

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**Centro de Desenvolvimento Tecnológico**  
**Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais**



**Tese de Doutorado**

**Desenvolvimento de forno para ensaios  
termogravimétricos controlados**

**Luciano Anacker Leston**

Pelotas, 2022

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

L642d Leston, Luciano Anacker

Desenvolvimento de forno para ensaios termogravimétricos controlados / Luciano Anacker Leston ; Darci Alberto Gatto, orientador ; Rafael Beltrame, coorientador. — Pelotas, 2022.

103 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2022.

1. Carvão vegetal. 2. Termogravimetria. 3. Carbonização. I. Gatto, Darci Alberto, orient. II. Beltrame, Rafael, coorient. III. Título.

CDD : 620.11063



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO

DEFESA DE TESE

Aluno	15104621 - LUCIANO ANACKER LESTON		
CPF	80705120082	Nacionalidade	BRASILEIRA
Naturalidade			
Ingresso	SELEÇÃO PÓS-GRADUAÇÃO - 2015/1		
Programa	PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS		
Curso	80101 - CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS	Nível	DOCTORADO
Modalidade	PRESENCIAL		

Dados pessoais dos membros da banca examinadora

Nome completo	Documento	Nasc	Titulação		
			Área	Local	Ano
DARCI ALBERTO GATTO	51220059072	1970	ENGENHARIA FLORESTAL	UFSM	2006
RAFAEL BELTRAME	00355363062	1983	ENGENHARIA FLORESTAL	UFSM	2012
SILVIA HELENA FUENTES DA SILVA	462.525.410-87	1970	INGENIERÍA DE MATERIALES RENOVABLES	UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO	2019
MARCELO LEMOS ROSSI	06047121624	1983	ENG. ELÉTRICA	UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA	2017
MATEUS BECK FONSECA	95344942087	1979	SAÚDE E COMPORTAMENTO	UCPEL	2019
RENE ALEXANDER HERRERA DÍAZ	AAI243174	1982	INGENIERÍA DE MATERIALES RENOVABLES	UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO	2019
EDUARDO WALKER	82948828015	1984	AGRONOMIA	UFPEL	2018
PATRÍCIA SOARES BILHALVA DOS SANTOS	82612935053	1984	INGENIERÍA DE MATERIALES RENOVABLES	UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO	2016

Membros da banca examinadora	Título	Assinatura
51220059072 - DARCI ALBERTO GATTO	DOCTORADO	
00355363062 - RAFAEL BELTRAME	DOCTORADO	
462.525.410-87 - SILVIA HELENA FUENTES DA SILVA	DOCTORADO	
06047121624 - MARCELO LEMOS ROSSI	DOCTORADO	
95344942087 - MATEUS BECK FONSECA	DOCTORADO	
AAI243174 - RENE ALEXANDER HERRERA DÍAZ	DOCTORADO	HERRERA DIAZ, RENE ALEXANDER (FIRMA)
82948828015 - EDUARDO WALKER	DOCTORADO	
82612935053 - PATRÍCIA SOARES BILHALVA DOS SANTOS	DOCTORADO	

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** SILVIA HELENA FUENTES DA SILVA  
Data: 09/08/2022 14:02:37-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** DARCI ALBERTO GATTO  
Data: 10/08/2022 11:52:38-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RAFAEL BELTRAME  
Data: 10/08/2022 12:37:13-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** Mateus Beck Fonseca  
Data: 10/08/2022 20:08:40-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MARCELO LEMOS ROSSI  
Data: 10/08/2022 21:28:55-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** PATRICIA SOARES BILHALVA DOS SANTOS  
Data: 10/08/2022 17:30:31-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** EDUARDO WALKER  
Data: 11/08/2022 13:29:48-0300  
Verifique em <https://verificador.iti.br>

**Luciano Anacker Leston**

**Desenvolvimento de forno para ensaios  
termogravimétricos controlados**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Darci Alberto Gatto

Co-orientador: Prof. Dr. Rafael Beltrame

Pelotas, 2022

Luciano Anacker Leston

Desenvolvimento de forno para ensaios termogravimétricos controlados

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais, Programa e Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 05/08/2022

Banca examinadora:

Prof. Dr. Darci Alberto Gatto (Orientador)  
Doutor em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Rafael Beltrame (Co-orientador)  
Doutor em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Rene Alexander Herrera Diaz  
Doutor em *Ingeniería de Materiales Renovables* pela *Universidad del País Vasco*

Profa. Dra. Silvia Helena Fuentes da Silva  
Doutora em *Ingeniería de Materiales Renovables* pela *Universidad del País Vasco*

Prof. Dr. Marcelo Lemos Rossi  
Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Eduardo Walker  
Doutor em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dra. Patrícia Soares Bilhalva dos Santos  
Doutora em *Ingeniería de Materiales Renovables* pela *Universidad del País Vasco*

Prof. Dr. Mateus Beck Fonseca  
Doutor em Saúde e Comportamento pela Universidade Católica de Pelotas

**Dedico este trabalho à minha esposa, ao meu filho, aos meus pais, aos meus familiares e amigos pelo apoio, amor e carinho.**

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Darci Alberto Gatto pela orientação e participação neste trabalho. Pela provisão de insumos, materiais e pelo acesso aos capacitados colegas e alunos dos diversos laboratórios da Engenharia Industrial Madeireira, pela amizade e ajuda em todas etapas deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Rafael Beltrame pelos ensinamentos e pelas importantes discussões sobre carvão vegetal.

Ao amigo Albio de Oliveira Alves, o qual colaborou para o desenvolvimento deste trabalho, assim como, pela amizade, dedicação e parceria em todos os momentos.

Ao colega Ricardo Ripol, responsável pelo desempenho de tarefas indispensáveis para o andamento deste trabalho.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais pela amizade e ajuda.

À minha esposa Suelen pela sua paciência durante a minha ausência e apoio.

Ao meu filho Heitor, o qual chegou durante a execução deste trabalho e representa a minha maior motivação.

Aos meus pais Dorivaldo e Marion pelo incansável apoio e zelo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais pela estrutura de corpo docente e seus laboratórios. Ao Coordenador Prof. Dr. Neftali Careño e à secretária do curso Srta. Isabel Cabral pelo suporte em todos os momentos.

**“A tentativa pode nos levar ao erro, mas a verdadeira  
busca em acertar já nos garante a vitória.”  
(Randerson Figueiredo)**

## Resumo

LESTON, Luciano Anacker. **Desenvolvimento de forno para ensaios termogravimétricos controlados**. 2022. <103>f. Tese de doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

O desafio no desenvolvimento de novos equipamentos de ensaios laboratoriais para acompanhar o progresso tecnológico no desenvolvimento de técnicas de caracterização de materiais é enfrentado por pesquisadores em todo o mundo. No caso de materiais como o carvão vegetal, apesar de existirem diversas normas nacionais e internacionais para caracterização do carvão vegetal, nenhuma delas relaciona diretamente aos fatores, parâmetros e condições produtivas reais. Sendo o Brasil o líder mundial na produção e consumo, e com uma expectativa de aumento da demanda por parte da produção siderúrgica nacional, a qual já resulta, somente no presente ano, em um aumento considerável no preço do metro cúbico do carvão vegetal. O presente trabalho busca o desenvolvimento de uma tecnologia, na forma de uma bancada experimental, capaz de controlar as variáveis envolvidas no processo de pirólise da madeira, independentemente de suas condições iniciais, produzindo assim para cada unidade de massa de uma determinada madeira, a maior quantidade de massa possível de carvão vegetal, garantindo e mantendo um determinado padrão qualidade, o qual estará referenciado apenas à qualidade natural da madeira enforada.

**Palavras-chave:** Carvão vegetal, termogravimetria, carbonização.

## **Abstract**

LESTON, Luciano Anacker. **Development of oven for controlled thermogravimetric tests**. 2022. <103>f. Thesis PhD. Federal University of Pelotas, Pelotas, 2022.

The challenge in developing new laboratory testing equipment to seek technological progress in the development of material characterization techniques is being tackled by researchers around the world. In the case of materials such as charcoal, although there are several national and international standards for charcoal characterization, none of them relates directly to real factors, parameters and production conditions. As Brazil is the world leader in production and consumption, and with an expectation of increased demand from national steel production, which has already resulted in a considerable increase in the price of cubic meter of charcoal. The present work seeks the development of a technology, in the form of an experimental bench, capable of controlling the variables involved in the process of pyrolysis of wood, independent of its initial conditions, thus producing for each unit of mass of a given wood, the largest quantity of possible mass of charcoal, guaranteeing and maintaining a certain quality standard, which will be referenced only to the natural quality of the wood encased.

**Key-words:** Charcoal, termogravimetric analysis, carbonization.

## Lista de Figuras

Figura 1 – Forno tipo cova, acima a visão em corte longitudinal e abaixo a vista superior do mesmo sem a cobertura. ....	29
Figura 2 – Forno tipo monte vertical. ....	30
Figura 3 – Forno tipo monte horizontal. ....	31
Figura 4 – Forno tipo monte Casamance.....	31
Figura 5 – Forno tipo argentino, meia-laranja. ....	33
Figura 6 – Forno brasileiro tipo colmeia. ....	34
Figura 7 – Forno tipo colmeia de encosta.....	35
Figura 8 – Forno tipo Missouri. ....	35
Figura 9 – Forno de metal portátil. ....	37
Figura 10 – Forno do tipo tambor.....	37
Figura 11 – Reator de carbonização CML. ....	39
Figura 12 – Carbonização OET Calusco. ....	40
Figura 13 – Processo de carbonização Lambiotte. ....	41
Figura 14 – Processo de carbonização Lurgi.....	42
Figura 15 – Forno rotativo.....	43
Figura 16 - Imagens de microscopia eletrônica por varredura do plano tangencial de carvão de <i>Bagasse guianensis</i> produzido em diferentes pressões: (superior esquerda) pressão atmosférica; (superior direita) 2 bar; (inferior esquerda) 7,3 bar e (inferior direita) 10 bar. ....	46
Figura 17 – Bancada experimental, com o sensor e o forno tubular.....	50
Figura 18 – Projeto tridimensional do dispositivo. (1) Atuadores térmicos são conectados através de pontes de SiN ao (2)cantilever. (3) Aquecedor e a junção	

quente do (4) termopar estão no suporte. (5) Piezo resistores estão ligados conforme a ponte de Wheatstone.....	51
Figura 19 - Desenho esquemático do forno com sensores de temperatura (T0-T5), resistência elétrica (R); sensor de pressão (P); manômetro (M); válvula de controle de pressão (V1); válvula de injeção de nitrogênio (V2) e válvula de segurança (SV). À direita, fotos do forno em laboratório. ....	52
Figura 20 - Fotos do equipamento TGA mostrando o forno e reator fechados (A), abertos (B) e a manipulação da amostra no cadinho de alumínio (C). ....	52
Figura 21 – Diagrama esquemático do reator para análise termogravimétrica: (1) conexão com a balança eletrônica, (2) eletroímã, (3) ímã permanente, (4) filete central, (5) sensores de posição, (6) término cônico no final do filete central, (7) entrada do gás (podendo ser inerte: N2, He ou oxidante: ar, CO, CO2 ou redutor: H2), (8) filete de platina suportando a amostra, (9) forno tubular com resistência elétrica envolvendo o reator tubular de inox (10) com diâmetro de 30 mm e altura de 1,2 m, (11) cadinho de alumínio para amostra; termopares tipo K próximo à resistência elétrica do forno (12) e abaixo da amostra (13) e (14) saída do gás.....	53
Figura 22 – Matéria prima da estrutura do forno tubular.....	55
Figura 23 – Resistência de Níquel-Kanthal.....	55
Figura 24 – Célula de carga de 100g.....	56
Figura 25 – Sensores de temperatura, na esquerda o termopar e na direita o sensor digital LM35.....	56
Figura 26 – Na esquerda, o tipo de válvula solenoide a ser utilizado e na direita o compressor.....	57
Figura 27 – Sensor de pressão MPX5999D. ....	57
Figura 28 – Filtro secador.....	58

Figura 29 – Micro controlador Atmega328P. ....	58
Figura 30 – Na esquerda o circuito integrado MAX6675 e na direita o conversor analógico digital de 24 bits HX711.....	59
Figura 31 – Relé de estado sólido SSR-40DA.....	60
Figura 32 – Circuito de isolamento.....	60
Figura 33 – Diagrama esquemático do forno de ensaios termogravimétricos. ....	61
Figura 34 – Arranjos das amostras de <i>Corymbia citriodora</i> . ....	63
Figura 35 – Arranjos das amostras de <i>Eucalipto saligna</i> . ....	63
Figura 36 – Arranjos das amostras de <i>Pinus elliottii</i> . ....	63
Figura 37 – Forno tubular com a resistência de 5kW em funcionamento na esquerda e a balança de precisão e o cadinho das amostras na direita. ....	65
Figura 38 – Bancada experimental implementada.....	66
Figura 39 – Isolação térmica.....	67
Figura 40 – Unidade de controle.....	67
Figura 41 – Unidade de pós-tratamento dos gases, diagrama de válvulas. ....	68
Figura 42 – Interface homem-máquina. ....	69
Figura 43 – Ambiente de simulação para modelar a dinâmica térmica do forno. ....	70
Figura 44 – Validação da função de transferência aproximada do forno.....	70
Figura 45 – Ambiente de simulação para projetar o sistema de controle. ....	71
Figura 46 – Validação do sistema de controle submetido diferentes taxa de aquecimento. ....	72
Figura 47 – Validação do sistema de controle submetido a diferentes degraus de entrada.....	72
Figura 48 – Ação do sistema de controle projetado sobre o PWM. ....	73

Figura 49 – Curva de resfriamento do forno, após atingir 650°C. ....	73
Figura 50 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3P de <i>Corymbia citriodora</i> .....	76
Figura 51 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3P de <i>Corymbia citriodora</i> .....	76
Figura 52 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 1G de <i>Corymbia citriodora</i> .....	77
Figura 53 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 1G de <i>Corymbia citriodora</i> .....	77
Figura 54 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 2G de <i>Corymbia citriodora</i> .....	78
Figura 55 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 2G de <i>Corymbia citriodora</i> .....	78
Figura 56 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3G de <i>Corymbia citriodora</i> .....	79
Figura 57 - Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3G de <i>Corymbia citriodora</i> .....	79
Figura 58 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3P1G de <i>Corymbia citriodora</i> .....	80
Figura 59 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3P1G de <i>Corymbia citriodora</i> .....	80
Figura 60 – Comparação entre as curvas termogravimétricas percentuais de <i>Corymbia citriodora</i> .....	81
Figura 61 – Comparação entre as derivadas das curvas termogravimétricas de <i>Corymbia citriodora</i> .....	81

Figura 62 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3P de <i>Eucalypto saligna</i> .....	82
Figura 63 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3P de <i>Eucalypto saligna</i> .....	82
Figura 64 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 1G de <i>Eucalypto saligna</i> .....	83
Figura 65 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 1G de <i>Eucalypto saligna</i> .....	83
Figura 66 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 2G de <i>Eucalypto saligna</i> .....	84
Figura 67 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 2G de <i>Eucalypto saligna</i> .....	84
Figura 68 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3G de <i>Eucalypto saligna</i> .....	85
Figura 69 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3G de <i>Eucalypto saligna</i> .....	85
Figura 70 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3P1G de <i>Eucalypto saligna</i> .....	86
Figura 71 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3P1G de <i>Eucalypto saligna</i> .....	86
Figura 72 – Comparação entre as curvas termogravimétricas percentuais de <i>Eucalypto saligna</i> .....	87
Figura 73 – Comparação entre as derivadas das curvas termogravimétricas de <i>Eucalypto saligna</i> .....	87
Figura 74 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3P de <i>Pinus elliottii</i> .....	88

Figura 75 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3P de <i>Pinus elliottii</i> . .....	88
Figura 76 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 1G de <i>Pinus elliottii</i> . .....	89
Figura 77 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 1G de <i>Pinus elliottii</i> . .....	89
Figura 78 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 2G de <i>Pinus elliottii</i> . .....	90
Figura 79 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 2G de <i>Pinus elliottii</i> . .....	90
Figura 80 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3G de <i>Pinus elliottii</i> . .....	91
Figura 81 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3G de <i>Pinus elliottii</i> . .....	91
Figura 82 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3P1G de <i>Pinus elliottii</i> . .....	92
Figura 83 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3P1G de <i>Pinus elliottii</i> . .....	92
Figura 84 – Comparação entre as curvas termogravimétricas percentuais de <i>Pinus elliottii</i> . .....	93
Figura 85 – Comparação entre as derivadas das curvas termogravimétricas de <i>Pinus elliottii</i> . .....	93
Figura 86 – Temperaturas finais de carbonização em função do teor de carbono fixo desejado. .....	95
Figura 87 – Queima controlada de C2G por 2383 segundos (471,8°C + 2min permanência). .....	96

Figura 88 – Queima controlada de S2G por 2389 segundos (478,2°C + 2min permanência).....	96
Figura 89 – Queima controlada de P2G por 2261 segundos (456,9°C + 2min permanência).....	97
Figura 90 – Comparação entre as queimas controladas. ....	97
Figura 91 – Acima e à esquerda, carvão produzido através de <i>Corymbia citriodora</i> , à direita <i>Eucalypto saligna</i> , e abaixo <i>Pinus elliottii</i> .....	98

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Composição elementar, rendimento e composição do carvão, em função da temperatura de carbonização.....	44
Tabela 2 – Tabela verdade da lógica de funcionamento das válvulas conforme o fluxo dos gases.....	68
Tabela 3 – Tabela dos dados amostrados e resultados experimentais para <i>Corymbia citriodora</i> .....	74
Tabela 4 – Tabela dos dados amostrados e resultados experimentais para <i>Eucalipto saligna</i> .....	74
Tabela 5 – Tabela dos dados amostrados e resultados experimentais para <i>Pinus elliottii</i> .....	75
Tabela 6 – Teores de carbono fixo calculados através dos percentuais de materiais voláteis e dos teores de cinzas. ....	94
Tabela 7 – Teores de carbono fixo calculados através dos percentuais de materiais voláteis e dos teores de cinzas, para cada carvão vegetal produzido, assim como seus respectivos rendimentos gravimétricos. ....	95

## Sumário

1 Introdução.....	21
1.1 Justificativa .....	23
1.2 Objetivo.....	24
1.2.1 Objetivos Específicos.....	24
1.3 Motivação.....	25
2 Revisão da Literatura.....	26
2.1 Carbonização.....	26
2.1.1 Estágios da Carbonização da Madeira .....	27
2.2 Tipos de fornos .....	28
2.2.1 Processos em lote .....	28
2.2.1.1 Fornos do tipo cova .....	28
2.2.1.2 Fornos do tipo monte .....	30
2.2.1.3 Fornos de tijolos ou concreto .....	32
2.2.1.4 Fornos de metal .....	36
2.2.2 Processos contínuos.....	38
2.2.2.1 Reator de carbonização CML .....	38
2.2.2.2 Carbonização OET Calusco.....	39
2.2.2.3 Processo de carbonização Lambiotte .....	40
2.2.2.4 Processo de Carbonização Lurgi .....	41
2.2.2.5 Forno rotativo.....	42
2.3 Influência da temperatura final.....	43
2.4 Taxa de aquecimento .....	44
2.5 Pressão e fluxo de gases.....	45
2.6 Rendimento e qualidade do carvão .....	47

2.6.1 Rendimento.....	47
2.6.2 Propriedades químicas .....	48
2.7 Análise Termogravimétrica .....	49
2.7.1 Estado da Arte .....	49
3 Materiais e Métodos.....	54
3.1 Bancada Experimental.....	54
3.1.1 O Forno.....	54
3.1.2 A Unidade de Pós-Tratamento dos Gases.....	57
3.1.3 A Unidade de Controle.....	58
3.1.4 Diagrama esquemático .....	61
3.2 Interface Homem-Máquina.....	61
3.3 Modelagem, Controle e Validação .....	61
3.4 Comparação entre Arranjos de Amostras e Espécies .....	62
3.5 Predição da Temperatura Final de Carbonização.....	64
4 Resultados .....	65
4.1 Implementação Experimental.....	65
4.2 Interface Homem-Máquina.....	69
4.3 Modelagem da Função de Transferência, do Sistema de Controle e Validação .....	69
4.4 Comparação da Carbonização de Diferentes Espécies e Arranjos .....	74
4.5 Predição da Temperatura Final de Carbonização.....	94
5 Conclusões .....	99
5.1 Trabalhos Futuros.....	99
Referências Bibliográficas .....	100

## 1 Introdução

Historicamente a descoberta do carvão vegetal, da mesma forma que sua utilização como combustível, é atribuída ao homem primitivo, o qual percebeu vantagens ao utilizar uma “madeira” queimada e friável no interior das cavernas. Tais vantagens eram não produzir chama nem fumaça, e sim gerar calor de uma forma mais intensa que a queima direta da madeira.

Segundo Gomes e Oliveira (1982), a madeira quando submetida à ação do calor, e em temperaturas relativamente elevadas, na faixa de 300 a 500°C, sofre um processo de transformação no qual todos os seus componentes são exaustivamente modificados. Este processo é conhecido como carbonização ou pirólise da madeira.

Conforme Wenzl (1970), a pirólise é um processo de decomposição térmica que a madeira sofre, na ausência ou na presença de quantidades controladas de oxigênio, gerando um resíduo sólido composto quase que exclusivamente de carbono puro, chamado de carvão vegetal.

Além do carvão vegetal, a pirólise da madeira, produz voláteis condensáveis como, alcatrões solúveis e insolúveis, ácidos orgânicos, cetonas, água, álcoois e hidrocarbonetos. Retirando-se o alcatrão insolúvel, a mistura dos demais compostos forma um subproduto importante, normalmente intitulado como ácido pirolenhoso. Este contém substâncias químicas valiosas como o ácido acético, metanol e acetona. Durante a sua fase gasosa, podendo esta ser utilizada como fonte de energia suplementar ao processo, possui rendimentos da ordem de 5 a 20% em massa, dependendo da faixa de temperatura em que a pirólise se realiza. Os principais gases produzidos são gás carbônico, monóxido de carbono, metano, hidrogênio e hidrocarbonetos de até quatro carbonos. Nos processos convencionais de transformação da madeira em carvão vegetal existe a presença controlada de oxigênio do ar, para que parte da madeira sofra combustão, gerando desta forma a energia necessária para a pirólise ser realizada. Essa queima leva à formação de compostos inorgânicos denominados cinzas (SANTIAGO e PANNIRSEL, 2004).

Segundo Brito e Cintra (2004), a principal motivação para a realização do processo de carbonização da madeira reside no fato do carvão vegetal liberar, em sua queima, uma quantidade de energia muito maior que a madeira de partida. A quantidade de energia liberada por unidade de massa na combustão de um combustível é denominada Poder Calorífico. Enquanto que na madeira o Poder Calorífico tem seu valor em torno de 4500 Kcal/Kg na base seca, no carvão vegetal pode atingir até 8000 Kcal/Kg.

A necessidade de utilização de fontes alternativas de energia tem incrementado o interesse no uso de biomassa. O carvão vegetal é um combustível renovável e capaz de

reduzir as emissões de dióxido de carbono e enxofre. Nesse sentido o Brasil se destaca no setor mundial como maior produtor e consumidor desta bioenergia. Os altos índices de utilização da biomassa no Brasil estão relacionados com a diversidade climática e a abundância de recursos agroflorestais (PELÁEZ-SAMANIEGO et al., 2008).

Um grande problema na produção do carvão vegetal é a ampla diferença existente no quesito qualidade, necessitando-se de um controle rigoroso das suas propriedades, ocasionando um grande desperdício de material, dificultando-se assim a operação na queima (TRUGILHO et al., 2001). Segundo esses mesmos autores, os diferentes sistemas de carbonização e as diferentes características físico-químicas de diversas espécies lenhosas exercem uma grande variabilidade na qualidade do carvão vegetal produzido. Dessa forma, a utilização de uma determinada madeira para fins energéticos deve estar baseada no conhecimento de suas características químicas e físicas, sendo que, quanto maior sua densidade e seu teor de lignina, maior será o rendimento em carvão vegetal na carbonização, bem como, maior será a quantidade de energia liberada em sua combustão.

Embora haja grande utilização da madeira para fins energéticos, há relativamente poucos estudos que descrevam as características importantes de uma determinada espécie de madeira para tal fim (MACHADO et al., 2014).

Outro grande problema na produção do carvão vegetal se dá ao fato das empresas produtoras, em sua grande maioria, continuarem a utilizar tecnologias primitivas, ultrapassadas e de baixa eficiência (AMELOTI e CARVALHO, 2009). Cabe salientar que tal fato não se aplica somente aos pequenos produtores, mas também aos grandes produtores.

Para o caso dos pequenos produtores de carvão vegetal, estes normalmente utilizam fornos construídos de alvenaria revestidos de barro. Estes fornos normalmente são feitos em barrancos ou na terra e não possuem formatos padronizados. Possuem formas e tamanhos distintos, fazendo com que o processo seja irregular e totalmente dependente de seus operadores. Geralmente, esses fornos possuem poucas tecnologias envolvidas, como mecanização e instrumentos de medição das variáveis importantes ao processo, prejudicando tanto o rendimento quanto a qualidade final do produto (OLIVEIRA, 2009).

No caso dos grandes produtores, os mesmos utilizam fornos de alvenaria reforçados com estruturas metálicas de tamanhos variados, de acordo com a necessidade de produção. Atualmente os mais utilizados são os fornos retangulares, cujo processo pode ser mecanizado, porém ainda é realizado de forma primitiva sendo que nestes casos, os fornos possuem poucos instrumentos capazes de fornecer dados precisos ao processo de carbonização da madeira. Mesmo com a padronização do processo de carbonização por parte dos grandes produtores, padronização de práticas operacionais e da madeira a ser enfiada, no entanto, os fornos utilizados possuem maior capacidade, dificultando o controle do processo. Atualmente, nessas indústrias, o cálculo da produtividade é obtido pela estimativa

do volume de madeira enfiada com o volume de carvão retirado do forno. Esse cálculo de produção torna-se uma medida não confiável, pois o volume de madeira enfiado está diretamente ligado a fatores subjetivos, como a experiência dos operadores, posicionamento da madeira dentro do forno, entre outros (OLIVEIRA et al., 2010).

Segundo Oliveira et al. (2010), para um cálculo da produção de forma mais precisa é necessário a utilização do cálculo do rendimento gravimétrico, o qual é diretamente dependente da massa da madeira e da massa do carvão produzido a cada ciclo.

O desenvolvimento de modelos numéricos e procedimentos experimentais para controlar qualquer tipo de equipamento são fundamentais para a obtenção de lucro, produtividade e qualidade do produto. Especificamente em fornos de carvão vegetal, onde alguns problemas, tais como: a previsão do tempo de produção, o tempo de secagem da madeira verde e os procedimentos para o controle da homogeneidade da carbonização são fundamentais e de difícil execução (CARVALHO et al., 2012).

Segundo Antal e Mok (1990), a média dos rendimentos típicos da madeira no Brasil é de aproximadamente 30%, sendo este índice obtido em fornos industriais para a produção em larga escala do tipo Missouri, feitos de alvenaria e reforçados com estruturas metálicas.

Do ponto de vista estequiométrico, o rendimento da madeira deveria ser superior a 40% (ANTAL e VÁRHEGYI, 1995).

## 1.1 Justificativa

Apesar de existirem diversas normas nacionais e internacionais para caracterização do carvão vegetal, nenhuma delas relaciona diretamente aos fatores, parâmetros e condições produtivas reais. E, em função de diversas variáveis inerentes ao processo, são incapazes de pré-determinar quais curvas, de aquecimento e pressão dos fornos, devem ser seguidas para obter o maior rendimento e a melhor qualidade.

Conforme Pereira et al. (2017), o grande gargalo na cadeia do carvão vegetal está relacionado às grandes emissões de poluentes e gases, as quais podem ser minimizadas pela queima dos gases resultantes da pirólise, reduzindo assim as emissões dióxido de carbono e água.

Segundo Araújo (2018), nos últimos anos a participação em toda a produção florestal nacional destinada ao carvão vegetal foi de 70,55%, posicionando assim o Brasil como primeiro no ranking mundial da produção de carvão vegetal, totalizando 11%. De acordo com o mesmo autor, existe uma expectativa de aumento da demanda por parte da produção siderúrgica nacional, a qual já está resultando em um aumento considerável no preço do metro cúbico do carvão vegetal.

Desta maneira, o presente trabalho atua diretamente na melhoria de todas as etapas da produção de carvão vegetal, seja a priori, identificando as espécies e determinando previamente seus rendimentos e qualidades produtivas, ou a posteriori, durante a queima das espécies, auxiliando na automação de fornos e no desenvolvendo de estratégias de controle para os mesmos.

## **1.2 Objetivo**

Produzir um equipamento automatizado para a obtenção eficiente do carvão vegetal, sendo o mesmo capaz de investigar quais parâmetros seriam necessários seguir durante a carbonização, para que o carvão vegetal produzido atinja valores de rendimentos mais próximos dos valores estequiométricos, ou seja, obtendo-se uma melhora quantitativa de aproximadamente 33% em ganho de massa se comparado com a produção de carvão vegetal atual, aumentando-se em 10% o rendimento final.

Realizar através do equipamento desenvolvido uma pesquisa comparativa, qualitativamente e quantitativamente, entre diferentes espécies de madeira.

### **1.2.1 Objetivos Específicos**

Este trabalho tem como objetivo específico desenvolver uma tecnologia, na forma de uma bancada experimental, capaz de controlar as variáveis envolvidas no processo de pirólise da madeira independente de suas condições iniciais, produzindo assim para cada unidade de massa de uma determinada madeira, a maior quantidade de massa possível de carvão vegetal, garantindo e mantendo assim um determinado padrão qualidade, o qual estará referenciado apenas à qualidade natural da madeira enfiada.

Os objetivos específicos do equipamento a ser desenvolvido são:

- Controlar a temperatura e a pressão, e suas respectivas taxas de variação durante o processo;

- Determinar o percentual de umidade da madeira;

- Recircular ou não os gases resultantes exauridos pelo processo de pirólise.

Desenvolver uma interface homem-máquina amigável para o usuário ou operador, sendo esta capaz de identificar as necessidades, identificar problemas, investigar a forma de trabalhar, assim como, comparar alternativas de maneira aumentar a eficiência e usabilidade do equipamento (Hartson, 1998; Preece et al, 2002).

### 1.3 Motivação

O presente trabalho se encaixa perfeitamente na tendência atual do mercado mundial, investir-se mais no desenvolvimento de software frente ao desenvolvimento de hardware, o qual é relativamente simples. O atual desenvolvimento tecnológico, principalmente na eletrônica e no desenvolvimento de software, tem proporcionado inúmeros recursos computacionais para o desenvolvimento de algoritmos mais complexos (Sun Microsystems, 2004).

As soluções propostas pela grande maioria dos pesquisadores da atualidade na área da termogravimetria (veja, por exemplo, Johnson e Mansfield (2012) e Iervolino (2011)) estão sempre voltadas para as micros ou as nanos decomposições. Desta forma se abre esta lacuna, no qual os fatores macro são as principais características. Trabalhos anteriores, como Dicerbo (1971), demonstram a necessidade de estabelecimento de novas padronizações para cada tipo de processo no que tange a termogravimetria.

Soluções comerciais utilizadas para a realização de ensaios termogravimétricos, por mais simples que sejam, mesmo não contemplando inúmeras etapas necessárias para realização dos testes normatizados no desenvolvimento e caracterização de carvão vegetal, chegam a custar mais de oito mil dólares americanos. Deste modo, o alto custo compromete a expansão das pesquisas, assim como a eficiência da produção nesta área tão importante para as indústrias da madeira, do carvão vegetal e da siderurgia nacional.

Este trabalho tem como principal motivação o desafio de desenvolver um forno para ensaios termogravimétricos controlados através de uma tecnologia difundida e atual. Para tanto, objetiva-se estruturar uma bancada e desenvolver uma arquitetura de controle simples e flexível para a mesma. Esta arquitetura deve permitir a realização de diferentes testes, e que os mesmos forneçam resultados precisos e confiáveis. Desta forma, esta bancada deverá colaborar com o desenvolvimento de outras tecnologias, as quais permitam a disseminação de novas tecnologias para a indústria brasileira através da otimização de recursos em sua implementação e do aumento do rendimento da produção.

## **2 Revisão da Literatura**

No item 2.1 deste Capítulo, apresenta-se uma revisão da literatura quanto a carbonização da madeira, assim como a apresentação dos estágios que a compreendem. No item 2.2, apresenta-se os diferentes tipos de fornos utilizados na produção do carvão vegetal. No item 2.3 é feita uma análise quanto influência da temperatura final de pirólise. No item 2.4 é realizada uma análise quanto a taxa de aquecimento no processo da carbonização. No item 2.5 é feita a análise quanto a pressão e o fluxo dos gases envolvidos no processo da carbonização. No item 2.6, apresenta-se como determinar o rendimento e a qualidade do carvão produzido. Finalmente, no item 2.7, apresenta-se uma revisão da literatura quanto a análise termogravimétrica.

### **2.1 Carbonização**

Segundo FAO (1985), a carbonização é uma forma particular de denominar o processo químico chamado de pirólise, o qual é a decomposição de substâncias complexas em substâncias mais simples através de seu aquecimento. Carbonização é o termo utilizado quando substâncias complexas compostas por carbono, como madeira ou resíduos agrícolas são decompostas, seja pelo aquecimento do carbono elementar ou pelo aquecimento de seus compostos químicos que contenham algum carbono em sua estrutura química.

Durante a pirólise ou carbonização, a madeira é aquecida em um recipiente fechado de algum tipo, longe do oxigênio do ar, pois o mesmo permitiria sua inflamação, permitindo assim a queima de suas cinzas. Sem oxigênio, a substância de madeira é forçada a se decompor em uma variedade de substâncias, a principal delas é o carvão vegetal, um sólido negro poroso constituído principalmente de carbono elementar.

Outros constituintes resultantes são as cinzas da madeira original, as quais correspondem de 0,5% a 6% dependendo do tipo de madeira, da quantidade de casca, da contaminação com terra e areia, entre outros, e as substâncias alcatroadas, as quais estão distribuídas através da estrutura porosa do carvão vegetal.

São produzidos produtos líquidos e gasosos, os quais podem ser coletados dos vapores expelidos. Os líquidos são condensados quando os vapores passam através de um condensador resfriado a água. Os gases não condensáveis passam e normalmente são queimados para regenerar energia térmica. O gás da madeira, como é chamado, é de baixo poder calorífico (cerca de 10% do gás natural).

Estes outros constituintes resultantes são normalmente descritos como subprodutos. A recuperação dos produtos químicos contidos neles era o objetivo de uma indústria

florescente em muitos países desenvolvidos. Desde o advento da indústria petroquímica, esta indústria de subprodutos se tornou antieconômica, pois na grande maioria dos casos, os produtos químicos podem ser produzidos a partir do petróleo de forma mais barata.

### **2.1.1 Estágios da Carbonização da Madeira**

Segundo Medeiros e Resende (1983) e Oliveira et al. (1982), um ciclo de produção de carvão vegetal é dividido em quatro fases, de acordo com a temperatura. À medida que a madeira é aquecida, ela passa por estágios definidos no caminho para a conversão em carvão.

FAO (1985) adiciona à afirmação de Medeiros e Resende (1983) e Oliveira et al. (1982) uma fase inicial de secagem. A formação de carvão vegetal em condições de laboratoriais pode ser descrita com o devido reconhecimento das etapas seguintes do processo de conversão.

Etapa de aquecimento de 20°C a 110°C, nesta etapa, pode-se afirmar que a madeira absorve o calor à medida que seca, liberando assim sua umidade na forma de vapor d'água. A temperatura permanece próxima ou um pouco acima de 100°C até a madeira estar quase 100% seca.

Etapa de aquecimento de 110°C a 270°C, nesta etapa, traços finais de água são liberados e a madeira começa a se decompor, emitindo um pouco de monóxido de carbono, dióxido de carbono, ácido acético e metanol. O calor é absorvido.

Etapa de aquecimento de 270°C a 290°C, nesta etapa, dá-se início ao ponto de de composição exotérmica da madeira. O calor é desenvolvido e a queima continua espontaneamente desde que não ocorra um resfriamento da madeira para baixo desta temperatura de decomposição. Gases e vapores mistos continuam a ser liberados juntamente com o alcatrão.

