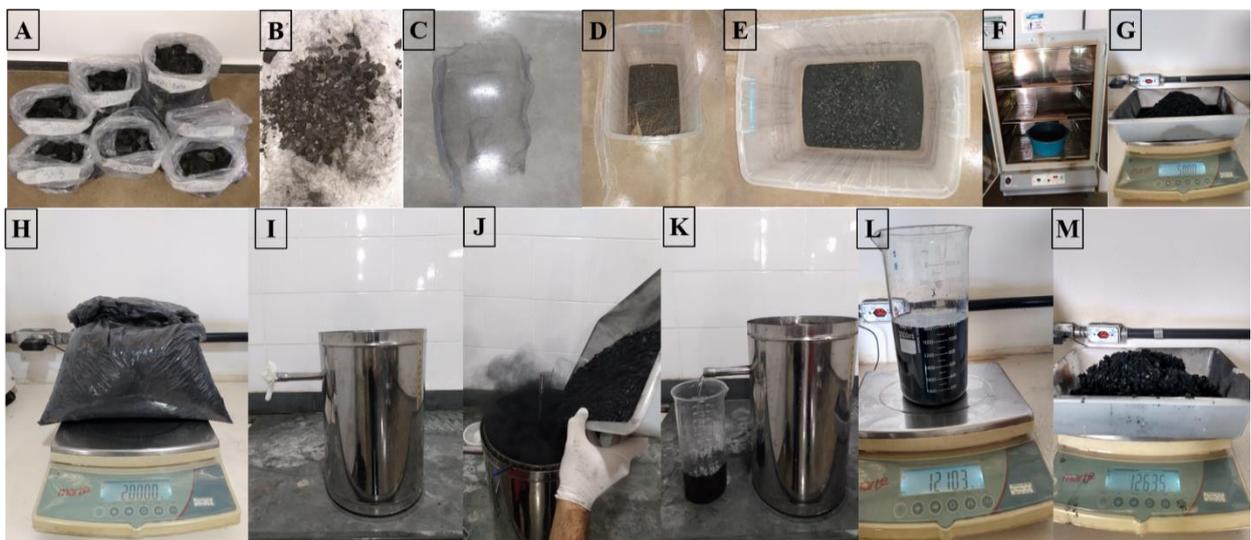
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O *download* dos dados pode ser realizado em tempo real com o uso da função *Requests*, neste trabalho foi usado o *Python*<sup>™</sup> como linguagem de programação para desenvolver o sistema de comunicação dos sensores, *Raspberry Pi* e Plataforma *ThingSpeak*<sup>™</sup> (Anexo B e C). Deste modo, o processo de carbonização pode ser acompanhado em qualquer dispositivo com a cesso a rede *internet*.

#### 4.3.5. Estudo do carvão vegetal

Para explorar o carvão vegetal, foi adotado o método de análise física, conforme as Figuras 7 e 8. Desse modo, foi verificada a Densidade Relativa Aparente, Norma ASTM D 167-73 (adaptada); Densidade Relativa Verdadeira, Norma ABNT NBR 9165, usada para representar a densidade das substâncias que formam o carvão vegetal; e a Porosidade, Norma ASTM D 167 – 73, sendo esta uma estimativa da quantidade de vazios existentes no carvão vegetal. Teste submetido em duas amostras do forno A.

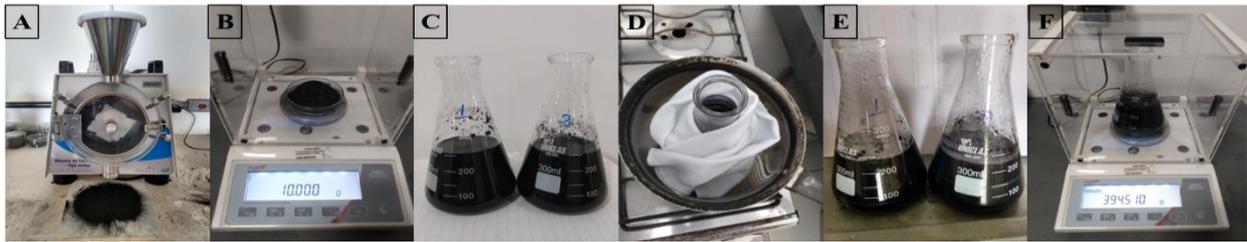
Figura 7 – Procedimentos do teste de Densidade Relativa Aparente



Amostras colhidas e separada do Fornos (A). Carvão selecionado, triturado, peneirado e reservado para teste (B), (c), (D), (E). Carvão posto na estufa (F). Reservando os 5 kg para testes e duplicatas (G). Pesando 2kg exigidos para teste (H). Nivelando água do galão (I). Inserindo os 2 kg de carvão no cesto dentro do galão de água (J). Reservando líquido retirado do galão (K). Pesando o líquido recolhido (L). Pesando carvão depois de escorrer (M).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 8 – Procedimentos do teste de Densidade Relativa Verdadeira.



Triturando carvão vegetal ressecado (A). Pesando 10g (B). Recipiente com água e carvão (c). Colocando para ferver, utilizando um peno e uma panela com água quente para substituir a manta térmica (D). Recipiente recolhido após período em que ferveu (E). Pesando recipiente para análise dos dados (F).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

#### 4.3.6. Análises dos dados

O método convencional de controle da carbonização é realizado a partir da abertura e da obstrução manual das entradas de ar do forno; depende de ações realizadas a partir do período cíclico de coleta da temperatura para manter o processo (entre 1h e 4h); e das boas condições climáticas, necessárias para o sucesso na produção de carvão. O método aplicado controla a vazão de ar eletronicamente, fornecendo ventilação para o forno, independentemente das condições do ambiente; e acompanha a temperatura em tempo real, por meio dos sensores, favorecendo ações imediatas de controle.