Etapa de aquecimento de 290°C a 400°C, com a contínua decomposição da estrutura da madeira, os vapores liberados são constituídos pelos gases combustíveis, monóxido de carbono, hidrogênio e metano, pelo gás dióxido de carbono e pelos vapores condensáveis como a água, o ácido acético, o metanol, a acetona, entre outros. Alcatrões começam a predominar conforme a elevação da temperatura.

Etapa de aquecimento de 400°C a 500°C, finalmente a aproximadamente 400°C a transformação da madeira em carvão vegetal está praticamente completa.

O carvão a esta temperatura ainda contém quantidades apreciáveis de alcatrão, aproximadamente 30% de seu peso. Este carvão macio precisa de mais aquecimento para extrair uma maior quantidade deste alcatrão e, assim, aumentar o teor de carbono fixo do

carvão vegetal para cerca de 75%, valores normalmente aceitáveis para qualificar o carvão vegetal como sendo de “boa qualidade”.

Para retirar este alcatrão, o carvão deve ser submetido a mais calor, elevando-se sua temperatura para cerca de 500°C, completando-se assim todas as etapas da carbonização.

Syred et al. (2006) generaliza o processo de carbonização, descrevendo o mesmo em termos de “reações primárias e secundárias”. As reações primárias são conversões dos componentes principais da madeira em produtos incluindo gases, líquido (alcatrão) e carvão (sólido), enquanto que as reações secundárias reduzem os produtos de reações primárias (particularmente o alcatrão) em frações mais leves, resultando principalmente em gases.

## **2.2 Tipos de fornos**

Sunl et al. (2011) apresenta dois tipos de carbonização para o processo industrial, o processo em lote e processo contínuo. Estes estão classificados de acordo com o princípio do processo de carbonização, demanda da matéria-prima, tempo de carbonização, assim como, suas vantagens e desvantagens.

### **2.2.1 Processos em lote**

O processo em lote foi a primeira forma de se produzir carvão. Esse tipo de tecnologia possui uma longa história, e apesar de muito ultrapassada em alguns casos ainda é amplamente utilizada em muitos países em desenvolvimento.

#### **2.2.1.1 Fornos do tipo cova**

Conforme Sunl et al. (2011) e FAO (1985) ocorrem dois tipos de fornos cova: pequenos e grandes. A pequena cova de até um metro cúbico é útil para produzir pequenas quantidades de carvão vegetal de madeiras pequenas e bastante secas.

O método desenvolvido para o forno pequeno é adequado para uma pequena vila ou aldeia, e não para produzir grandes quantidades comercialmente. Quando a carbonização começa, algumas madeiras pequenas e secas são utilizadas como combustível, após a ignição mais madeira é continuamente adicionada de forma a preencher o poço. Mais tarde, uma camada de folhas de cerca de vinte centímetros de espessura é colocada para cobrir a madeira. Sobre as folhas se deposita terra com cerca de vinte centímetros de espessura. No forno do tipo cova, deve-se permitir algumas pequenas aberturas para o escape da fumaça e

entrada de ar. Quando o forno é aberto e descarregado, pode ser necessário o uso de água para evitar a ignição do carvão quente recém formado.

O poço grande produz até seis toneladas ou mais de carvão por queima, os quais são muito difíceis de serem controlados, mas são mais eficientes quanto à mão de obra. Quanto menor o forno, melhor será o fluxo de ar, produzindo assim um carvão mais uniforme, mas em contrapartida sua produção será menor.

Na Figura 1, a seguir, apresenta-se um poço tipo cova grande, com um volume bruto de cerca de trinta metros cúbicos, podendo o mesmo conter cerca de vinte e seis metros cúbicos de madeira. Um homem leva cerca de três dias para cavar a cova e um dia para adicionar os canais de entrada de ar e de saída de fumaça. O estágio de carbonização pode levar de vinte a trinta dias para estar completo. Este tipo de forno tem como característica uma redução volumétrica de 50 à 70%.

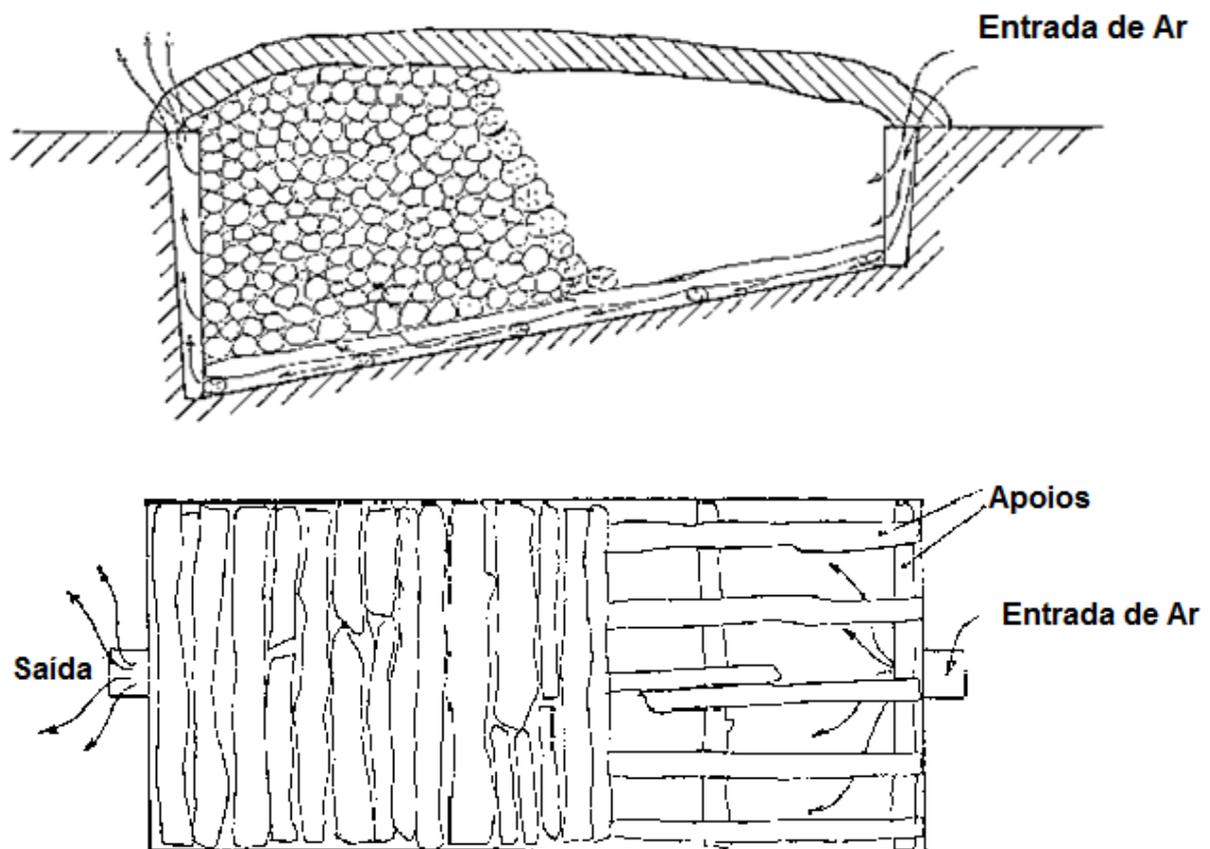


Figura 1 – Forno tipo cova, acima a visão em corte longitudinal e abaixo a vista superior do mesmo sem a cobertura.

Fonte: FAO, 1985.

### 2.2.1.2 Fornos do tipo monte

Segundo Schenkel et al. (1998) e Sunl et al. (2011), entre os métodos tradicionais de carbonização, a técnica de forno do tipo monte ainda é amplamente utilizada nos países em desenvolvimento. Geralmente, existem três tipos: o forno vertical, o forno horizontal e o forno melhorado, sendo este último, geralmente representado pelo forno do monte Casamance.

O forno do tipo monte vertical geralmente tem uma base circular, e é formado por pedaços de madeira empilhados verticalmente em torno de um centro, geralmente composto por um poste de apoio central, conforme se pode observar na Figura 2.

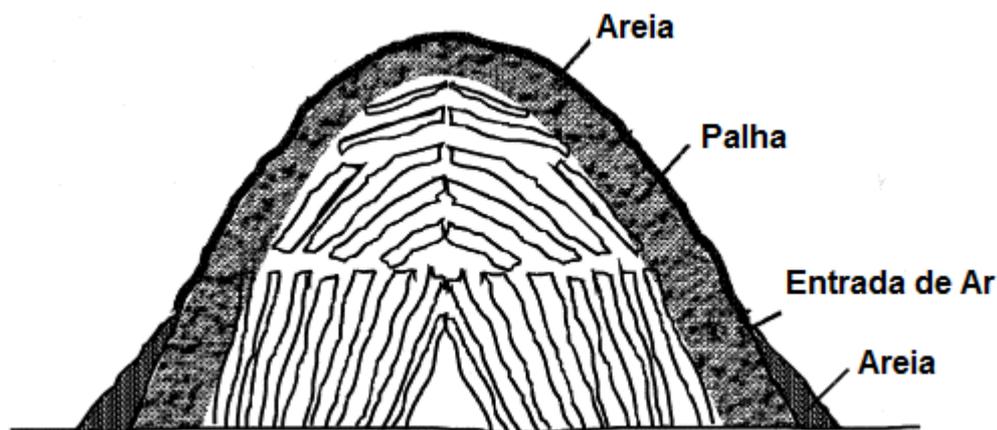


Figura 2 – Forno tipo monte vertical.

Fonte: Schenkel et al., 1998.

Pequenos troncos são cuidadosamente colocados nas fendas. Quando o forno do tipo monte vertical é concluído, ou seja, preenchido, uma abertura com a função de chaminé é então construída próxima ao poste central. Em seguida, uma camada de materiais vegetais (palha, grama, galhos) é adicionada para cobrir a madeira. Se possível, o mesmo pode ser coberto com uma camada de terra arenosa. A ignição se dá através da abertura da chaminé. Depois de iniciada a carbonização, a mesma se dá do topo ao fundo do forno. Uma vez que a carbonização está finalizada, o forno do tipo monte vertical é coberto com uma camada de terra, de maneira a armazenar o gás restante da carbonização durante o arrefecimento. A duração da carbonização neste tipo de forno é de cinquenta horas, em fornos de pequeno porte. O resfriamento pode durar vários dias.

Pode-se observar na Figura 3, o forno horizontal, nota-se que a madeira é empilhada horizontalmente (longitudinalmente) e a propagação de carbonização se move de um lado para o outro. Este tipo de forno é muito semelhante ao vertical, tanto quanto a cobertura como a operação. Possui uma forma de seção de meia esfera de um lado e de paralelepípedo do outro. No forno do tipo monte horizontal, existe uma grelha de circulação de ar, devido ao fato

dos troncos estarem posicionados um de ponta para o outro. Todo o ciclo de carbonização dura mais de três semanas.



Figura 3 – Forno tipo monte horizontal.

Fonte: Schenkel et al., 1998.

O melhor forno do tipo monte conhecido é o Casamance, o qual pode ser visualizado na Figura 4. Ao implementar um forno do tipo Casamance, geralmente se constrói um piso de madeira de lenha, assim como, faz-se pequenas aberturas de ar na base do forno, com a finalidade de exercer no sistema uma circulação de ar completa. Em seguida, coloca-se pequenos troncos na periferia e grandes troncos no centro do forno. Neste forno são colocadas duas camadas de cobertura, semelhantes aos outros fornos do tipo monte tradicionais, a camada de vegetais e a camada de areia.

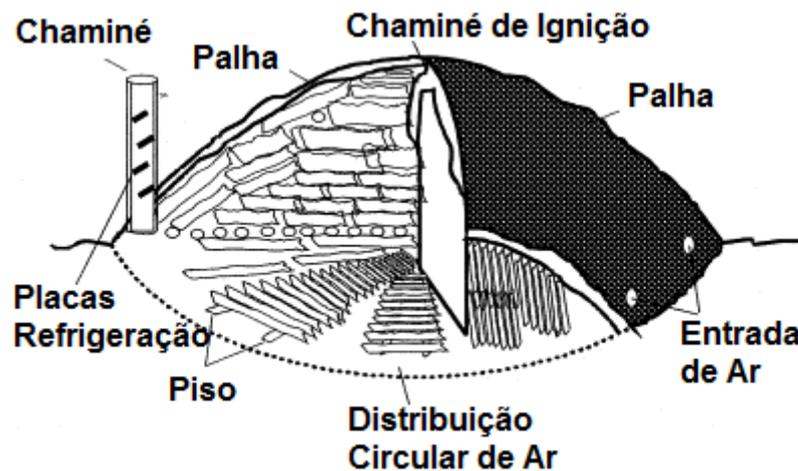


Figura 4 – Forno tipo monte Casamance.

Fonte: Schenkel et al., 1998.

A chaminé é colocada na borda da pilha, com a abertura da base do tubo conectada à base da pilha. A principal melhoria consiste em usar uma chaminé, a qual permite uma carbonização e operação mais fácil. Um forno de 0,1m<sup>3</sup> requer três dias para carbonização e quatro dias para resfriamento.

Os fornos do tipo monte constituem o método de carbonização mais utilizado nos países em desenvolvimento. No entanto, atualmente, a produção comercial em grande escala por esses fornos não é mais considerada viável, porque o forno deve ser completamente reconstruído após cada ciclo. Além de possuir um ciclo de produção muito demorado. A operação do forno, embora basicamente simples, requer considerável habilidade, experiência e até um certo grau de arte.

### **2.2.1.3 Fornos de tijolos ou concreto**

Este é o principal forno utilizado no Brasil, popularmente conhecido como “rabo quente”. Segundo FAO (1985) e Sunl et al. (2011), os fornos de tijolos ou concreto construídos e operados de forma adequada são os métodos mais eficazes de produção de carvão vegetal. Há muitos projetos de fornos de tijolos em uso em todo o mundo e produzem excelentes resultados.

O forno argentino, conhecido como meia-laranja, é construído completamente com tijolos. Pode-se observar na Figura 5, que o mesmo possui apenas duas portas, uma para carregar e outra para descarregar. O topo do forno possui uma abertura (chamada de "olho") para sair da fumaça, possui cerca de dez orifícios ao redor da base no nível do solo para entrada de ar.

Ao carregar, os troncos de maior diâmetro devem ser colocados no centro, local no qual as mais altas temperaturas são alcançadas, e não se deve fechar os orifícios das entradas de ar. Uma pequena porção de madeira seca deve ser colocada no topo da pilha sob o “olho” para ajudar na ignição do forno. Após o carregamento estar completo, as duas portas principais devem ser seladas por tijolos cobertos com lama. Tomando-se o devido cuidado para que todos os orifícios na base e no olho do forno estejam desobstruídos. Controla-se este processo de carbonização através da abertura e fechamento das entradas de ar na base do forno.

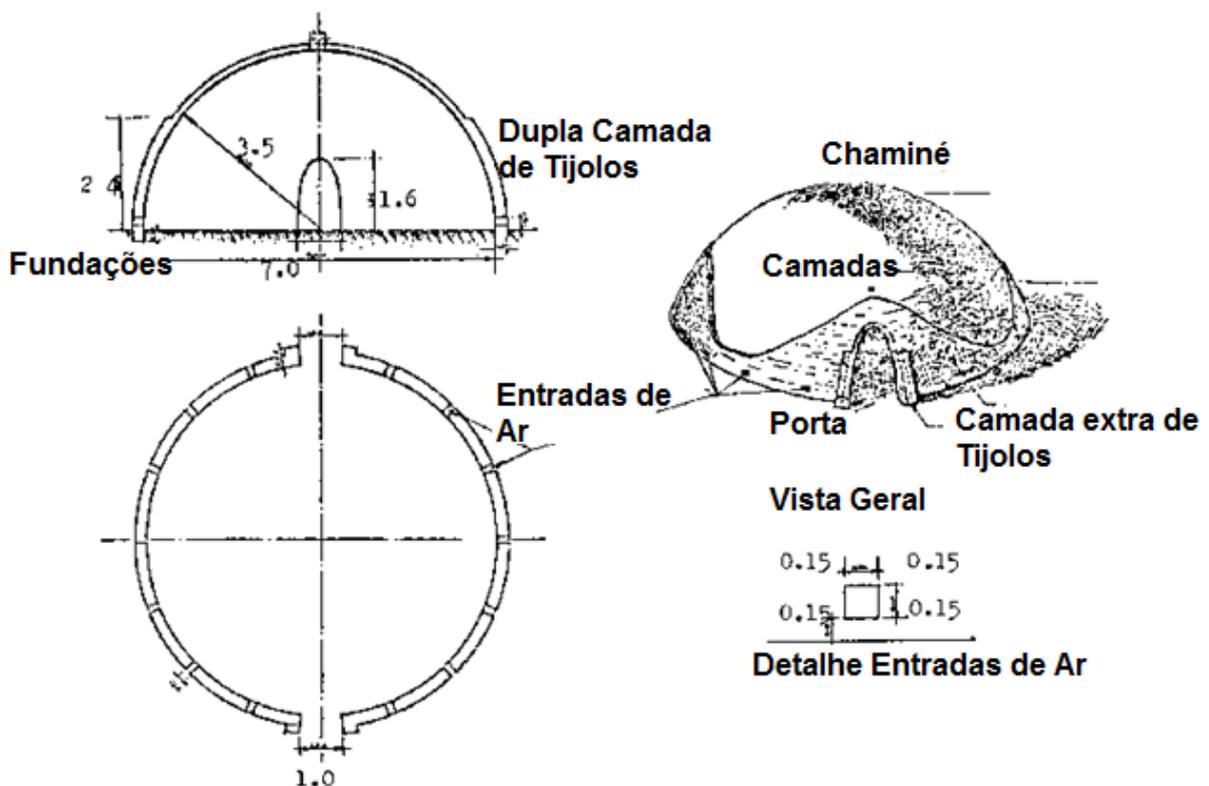


Figura 5 – Forno tipo argentino, meia-laranja.

Fonte: FAO, 1985.

Quando o processo de carbonização é concluído, os orifícios da base e olho superior devem ser fechados com lama ou cobertos com terra e areia, iniciando o processo de resfriamento. A madeira deve ser cortada com aproximadamente 1,00m à 1,30m de comprimento, com um diâmetro mínimo igual a 0,05m e um diâmetro máximo igual a largura da porta. O processo de carbonização se dá em um total de treze a quatorze, e ao completar o ciclo, uma quantidade de nove a dez toneladas de carvão vegetal deve ser produzida com um forno de sete metros de diâmetro.

O forno brasileiro do tipo colméia, conforme pode ser observado na Figura 6, raramente é construído sozinho, este tipo de fornos são comumente construídos em grupos ou baterias, incluindo várias unidades. Eles são circulares, com um teto abobadado e são construídos de tijolos comuns. Possuem dezoito portas de entrada de ar, seis portas de saída e seis chaminés em um forno de cinco metros de diâmetro.

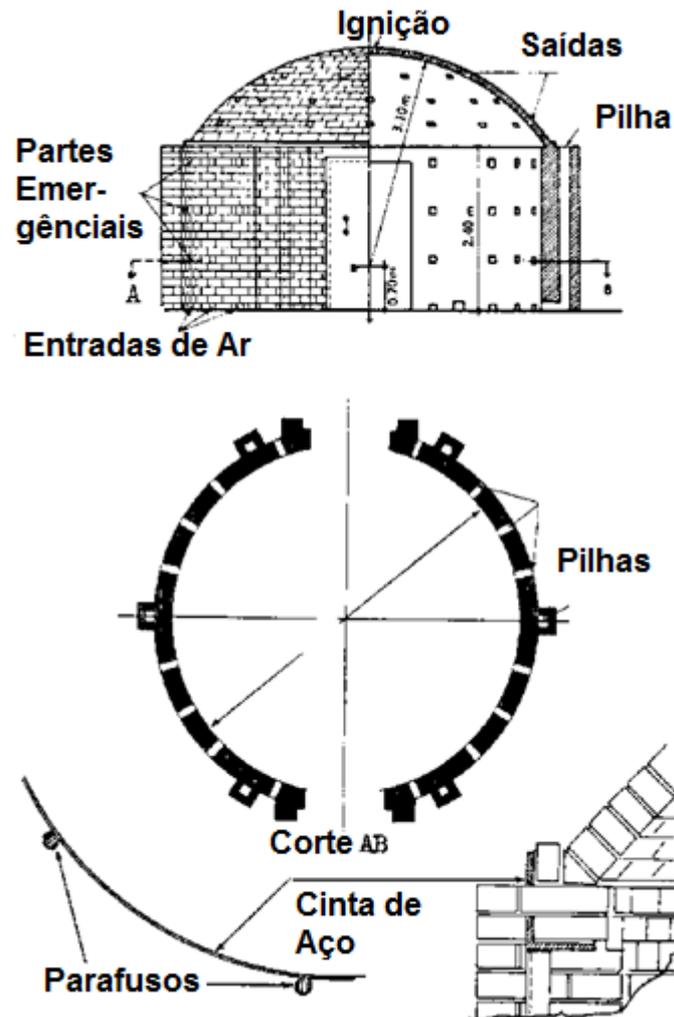


Figura 6 – Forno brasileiro tipo colmeia.

Fonte: FAO, 1985.

Deve-se carregar a madeira fina no entorno, próxima das paredes e progressivamente, carregar a madeira mais espessa em direção ao centro, observando-se que os troncos devem ocupar o centro ou núcleo da pilha. O descarregamento do forno deve começar apenas quando o mesmo estiver suficientemente arrefecido. Estes fornos operam em média com o tempo de ciclo de cerca de oito dias e o carvão vegetal possui o rendimento entre 31%-35%, sendo os mesmos controlados por operadores experientes.

Os fornos de tijolos tipo colméia de encosta podem ser classificados como uma variação do fornos de tijolos de colméia tradicional, pois possui uma forma circular, sendo construída em uma encosta ou colina, na qual a mesma forma o seu lado e suas paredes traseiras. Conhecido como forno do tipo declive, sua vantagem é o uso consideravelmente inferior de tijolos, a Figura 7 apresenta o forno do tipo declive.

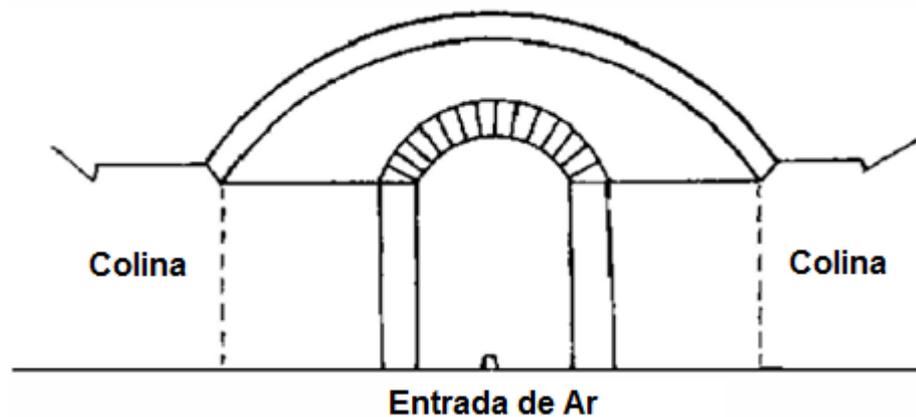


Figura 7 – Forno tipo colmeia de encosta.

Fonte: Sunl et al., 2011.

Sua operação é um pouco mais fácil do que o forno de tijolos colmeia porque estes possuem apenas uma porta de ar para controlar, em comparação às dezoito do forno tipo colméia. A composição química e física e os rendimentos do carvão vegetal produzido em fornos do tipo encosta são muito próximos aos do carvão vegetal produzido em fornos de tijolos do tipo colméia. Insignificantes diferenças entre as qualidades dos dois tipos de carvão são relatadas.

O forno do tipo Missouri está adaptado para um clima severo de inverno, possui altos custos de mão-de-obra, além de carga e descarga mecanizada. Estes geralmente são agrupados em baterias de três a seis, ou mais. Pode-se observar na Figura 8 um típico forno do tipo Missouri construído de concreto.

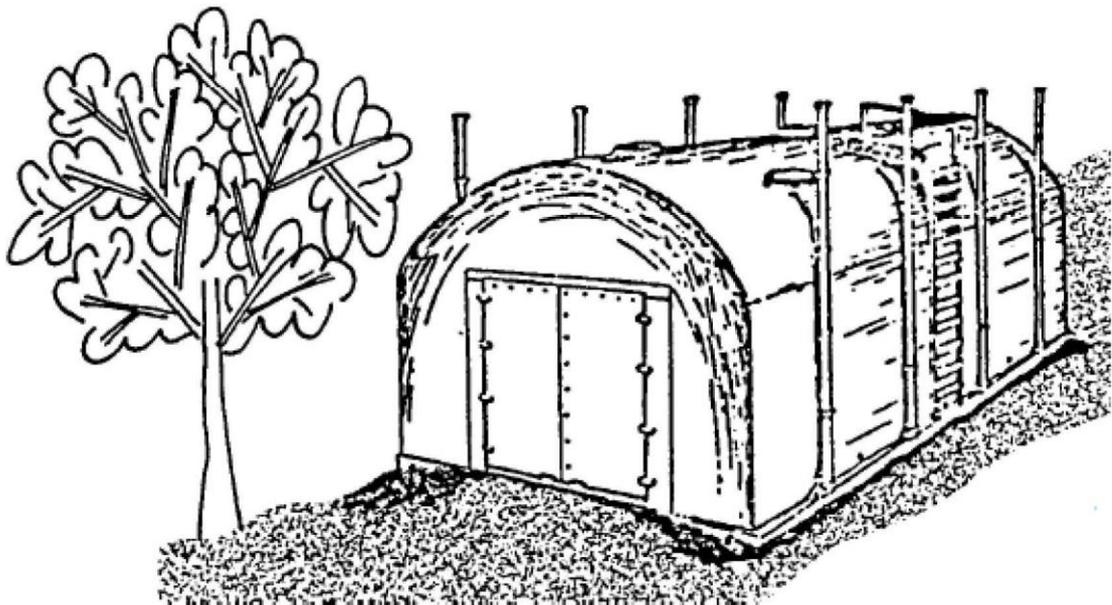


Figura 8 – Forno tipo Missouri.

Fonte: Sunl et al., 2011.

Suas estruturas das portas é construída em aço, os quais são componentes críticos e dispendiosos. Embora este forno esteja equipado com oito chaminés, as quais possuem cerca de quatro metros e meio de altura e são suportadas por colchetes fora das paredes do forno, ainda há de seis a oito entradas de ar que podem ser vedadas durante o período de resfriamento.

As portas de cada extremidade permitem o uso de carregadores frontais para carga e descarga. A temperatura em vários pontos dentro do forno pode ser lida através de termopares. O rendimento de carvão de um forno do tipo Missouri pode variar de 20% a 30%, dependendo das condições operacionais e da matéria-prima utilizada. O tempo de ciclo de carbonização varia entre sete a mais de trinta dias em um clima quente.

Os fornos de tijolo (ou concreto) provaram, através décadas de uso, serem de baixo custo de capital, moderado em relação a recursos humanos, além de surpreender quanto aos rendimentos de produção de carvão vegetal de qualidade, adequado para todos os usos industriais e domésticos. Sua grande desvantagem é a poluição gerada, a qual poderá se tornar um problema quanto a continuidade de sua utilização.

#### **2.2.1.4 Fornos de metal**

Segundo Sunl et al. (2011), os fornos portáteis de metal recebem este nome pela possibilidade de serem transportados na traseira de um veículo do tipo pick-up, dois ou mais fornos podem ser operados como um grupo para economizar mão de obra.

Pode-se observar a estrutura através da Figura 9, a qual consiste em duas seções cilíndricas (1, 2) e uma tampa cônica (3). A capa possui quatro aberturas para a liberação de vapor igualmente espaçadas (4), as quais podem ser fechadas (5) conforme a necessidade. O forno possui outros oito canais de entrada e saída de ar (6), radialmente distribuídos ao redor da base.

O tamanho da madeira mais adequado para o processo de carbonização deve ser de 450 a 600mm de comprimento e até 200mm de diâmetro. Um canal de ar mínimo 250mm deve estar liberado dentro do forno de maneira a evitar um superaquecimento da parede do forno. Deve se manter as entradas e saídas de ar, canais e os espaços entre eles abertos ao carregar o forno com a madeira. Dois homens experientes podem operar dois fornos de metal portáteis produzindo entre duas a três toneladas de carvão vegetal por semana.



Figura 9 – Forno de metal portátil.

Fonte: Sunl et al., 2011.

O forno do tipo tambor é um forno de metal simples, o mesmo é obtido através de um tambor de óleo de duzentos litros facilmente modificado. Na Figura 10, observa-se que a modificação é dada pela soldagem de um suporte de chaminé feito de um pequeno tubo de metal, devendo neste caber uma chaminé de um diâmetro de seis centímetros e com um comprimento de um metro no lado inferior do tambor.

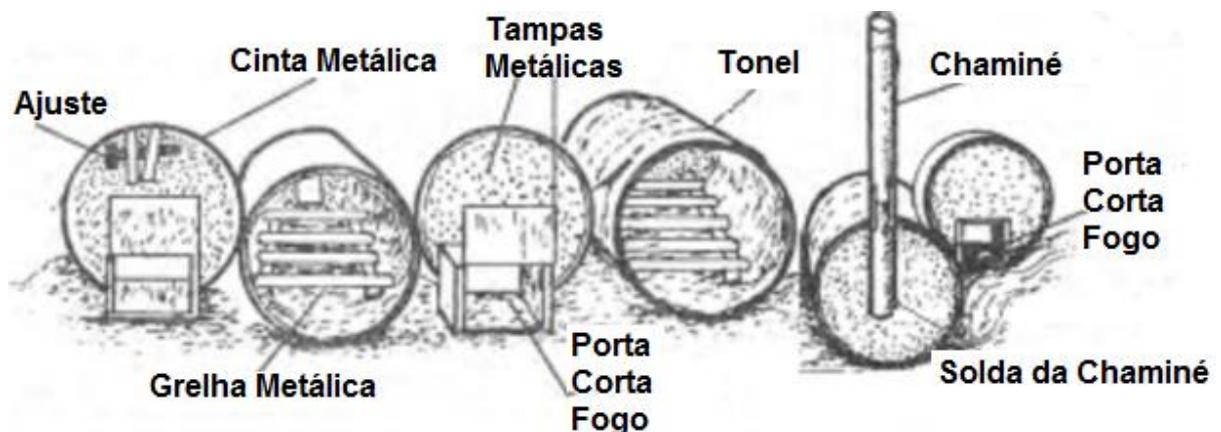


Figura 10 – Forno do tipo tambor.

Fonte: Sunl et al., 2011.

Deve-se construir uma grade de metal para evitar que a madeira entre em contato com o fundo do tambor, fornecendo assim, a devida circulação de ar dentro do forno do tipo tambor. Este tambor deve ter uma tampa removível e uma cinta metálica unindo a tampa ao tambor. Esta cinta possui um parafuso ajustável com a finalidade de pressionar a tampa do tambor, impedindo-a de abrir. Durante a carbonização, o forno inteiro deve estar coberto pelo o solo, com a finalidade de se evitar a perda de calor.

Este tipo de forno é adequado para o lar, a produção de carvão vegetal doméstico pode ser realizada usando hastes de pequeno diâmetro ou galhos de árvores, geralmente, utiliza-se com as seguintes dimensões: oitenta centímetros de comprimento e de seis a dez centímetros de diâmetro médio.

O processo de carbonização se dá entre seis e doze horas, produzindo um carvão vegetal com um rendimento de 28 a 30%. Cada forno de tambor possui uma capacidade de cerca de 0,4m<sup>3</sup> de madeira.

As principais vantagens do forno de metal são a sua portabilidade, a fonte de lenha e seu curto ciclo de produção de dezesseis a vinte e quatro horas. No entanto, eles têm um custo de capital mais elevado, isto se comparado com uma capacidade de produção igual à dos fornos de terra ou à dos fornos de tijolos

## **2.2.2 Processos contínuos**

Os sistemas de carbonização contínuos possuem um maior rendimento, um menor consumo de combustível e uma maior produtividade, se comparados aos procesos em lote para um mesmo capital de investimento.

### **2.2.2.1 Reator de carbonização CML**

Segundo Domac (2008), o reator de carbonização CML se baseia em um processo convencional de sistema de combustão, no qual é acoplado uma unidade de tratamento específico de gás, a qual permite a combustão do gás de pirólise produzido da carbonização de madeira.

O sistema de carbonização CML, conforme pode ser observado na Figura 11, consiste de quatro a doze reatores de carbonização de aço (revestidos com concreto refratário) ligados a uma câmara de combustão central. A entrada de ar é controlada por válvulas manuais colocadas na parte inferior dos reatores, enquanto os vapores de pirólise são sugados ao topo.

Cada reator é montado sobre uma balança, permitindo o monitoramento contínuo da perda de massa, controlando-se assim o processo. O rendimento de carvão é 22-24% dependendo da matéria-prima utilizada. O tempo total do ciclo de um lote é de vinte e duas a vinte e quatro horas. A câmara de combustão central facilita a recuperação do calor do sistema.

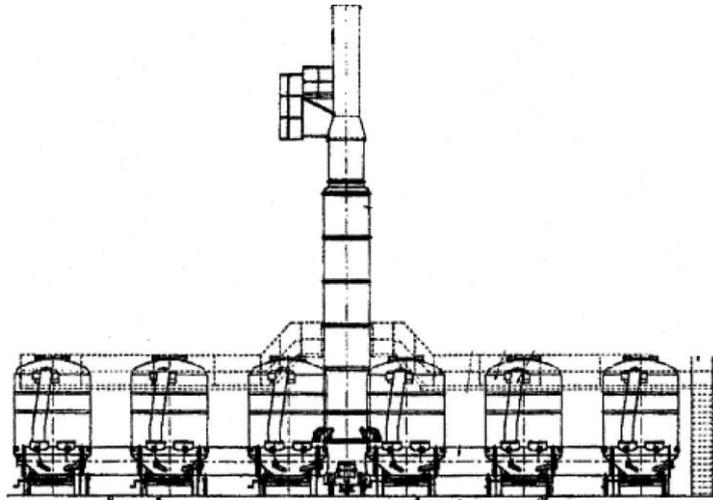


Figura 11 – Reator de carbonização CML.

Fonte: Domac, 2008.

O sistema CML possui algumas vantagens, as quais incluem a produção de um carvão de melhor qualidade, excelente condição de trabalho e menor poluição, além do controle computacional de recuperação de energia. As desvantagens são basicamente que toda a matéria prima deve conter no máximo 20% de umidade e comprimento inferior a trinta centímetros.

### 2.2.2.2 Carbonização OET Calusco

Segundo FAO (1985) e Domac(2006), na carbonização OET Calusco a madeira é transportada por carrinhos caçamba através de um túnel horizontal em forma de “U”, o qual garante a entrada de carrinhos carregados com madeira e a saída de carrinhos carregados com carvão.

Os carrinhos são revestidos com folhas de aço perfurado e viajam sobre rodas, as quais estão conectadas a um mecanismo de reboque para movê-las.

Como se pode observar através da Figura 12, o túnel é dividido em três câmaras onde a madeira atravessa sucessivamente a pré-secagem, em seguida a carbonização e por último, o resfriamento.

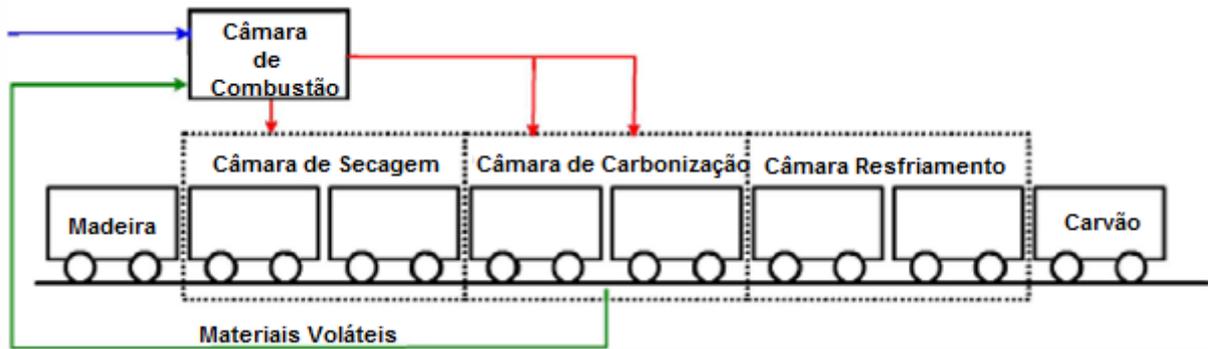


Figura 12 – Carbonização OET Calusco.

Fonte: Domac, 2006.

Cada câmara é separada por portas de correr, os gases de combustão são separados em três partes. Uma parte é utilizada na pré-secagem entrando em contato direto com a matéria-prima. Outra parte fornece calor para o processo de carbonização aquecendo indiretamente a madeira através de um trocador de calor colocado no túnel. Uma terceira parte é resfriada e utilizada como um meio de resfriamento para o carvão. O tempo total de permanência dentro do túnel é de vinte e cinco a trinta e cinco horas, dependendo do conteúdo de umidade e da matéria-prima usada.

Caso o sistema de controle atue nas condições ideais, o mesmo pode obter a produção uniforme, economizando energia através da circulação do gás resultante da pirólise. Seu maior problema e desvantagem é a quantidade de oxigênio que entra no processo devido as portas de correr.

### 2.2.2.3 Processo de carbonização Lambiotte

Segundo Lambiotte (1942), seu processo de carbonização permite produzir carvão vegetal de alta qualidade com o menor impacto ambiental possível. Este processo foi originalmente desenvolvido por Lambiotte no início da década de 1940.

Pode ser considerada a tecnologia mais bem-sucedida para a carbonização contínua, com a finalidade de produzir carvão vegetal convencional utilizável para todos os fins.

Em princípio, como pode se observar na Figura 13, no processo de carbonização a madeira pré-seca é erguida continuamente para o topo da torre por meio de uma esteira transportadora. Esta é despejada e em seguida, inicia-se o *loop* de matéria-prima através do estágio de secagem, estágio de destilação, estágio de carbonização e estágio de resfriamento. Por fim, obtem-se a produção de carvão vegetal a partir da parte inferior do sistema. Existem duas produções principais neste sistema, carvão e voláteis.

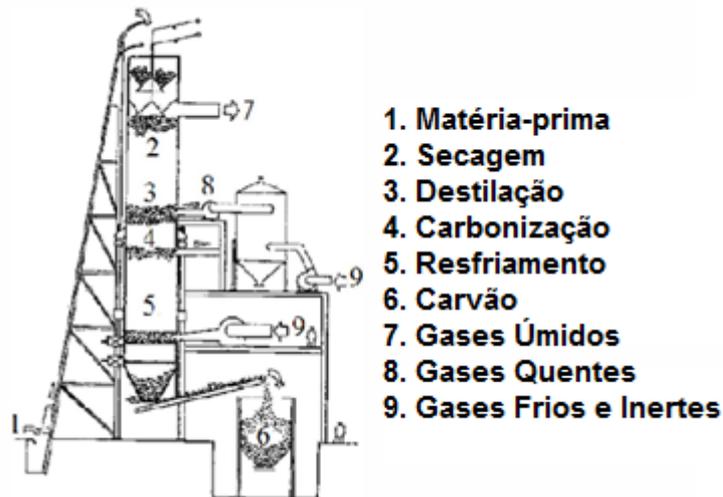


Figura 13 – Processo de carbonização Lambiotte.

Fonte: Lambiotte, 1942.

O processo Lambiotte é excelente em aspectos como alta eficiência de trabalho, maior rendimento de carvão, maior homogeneidade e qualidade controlada. Sua principal desvantagem é a corrosão por ácidos acéticos e afins, evoluídos durante a carbonização. Outra desvantagem é o alto custo de implantação.

#### 2.2.2.4 Processo de Carbonização Lurgi

Segundo Sunl et al. (2011), Lurgi desenvolveu um processo de carbonização bastante semelhante ao processo Lambiotte. A madeira entra no topo e o carvão sai pelo fundo. Cabe salientar que o processo Lurgi possui dois sistemas de recirculação de gás independentes, um para a zona de carbonização e outro para a zona de resfriamento.

Pode-se observar na Figura 14, que o gás da zona de carbonização é distribuído em todo o meio do reator e flui para cima. O vapor pirolenhoso que deixa o reator no topo é entregue a um incinerador especialmente projetado para a combustão. No primeiro estágio, o gás do reator é queimado perto das condições estequiométricas. Na segunda etapa, ar é adicionado para garantir a combustão completa antes da liberação para a atmosfera.

Cerca de um terço dos gases da combustão são retirados e condicionados (550°C - 700°C) para servir como gás de enxaguamento para a carbonização. O excesso de gases da combustão do segundo estágio são transportados para a atmosfera.

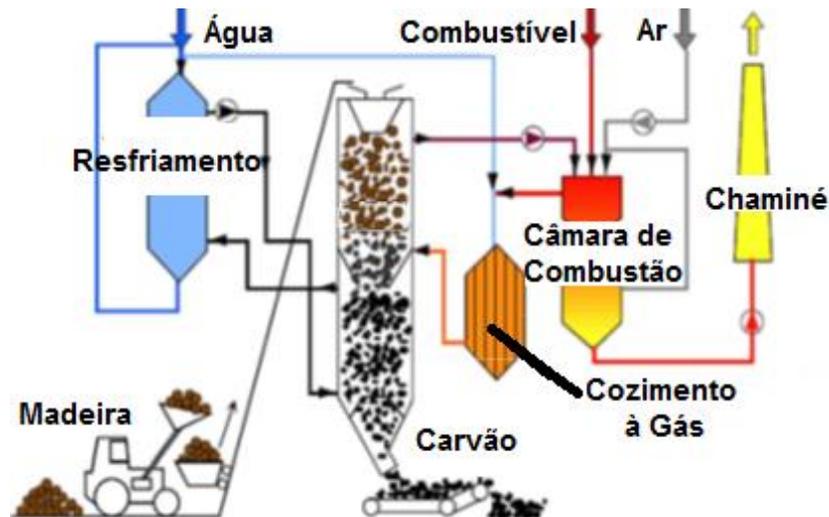


Figura 14 – Processo de carbonização Lurgi.

Fonte: Sunl et al., 2011.

O *loop* de circulação de gás na zona inferior do reator é projetado para esfriar suficientemente o carvão que desce da parte superior, e flui contra o deslocamento do mesmo. O gás de arrefecimento aquecido é diretamente re-resfriado por água em um purificador antes de entrar pelo fundo do reator.

A tecnologia Lurgi evita completamente as desvantagens das tecnologias tradicionais, permitindo-se produzir um carvão de alta qualidade com a menor possibilidade de impacto ambiental. Sua principal desvantagem é a corrosão acelerada do equipamento, a qual é o grande problema desta tecnologia.

#### 2.2.2.5 Forno rotativo

O forno rotativo é um método comprovado para carbonização de pequenas partículas de madeira, casca, sementes e resíduos de agricultura. O carvão é produzido em pó, e este tipo de forno é conhecido como o torrador de Herreshoff.

Pode-se observar o forno na Figura 15, o mesmo consiste de quatro a seis lareiras refratárias empilhadas uma sobre a outra. As fornalhas possuem aproximadamente cerca de seis a oito metros de diâmetro. Estas estão apoiadas em uma carcaça cilíndrica revestida por material refratário. O lado inferior possui a forma abobadada, de maneira a se auto-sustentar.

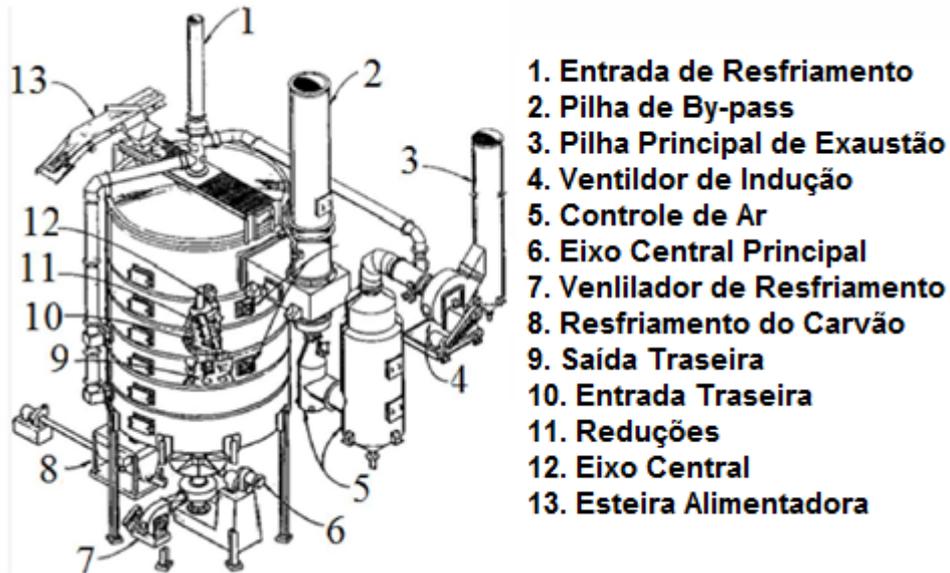


Figura 15 – Forno rotativo.

Fonte: Sunl et al., 2011.

A taxa de admissão de ar é regulada para que a madeira carbonize e deixe o forno de na forma de carvão fino. Os gases produzidos neste processo são altamente poluentes, dentre eles o gás de madeira, alcatrão, ácido pirolenhoso, condensáveis e vapor de água. Estes gases podem ser queimados diretamente para gerar vapor ou energia.

O forno rotativo pode ser abastecido com biomassa verde, com teor de umidade podendo chegar a 45%. Esta é sua maior vantagem em relação aos outros processos. Sua desvantagem consiste em ter de produzir briquetes com o pó de carvão vegetal para futura utilização. E não é possível recuperar os condensados pirolenhosos do fluxo de gás, poluindo assim o meio ambiente.

### 2.3 Influência da temperatura final

Diversas são as reações químicas decorrentes do processo de pirólise e os fenômenos de reação estão estreitamente relacionados com a temperatura à qual a madeira é submetida (Gomes e Oliveira, 1982). Conforme apresentado anteriormente, cada faixa de temperatura é responsável por um tipo de produto, com características próprias. Essas diversificações estão relacionadas com as faixas de temperatura de degradação de cada composto da madeira, como já fora abordado anteriormente.

O sólido produzido (carvão) diminui com o aumento na temperatura de pirólise, aumentando os produtos gasosos, assim como, a concentração de carbono fixo da fração sólida (Syred et al., 2006). CETEC (1980) relata que a temperatura tem um efeito próprio na densidade do carvão, decrescendo gradualmente até temperaturas na faixa dos 600°C e

acrescendo até 900°C (temperatura máxima registrada). Os dados contidos na Tabela 1, apresentam o efeito da temperatura sobre a composição elementar do carvão, rendimento (madeira seca/carvão obtido) e os teores de carbono fixo e materiais voláteis.

Tabela 1 - Composição elementar, rendimento e composição do carvão, em função da temperatura de carbonização.

Temperatura de carbonização (°C)	Composição elementar			Rendimento (%)	Análise química imediata	
	C (%)	H(%)	O(%)		C. Fixo	Mat. Vol.
200	52,3	6,3	41,4	91,8		
300	73,2	4,9	21,9	51,4	68	31
400	82,7	3,8	13,5	37,8		
500	89,2	3,1	6,7	31,0	86	13
600	92,2	2,6	5,2	29,1		
700	92,8	2,4	4,8	27,8	92	7
800	95,7	1,0	3,3	26,7		
900	96,6	0,7	3,2	26,6		
1000	96,4	0,5	2,9	26,5		

Fonte: CETEC, (1980).

A temperatura final de pirólise desempenha um papel fundamental nas diversas reações durante o processo de carbonização, sendo então uma das principais variáveis responsáveis pela qualidade final do carvão vegetal, levando à geração de produtos com características físicas e químicas diferentes (Trugilho e Silva, 2004).

## 2.4 Taxa de aquecimento

Quando a biomassa é aquecida rapidamente a temperaturas acima de 500°C, pode-se afirmar que nenhum carvão será formado. Conclui-se então, que o rendimento em carvão continuará aumentando enquanto a taxa de aquecimento no processo de degradação térmica seja diminuída. Entretanto, esta declaração não é verdadeira (Campos, 2008).

Segundo Antal & Grønli (2003), uma assíntota limite do rendimento em carvão é alcançada, abaixo da qual a redução da taxa de aquecimento não alterará o rendimento em carvão.

Baixas taxas de aquecimento aumentam o rendimento de sólido formado a partir de celulose pura, através do fato de que temperaturas baixas favorecem um dos caminhos de reação competitivos que preferencialmente produzem a fração sólida (Antal et al., 2000). Por outro lado, estudos realizados com pequenas amostras de biomassa por termogravimetria, no qual os vapores são rapidamente removidos do ambiente contendo a amostra, indicaram que baixas taxas de aquecimento têm pouco ou nenhum efeito no rendimento.

Pode-se afirmar que os materiais voláteis não são estáveis a temperaturas elevadas quando em presença de carvão ou biomassa sólida em decomposição. Os voláteis se adsorvem à superfície do sólido e rapidamente são carbonizados, liberando água, dióxido de carbono, metano e outros coprodutos. Essas observações indicam que o aumento do rendimento em carvão resultante da redução da taxa de aquecimento, em experimentos com grandes amostras, resulta em uma consequência dessas reações químicas secundárias da fase gasosa (Antal et al., 2000).

## **2.5 Pressão e fluxo de gases**

Segundo Campos (2008), além dos seus efeitos sobre o rendimento em carvão, altas pressões contribuem para a transferência de calor dentro do reator, produzindo um carvão mais uniforme (de cima a baixo) e reduzindo o tempo requerido para o aquecimento. Logo, de igual forma, a pressão é um parâmetro de processo responsável pelo rendimento da carbonização. A influência favorável da pressão sobre o rendimento em carvão provém da maior concentração da fase gasosa, composta pelos voláteis, no interior do reator de carbonização, e não simplesmente pelo aumento de pressão do sistema (Antal et al., 1996).

Um equipamento de análise termogravimétrica pressurizado foi utilizado para estudar a influência da pressão sobre a pirólise da madeira, celulose e lignina. Blackadder e Rensfelt (1985) observaram um aumento no rendimento em carvão de 21% a 28% para a madeira e de 6% a 15%, para a celulose, a 750°C, no intervalo de pressão de 0,1MPa a 0,4MPa. Diferentemente, a lignina apresentou um comportamento térmico independente da pressão, no intervalo avaliado.

Importantes pesquisas em pirólise da celulose têm mostrado que um aumento de 1 MPa na pressão aumenta substancialmente o rendimento de carvão em relação ao obtido sob pressão atmosférica. Assim como, tem sido revelada a influência decisiva do tempo de retenção dos gases de pirólise no reator sobre o rendimento de carvão (Antal e Mok, 1990). Sob pressão, os vapores oleosos e altamente reativos apresentam menor volume específico, conseqüentemente o tempo de retenção destes nas “cavidades” dos sólidos é prolongado,

aumentando assim a duração da decomposição destes compostos, enquanto são liberados da partícula em decomposição.

Através de uma pesquisa realizada no CIRAD-Forêt/França, Numazawa (2000) estudou os efeitos da pressão (2bar-10bar) em microestruturas dos carvões produzidos da madeira de *Bagasse guianensis*, por meio da microscopia eletrônica por varredura. Pode-se observar que as imagens obtidas mostram com clareza que a pressão favorece a condensação de voláteis na matriz sólida, em uma primeira etapa. Posteriormente, os compostos orgânicos condensados sofrem reações secundárias, aumentando o rendimento em carbono fixo. Na Figura 16, é possível constatar o aumento do conteúdo nas células com o aumento crescente da pressão de pirólise.

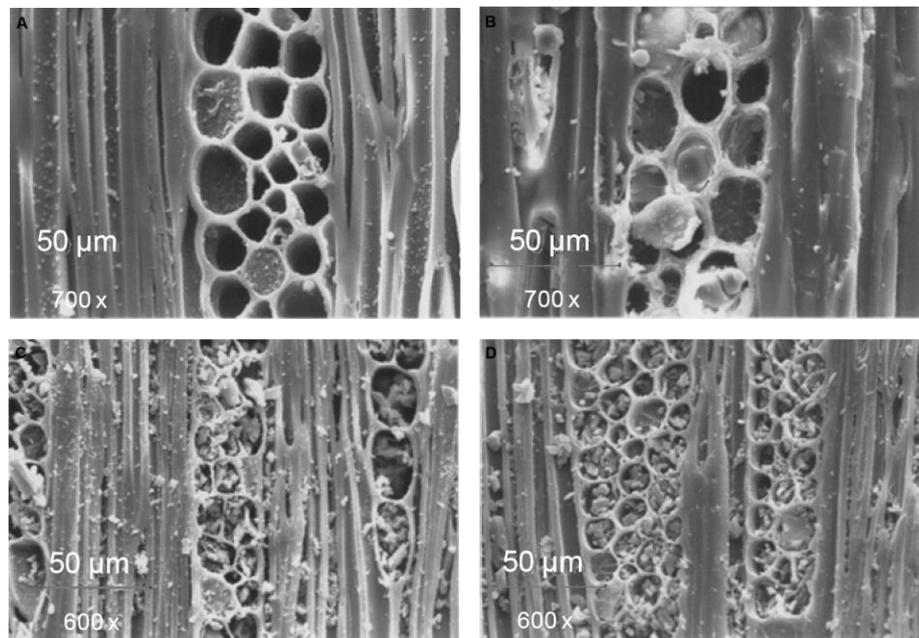


Figura 16 - Imagens de microscopia eletrônica por varredura do plano tangencial de carvão de *Bagasse guianensis* produzido em diferentes pressões: (superior esquerda) pressão atmosférica; (superior direita) 2 bar; (inferior esquerda) 7,3 bar e (inferior direita) 10 bar.

Fonte: Numazawa, 2000.

Da mesma forma, pode-se aumentar estes efeitos, ampliando-se o tempo de circulação do gás no interior do reator. Posteriormente, a formação de carbono secundário desses vapores oleosos é catalisada pelo carvão, e o vapor d'água atua como agente auto catalítico para a formação de carbono em altas pressões. Todos esses fenômenos podem contribuir para o aumento de rendimento em carbono fixo, que é obtido pela carbonização em pressões elevadas (Antal & Grønli, 2003).

## 2.6 Rendimento e qualidade do carvão

Segundo FAO (1985), a etapa de carbonização no processo de produção de carvão é o passo mais importante de todos, pois tem o poder de influenciar todo o processo, desde a árvore em crescimento até a distribuição final do produto até o usuário.

No entanto, a carbonização em si não é relativamente um passo dispendioso. Mesmo que os reatores possuam um alto custo de investimento de capital, tipicamente, a etapa de carbonização pode representar apenas 10% dos custos totais, desde o cultivo e colheita da árvore até a entrega a granel do carvão acabado ao armazém. Mas a eficiência de conversão da etapa de carbonização retorna ao ponto em que a madeira é colhida. Um alto rendimento na conversão significa menores quantidades de madeira a serem cultivadas, colhidas, secas, transportadas e carregadas.

A maneira específica pela qual a madeira é carbonizada pode afetar o rendimento global devido ao efeito que ela tem sobre a quantidade de finos produzidos. Estes podem não ter mercado ou só podem ser vendidos depois de passar por um processo caro de briquetagem.

Os três principais fatores que influenciam o rendimento de conversão são o teor de umidade da madeira no momento da carbonização, o tipo de equipamento de carbonização utilizado e o cuidado com o qual o processo é conduzido.

### 2.6.1 Rendimento

O cálculo do rendimento gravimétrico da carbonização RGC é dado pela equação (1).

$$RGC = (M_{cs} / M_{ms}) \times 100 \quad (1)$$

onde, tem-se como RGC sendo igual ao rendimento gravimétrico da carbonização em valor percentual,  $M_{cs}$  sendo a massa do carvão seco em gramas e  $M_{ms}$  sendo a massa da madeira seca em gramas.

O cálculo do rendimento em carbono fixo RCF é determinado pela equação (2).

$$RCF = (RGC \times TCF) / 100 \quad (2)$$

onde, tem-se RCF sendo igual ao rendimento em carbono fixo em valor percentual e TCF sendo o teor de carbono fixo em valor percentual.

### 2.6.2 Propriedades químicas

A norma NBR 8112 da ABNT é a mais utilizada no Brasil para realizar a análise química. Esta determina que antes de qualquer análise, as amostras devam ser moídas e peneiradas a uma granulometria de, aproximadamente 0,2mm. Os princípios para a determinação dos componentes químicos do carvão são descritos através do teor de umidade, do teor de materiais voláteis, do teor de cinzas e do teor de carbono fixo.

O teor de umidade ( $TU$ ) é dado pela perda de massa do carvão quando aquecido em estufa estabilizada a  $105\pm 3^\circ\text{C}$ , durante duas horas, ou até atingir o peso constante.

O teor de materiais voláteis ( $TMV$ ) é determinado pelo aquecimento do carvão a  $950^\circ\text{C}$  em forno a mufla, sem que ocorra a oxidação do carvão. Logo, a amostra é colocada em um cadinho com tampa permanecendo na mufla pelo período de apenas seis minutos. O  $TMV$  é obtido pela equação (3).

$$TMV = 100 * (M_s - M_{950^\circ\text{C}}) / M_s \quad (3)$$

onde, tem-se  $TMV$  sendo igual ao teor de materiais voláteis em valores percentuais,  $M_s$  sendo igual massa seca em gramas e  $M_{950^\circ\text{C}}$  sendo a massa após tratamento térmico a  $950^\circ\text{C}$  em gramas.

O teor de cinzas ( $TCZ$ ) é determinado através da combustão completa do carvão, sendo o mesmo aquecido em forno a mufla a  $750^\circ\text{C}$ , por um período de seis horas. Logo, o  $TCZ$  pode ser obtido através da equação (4).

$$TCZ = 100 * M_{\text{cinzas}} / M_s \quad (4)$$

onde,  $TCZ$  é igual ao teor de cinzas em valores percentuais,  $M_{\text{cinzas}}$  é massa de cinzas em gramas e  $M_s$  é a massa de carvão seco em gramas.

E finalmente, o teor de carbono fixo ( $TCF$ ) conforme pode ser observado pela equação (5).

$$TCF = 100 - (TCZ + TMV) \quad (5)$$

onde, tem-se  $TCF$  igual ao teor de carbono fixo em valores percentuais,  $TCZ$  é o teor de cinzas e  $TMV$  é o teor de materiais voláteis.

## 2.7 Análise Termogravimétrica

De acordo com Várhegyi (2007) somente o termo “análise térmica”, por si mesmo, possui uma definição ampla e generalizada: uma amostra é submetida a um dado programa de temperatura, enquanto são medidas uma ou mais propriedades do comportamento da amostra, em função do tempo ou temperatura.

Segundo Campos (2008) e Raad (2004) a análise termogravimétrica (TGA – *Thermogravimetric Analysis*) está baseada na medição constante da massa da amostra durante um processo de aquecimento. Geralmente, a massa da substância decresce, devido à perda de umidade, voláteis e reações de pirólise e combustão. Tal análise pode ser obtida em atmosfera oxidante (ar ou oxigênio), podendo ocorrer combustão e restando apenas cinzas no final do processo, ou sob uma atmosfera inerte, como N<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>. Neste caso, a perda de umidade e de materiais voláteis e reações químicas podem ocorrer. Com o gráfico obtido através do registro da perda de massa pela variação de temperatura, o processo pode ser observado em detalhe pela determinação do ponto de ignição, porcentagem de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas, e informações de estabilidade térmica.

A análise termogravimétrica permite conhecer a influência da taxa de um parâmetro interno, seu conjunto de moléculas, ou um produto externo, como por exemplo, seu poder catalítico. As influências dos parâmetros de processo sobre o rendimento e estudo cinético de reação, graças a regressões lineares, determinam-se a ordem da reação, a energia de ativação e o fator exponencial. Segundo Maa e Bailie (1973), as análises termogravimétricas partem da hipótese de que a decomposição de partículas com dimensões abaixo de 2mm seja controlada apenas por reações químicas. Portanto, condução térmica em partículas e diferenças atmosféricas em toda a massa da amostra são consideradas inexistentes.

### 2.7.1 Estado da Arte

Johnson e Mansfield (2012) implementaram uma bancada para análise termogravimétrica através de uma micro balança de cristal de quartzo. A mesma foi demonstrada a temperaturas na faixa de 20°C a 450°C. Um sistema de medição foi construído em torno de um sensor de cristal, o qual foi montado em um pequeno forno tubular, conforme pode ser observado na Figura 17.

Mudanças nas frequências do terceiro modo harmônico do cristal foram medidas durante decomposição termicamente ativada e a combustão de um filme de poli metacrilato de metila (PMMA) com uma massa inicial de aproximadamente 6µg, e mudanças correspondentes na massa foram estimadas.



Figura 17 – Bancada experimental, com o sensor e o forno tubular.

Fonte: Johnson e Mansfield, 2012.

O sistema TGA ( $\mu$ -TGA) baseado em uma micro balança apresenta uma ou duas ordens de grandeza de ruído menor do que a TGA de alta resolução, aproximadamente  $0,05\mu\text{g}$ , a temperaturas abaixo de  $200^\circ\text{C}$  e tem pelo menos uma ordem de grandeza menor ao longo de todas as temperaturas medidas. No entanto, o aumento da dependência da temperatura das frequências de cristal em temperaturas elevadas e o ruído nas medições de temperatura, levam ao ruído na estimação da massa dependente da temperatura acima de  $400^\circ\text{C}$ , a qual é comparável em magnitude àquela de um sistema TGA de alta resolução. Melhorias no desempenho de  $\mu$ -TGA dependem principalmente da implementação de ressonadores piezoelétricos confiáveis com baixa dependência de temperatura em toda a faixa medida.

Iervolino et. al (2011) apresentaram um dispositivo de sistemas micro eletromecânicos (*MEMS - Microelectromechanical Systems*) para análise termogravimétrica com atuadores térmicos integrados. O mesmo consiste em uma alavanca tipo cantilever conectada a dois atuadores térmicos separados, um de cada lado do cantilever. Um termopar integrado permite medir diretamente a diferença de temperatura entre o aquecedor, na ponta do cantilever, e a estrutura de silicone do dispositivo. Na Figura 18, pode-se observar a construção interna do dispositivo.

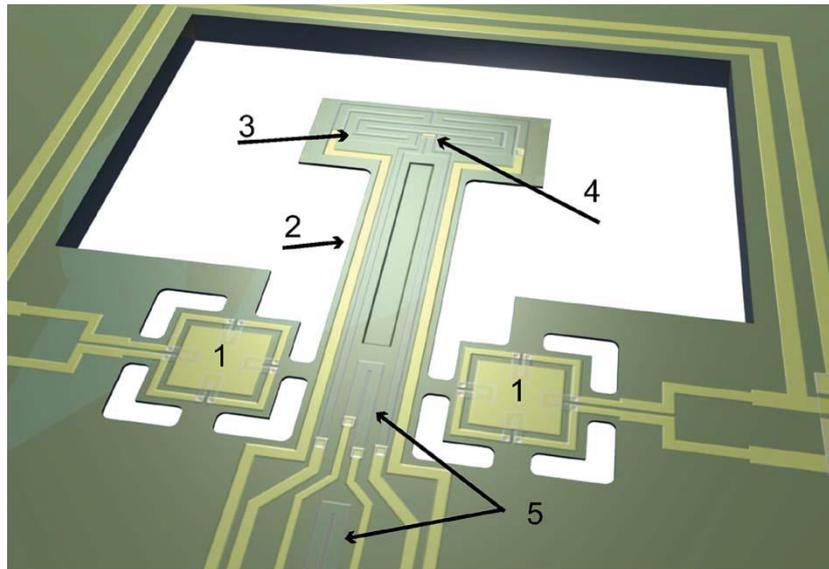


Figura 18 – Projeto tridimensional do dispositivo. (1) Atuadores térmicos são conectados através de depósitos de SiN ao (2) cantilever. (3) Aquecedor e a junção quente do (4) termopar estão no suporte. (5) Piezo resistores estão ligados conforme a ponte de Wheatstone.

Fonte: Iervolino et. al, 2011.

A amplitude de vibração do cantilever (frequência) é medida com um piezo resistor integrado. A dependência da temperatura da frequência de ressonância no aquecimento local com o aquecedor integrado é analisada. Calibrações de massa e temperatura são realizadas de 0ng a 6ng e de 25°C a 550°C, respectivamente. Para demonstrar o desempenho do dispositivo, é realizada a análise de amostras de poliamida e parafina. A análise termogravimétrica pode ser realizada com o dispositivo apresentado na faixa de temperatura de 25°C a 650°C para massas de amostra de 0,8ng.

Campos (2008), apresentou dois modelos de instrumentos de ensaios termogravimétricos, no primeiro, as carbonizações, em escala de laboratório, foram realizadas em um forno batch cilíndrico com capacidade de aproximadamente 0,2m<sup>3</sup> (49cm de diâmetro interno e 120cm de altura), aquecido por resistência elétrica posicionada em torno do forno. O reator, conforme pode ser observado na Figura 19, foi desenvolvido no CiradPersyst e permite simular diferentes condições experimentais pelos parâmetros de pressão entre 0,1MPa à 1MPa, temperatura até 700°C, taxa de aquecimento de até 20°C/min, tempo de retenção e controle da atmosfera interna com gás inerte. Estes parâmetros são controlados eletronicamente e todos os dados registrados e arquivados durante a experimentação. Os termopares tipo K, em diversas posições no interior do forno, permitem o monitoramento da temperatura.

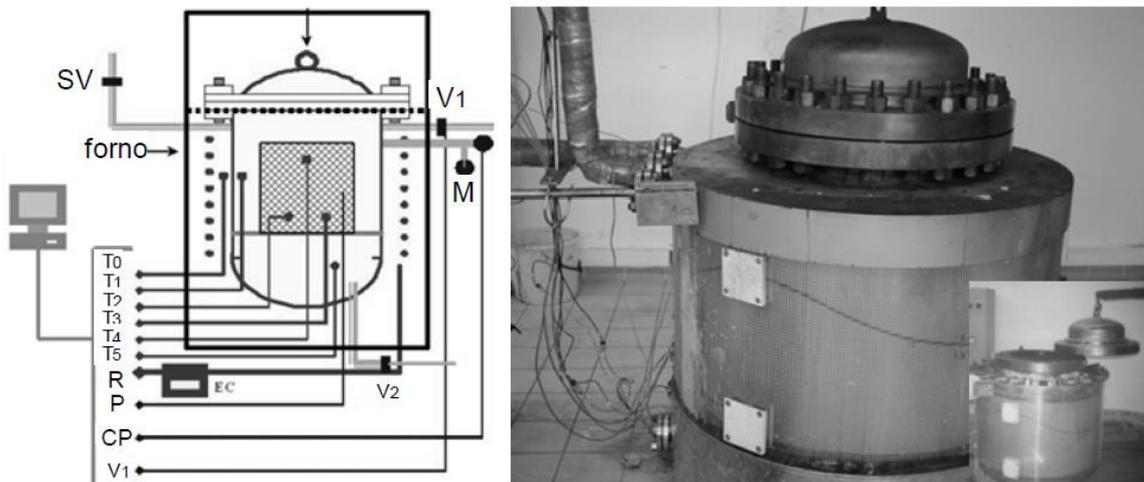


Figura 19 - Desenho esquemático do forno com sensores de temperatura (T0-T5), resistência elétrica (R); sensor de pressão (P); manômetro (M); válvula de controle de pressão (V1); válvula de injeção de nitrogênio (V2) e válvula de segurança (SV). À direita, fotos do forno em laboratório.

Fonte: Campos, 2008.

Constatou-se a ocorrência de uma grande variação da temperatura no interior do forno, devido principalmente aos fenômenos de convecção natural de gás e a transferência térmica causadas pelo sistema de aquecimento e isolamento térmico.

No segundo forno, conforme a Figura 20, apresenta formato tubular e é composto por duas “conchas”, as quais se abrem para a manipulação do reator e da amostra. O forno é provido de uma resistência elétrica com potência de 2,8kW, circundando o reator tubular de inox de 1,2m de comprimento e 30mm de diâmetro. O cadinho de alumínio para pesagem da amostra é mantido no interior do reator, ligado a um fio central de platina.

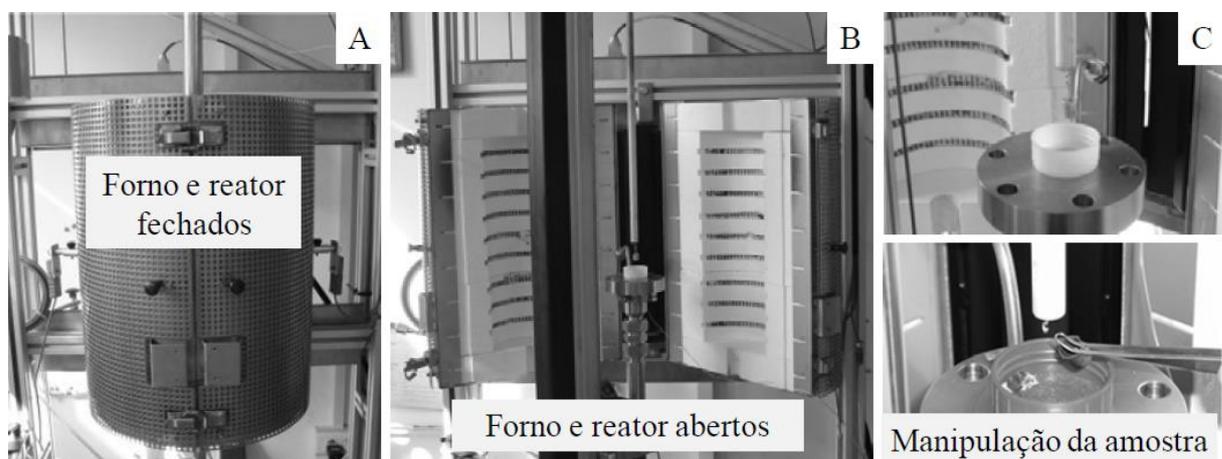


Figura 20 - Fotos do equipamento TGA mostrando o forno e reator fechados (A), abertos (B) e a manipulação da amostra no cadinho de alumínio (C).

Fonte: Campos, 2008.

Um diagrama esquemático de todo equipamento, assim como da balança eletromagnética utilizada pode ser observado na Figura 21.

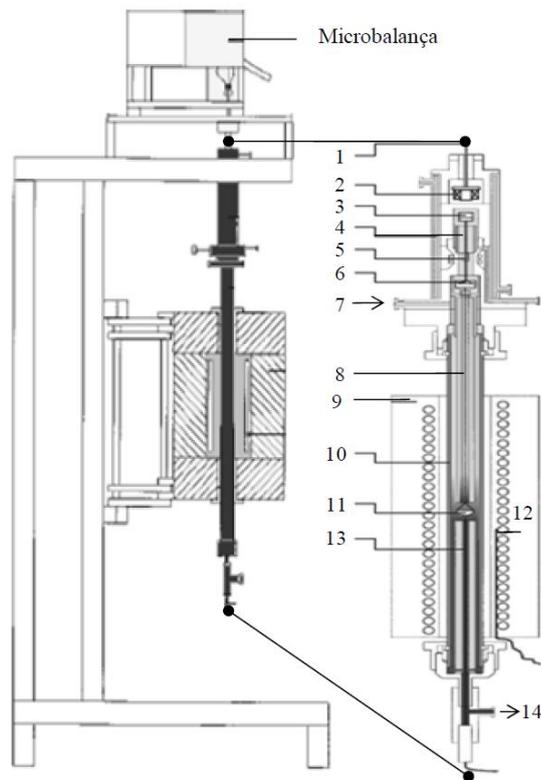


Figura 21 – Diagrama esquemático do reator para análise termogravimétrica: (1) conexão com a balança eletrônica, (2) eletroímã, (3) ímã permanente, (4) filete central, (5) sensores de posição, (6) término cônico no final do filete central, (7) entrada do gás (podendo ser inerte: N<sub>2</sub>, He ou oxidante: ar, CO, CO<sub>2</sub> ou redutor: H<sub>2</sub>), (8) filete de platina suportando a amostra, (9) forno tubular com resistência elétrica envolvendo o reator tubular de inox (10) com diâmetro de 30 mm e altura de 1,2 m, (11) cadinho de alumínio para amostra; termopares tipo K próximo à resistência elétrica do forno (12) e abaixo da amostra (13) e (14) saída do gás.