Na avaliação do desempenho do método aplicado, os dados foram confrontados com os resultados de uma carbonização convencional, realizada no dia 25/01/2022, sendo consideradas para análise, as fases de carbonização (Quadro 1), e a temperatura em relação ao tempo total gasto para a conclusão do processo.

Quadro 1 - Instruções para operação do processo da Carbonização da madeira.

Fase	Faixa de Temperatura	Fenômeno	+/- 30% de Umidade da Madeira		+/- 40% de Umidade da Madeira		+/-50% de Umidade da Madeira			
			TF	TG	TF	TG	TF	TG		
I	160°C a 170°C	<b>Fase Endotérmica:</b> Liberação de vapor de água e secagem da madeira.	12h	15h	15h	18h	18h	26h		
II	250°C a 270°C	<b>Fase Endotérmica:</b> Degradação das hemiceluloses e eliminação de gases.	12h	12h	12h	12h	12h	12h		
III	340°C a 350°C	<b>Fase Exotérmica:</b> Degradação da celulose, grande produção de gases. Formação do carvão vegetal	24h	24h	24h	24h	24h	24h		
IV	350°C a 360°C	<b>Fase Exotérmica:</b> Redução da emissão de gases e aumento da concentração de carbono no carvão vegetal.	18h	20h	18h	20h	18h	20h		
Tempo Total de Carbonização			-	-	66h	71h	69h	74h	72h	82h

TF (Tora Fina): Diâmetro de 6 a 14 cm. TG (Tora Grossa): Diâmetro de 15 a 20 cm.

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2019.

Para efeito de comparação estatística, foi aplicado o teste-t para comparar as amostras dos dados de carbonização obtidos pelo método empregado (Me) e das realizadas pelo método convencional (Mc). Para hipótese  $H_0$ , a média do  $Me - Mc = 0$ , ou seja, a temperatura do método empregado, não difere do método convencional no decorrer do tempo do processo de carbonização.

Para hipótese alternativa  $H_a$ , a média do  $Me - Mc \neq 0$ , ou seja, ambos os métodos atingem temperaturas e tempo diferentes no decorrer do processo de carbonização. Em relação ao nível de significância, considerou-se a confiabilidade de 5%.

Para Densidade Relativa Aparente (DRA), foi usado o cálculo da Equação 3. Para Densidade Relativa Verdadeira (DRV), foi usado o cálculo da Equação 4. Por fim, a Porosidade (P) é dada pela relação existente entre DRA e DRV, indicando uma estimativa da quantidade de vazios existentes no carvão vegetal, representada na Equação 5. O erro abaixo, de 5%, é considerado como análise correta. Para o erro acima, de 5%, deve-se refazer a análise e recalculer o erro. Utiliza-se como resultado o valor médio.

$$DRA = \frac{Pcs}{Pad + (Pcu - Pcs)}, \text{ dada em g/cm}^3 \quad (3)$$

Em que:  $Pcs$ ,  $Pad$  e  $Pcu$  são os pesos do carvão seco, da água deslocada e do carvão úmido (molhado), respectivamente. Considerando que  $\rho_{H_2O} = 1\text{g/cm}^3$ .

$$DRV = \frac{Pcs}{Pcs - (Ppca - Ppa)} \quad (4)$$

Em que:  $Pcs$ ,  $Ppca$  e  $Ppa$  são o peso do carvão seco, do picnômetro com o carvão e a água e do picnômetro com água, respectivamente.

$$P(\%) = 100 - (DRA \cdot 100) \div 100 \quad (5)$$

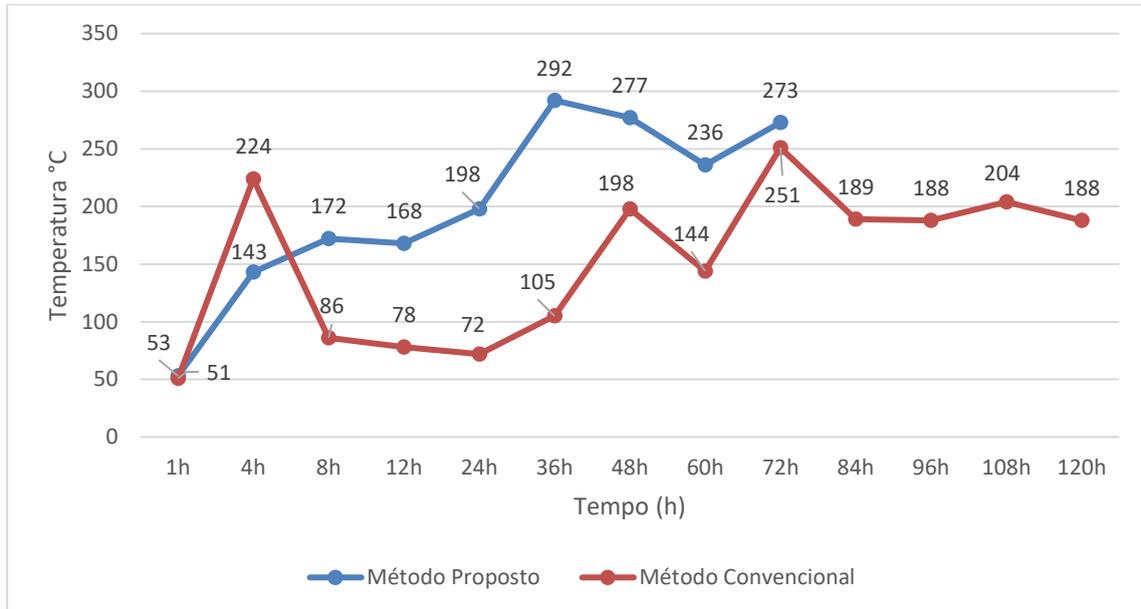
Em que:  $P(\%)$  = Porosidade em %;  $DRA$  = Densidade Relativa Aparente.