Fonte: Campos, 2008.

### **3 Materiais e Métodos**

Este trabalho será composto de cinco etapas, construção e instrumentação da bancada experimental, construção de uma interface homem-máquina, construção e modelagem dos sistemas de controle independentemente uns dos outros, assim como a validação dos resultados experimentais, comparação entre dois diferentes tamanhos de três espécies amostradas, sendo estas dispostas em cinco combinações diferentes, e por fim, predição da temperatura final de carbonização através de dados obtidos previamente.

#### **3.1 Bancada Experimental**

A planta de processo de pirólise construída e instrumentada pode ser dividida em três partes, a unidade do forno termogravimétrico, a unidade de pós-tratamento dos gases resultantes e a unidade de controle.

O forno termogravimétrico é composto de um forno tubular elétrico, com aquecimento através de uma resistência elétrica na forma de um reator cilíndrico, um cadinho para a amostra, uma balança de precisão, um termopar e outros sensores de temperatura.

A unidade de pós-tratamento dos gases resultantes será composta de um compressor, o qual poderá atuar como bomba de vácuo, filtros de particulados e condensáveis, sensor de pressão e válvulas 2/2 vias.

A unidade de controle é composta de condicionadores de sinais, conversores analógico-digitais, micro controlador, isoladores de sinais, controladores por largura de pulso, chaves de estado sólido e um software dedicado em um computador pessoal.

##### **3.1.1 O Forno**

O forno tubular possui as dimensões de 400mm de altura, com um diâmetro de 165mm, este foi construído a partir de um tubo de aço SAE1020, cuja parede possui 4,75mm, todas as suas tampas e união central foram confeccionadas, de igual forma, de aço SAE1020, porém com a espessura de 9,75mm. Na Figura 22, pode-se observar um exemplo da matéria prima da estrutura do forno. O volume útil para carbonização será de 0,35 litros.



Figura 22 – Matéria prima da estrutura do forno tubular.

O elemento de aquecimento é constituído por uma resistência confeccionada de um fio de 1,2mm de diâmetro de Níquel-Kanthal, sob um diâmetro de 6mm e um comprimento de 1m, produzindo 5kW. Na Figura 23, pode-se observar a resistência.



Figura 23 – Resistência de Níquel-Kanthal.

Todo o forno foi revestido com material refratário, com dupla função isolante, térmica e elétrica.

Utilizou-se como sensor de massa uma célula de carga de 100g, de 1mV/V, a mesma é apresentada na Figura 24.



Figura 24 – Célula de carga de 100g.

Foram utilizados quatro sensores de temperatura, no interior do forno foi aplicado um termopar do tipo K de 150mm com 3m de comprimento, o mesmo tem a sua temperatura máxima de trabalho de 1250°C, no exterior (temperatura ambiente), dentro do forno na entrada de gases (saída da unidade condensadora) e na célula de carga foram utilizados o sensor de temperatura digital LM35. Estes sensores são apresentados na Figura 25.

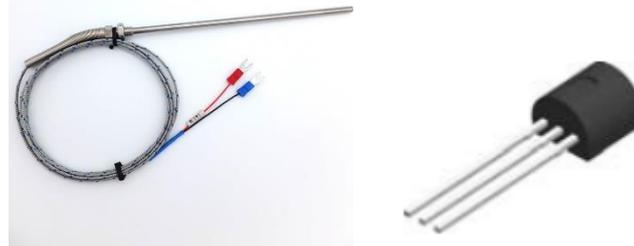


Figura 25 – Sensores de temperatura, na esquerda o termopar e na direita o sensor digital LM35.

Fonte: Texas Instruments, 2022.

A haste responsável em conectar o cadinho a célula de carga, assim como o próprio cadinho foram construídos de aço inoxidável.

### 3.1.2 A Unidade de Pós-Tratamento dos Gases

Na unidade de pós-tratamento de gases foi utilizado o compressor EGAS 70HLR do fabricante Embraco, o mesmo possui uma potência de 1/5 de HP e uma cilindrada de 5,56cm<sup>3</sup>.

Foram utilizadas válvulas pneumáticas 2/2 vias com sentido único, de acionamento simples através de solenoide 12v, com a potência de 2,5w e capacidade de 5 chaveamentos por segundo sobre uma pressão de trabalho de 1Mpa do fabricante Bosch.

Na Figura 26, pode-se visualizar a válvula solenoide utilizada e o compressor utilizado.



Figura 26 – Na esquerda, o tipo de válvula solenoide a ser utilizado e na direita o compressor.

Utilizou-se um sensor de pressão, modelo MPX5999D, do fabricante Freescale, este sensor é capaz de realizar medições de pressões entre 0,2 até 1Mpa, o mesmo pode ser observado na Figura 27.



Figura 27 – Sensor de pressão MPX5999D.

Utilizou-se um filtro na linha de gases responsável por restringir a passagem de eventuais materiais particulados, assim como, quaisquer umidade do ar atmosférico. O filtro secador pode ser observado na Figura 28.



Figura 28 – Filtro secador.

A unidade condensadora foi construída manualmente, através de uma serpentina produzida com 2m de duto de cobre de  $\frac{1}{4}$ " sobre um diâmetro de 75mm, sendo a mesma inserida em um cilindro de aço, no qual circulará água na temperatura ambiente.

O reservatório de materiais voláteis condensáveis será confeccionado através de um vidro comum com tampa metálica, no qual será adicionado conexões pneumáticas.

### 3.1.3 A Unidade de Controle

Na unidade de controle foi utilizado o micro controlador ATmega328P do fabricante Microchip, como pode ser observado na Figura 29.



Figura 29 – Micro controlador Atmega328P.

Fonte: Microchip, 2022.

O mesmo possui um processador de 8bits de 20MIPS com arquitetura AVR RISC, possui uma memória flash ISP de 32KB, com leitura e escritas simultâneas, possui uma eeprom de 1024B, uma memória SRAM de 2KB, 23 conexões de entrada e saída de uso geral, 32 registradores de trabalho de uso geral, três temporizadores flexíveis, contadores com modos de comparação, interrupções internas e externas, USART serial programável, uma interface serial de 2 fios orientada a byte, porta serial SPI, um conversor A/D de 10bits de 8 canais, temporizador de *watchdog* programável com oscilador interno e cinco modos de economia de energia selecionáveis por software. O dispositivo opera entre 1,8-5,5 volts (Microchip, 2022).

Foram utilizados como condicionadores de sinais o circuito integrado MAX6675 do fabricante Maxim Integrated, este possui compensação de junção fria e realiza digitalização do sinal do termopar do tipo K. Os dados são convertidos em uma resolução de 12bits, tendo como resolução de temperatura 0,25°C, permitindo medir temperaturas até 1024°C com precisão de 8bits menos significativos para temperaturas variando de 0°C a 700°C, e o conversor analógico digital de 24 bits HX711 do fabricante Avia Semiconductor. Suas finalidades são condicionar os sinais do termopar e da célula de carga respectivamente (Maxim Integrated, 2022 e Avia Semiconductor, 2022). Estes podem ser visualizados na Figura 30.

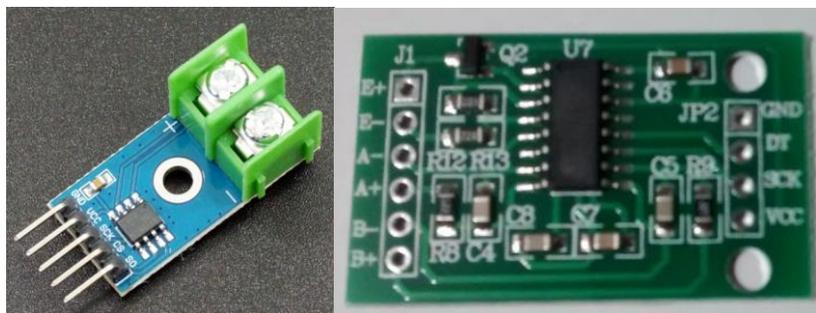


Figura 30 – Na esquerda o circuito integrado MAX6675 e na direita o conversor analógico digital de 24 bits HX711.

Fonte: Maxim Integrated, 2022 e Avia Semiconductor, 2022.

Tanto para o acionamento do compressor como para o acionamento das resistências elétricas (elementos de aquecimento) foram utilizados relés de estado sólido do modelo SSR-40DA produzido pelo fabricante FOTEK. (Fotek, 2022) O mesmo pode ser observado na Figura 31.



Figura 31 – Relé de estado sólido SSR-40DA.

Todas as saídas foram isoladas opticamente através do circuito apresentado na Figura 32. O mesmo é composto pelo opto-acoplador PC817 do fabricante SHARP, juntamente com o MOSFET IRF1404 do fabricante INTERNATIONAL RECTIFIER e o diodo ultra rápido UF5408 do fabricante VISHAY como diodo de roda livre, conferindo assim a imunidade à ruídos que o presente trabalho necessita (Sharp, 2022; International Rectifier, 2022; Vishay, 2022).

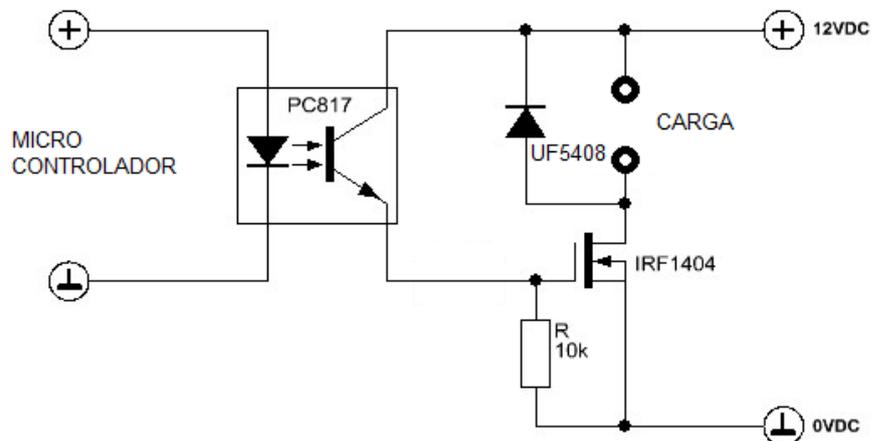


Figura 32 – Circuito de isolamento.

Um software foi implementado para o micro controlador, este software é escravo do software do computador pessoal, com exceção da rotina principal dos laços de controle de temperatura e de pressão em malha fechada, as quais são locais do mesmo.

O software do micro controlador foi confeccionado através do ambiente de desenvolvimento integrado ARDUINO. (Arduino, 2022)

### 3.1.4 Diagrama esquemático

Através da Figura 33, pode-se compreender melhor o funcionamento da bancada de testes. O forno desenvolvido para executar ensaios termogravimétricos controlados pode executar os seguintes modos de operação, com gás inerte ou com ar atmosférico, e combinado a estes com ou sem a recirculação dos mesmos durante o processo de pirólise, o teste poderá ser realizado no vácuo caso seja desejado.

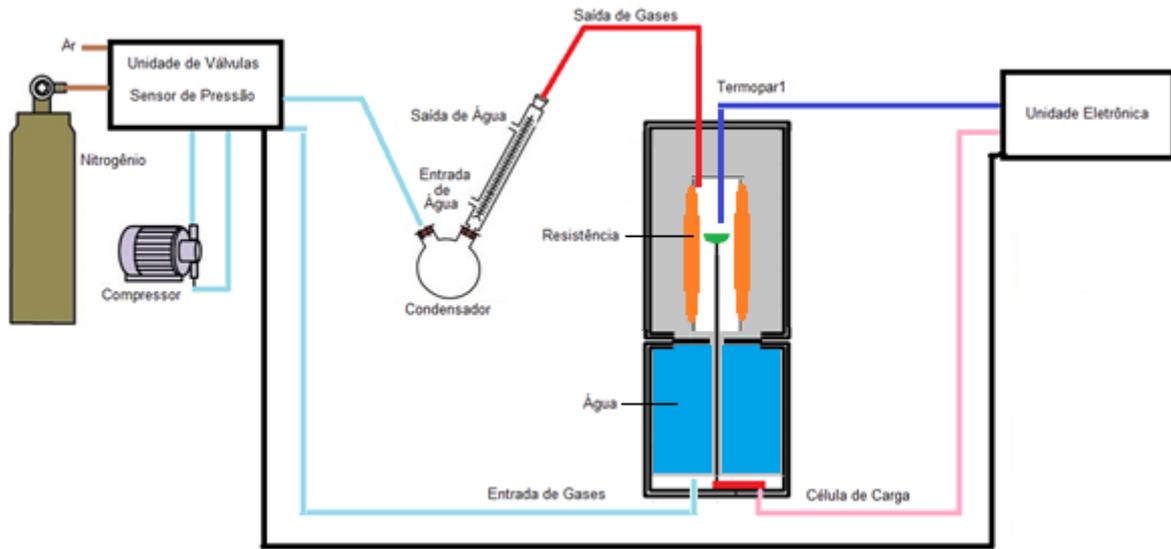


Figura 33 – Diagrama esquemático do forno de ensaios termogravimétricos.

### 3.2 Interface Homem-Máquina

A unidade eletrônica é conectada a um computador pessoal, no qual está presente uma interface homem-máquina, com a finalidade de facilitar o registro, a análise, o uso, assim como o desenvolvimento do equipamento.

A interface homem-máquina, ou melhor descrito como, o software do computador pessoal, foi confeccionado através do ambiente de desenvolvimento integrado MICROSOFT VISUAL STUDIO. (Microsoft, 2022)

### 3.3 Modelagem, Controle e Validação

Todas as unidades foram devidamente modeladas via software Simulink/MATLAB, curvas de suas respostas dinâmicas serão levantadas experimentalmente, para diferentes tipos de carregamento, para os casos de máxima e ou mínima aplicação potência térmica,

para diferentes tipos de degraus e rampas de temperatura. Resultados obtidos via software serão confrontados e validados com os resultados experimentais. (Mathworks, 2022)

Toda dinâmica do sistema foi modelada através dos métodos clássicos desenvolvidos nos sistemas de controle, conforme OGATA (2010).

O sistema de controle de temperatura em malha fechada desenvolvido foi devidamente validado. Conforme NISE (2002), o sistema de controle de pressão/vácuo foi implementado através de um simples controle liga-desliga com histerese, sendo então trivial e não havendo assim a necessidade de modelagem dinâmica.

Todos os resultados obtidos através deste equipamento foram comparados com a atual literatura, comparando os mesmos com outros autores já consolidados.

### **3.4 Comparação entre Arranjos de Amostras e Espécies**

No presente trabalho, foram experimentadas três espécies de madeira, *Corymbia citriodora*, *Eucalypto saligna* e *Pinus elliottii*, realizando a comparação entre dois diferentes tamanhos de cada espécie amostrada, sendo estas dispostas em cinco combinações diferentes. Nesta etapa, foi consolidado e validado a construção do equipamento como um todo.

Foram produzidas amostras de cada espécie com as seguintes dimensões, 10mm x 10mm x 10mm, ao longo deste trabalho estas amostras serão denominadas “pequenas” (P).

Amostras de cada espécie foram produzidas com as dimensões, 10mm x 10mm x 30mm, as quais serão denominadas “grandes” (G).

Os testes experimentais através do equipamento desenvolvido se deram da seguinte forma nesta etapa, as amostras foram arranjadas em cinco combinações: três amostras pequenas, uma amostra grande, três amostras pequenas e uma grande, duas amostras grandes e finalmente, três amostras grandes, conforme pode ser observado nas Figuras 34, 35 e 36.

Todos arranjos foram carbonizados em uma rampa de temperatura de 10°C/min e com atmosfera de ar natural sem a recirculação dos gases, ou seja, os gases injetados no forno sempre estiveram ricos em oxigênio e os gases resultantes foram exauridos para a atmosfera. Foram realizadas vinte repetições para cada arranjo. Todos os testes foram registrados com três medições por segundo entre 150°C a 650°C. A massa final será considerada como o teor de cinzas. Todos os registros foram filtrados com uma média móvel de cem posições. Das vinte repetições realizadas foram descartadas as dez cujos erros médio e desvios padrão sejam maiores e, por fim, foram utilizadas somente as cinco mais semelhantes entre si. Todos arranjos, antes e depois dos experimentos foram pesados em uma balança de precisão para

conferência, desta forma, ao longo da execução dos ensaios, o correto funcionamento do equipamento foi verificado e validado novamente.



Figura 34 – Arranjos das amostras de *Corymbia citriodora*.



Figura 35 – Arranjos das amostras de *Eucalipto saligna*.



Figura 36 – Arranjos das amostras de *Pinus eliottii*.

### 3.5 Predição da Temperatura Final de Carbonização

Nesta etapa foram utilizados somente os arranjos com duas amostras grandes de cada espécie. Foram realizados os testes com a finalidade de determinar o percentual de materiais voláteis de cada espécie carbonizadas a priori em duas temperaturas finais de carbonização, 350°C e 500°C sob uma rampa de 10°C/min com atmosfera fechada e recirculante. Foi possível então calcular o teor de carbono fixo para estes dois pontos.

Através destes pontos, uma linearização foi realizada, predizendo então a temperatura final de carbonização de cada espécie para qualquer teor de carbono fixo desejado.

Para a determinação de materiais voláteis dos arranjos de amostras, os mesmos foram carbonizados sob uma rampa de 50°C/min com atmosfera fechada e recirculante até atingir 750°C. Finalmente, inferiu-se através da linearização a temperatura final para se obter, através de cada uma das espécies, um carvão vegetal com teor de carbono de fixo de 75%.

Foram realizadas vinte repetições para cada espécie. Das vinte repetições realizadas foram descartadas as dez cujos erros médios e desvios padrão foram maiores e, por fim, foram utilizadas somente as cinco mais semelhantes entre si. Todos experimentos, antes e depois foram pesados em uma balança de precisão para conferência.

## 4 Resultados

### 4.1 Implementação Experimental

A implementação do forno termogravimétrico é composta do forno tubular elétrico, com aquecimento através de uma resistência elétrica na forma de um reator cilíndrico, conforme pode ser visualizado em pleno funcionamento na Figura 37, de um cadinho para a amostra e de uma balança de precisão na mesma Figura 37, um termopar e outros sensores de temperatura.



Figura 37 – Forno tubular com a resistência de 5kW em funcionamento na esquerda e a balança de precisão e o cadinho das amostras na direita.

Através da Figura 38, pode-se verificar a bancada implementada experimentalmente de uma maneira geral.

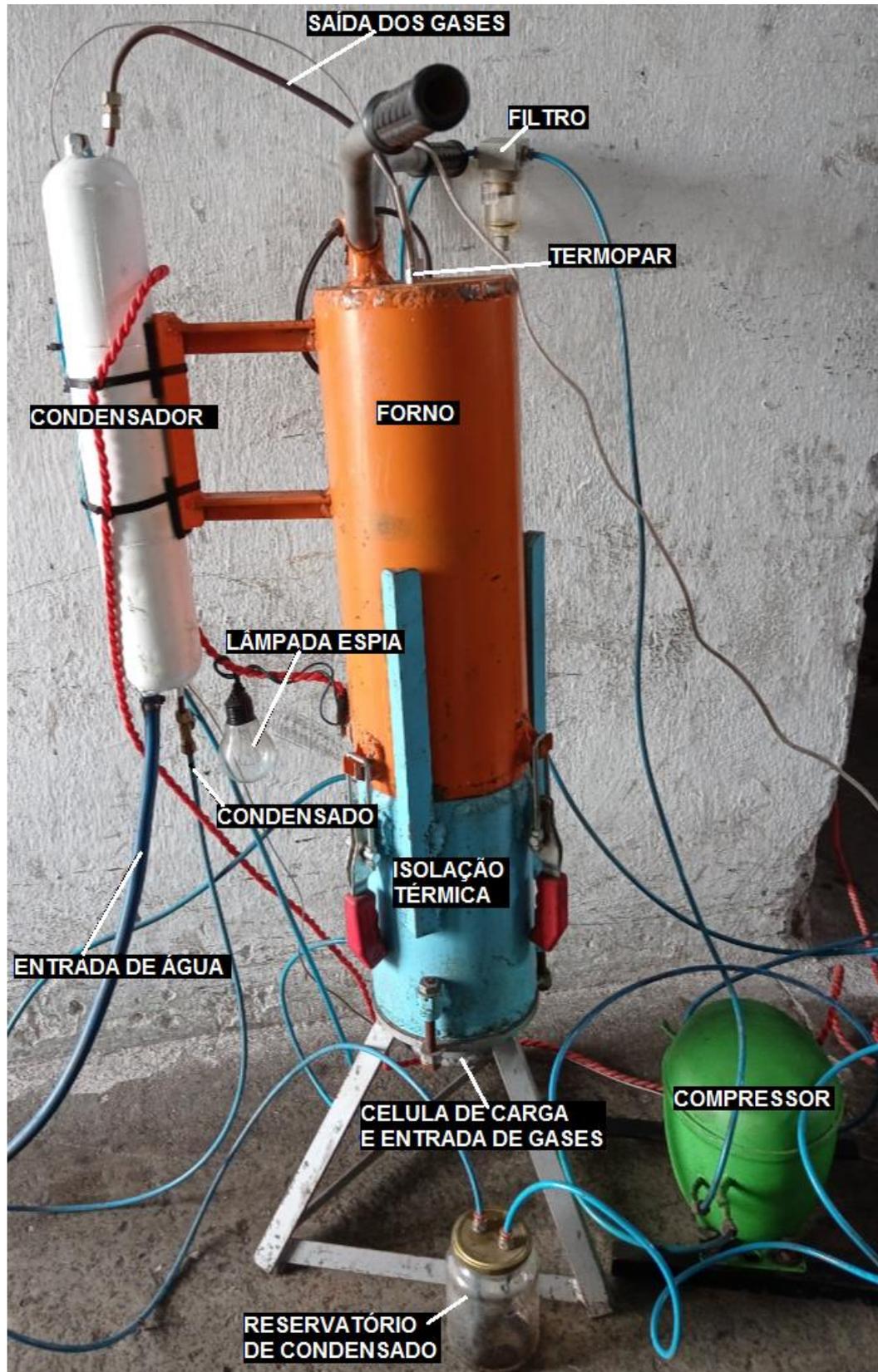


Figura 38 – Bancada experimental implementada.

Na Figura 39, observa-se em detalhe a isolação térmica.



Figura 39 – Isolação térmica.

Através da Figura 40, pode-se observar a unidade de controle.



Figura 40 – Unidade de controle.

Para a unidade de pós-tratamento de gases, desenvolveu-se um circuito capaz de controlar o fluxo dos gases no interior do forno, de acordo o tipo de teste a ser realizado. Para tal o diagrama esquemático das válvulas pode ser observado na Figura 41, as setas indicam o sentido que o fluxo poderá ser impedido caso as mesmas sejam acionadas, e a tabela verdade contendo a lógica de funcionamento para cada situação é apresentada na Tabela 2.

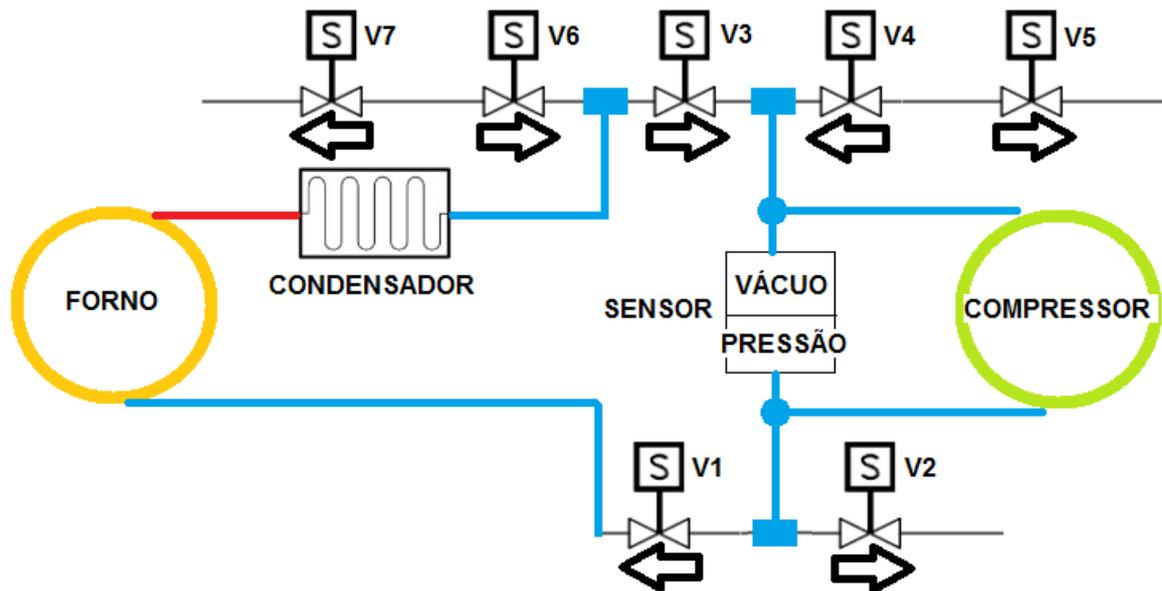


Figura 41 – Unidade de pós-tratamento dos gases, diagrama de válvulas.

Tabela 2 – Tabela verdade da lógica de funcionamento das válvulas conforme o fluxo dos gases.

Tipo de Fluxo	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7
Fechado	0	1	0	1	1	1	1
Pressurizando	0	1	1	0	0	1	1
Vácuo	1	0	0	1	1	1	1
Aberto	0	1	1	0	0	0	0
Alívio	0	0	0	0	0	0	0

## 4.2 Interface Homem-Máquina

A interface homem-máquina foi desenvolvida no ambiente de desenvolvimento integrado MICROSOFT VISUAL STUDIO na linguagem Visual C#, sua finalidade é de facilitar o registro, a análise, o uso, assim como, o desenvolvimento do equipamento. Esta pode ser melhor observada na Figura 42.

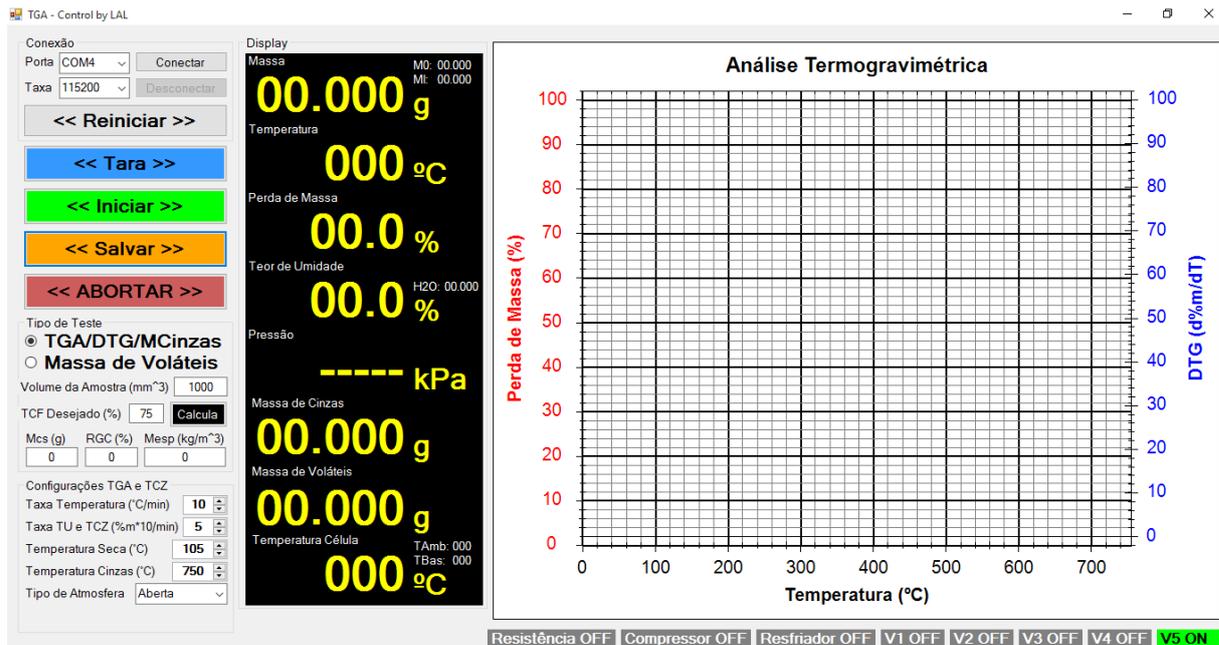


Figura 42 – Interface homem-máquina.

## 4.3 Modelagem da Função de Transferência, do Sistema de Controle e Validação

Para a execução da modelagem da função de transferência do forno, aplicou-se um degrau de 15% de *duty cycle* no PWM (*pulse wide modulation*) sobre a resistência do forno, em seguida, constatou-se que a dinâmica do forno em malha aberta se comporta de maneira semelhante a um sistema de primeira ordem. Conforme Nise (2012), realizou-se então a aproximação da mesma através da equação (6) devidamente ajustada, como segue:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

(6)

onde,  $Y(s)$  é a saída do sistema (temperatura de saída),  $X(s)$  é a entrada do sistema (*duty cycle* do PWM),  $\tau$  é a constante de tempo, a qual é extraída da curva do gráfico da resposta temporal, no ponto onde o valor da resposta atinge 63,2% do valor final e o ganho  $K$  é ajustado conforme a necessidade de se corrigir p valor em regime permanente.

A partir dos dados obtidos, ajustou-se os valores de  $\tau$  e  $K$  para 500 e 7, respectivamente, obtendo-se a função de transferência representativa da dinâmica térmica do forno conforme a equação (7), a implementação realizada no ambiente de simulação e a sua validação podem ser verificadas através das Figuras 43 e 44.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{7}{500s + 1}$$

(7)

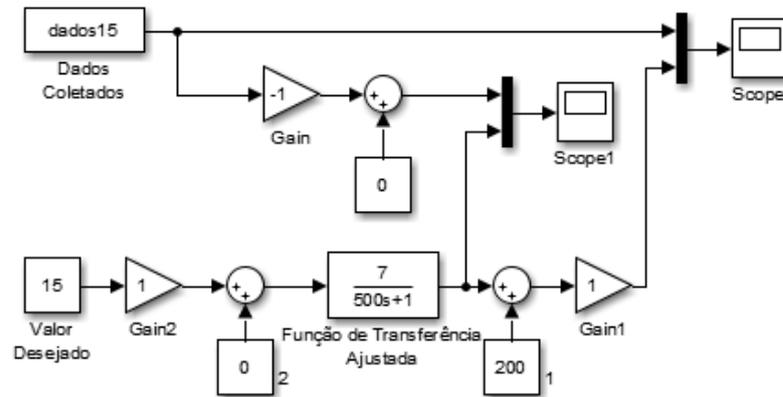


Figura 43 – Ambiente de simulação para modelar a dinâmica térmica do forno.

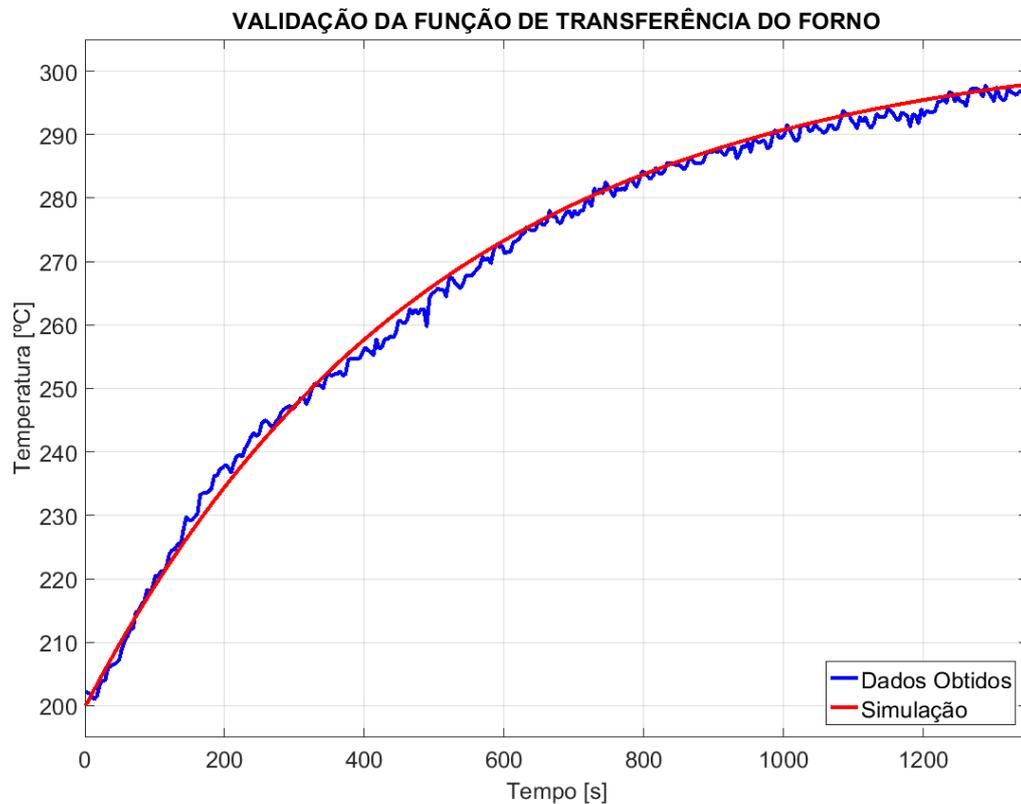


Figura 44 – Validação da função de transferência aproximada do forno.

Após a modelagem da dinâmica do forno, projetou-se um sistema de controle do tipo proporcional, integral e derivativo para a temperatura, sendo o mesmo responsável pela precisão, repetitividade e eficiência da queima da madeira.

O sistema de controle projetado foi implementado conforme pode ser visualizado na Figura 45. Os valores dos ganhos foram gerados automaticamente pela ferramenta de otimização do ambiente de simulação Simulink/MATLAB, obtendo-se os seguintes valores para os ganhos: ganho unitário para a ação de controle proporcional ( $P = 1$ ), ganho de 0,001 para a ação de controle integradora ( $I = 0,001$ ), ganho de 5 para ação de controle derivativa ( $D = 5$ ) e ganho unitário para o coeficiente de filtragem ( $N = 1$ ). Adicionou-se um bloco saturador, pois jamais a ação de controle resultante poderá atuar com valores superiores a 100% e inferiores a 0% sobre o PWM.

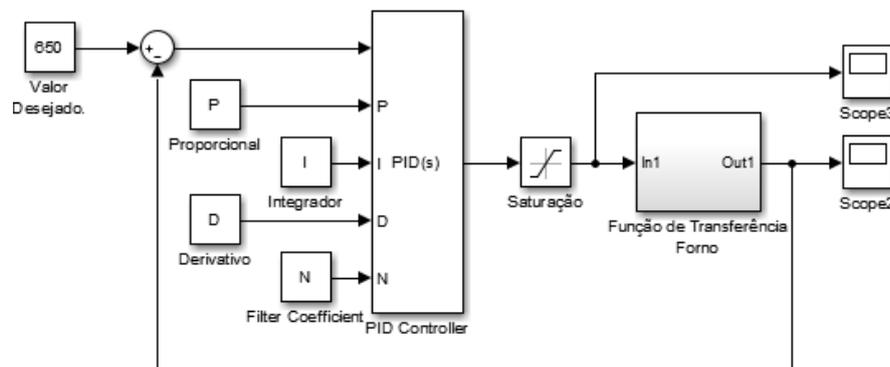


Figura 45 – Ambiente de simulação para projetar o sistema de controle.

O sistema de controle projetado em ambiente de simulação foi validado experimentalmente. O mesmo foi confrontado com diversas rampas de temperatura, isto é, diversas taxas de aquecimento. Na Figura 46, observa-se as curvas desejadas de diferentes taxas de aquecimento com as suas respectivas curvas obtidas experimentalmente no forno.

O sistema de controle foi validado frente a diferentes degraus de entrada, com outras palavras, diferentes magnitudes de temperatura, utilizando-se 100% da potência térmica do forno, formando-se assim um efeito “escada”. O mesmo pode ser melhor observado através da Figura 47.

Da mesma maneira, na Figura 48, pode-se observar a ação de controle aplicada para atingir os degraus de entrada, onde fica evidente a ação do sistema de controle projetado.