#### 4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sucesso da produção de carvão vegetal no sistema Fornos-Fornalha está diretamente relacionado às ações de controle do processo de carbonização da madeira. Os resultados obtidos ressaltam algumas vantagens da metodologia empregada e ajudam a compreender os efeitos do protótipo no desenvolvimento do processo da carbonização.

A carbonização com o uso do protótipo decorreu em um período total de 72 horas, enquanto, pelo método convencional, a duração foi de 120 horas. As temperaturas obtidas são descritas no Gráfico 1. Conforme os resultados, com o uso do protótipo, com 4 horas de carbonização, o processo atingiu 143,7 °C (Gráfico 1), aferido no cilindro da cúpula de frente. Com 8 horas de carbonização, o processo atingiu 172,6°C, no mesmo cilindro. De acordo com a Fase I, na qual a faixa de temperatura é de 160°C a 170°C, em 12 horas de processo (BRASIL, 2019), a carbonização com o uso do protótipo atingiu a Fase I, em menos tempo.

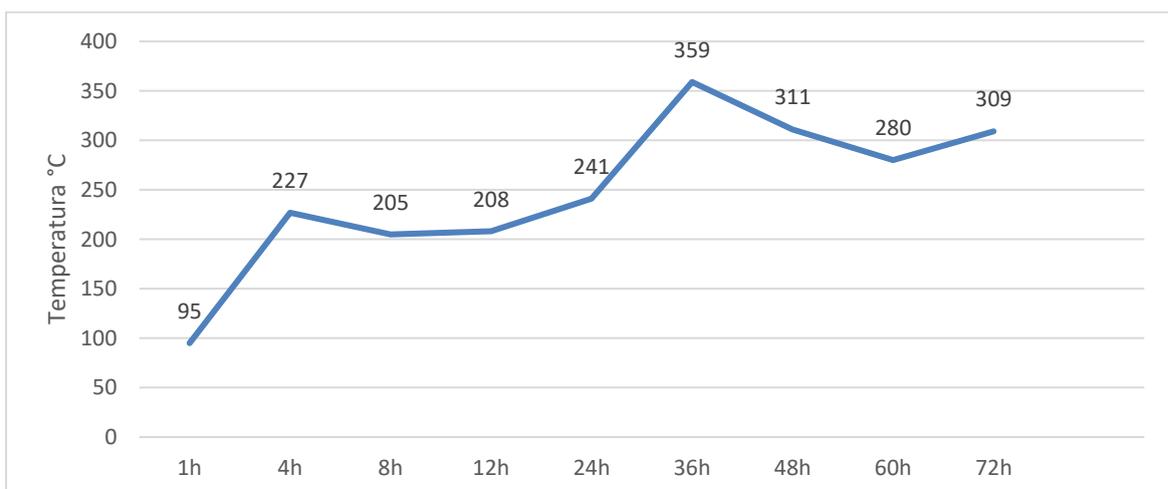
Gráfico 1 - Temperatura em relação ao tempo de carbonização de cada método.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Após concluir a Fase II, em 280,3°C, com 35 horas de carbonização, o processo seguiu mantendo a temperatura alta. A partir da Fase II, o forno começou a apresentar variação de temperatura, chegando ao máximo de 301°C, com 38 horas de carbonização. As Fases III e IV da carbonização não são atingidas por ambos os métodos. Com o surgimento de brasas nas demais entradas de ar do forno (fenômeno indicador do alastramento da carbonização), o processo foi finalizado, embora não tenha atingido as temperaturas das fases finais do processo, para garantir que o carvão vegetal produzido não seja destruído. Entretanto, com uso do sensor Termopar, do tipo K, instalado na parte interna da cúpula do forno, foi possível observar o processo atingir as fases finais (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Temperatura interna do forno em relação ao tempo de processo.



Fase III alcançada com temperatura de 359,75°C após 36 horas carbonização e a Fase IV atingida com 363,75°C no processo após 41 horas.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A carbonização convencional teve um processo prolongado devido à dificuldade de manter a temperatura do forno manualmente. Para cumprir as Fases da carbonização, descritas no Quadro 2, as ações de controle foram insuficientes para a finalização adequada do processo. Houve oscilação da temperatura do forno conforme aferição por Pirômetro nos cilindros, condição essa que dificulta desenvolver uma carbonização uniforme. O método convencional de carbonização é influenciado também pelas de boas condições do ambiente. Para efeito de comparação estatística, a Tabela 2 descreve os resultados obtidos do teste-t aplicado nos dados.

Tabela 2 - Análise Estatística dos dados de temperatura.

<b>Teste-t: duas amostras em par para médias</b>						
<b>Identificação</b>	<b>Forno</b>	<b>Média(°C)</b>	<b>Variância</b>	<b>Observações</b>	<b>Correlação*</b>	<b>Teste-t</b>
Método empregado	A	201,75	5941,29	9	0,4759	2,6089
Método convencional	A	134,75	5371,85	9		
				<b>df</b>	<b>P(T&lt;=t) uni-caudal</b>	<b>T crítico uni-caudal</b>
				8	<b>0,0155</b>	<b>1,8595</b>

Análise considerando 72h de Carbonização para ambos os métodos. Correlação de Pearson (\*). Média da temperatura de cada método em Graus Celsius (°C). Graus de liberdade (df).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A análise estatística sinaliza haver diferença de temperatura no decorrer do tempo do processo de carbonização, tal como descreve a  $H_a$ . O p-value resultante é menor que o nível de significância (5%) considerado para o teste. Deste modo, com o p-valor menor que 5%, estatisticamente a hipótese  $H_a$  é aceita. A análise física das amostras colhidas revela resultados satisfatórios. As tabelas 3, 4 e 5 descrevem os resultados obtidos dos testes em que as amostras de carvão vegetal foram submetidas.

Tabela 3 - Resultado da análise da Densidade Relativa Aparente.

<b>Densidade Relativa Aparente</b>			
<b>Identificação</b>	<b>Forno</b>	<b>Resultado (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Erro*</b>
Amostra 1	A	0,2533	<b>0,0191</b>
Duplicata Amostra 1	A	0,2724	
Amostra 2	A	0,2810	<b>0,0251</b>
Duplicata Amostra 2	A	0,3062	

\*Erro abaixo de 5%, resultado satisfatório.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 4 - Resultado da análise da Densidade Relativa Verdadeira.

<b>Densidade Relativa Verdadeira</b>			
<b>Identificação</b>	<b>Forno</b>	<b>Resultado</b>	<b>Erro*</b>
Amostra 1	A	0,9116	<b>0,0354</b>
Duplicata Amostra 1	A	0,8761	
Amostra 2	A	0,9364	<b>0,0034</b>
Duplicata Amostra 2	A	0,9398	

\*Erro abaixo de 5%, resultado satisfatório.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Tabela 5 - Resultado da análise de Porosidade.

<b>Porosidade – Densidade Relativa Aparente</b>			
<b>Identificação</b>	<b>Forno</b>	<b>Resultado (%)</b>	<b>Erro*</b>
Amostra 1	A	99,74	<b>0,0191</b>
Duplicata Amostra 1	A	99,72	
Amostra 2	A	99,71	<b>0,0251</b>
Duplicata Amostra 2	A	99,69	
<b>Porosidade – Densidade Relativa Verdadeira</b>			
Amostra 1	A	99,08	<b>0,0354</b>
Duplicata Amostra 1	A	99,12	
Amostra 2	A	99,06	<b>0,0034</b>
Duplicata Amostra 2	A	99,06	

\*Erro abaixo de 5%, resultado satisfatório.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Nas análises de Densidade Relativa Aparente e Densidade Relativa Verdadeira, as amostras obtiveram resultados satisfatórios, apresentando erro abaixo de 5%. No teste de Porosidade, as amostras prosseguiram resultando em um erro abaixo dos 5%, sendo um resultado positivo para a análise.

Embora durante o processo de carbonização a temperatura tenha variado, diferentemente do processo convencional, com o uso do protótipo, os valores se mantinham próximos do desejado. Neste contexto, o controle favoreceu a recuperação da temperatura desejada, a partir de ações com o uso do protótipo. As temperaturas próximas a 400°C garantem a purificação da madeira com a volatilização de 89% de oxigênio, e formação de um produto energético, com aproximadamente 57% de carbono (COSTA et al., 2020). Assim, tendo os valores de temperatura respondendo adequadamente às ações para manter o ritmo da decomposição da matéria orgânica em carbono (SIRURU et al., 2020), o tempo de conclusão das fases desejadas foi atingido em menor tempo.

A variável tempo chama atenção, pois para suprir uma demanda energética de uma indústria, a produção de carvão vegetal terá que ocorrer com o mínimo de falhas para atender à produção de larga escala, em menor tempo. Além disso, nos processos de pirólise, nos quais o tempo está relacionado, são proporcionados diferentes índices de rendimento e qualidade do produto final (SAKULKIT et al., 2020); e são fatores importantes, que podem ser mais facilmente controlados, a temperatura, a taxa de aquecimento e o tempo de espera (YANG et al., 2020). Obter um produto final com qualidade, em menor tempo e em larga escala é relevante para o mercado, sobretudo, quando produzido por meios confiáveis. Ressaltando o interesse estratégico, na percepção de Mfomo et al. (2020), o carvão vegetal é atualmente um dos combustíveis mais procurados, devido às suas propriedades e aos seus diversos usos.

Importante ressaltar que a escolha da madeira para essa finalidade influencia a produção do carvão vegetal, tendo em vista, o aproveitamento conveniente das qualidades comerciais do produto final (ARANTES et al., 2020). Ainda que a qualidade dessa matéria-prima possa ser selecionada conforme estudos de melhoria de uso para a energia e os sistemas de produção (RIBEIRO et al., 2020), a alta umidade tem um impacto negativo na taxa de aquecimento interno da madeira, uma vez que o calor latente é necessário para a evaporação da água (OVEISI et al., 2018). O fator umidade da madeira também reflete diretamente no tempo total do processo. Neste contexto, o processo da carbonização pode ser comprometido, resultando em um produto com o carbono fixo baixo, levando em conta que uma fonte de

combustível ideal possui alta porcentagem de carbono fixo e baixa porcentagem de matéria volátil e cinzas (HILARIO et al., 2020).

Com o uso da metodologia desenvolvida, os locais para a construção de fornos, com essa finalidade, não se limitam. Estrategicamente, os melhores espaços para a produção de carvão vegetal são os que possuem terreno relativamente nivelado (POWELL; WHEELER; BATT, 2021). Tal procedimento desenvolvido também garante um ambiente menos poluído para o ser humano, sem a presença de fumaças e partículas provenientes da queima da biomassa (MARTIN et al., 2013). Uma preocupação cada vez mais presente e valorizada pelas pessoas e que impulsiona uma demanda crescente pela qualidade do ambiente (REN et. al., 2020). Verificou-se, ainda, que o protótipo utilizado foi capaz de conter a fumaça que é expelida pelas aberturas de ar do forno, evitando a poluição do ar e o surgimento de chamas.