Finalmente, na Figura 49, constata-se a curva de resfriamento do forno, a qual evidencia o tempo de resfriamento após um experimento atingir os 650°C voltar para próximo de 200°C, tempo este de 2200s, ou seja, aproximadamente 40 minutos. Este intervalo de tempo deverá ser aguardado, para não trincar o isolamento térmico refratário do interior do forno.

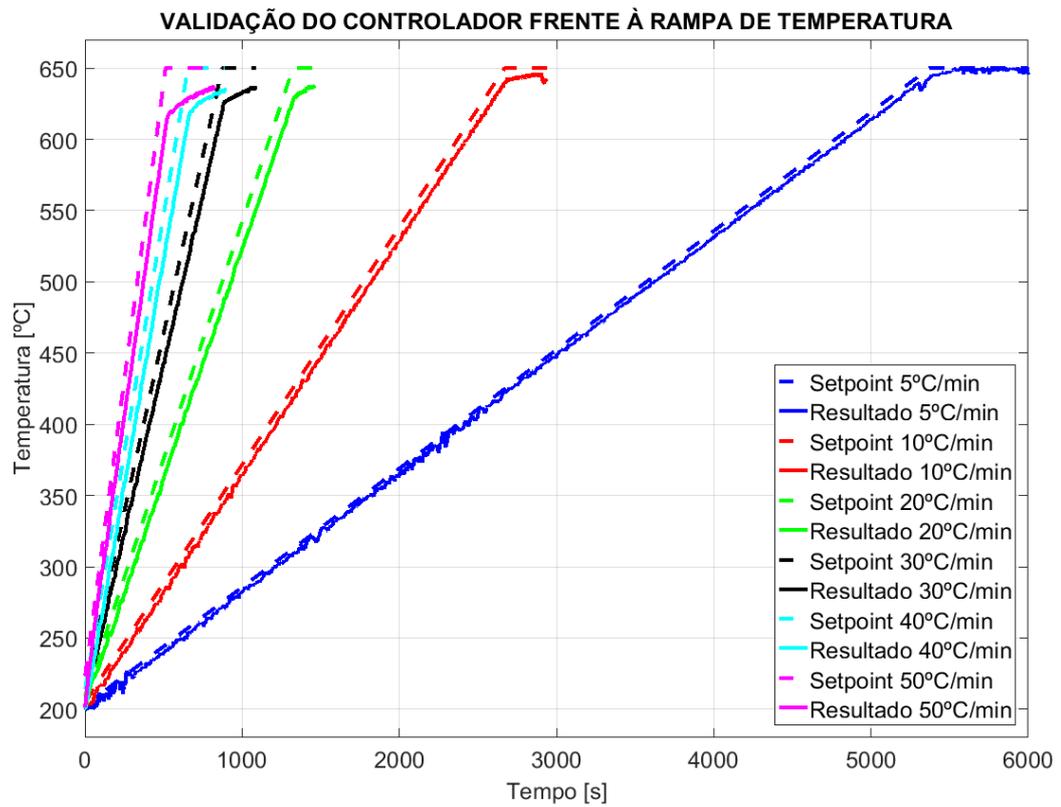


Figura 46 – Validação do sistema de controle submetido a diferentes taxas de aquecimento.

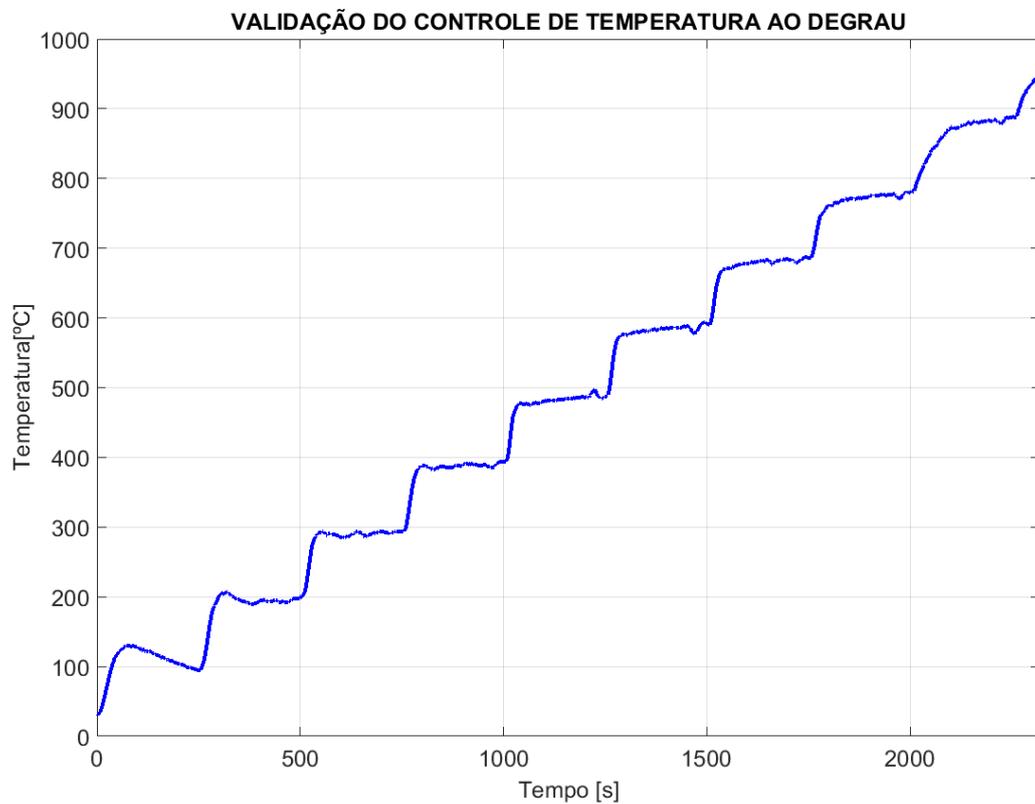


Figura 47 – Validação do sistema de controle submetido a diferentes degraus de entrada.

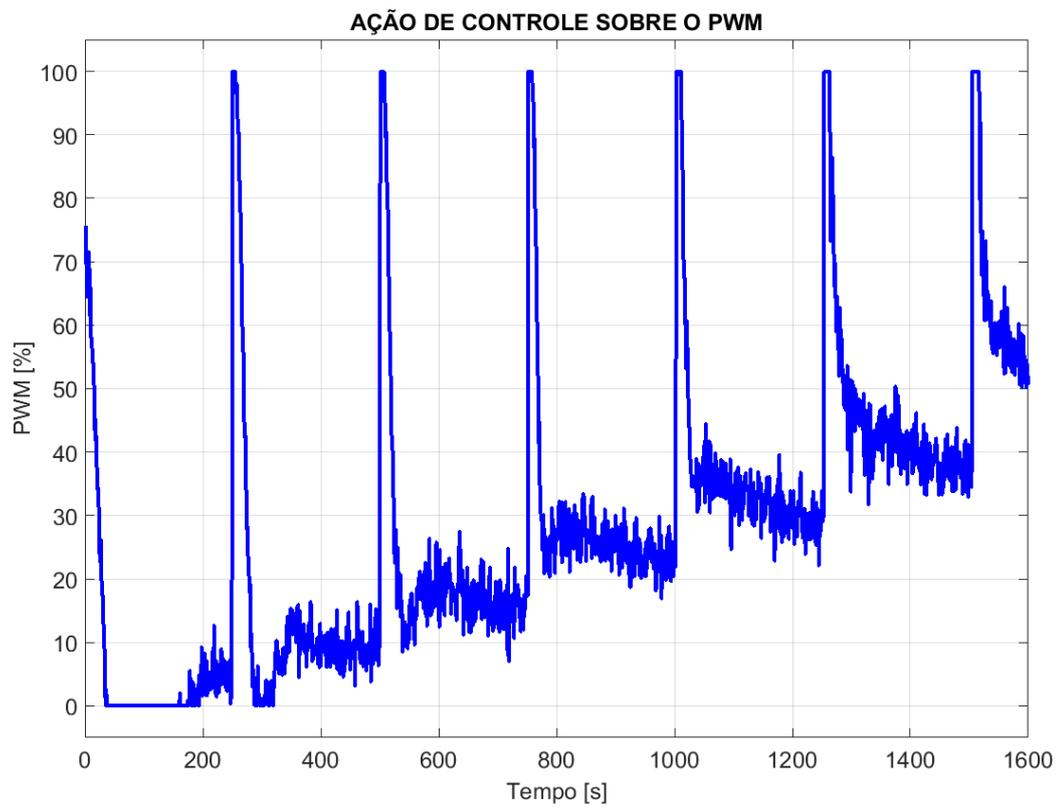


Figura 48 – Ação do sistema de controle projetado sobre o PWM.

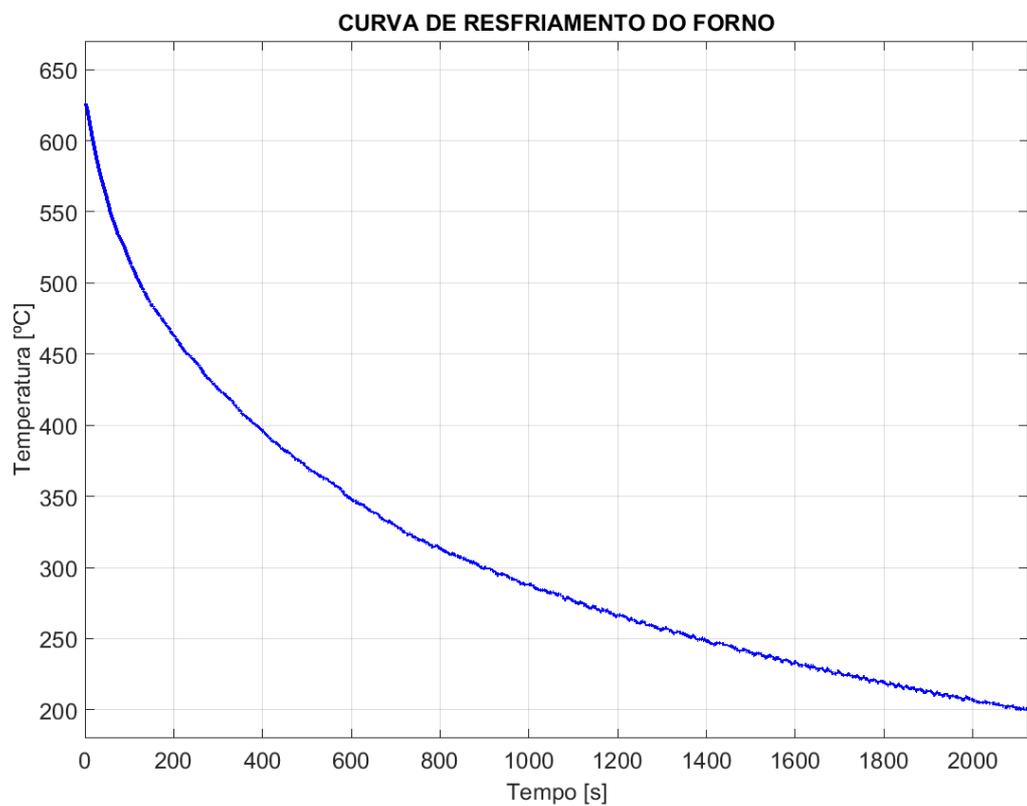


Figura 49 – Curva de resfriamento do forno, após atingir 650°C.

#### 4.4 Comparação da Carbonização de Diferentes Espécies e Arranjos

Conforme exposto anteriormente, nesta etapa foram experimentadas três espécies de madeira, *Corymbia citriodora*, *Eucalipto saligna* e *Pinus elliottii*, realizando a comparação entre dois diferentes tamanhos de cada espécie amostrada, sendo estas dispostas em cinco combinações diferentes.

Os testes experimentais através do equipamento desenvolvido foram realizados da seguinte maneira: as amostras (C – *Corymbia citriodora*, S – *Eucalipto saligna* e P – *Pinus elliottii*) foram arranjadas em cinco combinações: três amostras pequenas (3P), uma amostra grande (1G), três amostras pequenas e uma grande (3P1G), duas amostras grandes (2G) e finalmente, três amostras grandes (3G). Os arranjos foram carbonizados em uma rampa de temperatura de 10°C/min e com atmosfera de ar natural sem a recirculação dos gases, ou seja, os gases injetados no forno sempre estavam ricos em oxigênio e os gases resultantes foram exauridos para a atmosfera.

Nas Tabelas 3, 4 e 5, pode-se observar os dados amostrados e os resultados experimentais desta etapa para as espécies *Corymbia citriodora*, *Eucalipto saligna* e *Pinus elliottii*, respectivamente.

Tabela 3 – Tabela dos dados amostrados e resultados experimentais para *Corymbia citriodora*.

Arranjo	Massa Específica [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa Inicial [mg]	Massa Final [mg]	Teor de Cinzas [%]
C3P	903,40 ±17,14	3160 ±10	30 ±5,66	1,25 ±0,30
C1G		4120 ±15	40 ±6,51	
C2G		6525 ±21	85 ±8,45	
C3G		10790 ±33	190 ±17,86	
C3P1G		6720 ±22	80 ±10,75	

Tabela 4 – Tabela dos dados amostrados e resultados experimentais para *Eucalipto saligna*.

Arranjo	Massa Específica [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa Inicial [mg]	Massa Final [mg]	Teor de Cinzas [%]
S3P	567,79 ±17,94	2070 ±15	20 ±6,01	1,14 ±0,39
S1G		2079 ±16	11 ±5,02	
S2G		4779 ±35	79 ±8,32	
S3G		6930 ±41	100 ±9,74	
S3P1G		4509 ±32	51 ±9,11	

Tabela 5 – Tabela dos dados amostrados e resultados experimentais para *Pinus elliottii*.

Arranjo	Massa Específica [kg/m <sup>3</sup> ]	Massa Inicial [mg]	Massa Final [mg]	Teor de Cinzas [%]
P3P	460,10 ±6,43	1389 ±5	29 ±3,76	2,54 ±0,29
P1G		1309 ±4	39 ±4,12	
P2G		3055 ±10	55 ±5,32	
P3G		4081 ±12	121 ±6,66	
P3P1G		2849 ±11	69 ±6,72	

Nas Figuras 50, 52, 54, 56 e 58 serão apresentados os resultados da carbonização da espécie *Corymbia citriodora* para os arranjos C3P, C1G, C2G, C3G e C3P1G respectivamente.

Nas Figuras 51, 53, 55, 57 e 59 serão apresentados os resultados da derivada carbonização da espécie *Corymbia citriodora* para os arranjos C3P, C1G, C2G, C3G e C3P1G respectivamente.

Nas Figuras 60 e 61 serão apresentados a comparação dos diferentes arranjos e dos resultados percentuais da carbonização e da primeira derivada da carbonização para a espécie *Corymbia citriodora*.

Nas Figuras 62, 64, 66, 68 e 70 serão apresentados os resultados da carbonização da espécie *Eucalipto saligna* para os arranjos S3P, S1G, S2G, S3G e S3P1G respectivamente.

Nas Figuras 63, 65, 67, 69 e 71 serão apresentados os resultados da derivada carbonização da espécie *Eucalipto saligna* para os arranjos S3P, S1G, S2G, S3G e S3P1G respectivamente.

Nas Figuras 72 e 73 serão apresentados a comparação dos diferentes arranjos e dos resultados percentuais da carbonização e da primeira derivada da carbonização para a espécie *Eucalipto saligna*.

Nas Figuras 74, 76, 78, 80 e 82 serão apresentados os resultados da carbonização da espécie *Pinus elliottii* para os arranjos P3P, P1G, P2G, P3G e P3P1G respectivamente.

Nas Figuras 75, 77, 79, 81 e 83 serão apresentados os resultados da derivada carbonização da espécie *Pinus elliottii* para os arranjos P3P, P1G, P2G, P3G e P3P1G respectivamente.

Nas Figuras 84 e 85 serão apresentados a comparação dos diferentes arranjos e dos resultados percentuais da carbonização e da primeira derivada da carbonização para a espécie *Pinus elliottii*.

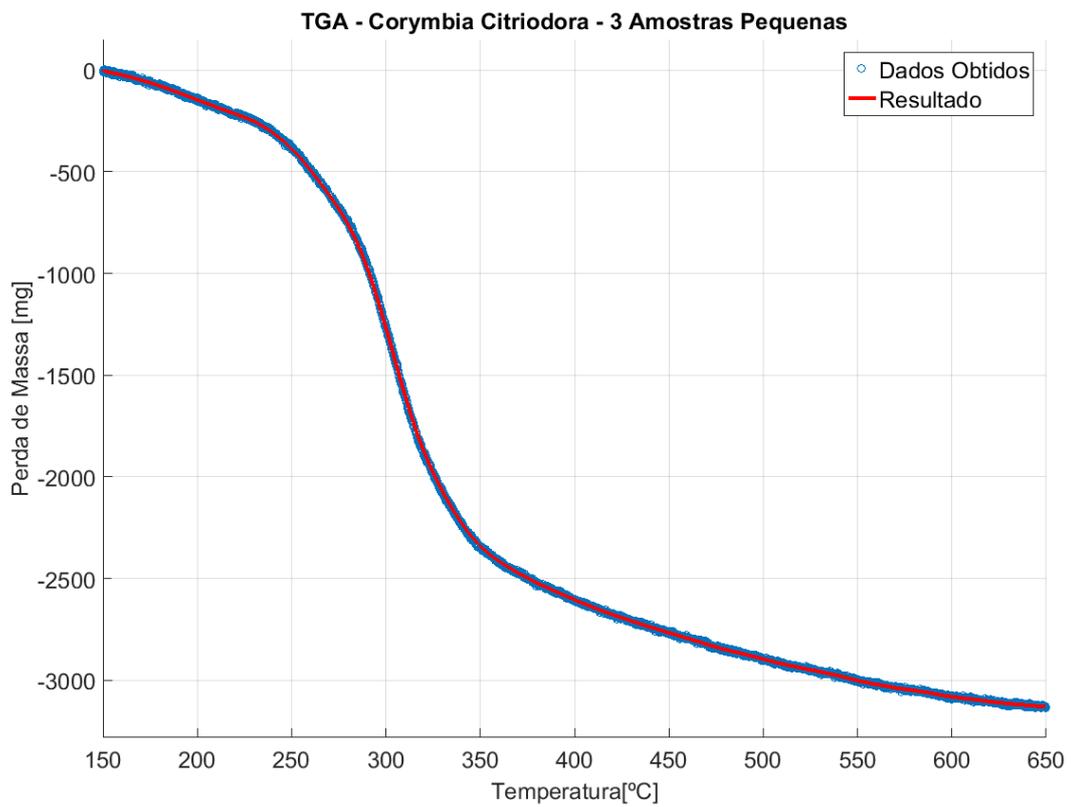


Figura 50 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3P de *Corymbia citriodora*.

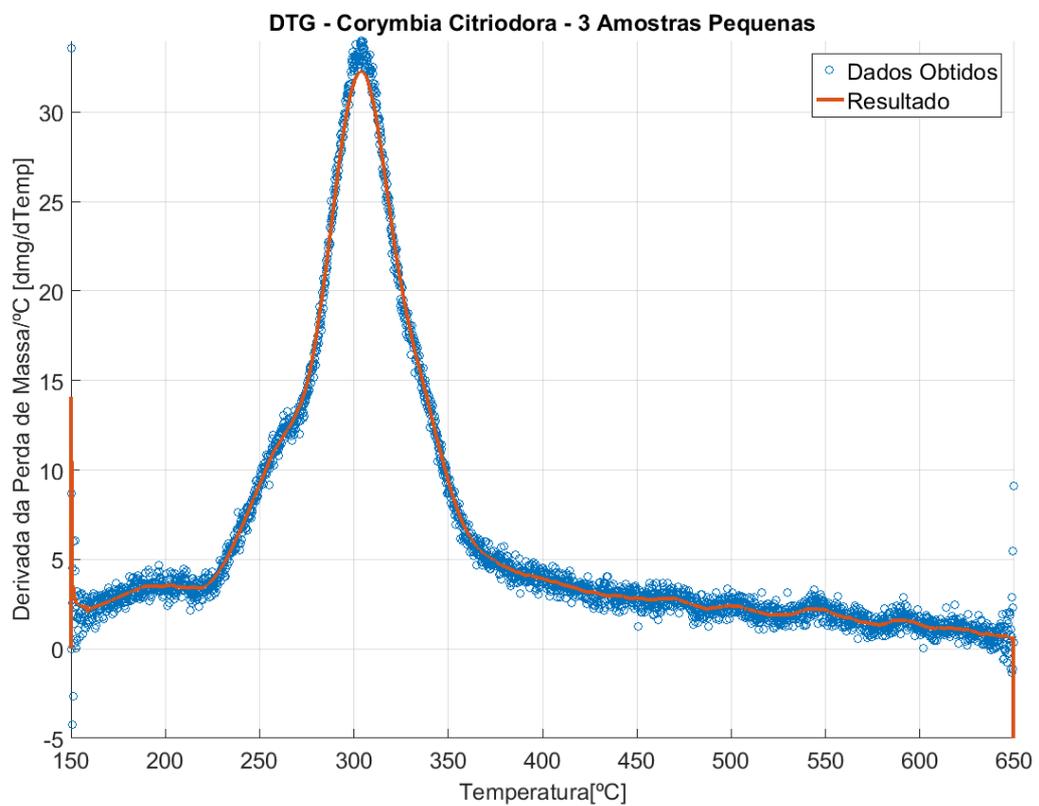


Figura 51 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3P de *Corymbia citriodora*.

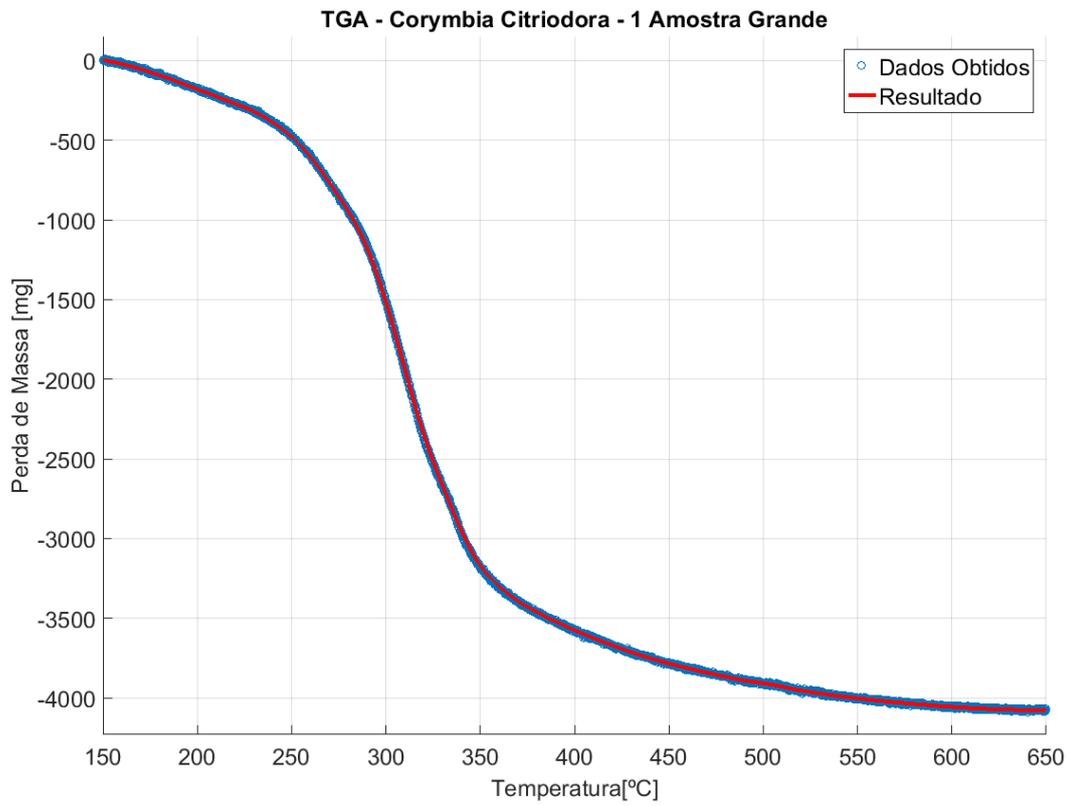


Figura 52 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 1G de *Corymbia citriodora*.

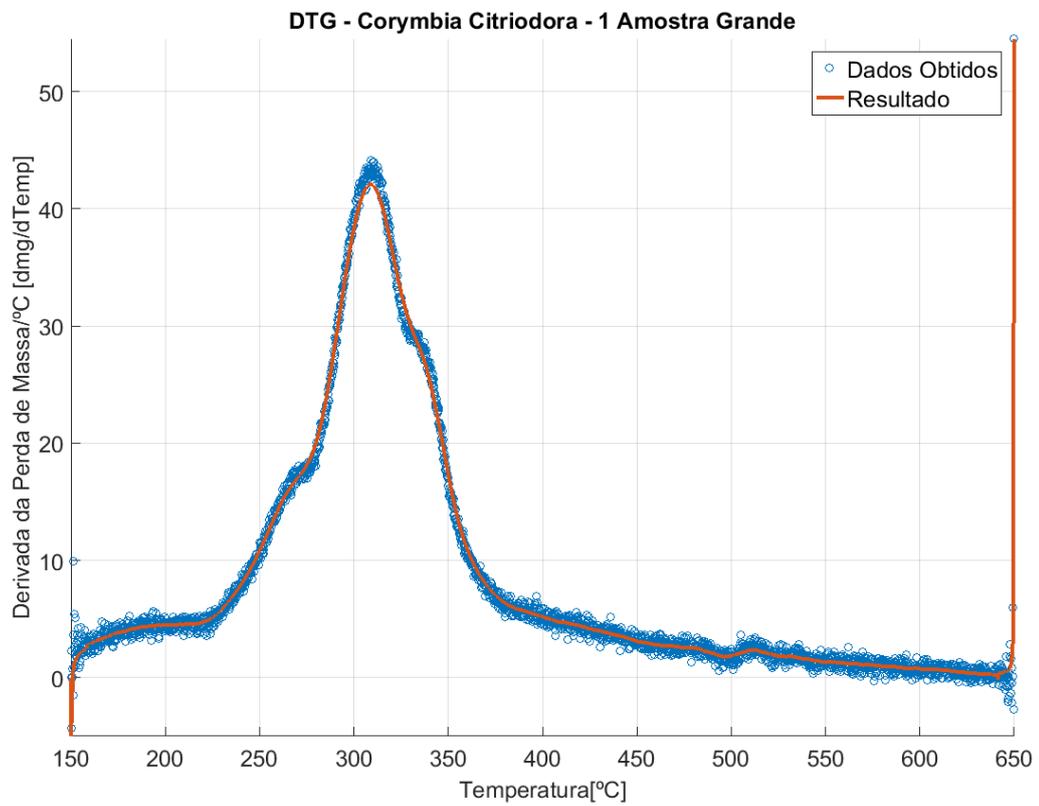


Figura 53 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 1G de *Corymbia citriodora*.

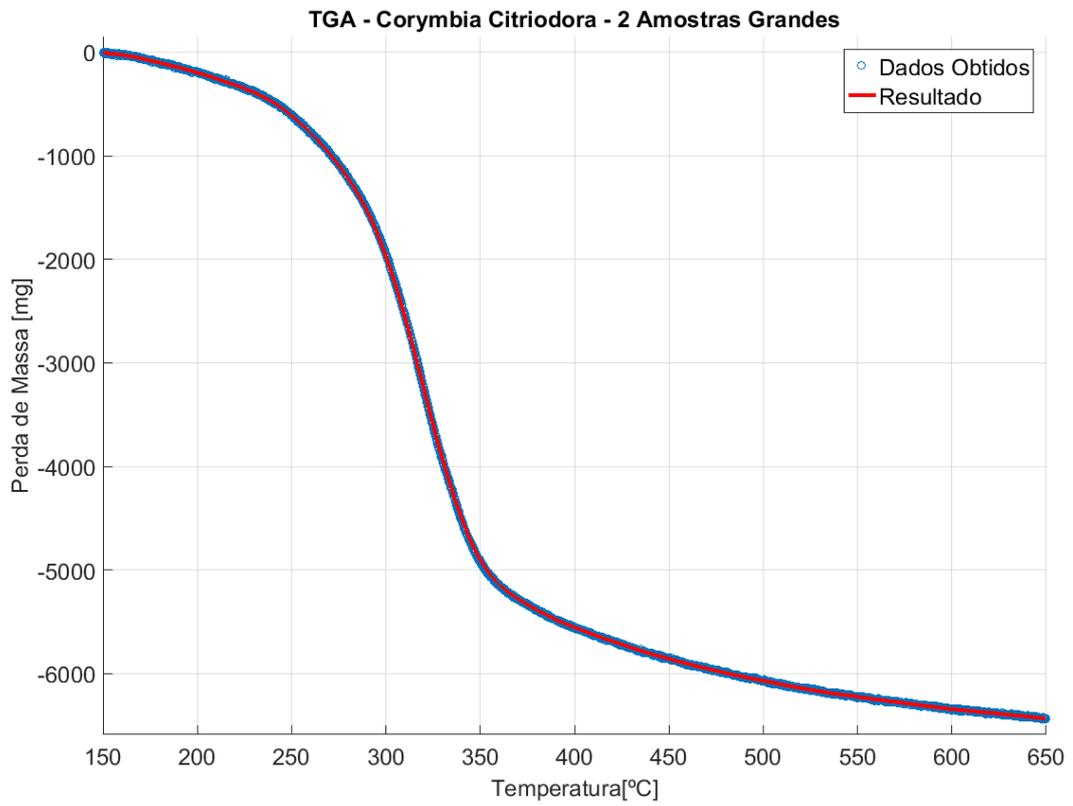


Figura 54 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 2G de *Corymbia citriodora*.

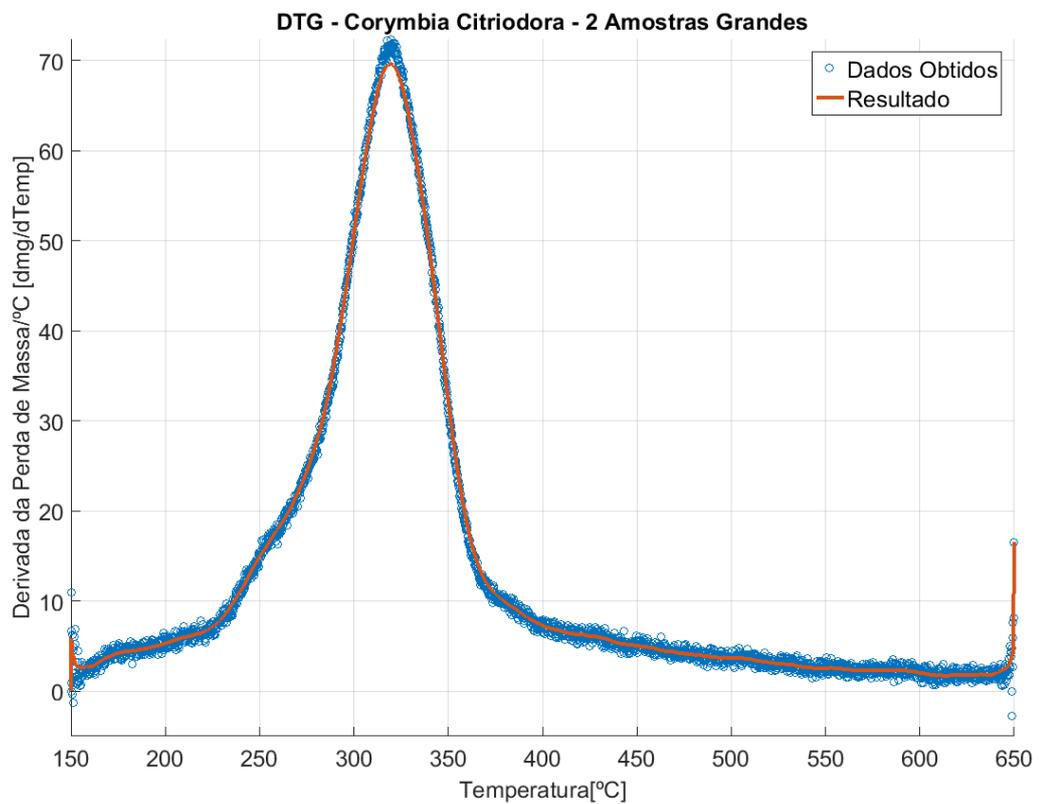


Figura 55 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 2G de *Corymbia citriodora*.

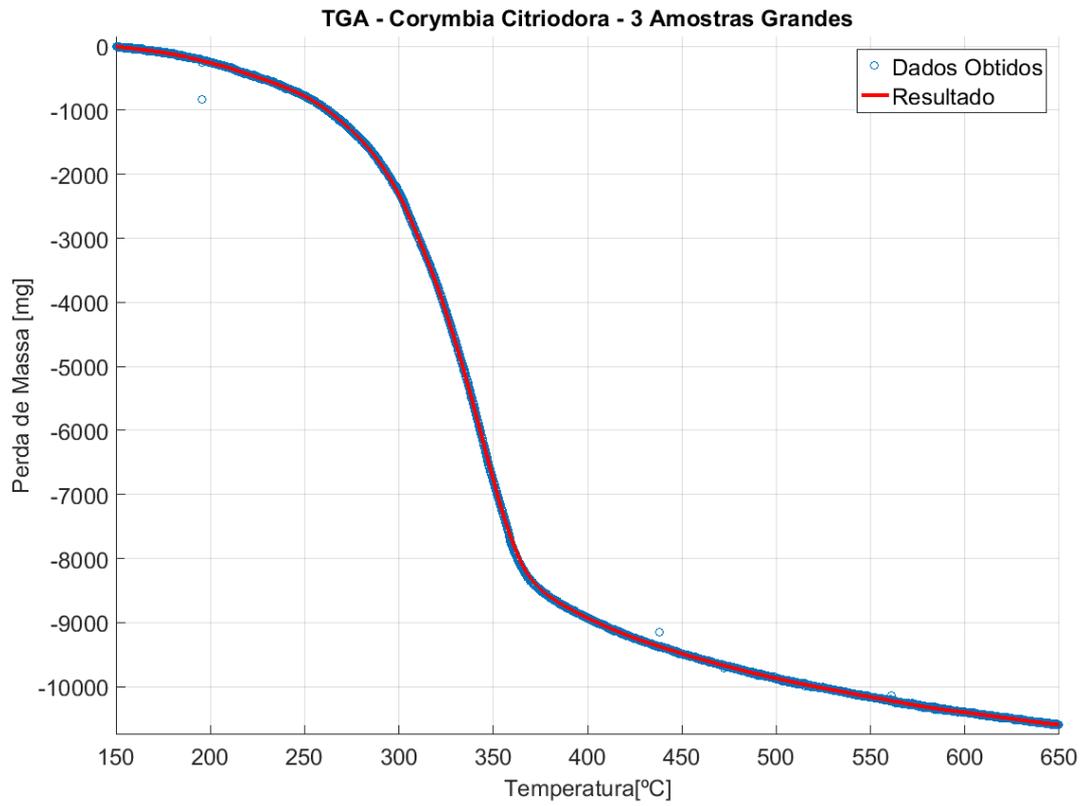


Figura 56 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3G de *Corymbia citriodora*.

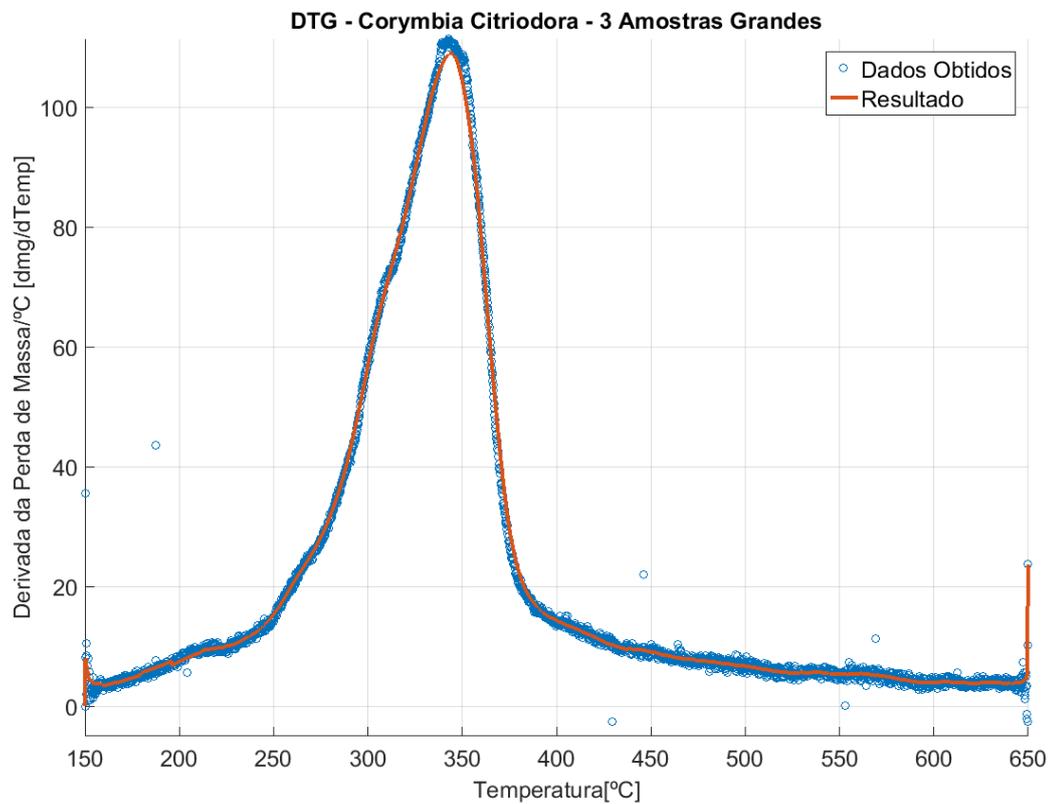


Figura 57 - Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3G de *Corymbia citriodora*.

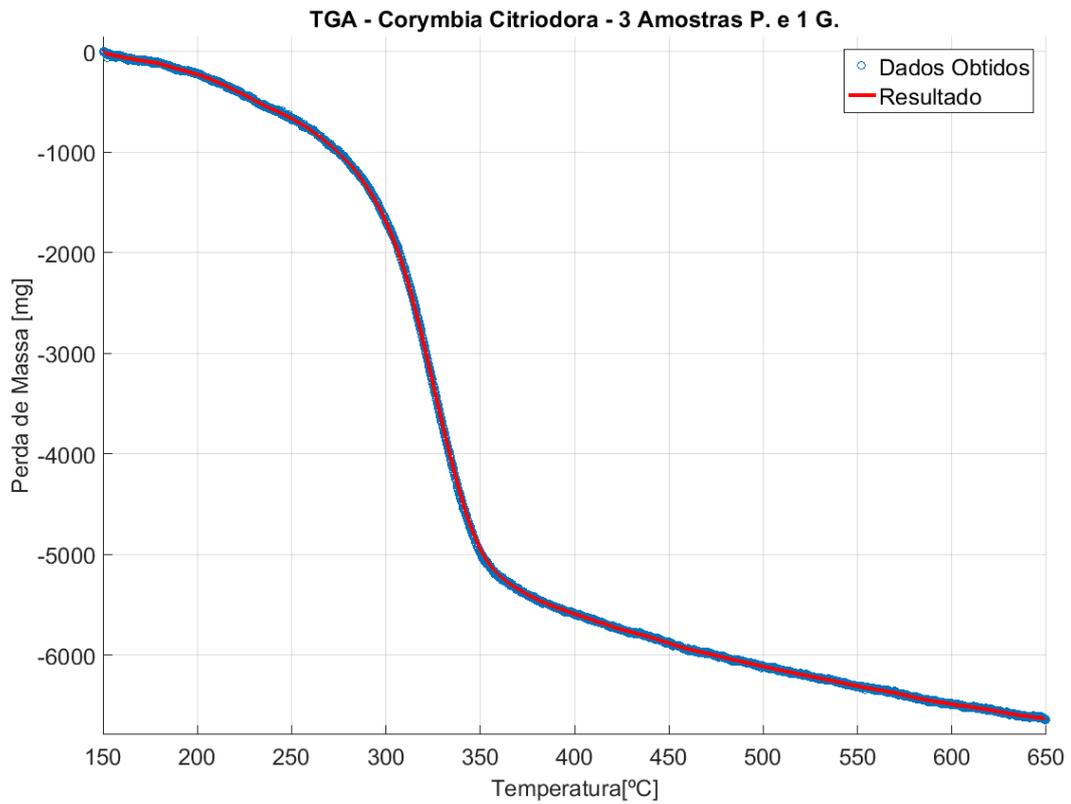


Figura 58 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3P1G de *Corymbia citriodora*.

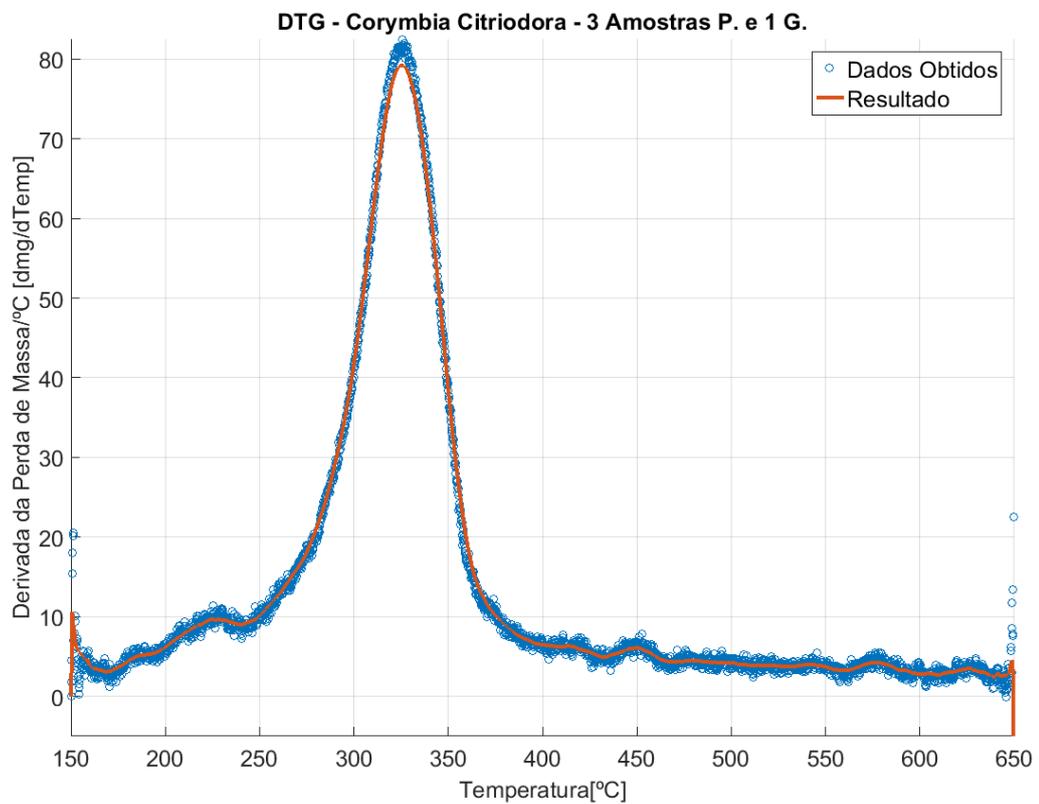


Figura 59 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3P1G de *Corymbia citriodora*.

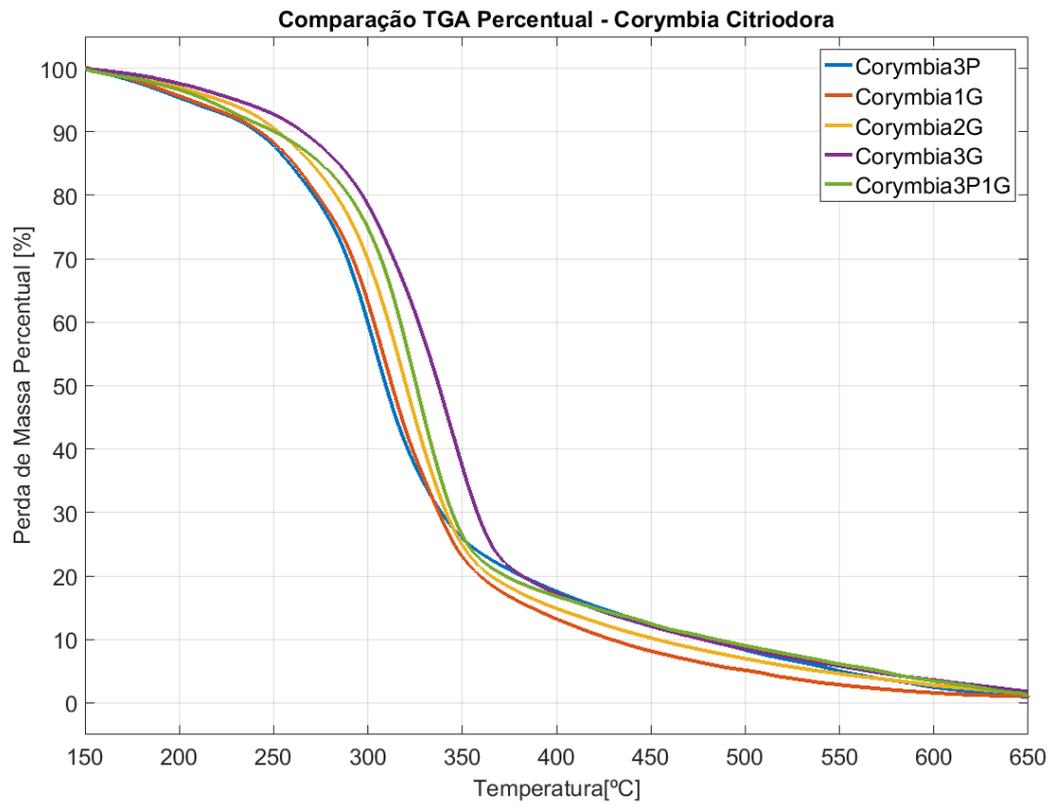


Figura 60 – Comparação entre as curvas termogravimétricas percentuais de *Corymbia citriodora*.

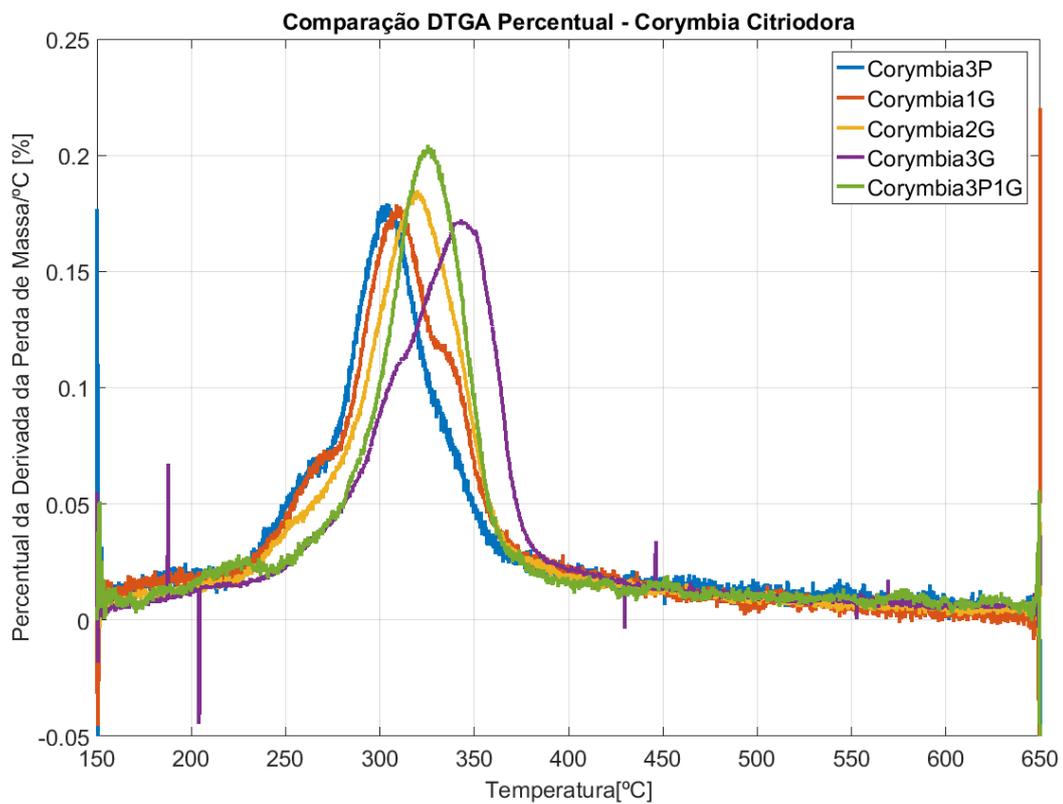


Figura 61 – Comparação entre as derivadas das curvas termogravimétricas de *Corymbia citriodora*.

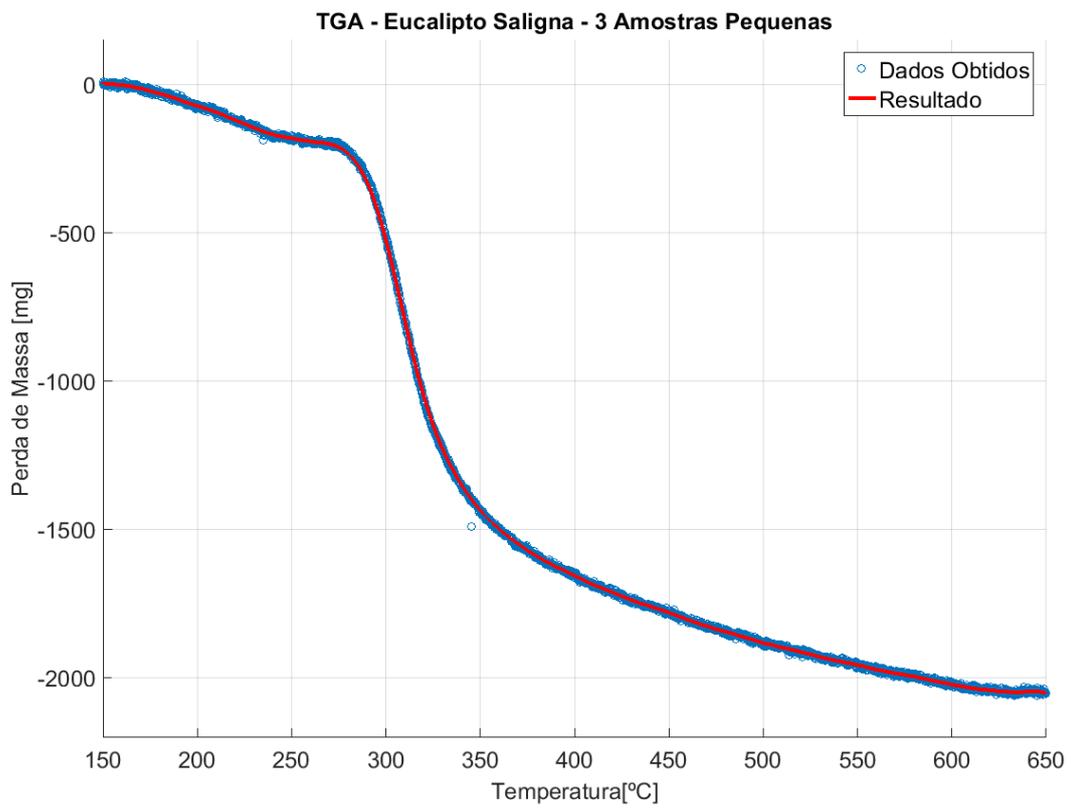


Figura 62 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3P de *Eucalipto saligna*.

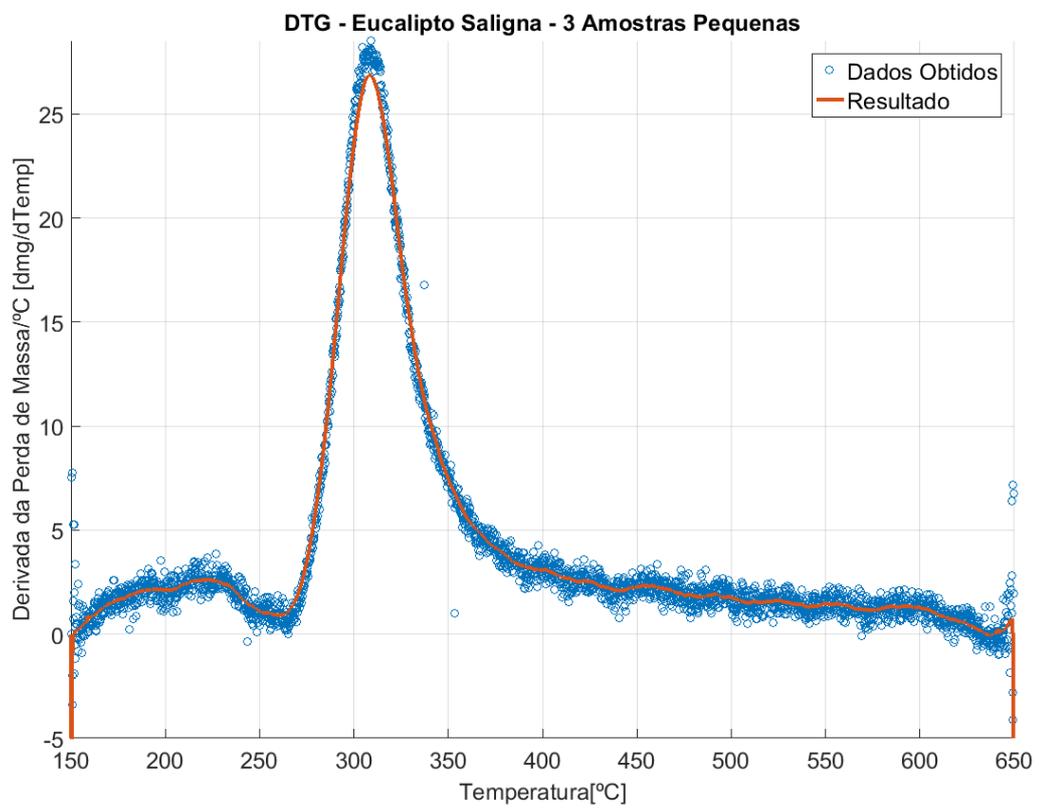


Figura 63 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3P de *Eucalipto saligna*.

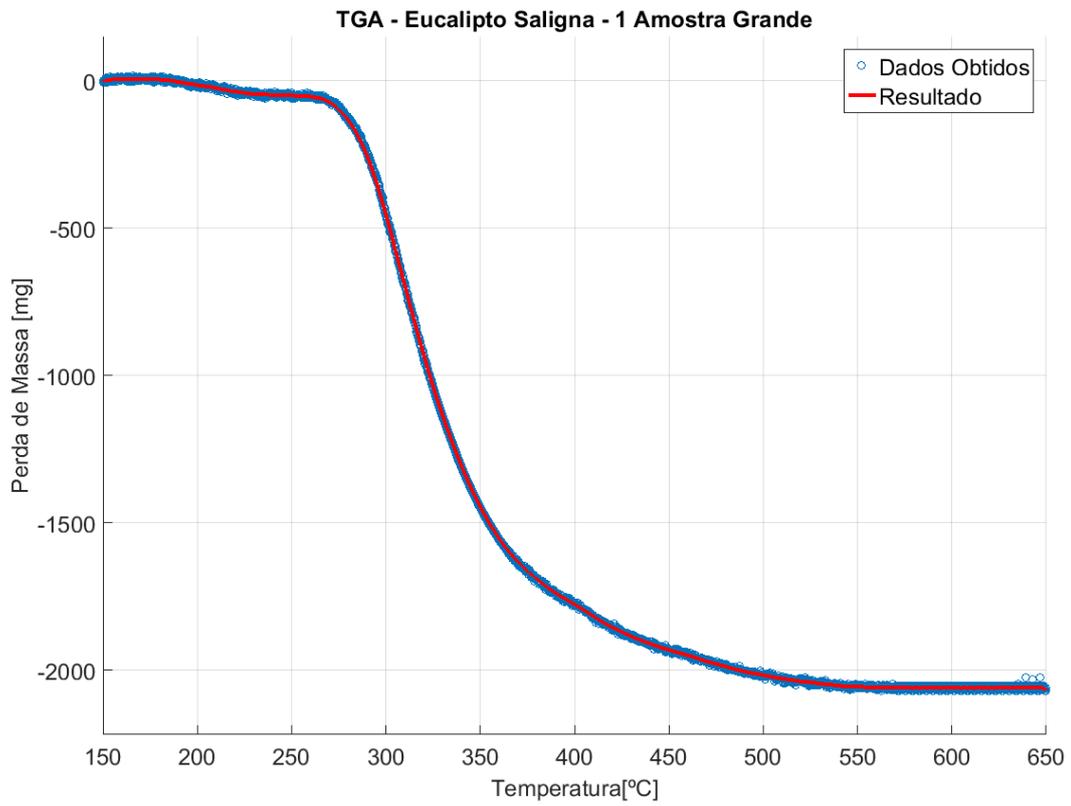


Figura 64 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 1G de *Eucalipto saligna*.

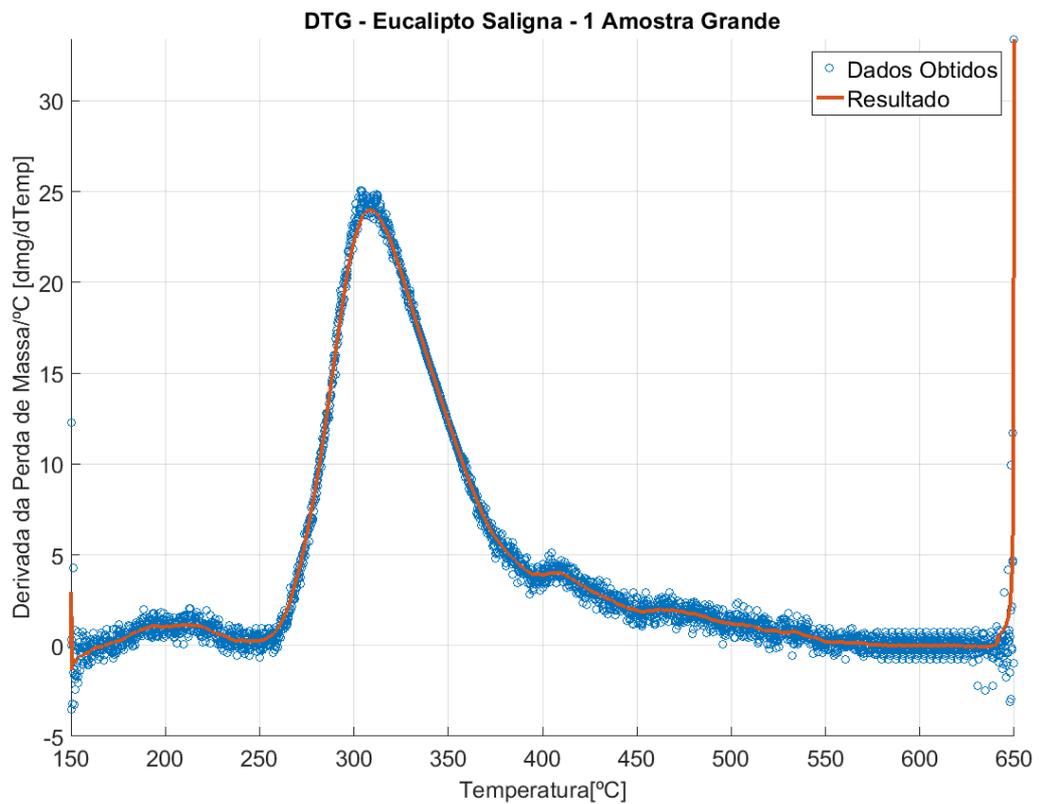


Figura 65 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 1G de *Eucalipto saligna*.

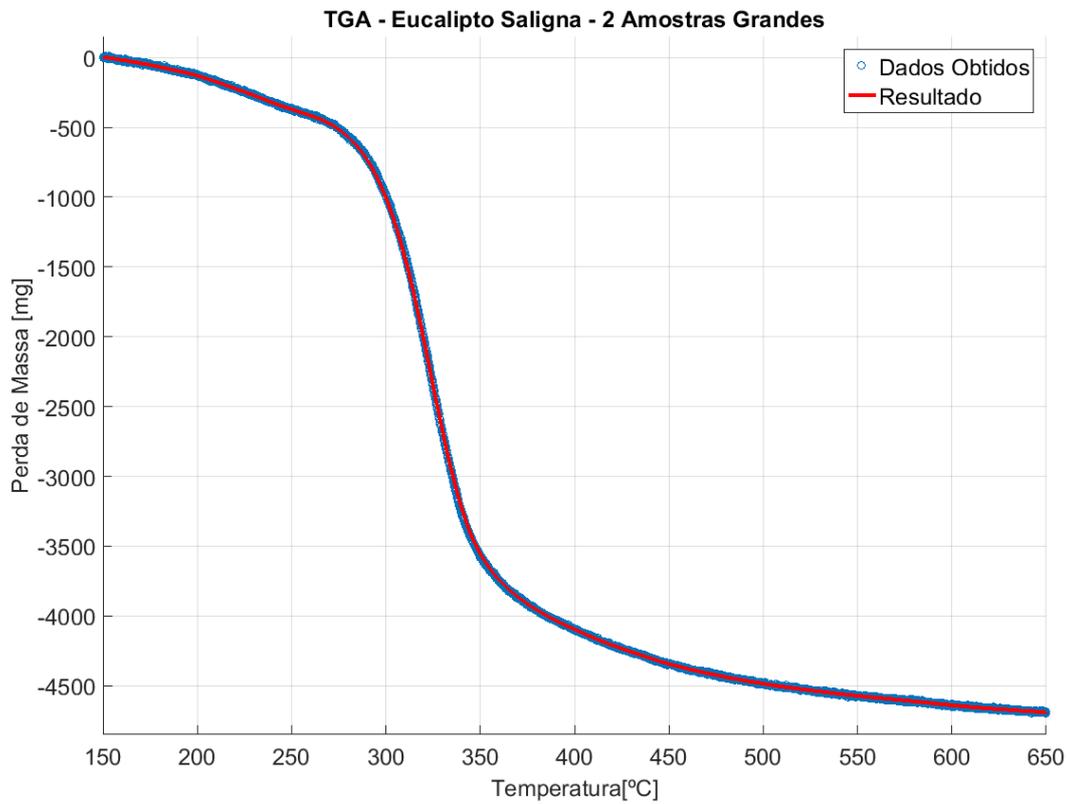


Figura 66 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 2G de *Eucalipto saligna*.

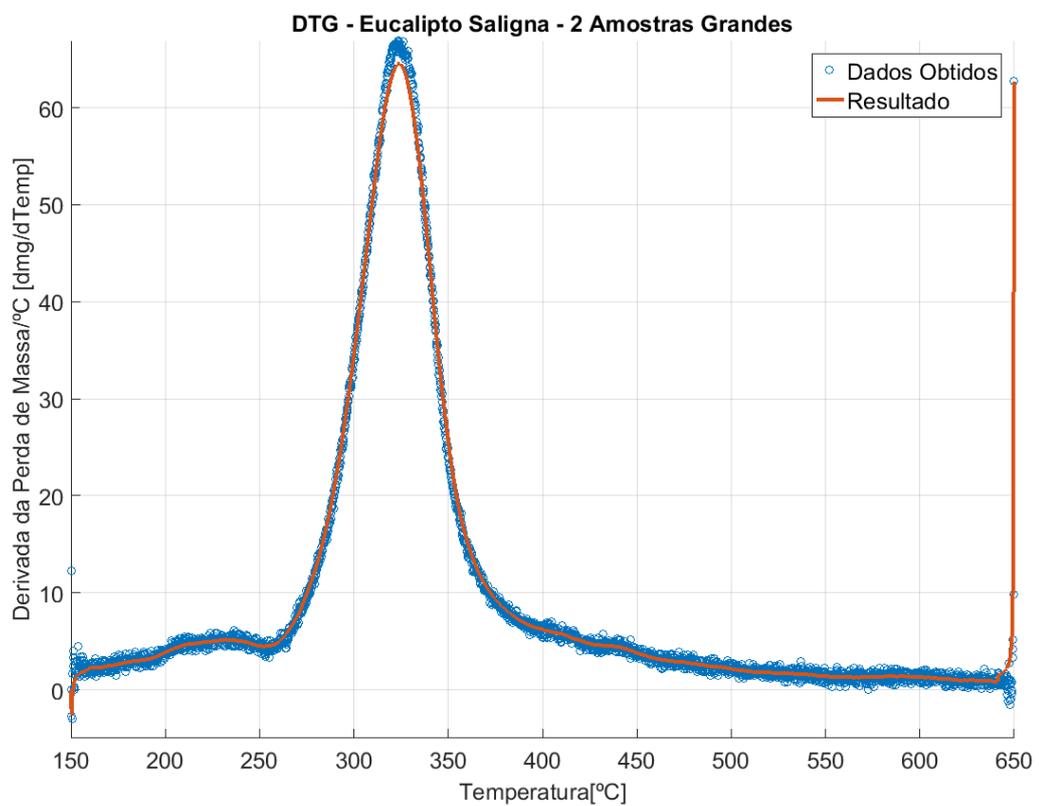


Figura 67 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 2G de *Eucalipto saligna*.

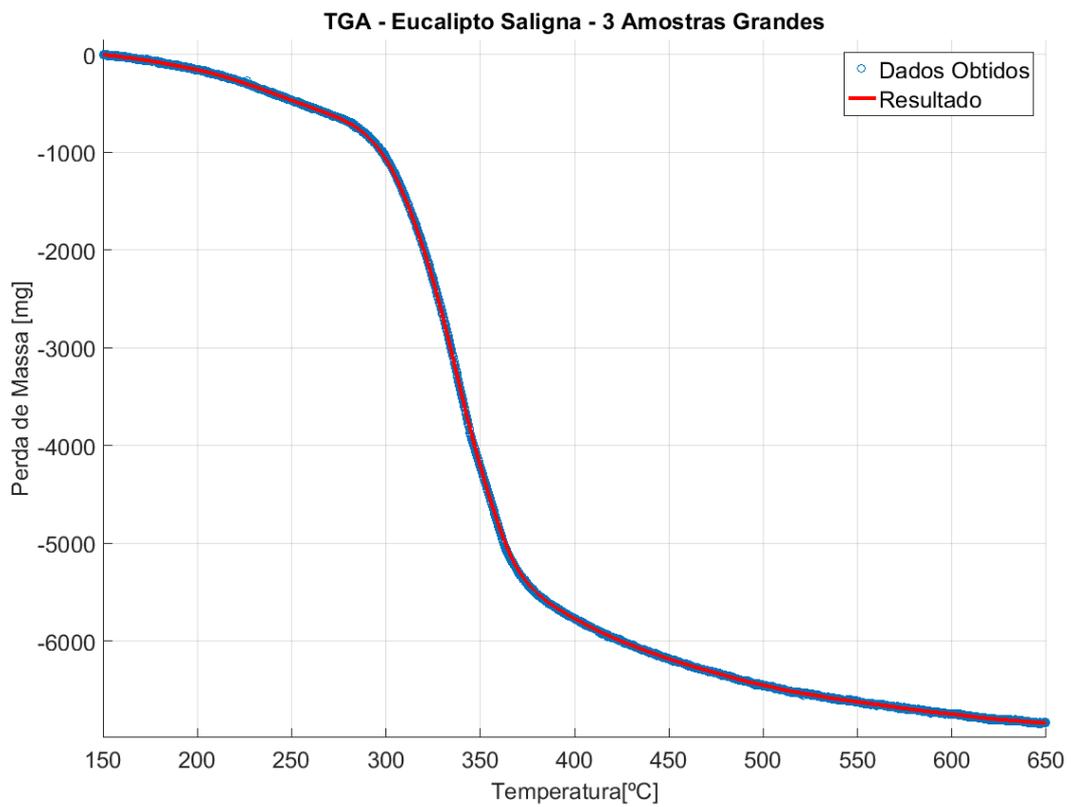


Figura 68 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3G de *Eucalipto saligna*.

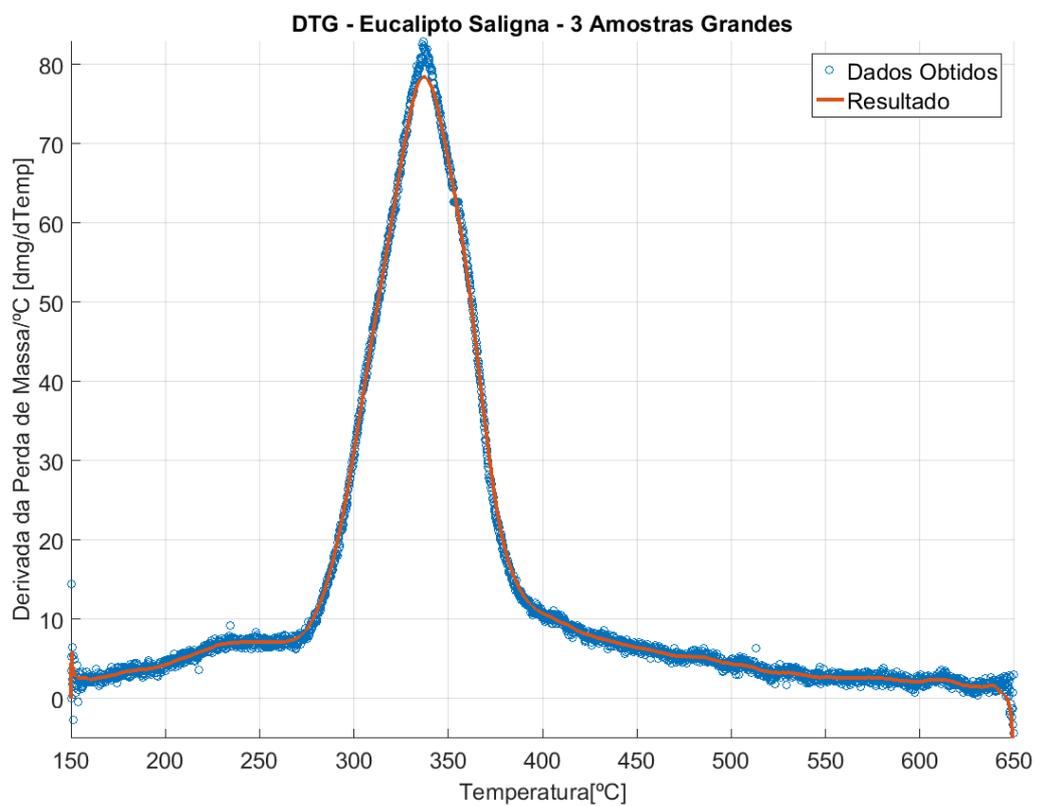


Figura 69 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3G de *Eucalipto saligna*.

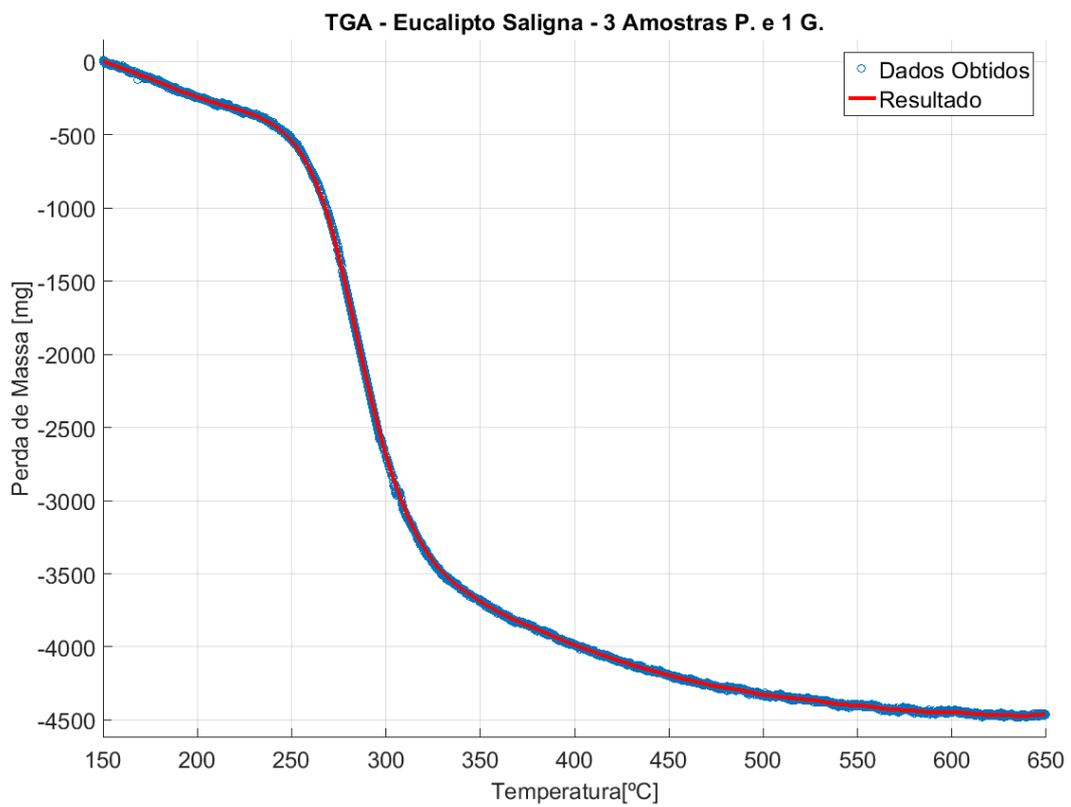


Figura 70 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3P1G de *Eucalipto saligna*.