Por sua vez, na produção do carvão vegetal, o cenário é perigoso para os trabalhadores que atuam próximos à operação e manutenção dos fornos e ficam constantemente submetidos a riscos à saúde, tendo em vista o contato constante com o calor (SCABIN et al., 2022). Sob essa ótica, a automação do processo supervisório representa uma contribuição positiva, ao retirar os trabalhadores desse ambiente, oferecendo a eles melhorias nas relações de trabalho e na qualidade de vida. Desta forma, o uso dessa tecnologia também reduz os movimentos repetitivos e as posturas incorretas, comumente adotados nas ações de controle da carbonização.

O protótipo aplicado resistiu às intempéries do ambiente, bem como ao tempo decorrido da carbonização, embora sua estrutura não seja robusta nem complexa. Em termos de aplicabilidade, o protótipo ofereceu elevação controlada da temperatura do forno, o que garante concentração de carbono durante a pirólise da madeira, fator esse que resulta em valores elevados de densidade do carvão vegetal (COSTA et al., 2020). O protótipo possibilitou um fácil manuseio, combinando as ações de controle da carbonização. No entanto, para outros sistemas de fornos, se faz necessário um estudo para viabilizar o uso do mesmo.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou resultados relevantes de uma metodologia desenvolvida e aplicada para otimizar o processo de carbonização da madeira em fornos de alvenaria, com sistema de fornalha. Essa aplicação possibilitou compreender os efeitos da implementação do protótipo de vazão de ar no controle da temperatura, e compará-los com o método convencional de controle. Os resultados contribuem para preencher as lacunas referentes aos métodos de carbonização existentes e praticados.

A metodologia aplicada tem o potencial de reduzir o tempo de carbonização, mantendo a qualidade de produção do carvão vegetal produzido. O emprego da automação na aquisição de dados em tempo real favorece as ações de controle, reduzindo, assim, as chances de falhas no processo de carbonização da madeira.

Os testes aplicados para o estudo da qualidade do material produzido revelam sinais positivos do sucesso na carbonização pelo método desenvolvido. Entretanto, sob o ponto de vista qualitativo, ainda podem ser aplicados outros testes, para uma validação mais consistente.

Em termos de ergonomia, para este ambiente de trabalho, a metodologia aplicada oferece maior flexibilidade para operar fornos, diminuindo as funções manuais e maximizando o conforto do trabalhador. Com as tecnologias envolvidas, a segurança do ambiente também é elevada, oferecendo maior controle do local e previsibilidade na gestão dos riscos ocupacionais.

Este estudo preliminar merece um aprofundamento, visto a necessidade de incorporar novas tecnologias ao segmento de fornos de baixo custo, para produção do carvão vegetal. Além disso, embora a fase de teste não tenha sido finalizada, neste sistema de fornos, a aplicação metodológica é inédita. A baixa complexidade envolvida na implementação torna a metodologia replicável.

Portanto, automatizar o processo de carbonização da madeira, aplicando os conhecimentos da “Indústria 4.0”, trará benefícios não somente qualitativos, mas também econômicos. Desse modo, quanto maior o nível de automação do processo, proporcionalmente também será maior a produtividade, bem como a independência de ações humanas, além de promover menor exposição dos trabalhadores aos riscos ocupacionais presentes na produção do carvão vegetal. Assim, fomenta-se o conceito de “Floresta 4.0” e maximiza-se os valores dos produtos da cadeia produtiva da Energia da Madeira.