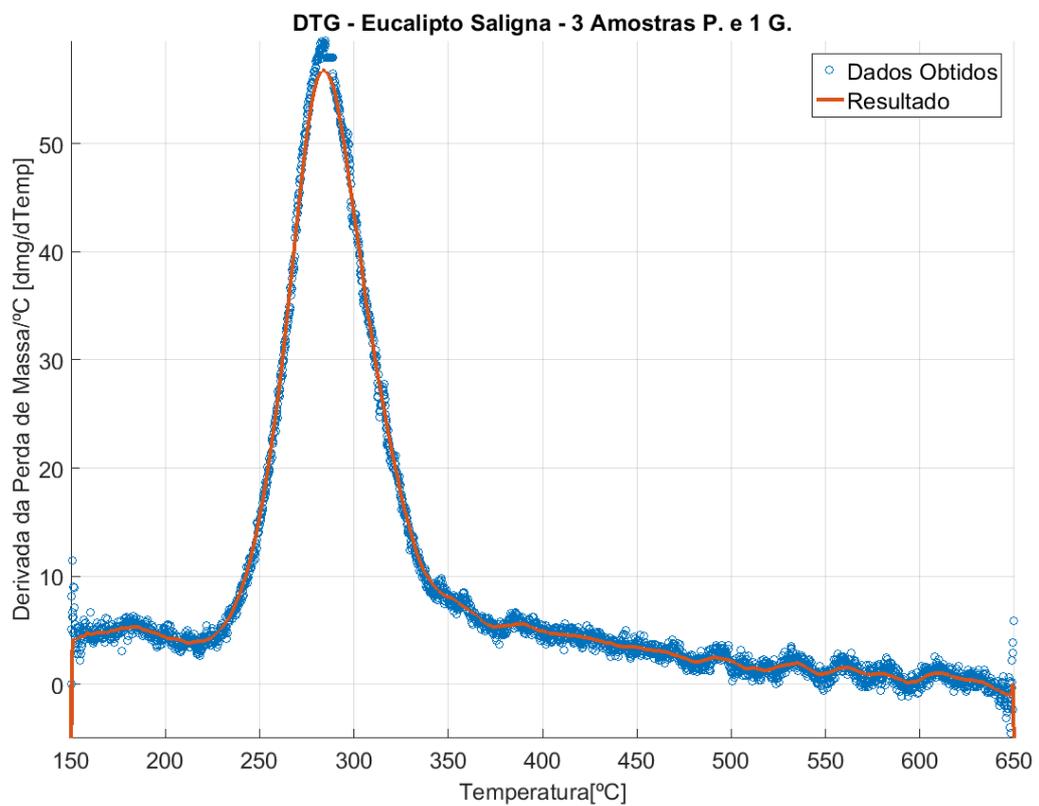


Figura 71 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3P1G de *Eucalipto saligna*.

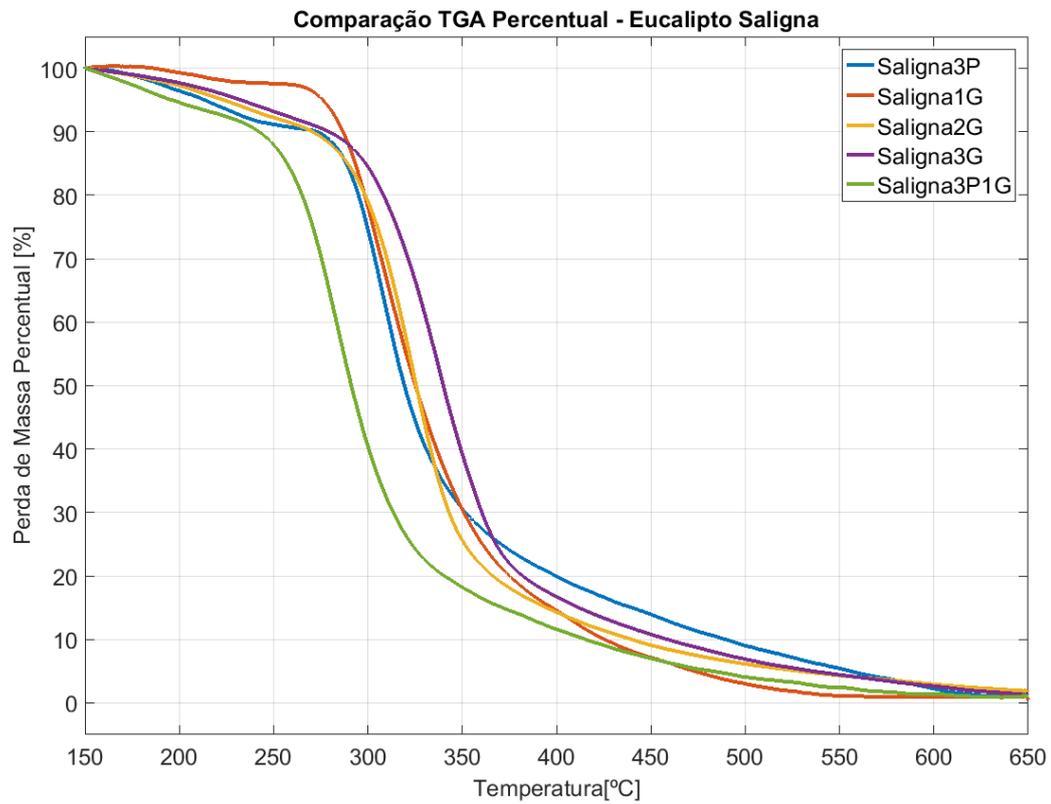


Figura 72 – Comparação entre as curvas termogravimétricas percentuais de *Eucalipto saligna*.

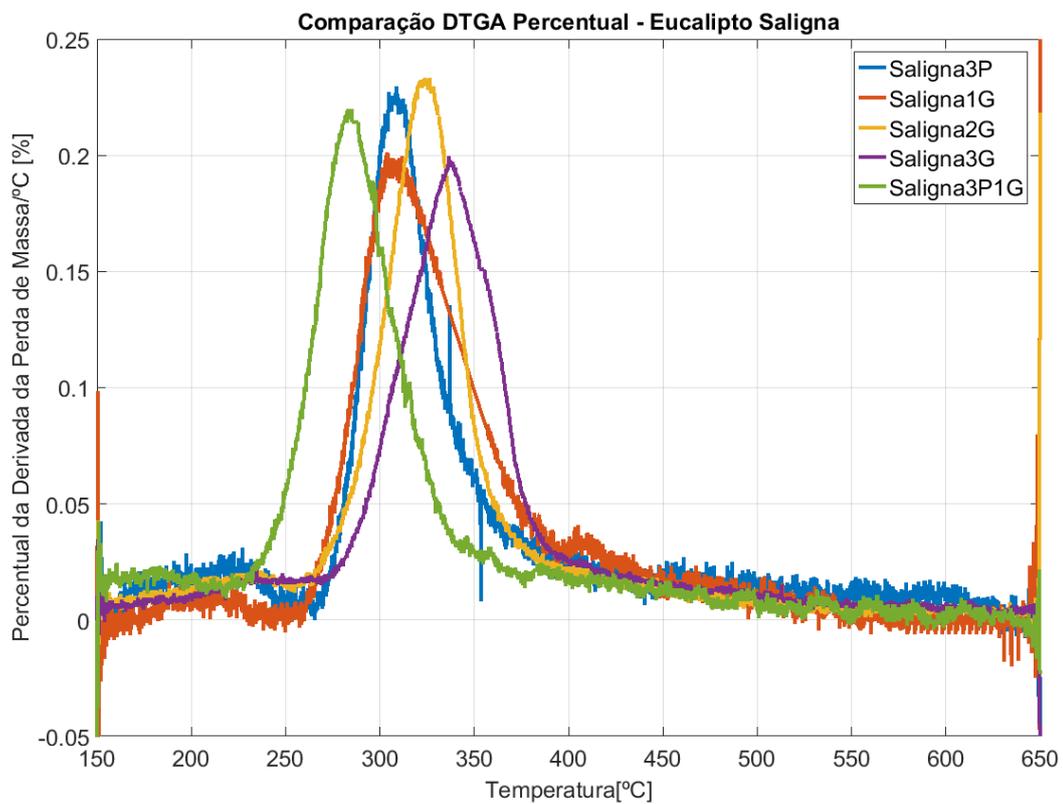


Figura 73 – Comparação entre as derivadas das curvas termogravimétricas de *Eucalipto saligna*.

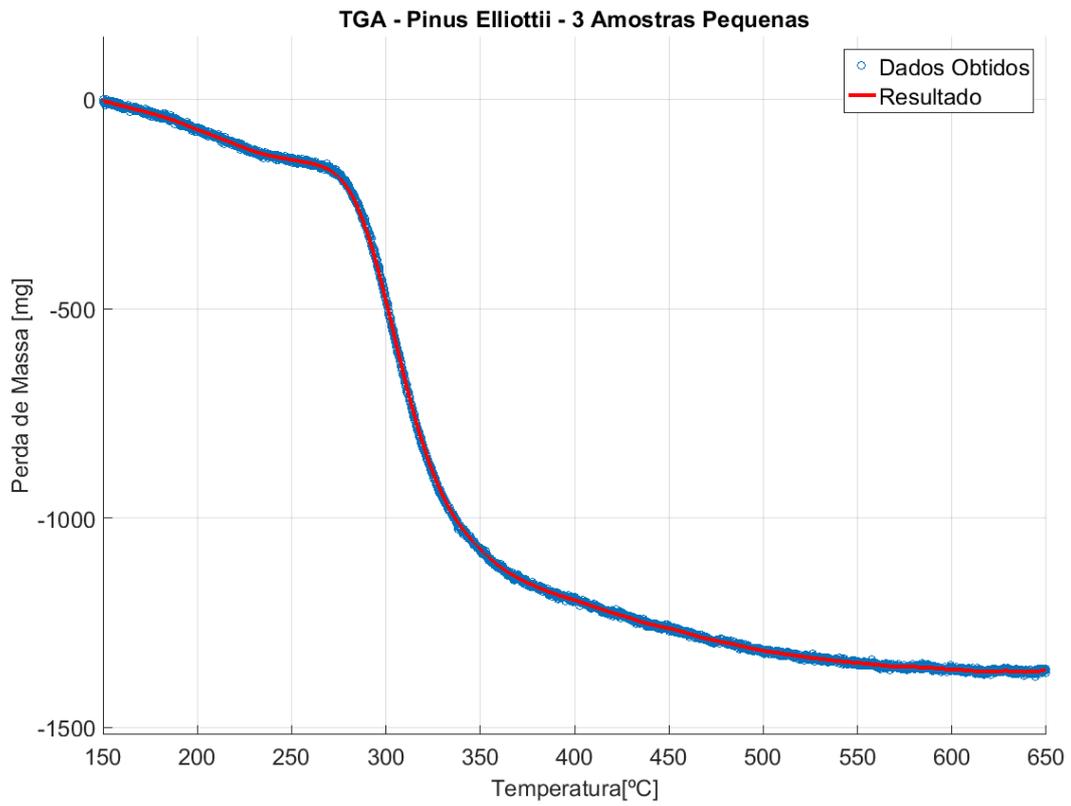


Figura 74 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3P de *Pinus elliottii*.

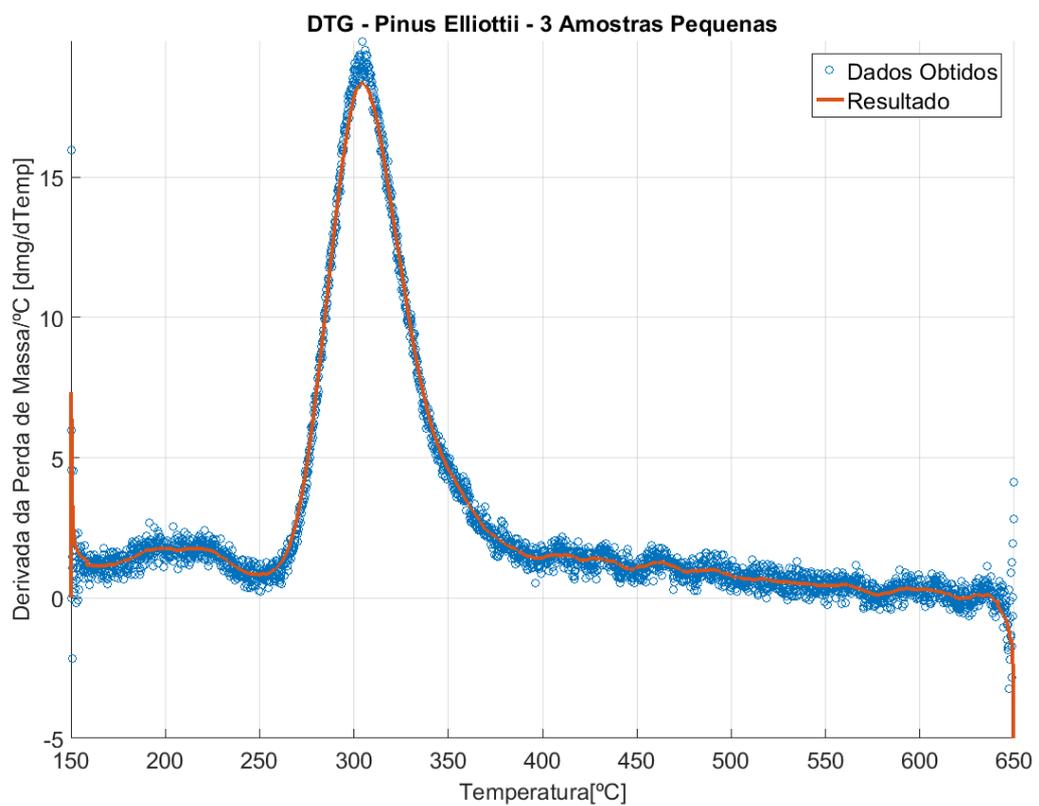


Figura 75 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3P de *Pinus elliottii*.

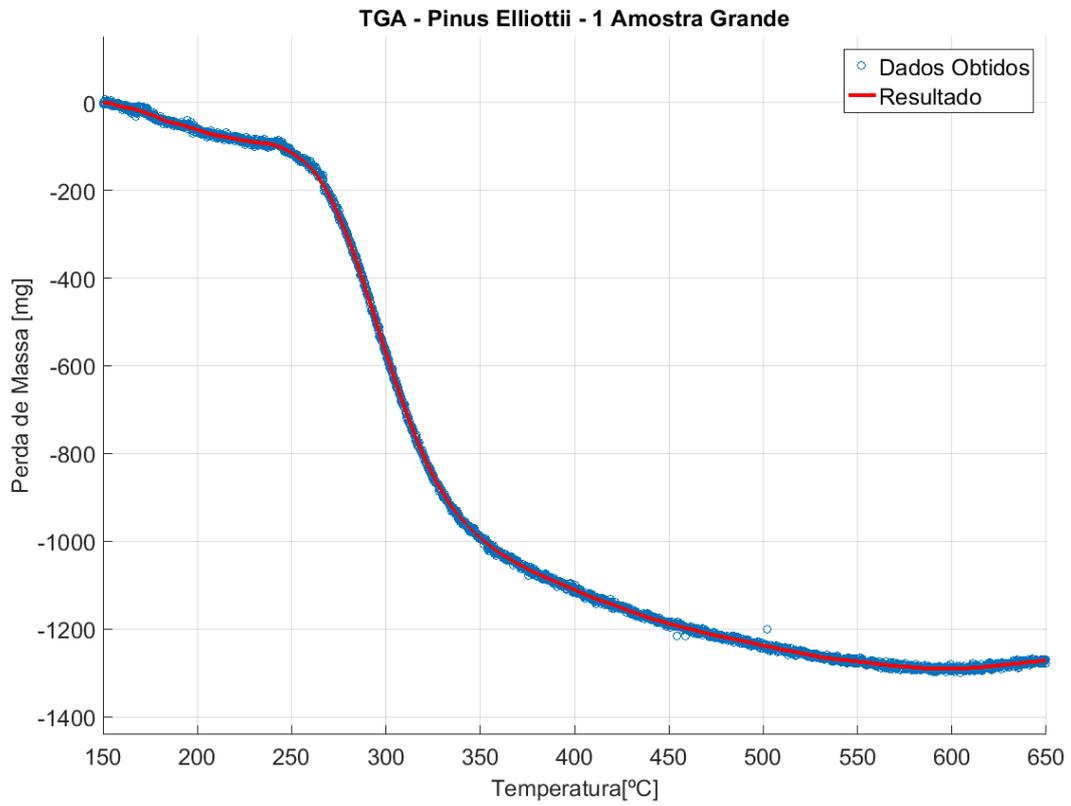


Figura 76 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 1G de *Pinus elliottii*.

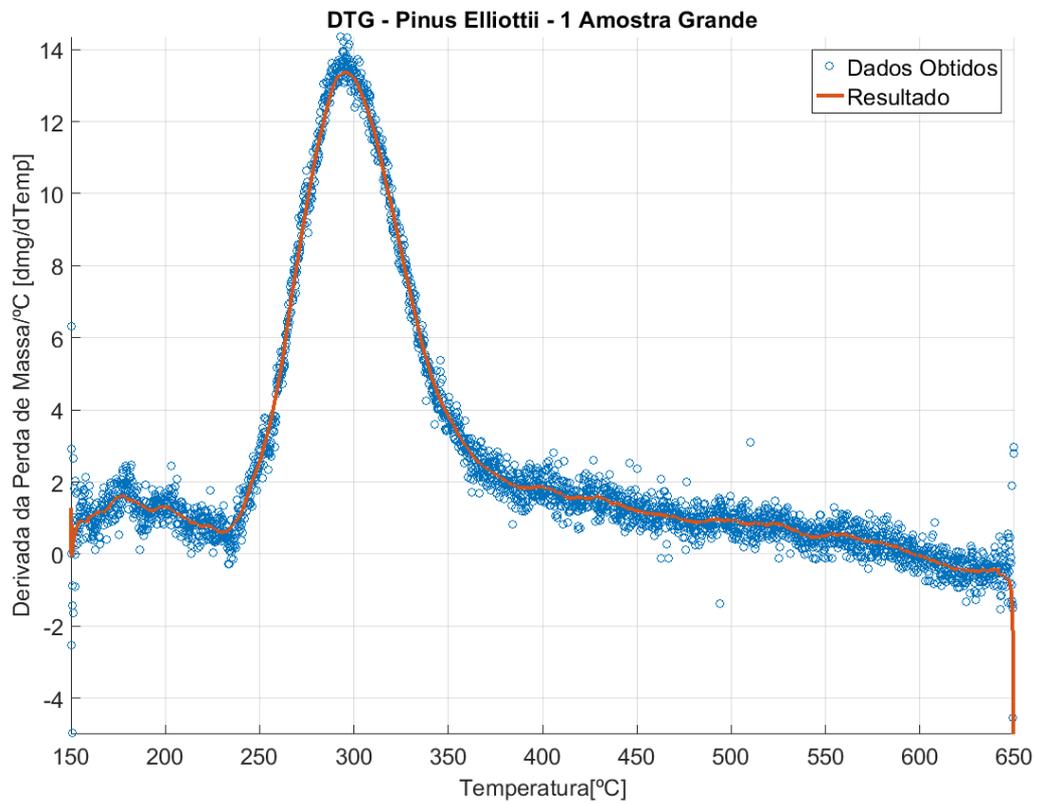


Figura 77 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 1G de *Pinus elliottii*.

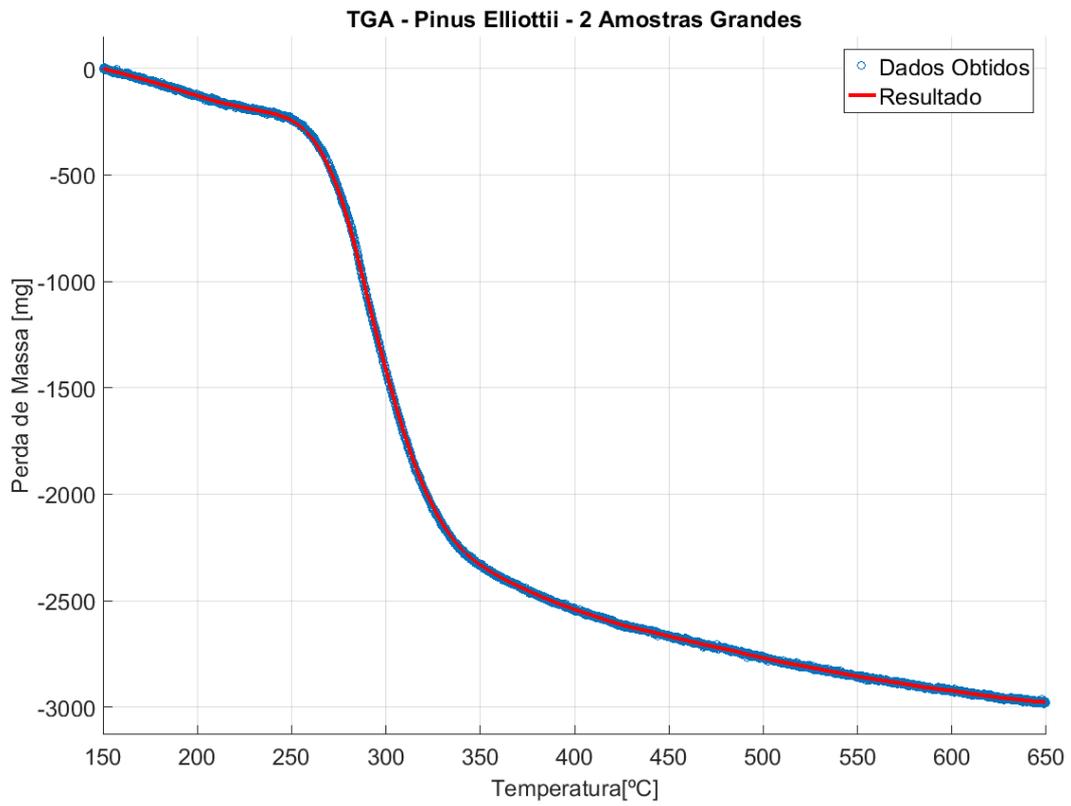


Figura 78 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 2G de *Pinus elliottii*.

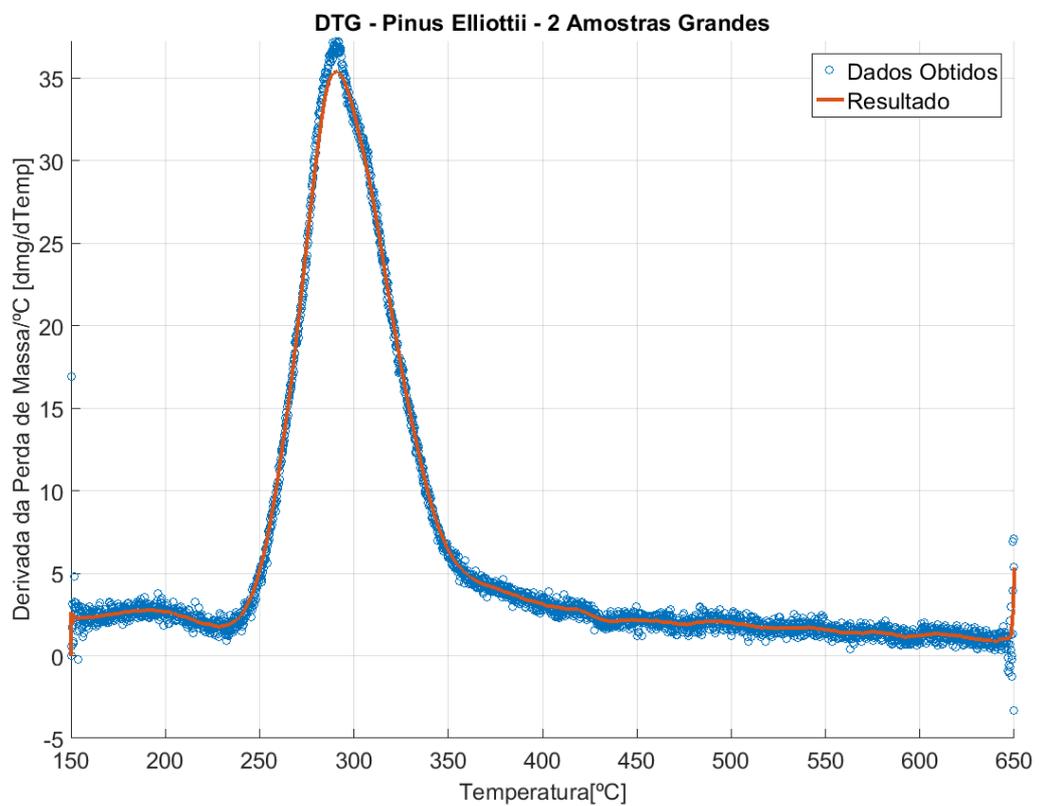


Figura 79 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 2G de *Pinus elliottii*.

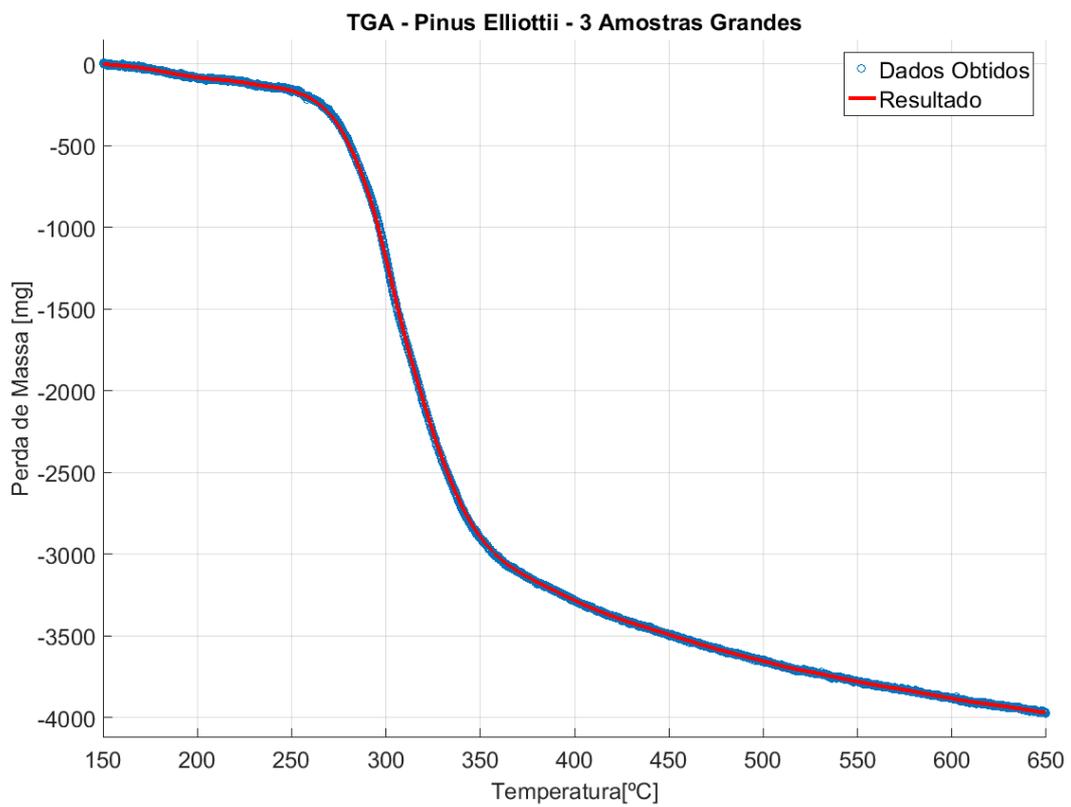


Figura 80 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3G de *Pinus elliottii*.

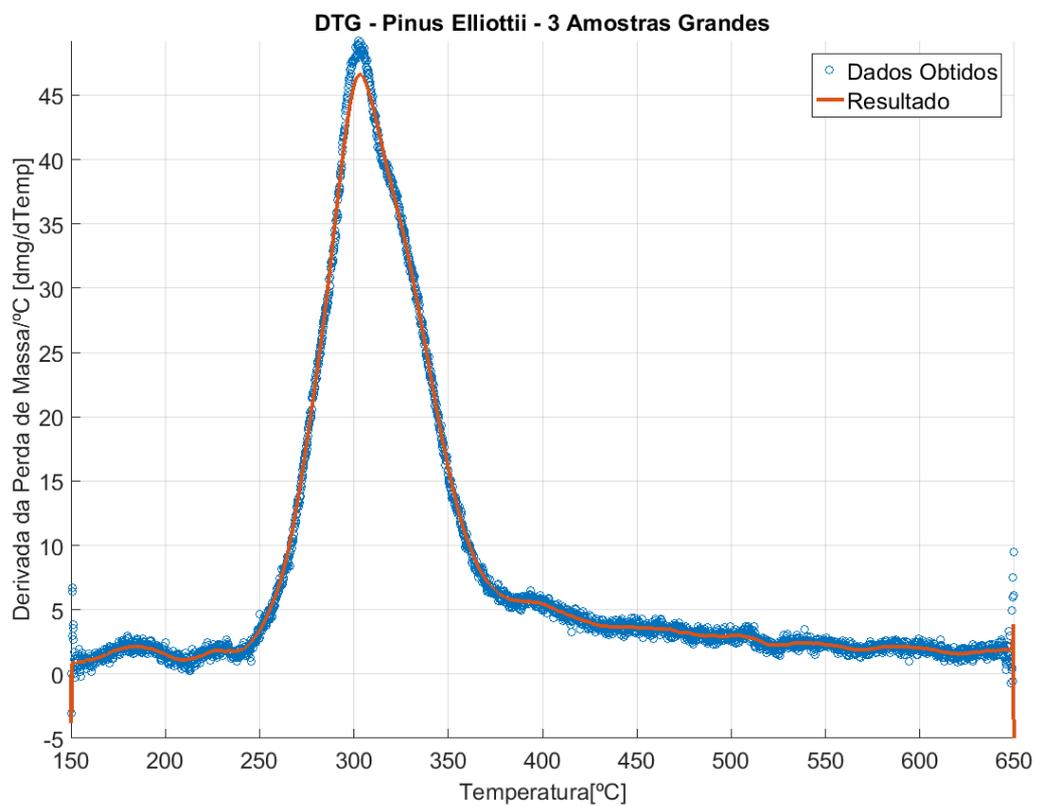


Figura 81 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3G de *Pinus elliottii*.

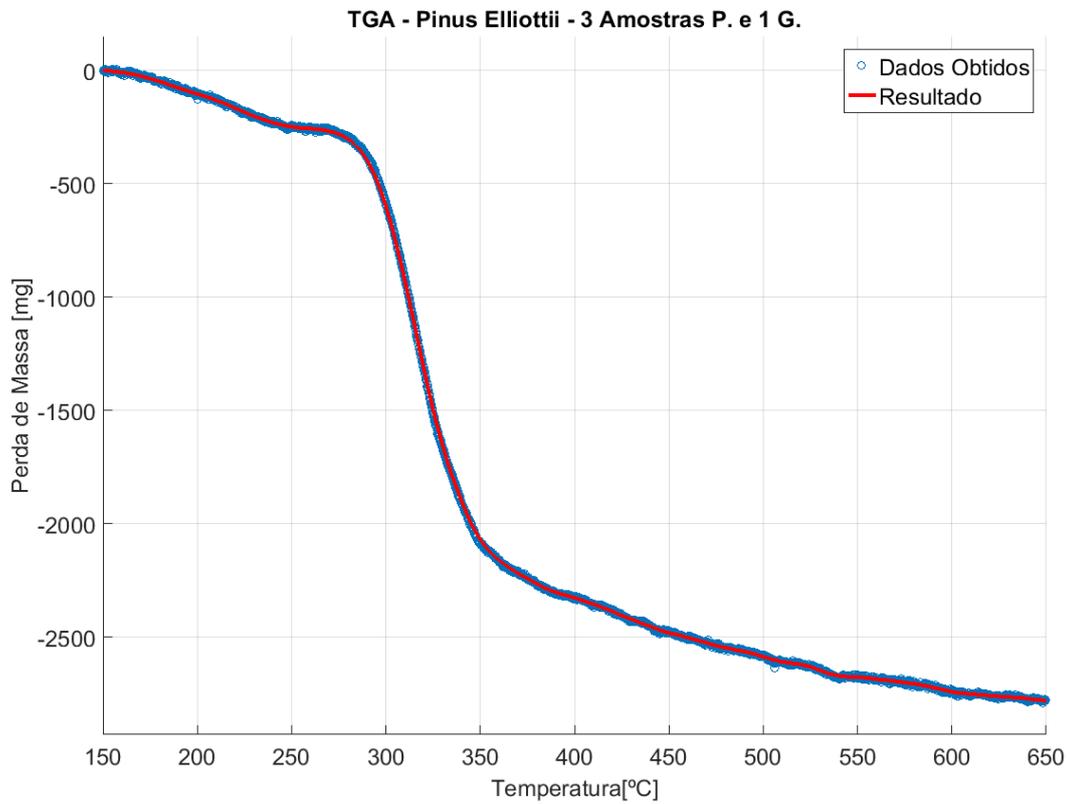


Figura 82 – Curva termogravimétrica da carbonização do arranjo 3P1G de *Pinus elliottii*.

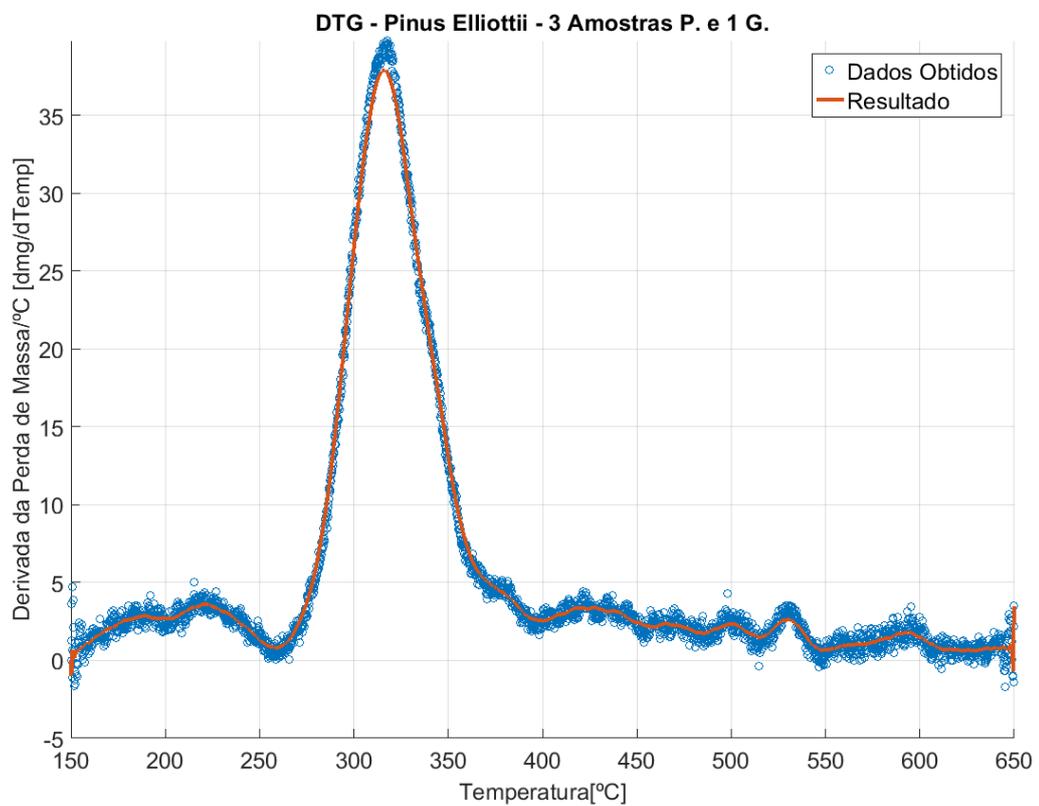


Figura 83 – Derivada da curva termogravimétrica do arranjo 3P1G de *Pinus elliottii*.