## REFERÊNCIAS

- ARANTES, Marina Donário Chaves et al.. Anatomy of charcoal and carbonization effect under Eucalyptus fibers' dimensions. *Floresta e Ambiente*, v. 27, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.064317>. Acesso em: 12 abr. 2022.
- ARDUINO. *Arduino*. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em: 01 fev.2022.
- BALTRUSCH, S. et al.. The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Applied ergonomics*, v. 72, p. 94-106, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.04.007>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- BRASIL. Produção sustentável de carvão vegetal: manual de operação de sistema fornos-fornalha. Brasília, DF: MMA, 2019. fornos-fornalha / Ministério do Meio Ambiente ... [et al.]. – Brasília, DF: MMA, 2019.
- BROWN, Mark et al.. The progression of forest operations technology and innovation. *Australian Forestry*, v. 83, n. 1, p. 1-3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00049158.2020.1723044>. Acesso em: 5 mai. 2022.
- COSTA, Júlia Melo Franco Neves et al.. Influência da temperatura de pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, v. 11, n. 1, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/cienciadamadeira/article/view/16774>. Acesso em: 10 mai. 2022.
- FENG, Yan; AUDY, Jean-François. Forestry 4.0: A framework for the Forest Supply Chain Toward Industry 4.0. *Gestão & Produção*, v. 27, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-530X5677-20>. Acesso em: 7 abr. 2022.
- FERREIRA, José Guilherme Da Silveira Vasconcelos et al.. Risco Ergonômico na Atividade Envolvendo Transporte Manual de Cargas no Canteiro de Obras. *Revista Eletrônica TECCEN*, v. 12, n. 2, p. 39-44, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21727/teccen.v12i2.2027>. Acesso em: 6 jun. 2022.
- GOMES, Arthur Freitas et al.. Qualidade do Carvão Vegetal Submetido a Diferentes Taxas de Resfriamento com Trocador de Calor. *Ciência Florestal*, v. 30, p. 677-687, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509829608>. Acesso em: 3 jun. 2022.
- HILARIO'S, Felix A. Estevez et al.. Study on Charcoal Scarcity and the Limitations of Existing Cooking Fuel Alternatives. In: *2020 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC)*. IEEE, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/GHTC46280.2020.9342925>. Acesso em: 14 jun. 2022.
- MACHADO, Jelvis Santos et al.. *A mecanização florestal sob uma perspectiva ergonômica. Engenharia de produção: produtividade e competitividade*, 2020. Disponível em: [Engenhariadeproduo\\_produtividadeecompetitividade\\_VolumeVII.pdf](Engenhariadeproduo_produtividadeecompetitividade_VolumeVII.pdf) (ufmg.br). Acesso em: 9 abr. 2022.
- MACHADO, Jelvis Santos et al.. Evaluation of Agricultural Tractors Used in Forestry Operations. *Revista Engenharia na Agricultura-Reveng*, v. 28, p. 435-445, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.13083/reveng.v29i1.8834>. Acesso em: 26 ago. 2022.
- MARTIN, Maria et.. Hygroscopic properties of fresh and aged wood burning particles. *Journal of Aerosol Science*, v. 56, p. 15-29, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2012.08.006>. Acesso em: 8 jan. 2022.
- MFOMO, Joseph Zobo et al.. Carbonization techniques and wood species influence quality attributes of charcoals produced from industrial sawmill residues in Eastern Cameroon. *Bois & Forêts Des Tropiques*, v. 345, p. 65-74, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.19182/bft2020.345.a31831>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- MÜLLER, Fabian; JAEGER, Dirk; HANEWINKEL, Marc. Digitization in wood supply—A review on how Industry 4.0 will change the forest value chain. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 162, p. 206-218, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.04.002>. Acesso em: 4 abr. 2022.

NARYANTO, Rizqi Fitri et al.. The Effect of Moisture Content on the Tar Characteristic of Wood Pellet Feedstock in a Downdraft Gasifier. *Applied Sciences*, v. 10, n. 8, p. 2760, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app10082760>. Acesso em: 5 mar. 2022.

NORMA REGULAMENTADORA Nº17 (NR-17). NR 17 – ERGONOMIA. Ministério do Trabalho e Previdência. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/ctpp-nrs/norma-regulamentadora-no-17-nr-17>. Acesso em: 09 ago. 2022.

OGEDENGBE, Temitayo Samson et al.. Ergonomics Postural Risk Assessment and Observational Techniques in the 21st Century. *Procedia Computer Science*, v. 217, p. 1335-1344, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.331>. Acesso em: 20 fev. 2023.

OLIVEIRA, Aylson Costa et al.. Otimização da Produção do Carvão Vegetal por meio do Controle de Temperaturas de Carbonização. *Revista Árvore*, v. 37, p. 557-566, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300019>. Acesso em: 15 jun. 2022.

OLIVEIRA, Luiz Fernando Pinto; MOREIRA, Antonio Paulo; SILVA, Manoel Ferreira da. Advances in forest robotics: A state-of-the-art survey. *Robotics*, v. 10, n. 2, p. 53, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/robotics10020053>. Acesso em: 3 mai. 2022.

OVEISI, Ehsan et al.. Characterization of Recycled Wood Chips, Syngas yield, and tar Formation in an Industrial Updraft Gasifier. *Environments*, v. 5, n. 7, p. 84, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/environments5070084>. Acesso em: 23 jun. 2022.

PAIVA, Lucas Duarte Farias et al.. Estudo de caso da NR 17 e a sua importância na relação colaborador e empresa. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 7, p. 52621-52627, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-782>. Acesso em 4 fev. 2022.

POWELL, Alan J.; WHEELER, Jane; BATT, C. M. Identifying Archaeological Wood Stack Charcoal Production Sites Using Geophysical Prospection: Magnetic Characteristics from a Modern Wood Stack Charcoal burn Site. *Journal of archaeological science*, v. 39, n. 5, p. 1197-1204, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.11.005>. Acesso em: 18 jan. 2022.

PYTHON™. *Python*. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 03 jan. 2022.

RASPBERRY PI. *Raspberry Pi*. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/>. Acesso em: 03 jan. 2022.

REMOTEXY. *Remotexy*. Disponível em: <https://remotexy.com/en/>. Acesso em: 01 fev. 2022.

REN, Qiang et al.. Functionalization of renewable bamboo charcoal to improve indoor environment quality in a sustainable way. *Journal of Cleaner Production*, v. 246, p. 119028, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119028>. Acesso em: 18 abr. 2022.

RIBEIRO, Gabriel Browne de Deus et al.. Economic Viability Of Four Charcoal Productive Systems From Minas Gerais State. *Revista Árvore*, v. 44, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9088202000000001>, Acesso em: 20 jun. 2022.

RODRIGUES, Thaisa; BRAGHINI, Braghini Junior. Charcoal: A Discussion on Carbonization Kilns. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, v. 143, p. 104670, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104670>. Acesso em: 29 jun. 2022.

SAKULKIT, Patipan et al.. Characteristics of pyrolysis products from pyrolysis and co-pyrolysis of rubber wood and oil palm trunk biomass for biofuel and value-added applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, n. 6, p. 104561, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104561>. Acesso em: 16 dez. 2022.

SANTI, Auxiliadora Maria Moura; GONÇALVES, Zahia de Lima. Por trás da cortina de fumaça: trabalho e vida em carvoarias brasileiras. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 15, n. 37, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3895/rts.v15n37.9771>. Acesso em: 13 jun. 2022.

SANTOS, Ítalo Rodrigo Dos; COSTA NETO, Virgílio Oliveira; SANTOS, Raimundo Washington dos. Automatização inteligente: diferencial competitivo no sistema de informações do setor de colheita florestal da WSFORREST. *Revista Fatec de Tecnologia e Ciências*, v. 6, n. 1, 2021. Disponível em: <https://fatecbr.edu.br/revista-eletronica/index.php/rftc/article/view/111/34>. Acesso em: 20 nov. 2022.

SCABIN, Flávia et al.. *Diagnóstico preliminar da cadeia produtiva do carvão vegetal: análise de desafios para a promoção de melhores condições de trabalho no setor*. 2022. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/33255>. Acesso em: out. 2022.

SCHETTINI, Bruno Leão Said et al.. Produção de Madeira e Carvão Vegetal no Sistema Forno-Fornalha: Como a Variação nos Custos e Receitas Afetam a Viabilidade Econômica. *Revista Árvore*, v. 45, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/Ywcd3tmgbbk8Lpvd5RfcKhN/abstract/?lang=en>. Acesso em: 23 mai. 2023.

SILVA, Felipe Feitosa da Silva et al.. Seleção de Espécie, Temperatura e Tempo de Carbonização na Produção de Carvão Vegetal Com Resíduos Madeireiros da Amazônia. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 40, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4336/2020.pfb.40e201801737>. Acesso em: 10 nov. 2022.

SILVA, Renata Carvalho da et al.. Influência da Temperatura Final de Carbonização nas Características do Carvão Vegetal de Espécies Tropicais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 38, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201801573>. Acesso em: 13 mar. 2022.

SIMÃO, L. Floresta 4.0: Como os Conceitos da Indústria 4.0 estão Revolucionando o Setor Florestal. *B. Forest*, v. 59. 2019. Disponível em: [https://revistabforest.com.br/wp-content/uploads/2019/09/b.forest-59\\_download.pdf](https://revistabforest.com.br/wp-content/uploads/2019/09/b.forest-59_download.pdf). Acesso em: 13 mar. 2022.

SIMON, Athulya A.; ALEMI, Mohammad Mehdi; ASBECK, Alan T.. Kinematic effects of a passive lift assistive exoskeleton. *Journal of Biomechanics*, v. 120, p. 110317, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110317>. Acesso em: 20 jun. 2022.

SINGH, Rajesh et al.. Forest 4.0: Digitalization of forest using the Internet of Things (IoT). *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.02.009>. Acesso em: 20 out. 2022.

SIRURU, Herman et al.. Properties of sago waste charcoal using hydrothermal and pyrolysis carbonization. *Biomass Conversion and Biorefinery*, p. 1-12, 2020. Disponível em: Properties of sago waste charcoal using hydrothermal and pyrolysis carbonization | SpringerLink. Acesso em: 20 out. 2022.

SORANSO, Denise Ransollin et al.. Análise dos critérios normativos de saúde e segurança do trabalho na manutenção de indústrias de celulose e papel. *Revista Gestão Industrial*, v. 15, n. 4, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3895/gi.v15n4.11539>. Acesso em: 26 abr. 2022.

THINGSPEAK™. *ThingSpeak*. Disponível em: <https://thingspeak.com/>. Acesso em: 06 jan. 2022.

YANG, Xuanmin et al.. Effects of carbonization conditions on the yield and fixed carbon content of biochar from pruned apple tree branches. *Renewable Energy*, v. 146, p. 1691-1699, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.148>. Acesso em: 22 jul. 2022.

ZHANG, Xuefei et al.. Preparation and Properties of Wood Tar-based Rejuvenated Asphalt. *Materials*, v. 13, n. 5, p. 1123, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13051123>. Acesso em: 13 abr. 2022.

## ANEXOS

## ANEXO A- Código C++ para acionamento dos protótipos e interface do Aplicativo.

```

/*
  -- PROJETO F-F_UFMG --
*/
////////////////////////////////////////////////////////////////
// RemoteXY include library //
////////////////////////////////////////////////////////////////
// RemoteXY select connection mode and include library
#define REMOTEXY_MODE__HARDSERIAL
#include <RemoteXY.h>
// RemoteXY connection settings
#define REMOTEXY_SERIAL Serial
#define REMOTEXY_SERIAL_SPEED 9600
// RemoteXY configurate
#pragma pack(push, 1)
uint8_t RemoteXY_CONF[] = // 107 bytes
{ 255,4,0,0,0,100,0,16,46,1,2,1,20,45,22,11,2,26,31,31,
  79,78,0,79,70,70,0,2,1,20,27,22,11,2,26,31,31,79,78,0,
  79,70,70,32,0,2,1,20,81,22,11,24,26,31,31,79,78,0,79,70,
  70,0,2,1,20,63,22,11,24,26,31,31,79,78,0,79,70,70,0,129,
  0,4,14,57,5,31,80,82,79,84,195,147,84,73,80,79,95,70,70,32,
  45,32,85,70,77,71,0 };
// this structure defines all the variables and events of your control interface
struct {
  // input variables
  uint8_t switch_1; // =1 if switch ON and =0 if OFF
  uint8_t switch_2; // =1 if switch ON and =0 if OFF
  uint8_t switch_3; // =1 if switch ON and =0 if OFF
  uint8_t switch_4; // =1 if switch ON and =0 if OFF
  // other variable
  uint8_t connect_flag; // =1 if wire connected, else =0
} RemoteXY;
#pragma pack(pop)
////////////////////////////////////////////////////////////////
// END RemoteXY include //
////////////////////////////////////////////////////////////////
#define PIN_SWITCH_1 33
#define PIN_SWITCH_2 31
#define PIN_SWITCH_3 37
#define PIN_SWITCH_4 35
void setup()
{
  RemoteXY_Init ();
  pinMode (PIN_SWITCH_1, OUTPUT);
  pinMode (PIN_SWITCH_2, OUTPUT);
  pinMode (PIN_SWITCH_3, OUTPUT);
  pinMode (PIN_SWITCH_4, OUTPUT);
  // TODO you setup code
}
void loop()
{
  RemoteXY_Handler ();
  digitalWrite(PIN_SWITCH_1, (RemoteXY.switch_1==0)?LOW:HIGH);
  digitalWrite(PIN_SWITCH_2, (RemoteXY.switch_2==0)?LOW:HIGH);
  digitalWrite(PIN_SWITCH_3, (RemoteXY.switch_3==0)?LOW:HIGH);
  digitalWrite(PIN_SWITCH_4, (RemoteXY.switch_4==0)?LOW:HIGH);
  // TODO you loop code
  // use the RemoteXY structure for data transfer
  // do not call delay()
}