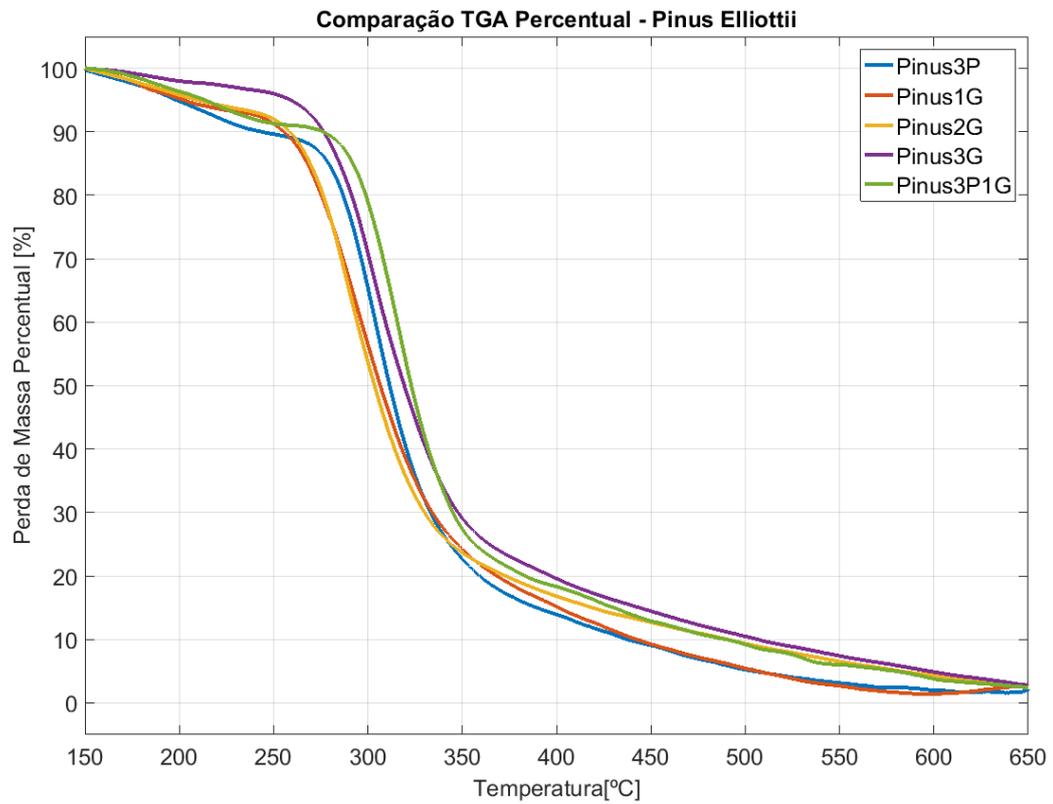


Figura 84 – Comparação entre as curvas termogravimétricas percentuais de *Pinus elliotii*.

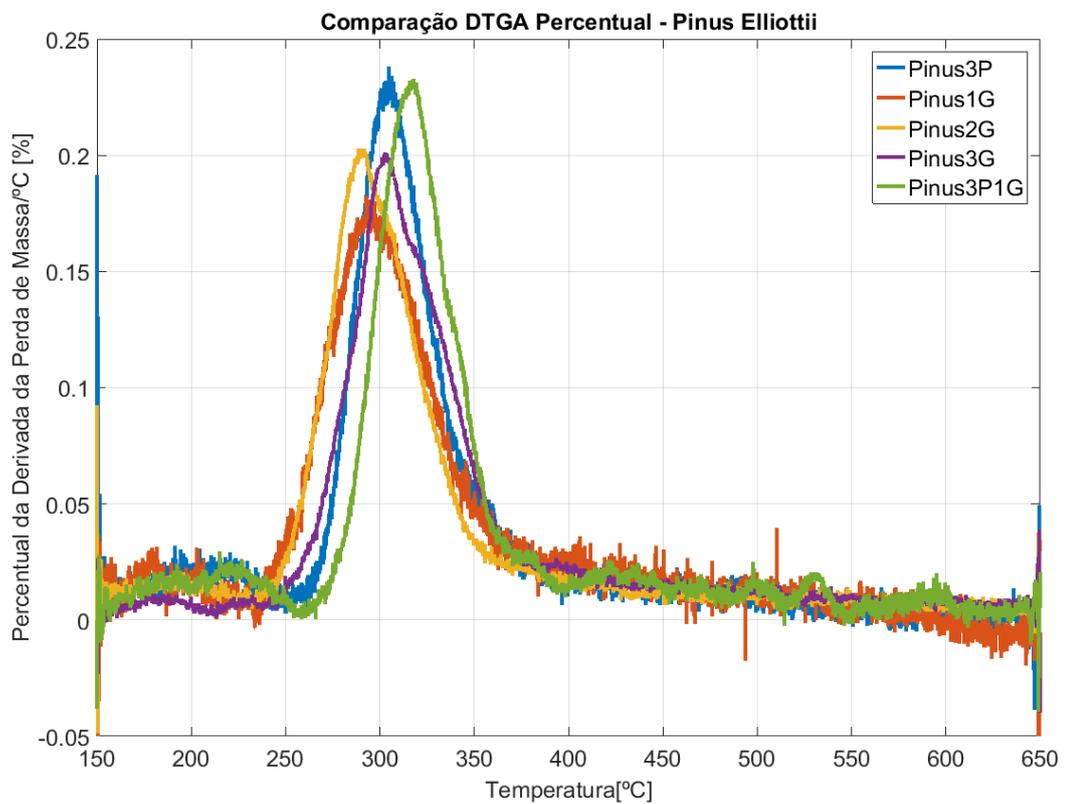


Figura 85 – Comparação entre as derivadas das curvas termogravimétricas de *Pinus Elliottii*.

#### 4.5 Predição da Temperatura Final de Carbonização

Como mencionado anteriormente, nesta etapa foram utilizados somente os arranjos com duas amostras grandes de cada espécie. Foram realizados os testes com a finalidade de determinar o percentual de materiais voláteis de cada espécie, as quais foram carbonizadas a priori em duas temperaturas finais de carbonização, 350°C e 500°C, sob uma rampa de 10°C/min com atmosfera fechada e recirculante. Ao chegar na temperatura final, a mesma foi mantida por mais 2min. Finalmente foram carbonizadas novamente para a determinação de materiais voláteis a 750°C, sob uma rampa de 50°C/min com atmosfera fechada e recirculante. Desta maneira foi possível se calcular o teor de carbono fixo para estes dois pontos, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Teores de carbono fixo calculados através dos percentuais de materiais voláteis e dos teores de cinzas.

Espécie e Temperatura	Materiais Voláteis [%]	Teor de Carbono Fixo [%]	Teor de Cinzas [%]
C2G – 350°C	40,89	57,86	1,25
C2G – 500°C	19,78	78,97	
S2G – 350°C	38,90	59,96	1,14
S2G – 500°C	21,31	77,55	
P2G – 350°C	43,48	53,98	2,54
P2G - 500°C	13,98	83,48	

Através destes pontos, uma linearização foi realizada, permitindo assim prever a temperatura final de carbonização de cada espécie para um determinado teor de carbono fixo desejado. Através da Figura 86, pode-se observar os gráficos linearizando as temperaturas finais de carbonização em função do teor de carbono fixo desejado.

Atribuiu-se para o eixo y das equações das retas o valor de 75%, percentual desejado de teor de carbono fixo, obtendo-se então para cada espécie a temperatura final de carbonização: 471,8°C para *Corymbia citriodora*, 478,2°C para *Eucalipto saligna* e 456,9°C para *Pinus elliottii*. Esta temperatura foi transformada em tempo, pois a taxa de aquecimento utilizada é fixa em 10°C/min, e o tempo de permanência após atingir a temperatura final de carbonização é de 2 minutos, tem-se então para *Corymbia citriodora* o tempo total de 2383 segundos, para *Eucalipto saligna* o tempo total de 2389 segundos e para *Pinus elliottii* o tempo total de 2261 segundos.

Nas Figuras 87, 88 e 89, pode-se verificar a queima controlada de cada espécie, note-se que os gráficos estão em função do tempo em segundos.

Na Figura 90, realizou-se uma comparação da queima entre as diferentes espécies, os diferentes tempos finais, entre outras palavras, as diferentes temperaturas finais de carbonização ficam evidenciadas neste comparativo.

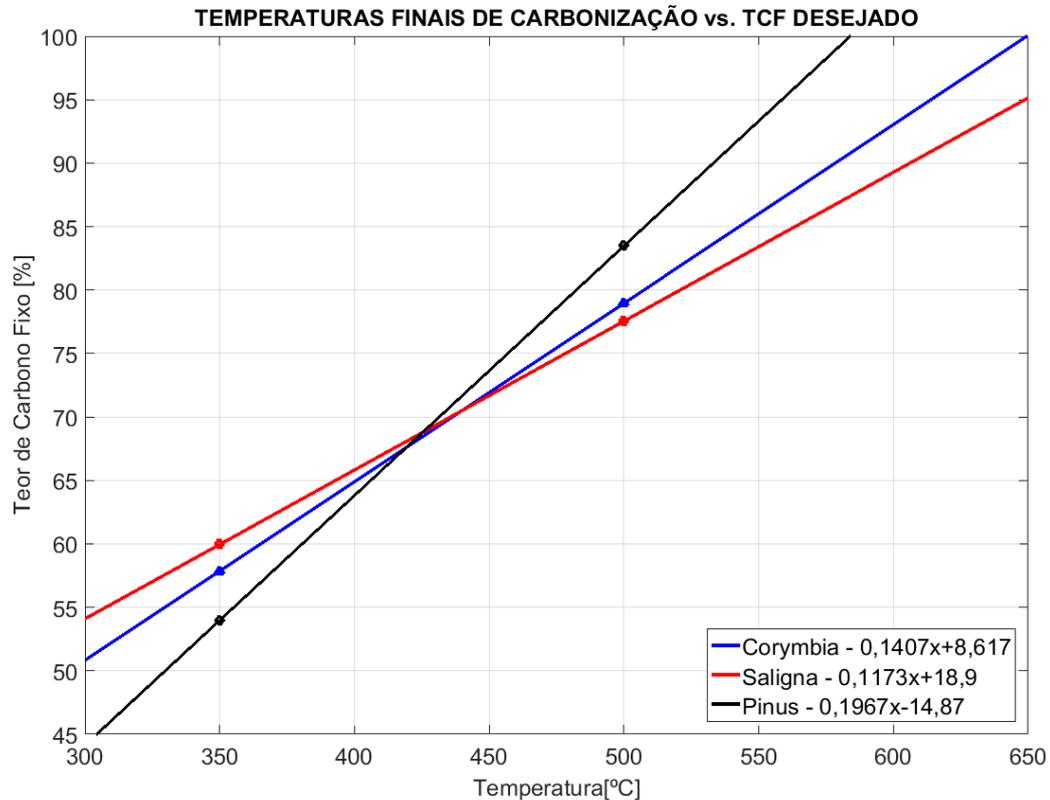


Figura 86 – Temperaturas finais de carbonização em função do teor de carbono fixo desejado.

Após esta etapa, todas as amostras já carbonizadas foram novamente experimentadas para determinar o percentual de materiais voláteis contido em cada carvão vegetal produzido. Na Tabela 7 estão descritos os valores calculados de teor de carbono fixo através das temperaturas finais previstas. Foram calculados os rendimentos gravimétricos de carvão para cada espécie.

Tabela 7 – Teores de carbono fixo calculados através dos percentuais de materiais voláteis e dos teores de cinzas, para cada carvão vegetal produzido, assim como seus respectivos rendimentos gravimétricos.

Espécie e Temperatura	Rendimento Gravimétrico [%]	Materiais Voláteis [%]	Teor de Carbono Fixo [%]	Teor de Cinzas [%]
C2G – 471,8°C	38,95	23,35	75,4	1,25
S2G – 478,2°C	34,93	22,06	76,8	1,14
P2G – 456,9°C	24,60	20,26	77,2	2,54

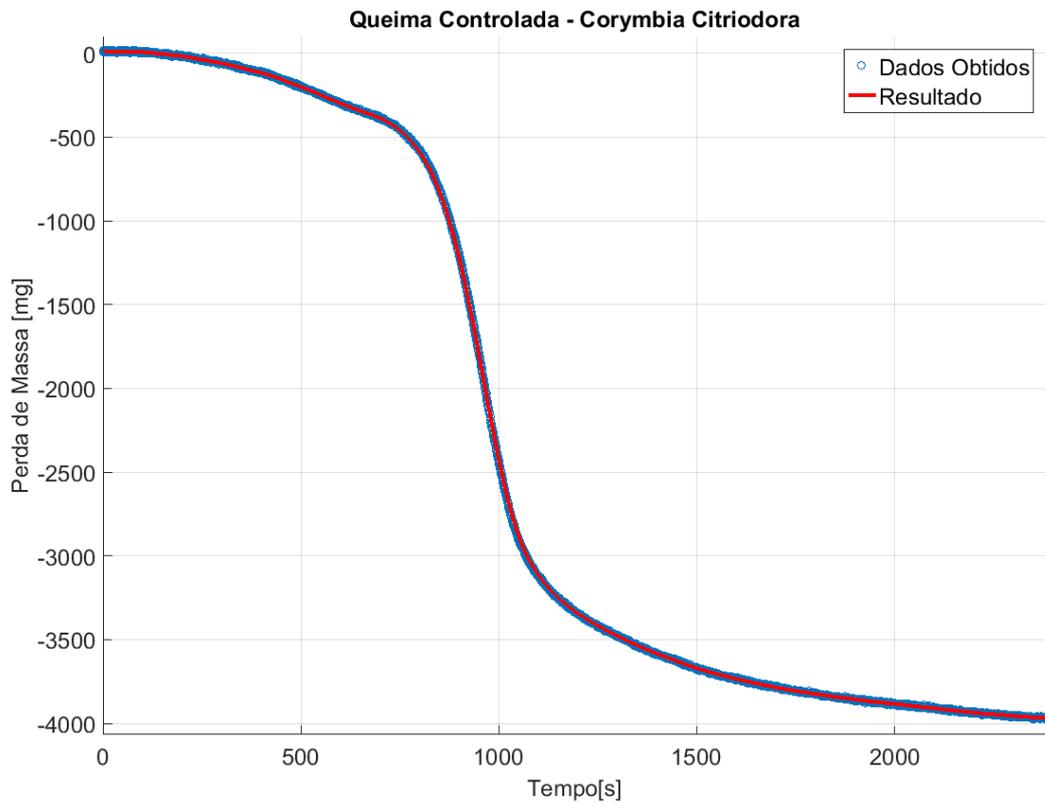


Figura 87 – Queima controlada de C2G por 2383 segundos (471,8°C + 2min permanência).

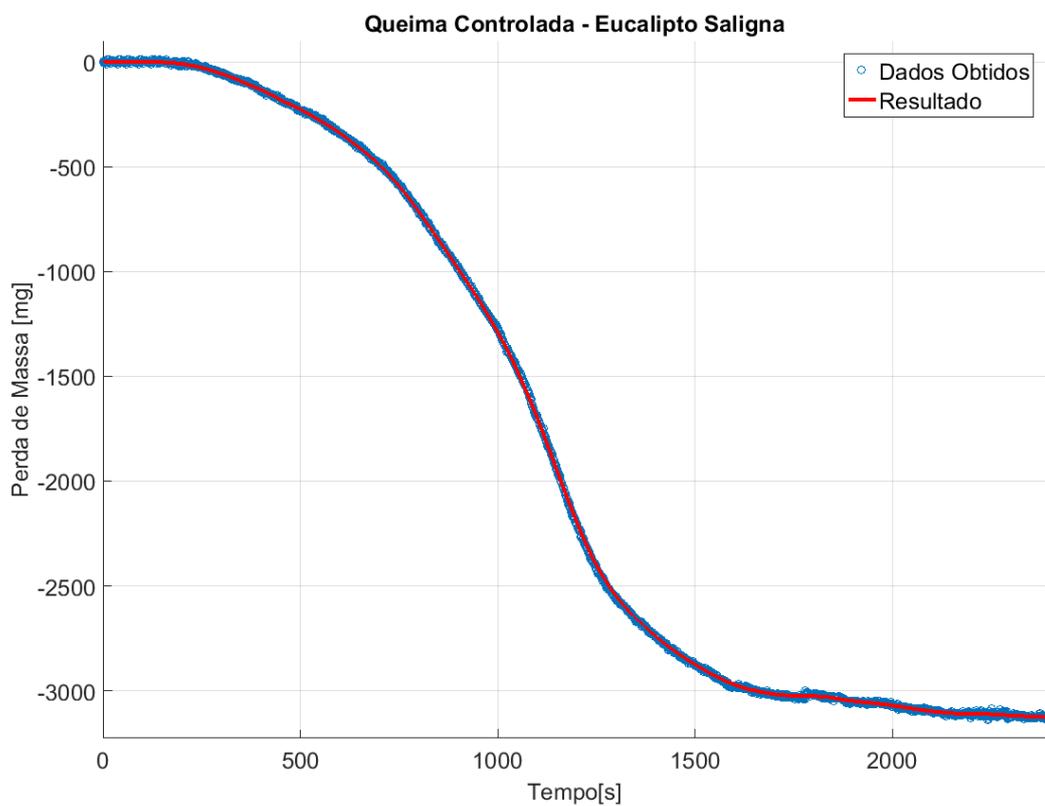


Figura 88 – Queima controlada de S2G por 2389 segundos (478,2°C + 2min permanência).

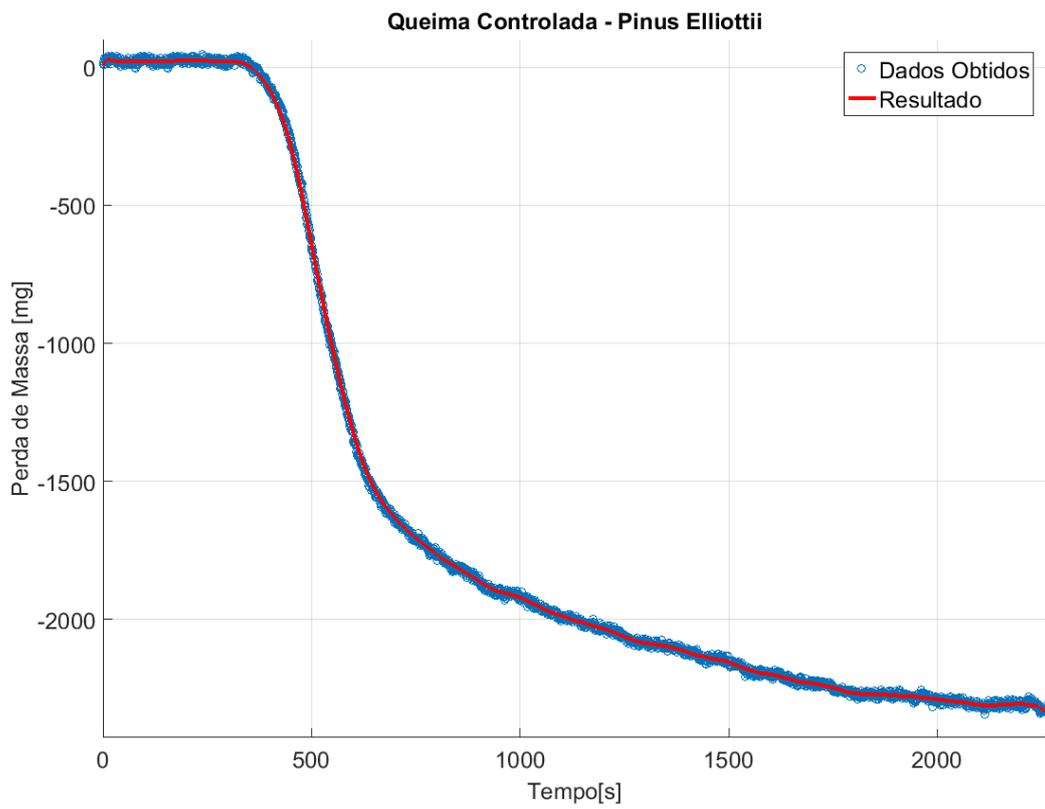


Figura 89 – Queima controlada de P2G por 2261 segundos (456,9°C + 2min permanência).

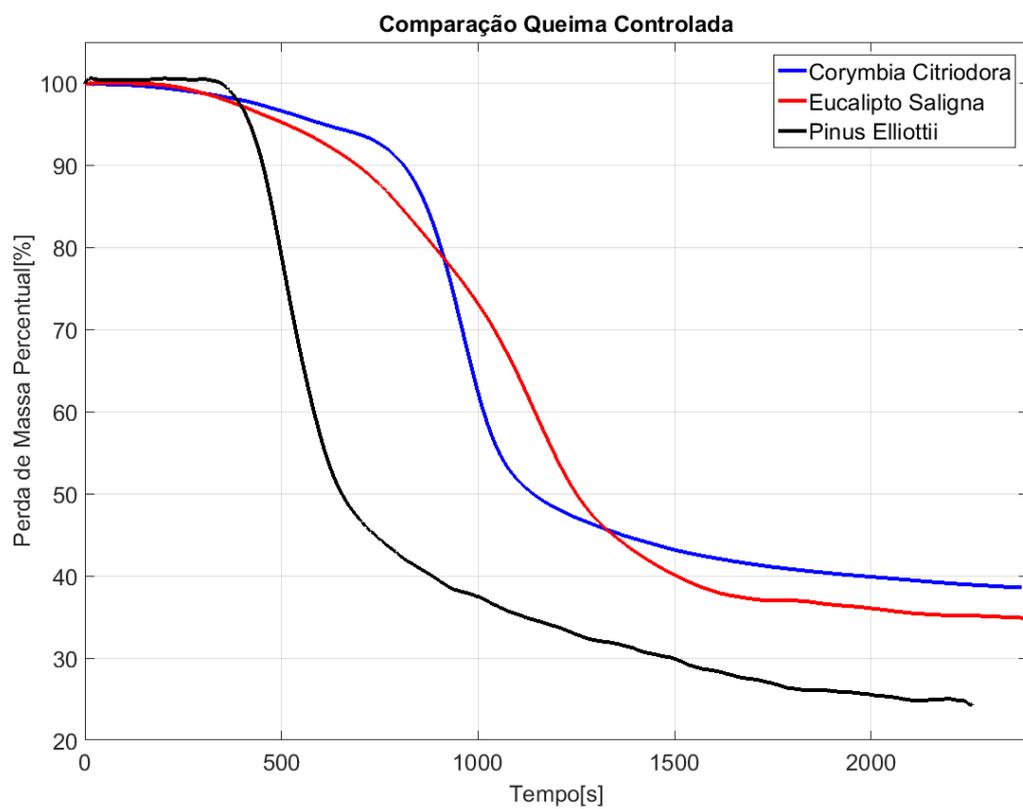


Figura 90 – Comparação entre as queimas controladas.

Resultados semelhantes foram observados pelos autores Couto et al. (2015), Simetti (2016) e Batista (2015). Os valores divergem somente para os teores de cinzas percentuais, no presente trabalho todos obtidos foram superiores.

Na Figura 91, pode ser observado exemplos dos carvões vegetais produzidos para as três espécies presentes neste trabalho.



Figura 91 – Acima e à esquerda, carvão produzido através de *Corymbia citriodora*, à direita *Eucalypto saligna*, e abaixo *Pinus elliottii*.

## 5 Conclusões

A análise termogravimétrica é sem dúvida um dos mais importantes métodos de caracterização de materiais para a produção de carvão vegetal, logo, espera-se que o equipamento desenvolvido venha a contribuir em diversos aspectos, facilitando aos operadores o teste como um todo, pois o mesmo é realizado de maneira simples, podendo obter curvas termogravimétricas e suas derivadas através de diferentes configurações de experimentação com alta repetitividade. Sabendo-se a temperatura final de carbonização para determinada espécie é possível melhorar a produção do carvão vegetal, através do aumento do rendimento da produção e de sua qualidade.

Melhorar a tecnologia dos fornos industriais de utilizados nos processos atuais, pois com o equipamento desenvolvido e a predição da temperatura final, estes poderão ser controlados através da inserção de uma automação simples, controlando suas entradas de ar e as temperaturas envolvidas no processo, incentivando-se ainda mais a utilização desta biomassa, aumentando-se a sua contribuição na matriz energética do país e, sendo esta uma fonte renovável, contribuir para a diminuição da produção de gases de efeito estufa.

Através do equipamento desenvolvido, pode-se estabelecer comparativos quanto ao rendimento e a qualidade das diferentes espécies frente aos processos ensaiados, pôde-se construir uma evidência quanto ao tamanho e ao arranjo das amostras carbonizadas. Constatou-se que para cada espécie houve um comportamento diferenciado, não sendo possível padronizar uma regra geral para todas as espécies e arranjos.

Como resultado, construiu-se um banco de dados quanto as espécies testadas, capaz de estimar e prever a capacidade produtiva das amostras destas em futuros ensaios.

### 5.1 Trabalhos Futuros

Realizar testes no vácuo e sob pressão, em seguida verificar com outras técnicas de caracterização de materiais para validar os possíveis ganhos quantitativos e qualitativos na produção do carvão vegetal.

Monitorar a massa de materiais voláteis condensados, assim como, instalar um analisador de gases na saída dos gases exauridos, verificando-se desta maneira a estequiometria da carbonização, buscando-se modelar um sistema para a posteriori controlar as entradas de ar, aumentando-se a eficiência da carbonização. Conectar as saídas dos gases em um Nir (*near infrared sensor*), discriminando-se os componentes dos materiais voláteis exauridos em todos estágios da carbonização, complementando-se o estudo atual.

Testar outros arranjos e outras espécies, aumentando-se o banco de dados, elucidando-se cada vez mais o comportamento da carbonização em diversas espécies.

## Referências Bibliográficas

AMELOTI, G. B.; CARVALHO, S. R.; Simulação numérica do processo de aquecimento e dinâmica dos gases no interior de um forno industrial. *Horizonte Científico*, v. 6, n. 1, 2012.

ANTAL, M. J.; ALLEN, S. G.; DAÍ, X.; SHIMIZU, B.; TAM, M. S.; GRØNLI, M. Attainment of the theoretical yield of carbon from biomass. *Indian Engineering Chemistry Research, New Delhi*, v. 39, p. 4024-4031, 2000.

ANTAL, M. J.; CROISSET, E.; DAÍ, X.; ALMEIDA, C. de; MOK, W. S. L.; NORBERG, N. High-yield biomass charcoal. *Energy & Fuels*, v. 10, p. 652-658, 1996.

ANTAL, M. J.; GRØNLI, M. The art, science, and technology of charcoal production. *Indian Engineering Chemistry Research, New Delhi*, v. 42, p. 1619-1640, 2003.

ANTAL, M. J.; MOK, W. S. L. Review of methods for improving the yield of charcoal from biomass. *Energy & Fuels*, v. 4, n. 3, p. 221-225, 1990.

ANTAL, M. J.; VÁRHEGY, G. Cellulose pyrolysis kinetics: the current state of knowledge. *Indian Engineering Chemistry Research, New Delhi*, v. 34, p. 703-717, 1995.

ARAÚJO, J. C. A. Oferta e demanda de produtos florestais frente ao aquecimento do setor siderúrgico pelo carvão vegetal. *Superintendente – ASIFLOR*, 2018.

ARDUINO <https://www.arduino.cc/> Acesso em: 29/06/2022.

AVIA SEMICONDUCTOR [https://www.mouser.com/ds/2/813/hx711\\_english-1022875.pdf](https://www.mouser.com/ds/2/813/hx711_english-1022875.pdf)  
Acesso em: 29/06/2022.

BATISTA, J. A. N.; *Torrefação do Pinus Elliottii para fins energéticos; Itapeva – SP*, 2015.

BLACKADDER, W.; RENSFELT, E. A pressurized thermo balance for pyrolysis and gasification studies of biomass, wood and peat. In: OVEREND, R. P.; MILNE, T. A.; MUDGE, L. K. (Ed.). *Fundamentals of thermochemical biomass conversion*. London: Elsevier Applied Science, p. 747-759, 1985.

BRITO, J. O.; CINTRA, T. C. Madeira para energia no Brasil: realidade, visão, estratégia e demandas de ações. *Biomassa & Energia, Viçosa*, v. 1, n. 2, p. 157-163, 2004.

CAMPOS, A. C. M. Carvão de Eucalyptus: efeitos dos parâmetros da pirólise sobre a madeira e seus componentes químicos e predição da qualidade pela espectroscopia NIR, *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, MG*. 2008.

CARVALHO, S. R.; BORGES, V. L.; MULINA, B. H. O.; LIMA, R.; OLIVEIRA, M.; JÚNIOR, E. A. F.; & FILHO, J. S. P. Instrumentação térmica aplicada ao processo de produção de carvão vegetal em fornos de alvenaria. *Revista Árvore*, 36(4), 787-796. 2012.

CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte, MG, v. 1, 158 p., 1980.

COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; LIMA, J. T.; DA SILVA, J. R. M.; PROTÁSIO, T. P.; Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. Sci. For., Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 817-831, dez. 2015.

DICERBO, P. M. Thermogravimetric analysis the need for standard procedures, EIC 10th Electrical Insulation Conference, 1971.

DOMAC, M. T. J. Economic aspects of charcoal production in Croatia, 2008.

DOMAC, M. T. J. Industrial charcoal production Zagreb, 2006.

FAO – Food and agriculture organization of de United Nations. Industrial Charcoal Making, Forestry Paper n°. 63, Rome, 1985.

GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: PENEDO, W.R. (Ed.) Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte: CETEC. pp. 27-41. 1982.

GUIMARÃES NETO, R. M. Avaliação econômica e financeira de projetos de fornos dos tipos container industrial e retangular de 40 estéreos. Revista Árvore, v.31, n.4, p.709-715, 2007.

FOTEK <https://www.fotek.com.tw/en-gb/> Acesso em: 29/06/2022.

HARTSON, H. R. Human-computer Interaction: Interdisciplinary roots and trends. The Journal of System and Software, v. 43 ,p. 103-118, 1998.

IERVOLINO, E.; HERWAARDEN, A. W.; VLIST, W.; SARRO, P. M. MEMS for Thermogravimetry: Fully Integrated Device for Inspection of Nanomasses, Journal of Microelectromechanical Systems, v.20 , 2011.

INTERNATIONAL RECTIFIER [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRF1404-DataSheet-v01\\_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355dae92618b0](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRF1404-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355dae92618b0) Acesso em: 29/06/2022

JOHNSON, W. L.; MANSFIELD, E. Thermogravimetric analysis with a heated quartz crystal microbalance, IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings, 2012.

LAMBIOTTE, A. Continuous carbonisation and destructive distillation of cellulosic materials such as wood. 1942.

MAA, P. S.; BAILIE, R. C. Influence of partial sizes and environmental conditions on high temperature pyrolysis of cellulosic material: I theoretical. Combustion Science and Technology, v. 7, n. 6, p. 257-269, 1973.

MACHADO, G. O.; VOGEL, F.; SILVA, M. M.; Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas, químicas e energéticas do carvão de cinamomo (*Melia azedarach* L.). *Ambiência Guarapuava* (PR), v. 10 n.1, p. 83-96, 2014.

MAXIM INTEGRATED <https://www.maximintegrated.com/en.html> Acesso em: 29/06/2022.

MATHWORKS <https://www.mathworks.com/> Acesso em: 29/06/2022.

MEDEIROS, C. A.; RESENDE, M. E. A. Alcatrão vegetal: perspectivas de produção e utilização. *Revista da Fundação João Pinheiro*, v.13, n.9-12, p.42-48, 1983.

MICROCHIP [www.microchip.com](http://www.microchip.com) Acesso em: 29/06/2022.

MICROSOFT <https://visualstudio.microsoft.com/pt-br/> Acesso em: 29/06/2022.

NISE, N. S. *Engenharia de Sistemas de Controle*, 3a Edição, LTC, 2012.

NUMAZAWA, S. Contribution a l'etude de la pyrolyse lente sous pression du bois: détermination des paramètres optimums du procédé et des caractéristiques des produits obtenus. Tese (Docteur de Génie de Procédés Industriels) - Université de Technologie de Compiègne, Compiègne. 204 p., 2000.

OGATA, Katsuhiko. *Engenharia de Controle Moderno - 5ª edição*. Editora Pearson, 2010.

OLIVEIRA, R. L. M. Instrumentação e análise térmica do processo de produção de carvão vegetal. 2009. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Brasil.

OLIVEIRA, R. L. M.; MULINA, B. H. O.; BORGES, V. L., CARVALHO, S. R. Análise térmica e do rendimento gravimétrico em fornos de produção de carvão vegetal. CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Campina Grande, Brasil. 2010.

OLIVIERA, J. B.; GOMES, P. A.; ALAMEIDA, M. R. Caracterização do processo de fabricação de carvão em fornos de alvenaria. In: PENEDO, W. R. (Ed.) *Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade*. Belo Horizonte: CETEC, p.63-102, 1982.

PELÁEZ-SAMANIEGO, M. R.; GARCIA-PEREZ, M.; CORTEZ, L. B.; ROSILLO-CALLE, F.; MESA, J. Improvements of Brazilian carbonization industry as part of the creation of a global biomass economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.12, n.4, p. 1063-1086, 2008.

PEREIRA, E. G.; MARTINS, M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. C. O. Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, p. 592–600, 2017.

PREECE, J.; ROGERS, Y.; SHARP, E. *Interaction design: beyond human-computer interaction*. Nova York, NY, John Wiley & Sons. 2002.

RAAD, T. J. Drying process simulation and Eucalyptus ssp carbonization. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. ,114 p., 2004.

SANTIAGO, B. H. S.; PANNIRSELVAM, P. V. Estudo comparativo do uso do processo de pirólise e gaseificação para integração energética no ambiente rural na agroindústria do coco. In: BIENNIAL INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN ENERGY STUDIES, p. 24. 2004.

SCHENKEL, Y.; BERTAUX, P.; VANWIJNBSERGHE, S.; CARRE, J. An evaluation of the mound kiln carbonization technique. Biomass and Bioenergy 14, (5-6), PP. 505-516. 1998.

SHARP <https://www.farnell.com/datasheets/73758.pdf> Acesso em: 29/06/2022.

SIMETTI, R.; Biomassa de cinco espécies de Eucalyptus para uso como biocombustível, Dissertação de Mestrado, Curitiba, 2016.

SUN MICROSYSTEMS. The Real-Time Java Platform. 2004.

SUNL, Y.; JIANG, J.; XUI, J.; ZHAO, S. Biomass carbonization industrial process, IEEE, 2011.

SYRED, C.; GRIFFITHS, A. J.; SYRED, N.; BEEDIE, D.; JAMES, D. A clean, efficient system for producing charcoal, heat and power (CHaP). Fuel, v. 85, p. 1566-1578, 2006.

TEXAS INSTRUMENTS <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf> Acesso em: 29/06/2022

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F.A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal. Cerne, Lavras, v.7, n.2, p.104-114, 2001.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. da. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (Himenea courbaril L.). Scientia Agraria, Piracicaba, v. 2, n. 27, 2004.

VÁRHEGYI, G. Aims and methods in non-isothermal reaction kinetics. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 79, p. 278-288, 2007.

VISHAY <https://www.vishay.com/docs/88756/uf5400.pdf> Acesso em: 29/06/2022.

WENZL, H. F. J. The chemical technology of wood. New York: Academic Press, 692p. 1970.