```

**ANEXO B-** Código *Python* para da aquisição de dados do processo de carbonização.

```

import MAX6675.MAX6675 as MAX6675
import time
from datetime import datetime
import requests

import RPi.GPIO as GPIO
import webbrowser
import urllib.request
import requests

CSK = 25
CS = 24
DO1 = 18
DO2 = 20
DO3 = 21
DO4 = 19
DO5 = 26

sensor1 = MAX6675.MAX6675(CSK,CS,DO1)
sensor2 = MAX6675.MAX6675(CSK,CS,DO2)
sensor3 = MAX6675.MAX6675(CSK,CS,DO3)
sensor4 = MAX6675.MAX6675(CSK,CS,DO4)
sensor5 = MAX6675.MAX6675(CSK,CS,DO5)

try:
    while True:
        temp1 = sensor1.readTempC()
        temp2 = sensor2.readTempC()
        temp3 = sensor3.readTempC()
        temp4 = sensor4.readTempC()
        temp5 = sensor5.readTempC()
        dados1 = print(datetime.today().strftime('%Y-%m-%d %H:%M'),("tempt1°C ==> {0:0.2F}". format(temp1),
            "tempt2°C ==> {0:0.2F}". format(temp2),
            "tempt3°C ==> {0:0.2F}". format(temp3),
            "tempt4°C ==> {0:0.2F}". format(temp4),
            "tempt5°C ==> {0:0.2F}". format(temp5)))

        enviar = requests.get("https://api.thingspeak.com/update?api_key=9CHEZ0P52677UNJV&field1="
            +str(temp1)+"&field2="+str(temp2)+"&field3="+str(temp3)
            +"&field4="+str(temp4)+"&field5="+str(temp5))

        time.sleep(5)

except KeyboardInterrupt:
    GPIO.cleanup()
    #print('Finalizado...')

```

**ANEXO C-** Código *Python* para *download* de dados do processo de carbonização.

```

import time
from datetime import datetime
import webbrowser
import urllib.request
import requests
try:
    while True:
        #time.sleep(5)
        conteudo
requests.get('https://api.thingspeak.com/channels/1841774/fields/1/last?key=l8J1NYZGCYMF7SGI')
        conteudo1
requests.get('https://api.thingspeak.com/channels/1841774/fields/8/last?key=l8J1NYZGCYMF7SGI')
        conteudo2
requests.get('https://api.thingspeak.com/channels/1841774/fields/2/last?key=l8J1NYZGCYMF7SGI')
        conteudo3
requests.get('https://api.thingspeak.com/channels/1841774/fields/3/last?key=l8J1NYZGCYMF7SGI')
        conteudo4
requests.get('https://api.thingspeak.com/channels/1841774/fields/4/last?key=l8J1NYZGCYMF7SGI')
        conteudo5
requests.get('https://api.thingspeak.com/channels/1841774/fields/5/last?key=l8J1NYZGCYMF7SGI')
        print("valor lido ")
        print(datetime.today().strftime('%Y-%m-%d %H:%M') + ('|')+ ('==>') + str(conteudo.text) + ('|') +
(conteudo1.text) +
        ('|') + (conteudo2.text) + ('|') + (conteudo3.text)+
        ('|') + (conteudo4.text) + ('|') + (conteudo5.text ))
        #print(conteudo1.text)
        #print(conteudo2.text)
        #print(conteudo3.text)
        #print(conteudo4.text)
        #print(conteudo5.text)
        conteudo = conteudo.text
        conteudo1 = conteudo1.text
        conteudo2 = conteudo2.text
        conteudo3 = conteudo3.text
        conteudo4 = conteudo4.text
        conteudo5 = conteudo5.text
        arquivo = open('/Users/RAFAEL/Desktop/recebendo/testdados', 'a+')
        arquivo.writelines(datetime.today().strftime('%Y-%m-%d %H:%M') + ('|') + ( 'T0==> ')+ str((conteudo) +
        ('|') + ( 'T1==> ' ) + conteudo1 + ('|') + ( 'T2==> ' ) + conteudo2 +
        ('|') + ( 'T3==> ' ) + conteudo3 + ('|') + ( 'T4==> ' ) + conteudo4 +
        ('|') + ( 'T5==> ' ) + conteudo5 + ('|') +'\n'))

        time.sleep(10)
        #arquivo.writelines(str(conteudo1) + '\n' + ':')
        arquivo.close()
except KeyboardInterrupt:
    # GPIO.cleanup()
    print('Finalizado...')

```