

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**ESTUDO SOBRE OS ASPECTOS PRODUTIVOS,
TECNOLÓGICOS E DE QUALIDADE DO CARVÃO
VEGETAL**

Dissertação de Mestrado

Ricardo Boeira Ivanov

Porto Alegre

2018

Ricardo Boeira Ivanov

**ESTUDO SOBRE OS ASPECTOS PRODUTIVOS, TECNOLÓGICOS E DE
QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL**

Dissertação de mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Área de Concentração:

Cinética Aplicada, Catálise e Reatores Químicos e Biorreatores

Orientador: Prof. Dr. Nilson Romeu Marcílio

Porto Alegre

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *Estudo sobre os Aspectos Produtivos, Tecnológicos e de Qualidade do Carvão Vegetal*, elaborada por Ricardo Boeira Ivanov, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Comissão Examinadora:

Dr. Guilherme Pantaleão da Silva Priebe
Secretaria de Minas e Energia – SME/RS

Prof. Dr. Saulo Roca Bragança
Departamento de Engenharia de Materiais – PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Evandro Steffani
Departamento de Engenharia Química – UFRGS

Porto Alegre, RS, Brasil

2018

À Suprema Lei do Universo, imanente em tudo e transcendente a tudo.
A Jesus de Nazaré, divino Mestre, talvez o único Homem Integral que apareceu na Terra.
Ao meu filho Bernardo e à minha esposa Robercia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço infinitamente à minha família, por toda paciência, apoio e incentivos desmedidos que me prestaram durante o período de realização do mestrado. Sem eles este trabalho não seria possível. Minha esposa Robercia e meu filho Bernardo, que tiveram muita paciência enquanto eu abdicava do exíguo tempo de lazer para concluir a dissertação, meus pais Carlos e Isabel, meus irmãos Guilherme e André, e minha tia Maria Cleuza também sempre me apoiaram bastante nos estudos. Muito obrigado a vocês!

Agradeço a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFRGS pelo ensino de qualidade, em especial à Prof.^a Lígia, que além de ser uma excelente professora (desde quando eu tive a primeira aula com ela, lá nos idos 2005), foi ela quem me abriu as portas e incentivou minha inscrição no Mestrado; e também ao meu orientador Prof.

Nilson, por toda sua calma, humanidade, paciência e seriedade, virtudes muito raras nos acelerados dias de hoje, mas que ele ainda preserva desde que o conheci, lá em 2007, também na graduação. Sempre lembrarei de vocês dois com carinho e sou imensamente grato.

Não posso deixar de agradecer a todos os professores do Instituto de Matemática da UFRJ, especialmente do Departamento de Métodos Estatísticos, com os quais convivo e aprendo muito diariamente. Ainda que não tenham participado deste trabalho, vocês são muito importantes no aprimoramento e ampliação de meus conhecimentos.

Agradeço também aos amigos e colegas do Inmetro, que sempre me incentivaram (e até “cobraram”) pela conclusão do Mestrado. Nesta parte, são muitos os nomes, pois já são 8 anos de Inmetro. Até havia escrito alguns nomes, mas a lista foi crescendo, crescendo... que resolvi agradecer a todos os amigos da Cgcre e da Diraf, para não ser injusto, pois todos foram importantes de uma forma ou de outra.

Por fim, aos amigos de UFRJ, Althayr e Vinicius Grijó, futuros colegas profissionais, pelo incentivo na reta final para conclusão da dissertação. Nossas conversas filosófico-existenciais, sempre com analogias e alegorias matemáticas, construíram ensinamentos que lembrarei em toda a minha vida. Apesar de muito mais jovens que eu, aprendo muito com vocês.

Muito obrigado!

SER ALGUÉM

Prof. Huberto Rohden

*Amigo. Se quiseres escrever para a humanidade o que a torne melhor – sê tu mesmo o início
dessa humanidade melhor...*

Sê uma célula sadia – do organismo convalescente.

Sê primeiro em tua pessoa – o que desejaras fossem os outros.

Começa a reforma do gênero humano – pela reforma do teu Eu individual.

Primeiro na própria casa – depois na casa do vizinho.

De dentro para fora – do componente para o composto...

Está em teu poder reformar a sociedade – ao menos em uma das suas partes integrantes...

*Sem uma grande realidade ou um grande ideal, ninguém pode ser grande – e como poderia
prestar grandes coisas quem não é grande?*

Cada um é o secretário do próprio Eu – só pode escrever o que o dono lhe ditar.

Cada um é o eco de sua alma – só reproduz com palavras o que ela é de fato.

Para ser grande não basta fazer algo – é necessário ser alguém.

De alma para alma é que atua o poderoso fluido da personalidade.

De espírito a espírito tece o homem os invisíveis fios do seu destino – e o destino dos outros.

Do Eu para um Tu se lança a torrente vital dos grandes vultos da história.

A mais eficaz propaganda de tua obra, meu amigo – és tu mesmo...

Não o teu ego periférico – mas o teu Eu central.

Sem um genuíno autoconhecimento – não haverá verdadeira auto-realização.

*Não faças reclamo de ti mesmo – pois seria o limite de tua grandeza –, mas sê a alma de tua
obra.*

Não interessa a ninguém o que estudaste, decoraste ou sabes – interessa somente o que tu és.

Se não és alguém, ninguém te pode garantir a vitória – se és alguém, ninguém te pode derrotar.

Mais do que o teu conhecer – é o teu ser que atua sobre outros seres.

Pode-se aprender a ler, escrever e contar – mas não se pode aprender com meras teorias a ser alguém.

Para ser alguém, deve o homem ter consciência da sua realidade.

Deve guardar absoluta fidelidade ao íntimo ser.

Deve ser integralmente sincero consigo mesmo.

Deve saber unir a justiça ao amor.

Deve preferir a retilínea convicção às curvilíneas convenções da sociedade.

Deve ter linhas definidas como o cristal – e não ser argila amorfa.

Deve imolar a escravidão farta na ara da liberdade austera.

Deve ser um eco do Eterno – no deserto do mundo efêmero.

Um emissário de Deus – no meio da humanidade.

Deve estar disposto a sacrificar os mais belos ídolos do ego – ao único ideal do Eu.

RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, cujo valor de produção alcança a cifra de R\$ 3 bilhões por ano. A produção de carvão vegetal é realizada majoritariamente em fornos artesanais (chamados de “rabo quente”), em processos altamente empíricos, poluentes, dependentes de trabalho manual e com baixo rendimento. Neste contexto, novas tecnologias despontam com o intuito de contornar os problemas dos fornos “rabo quente” e substituí-los o quanto antes possível, dentre as quais se destacam os fornos cilíndricos metálicos. Mediante um profundo estudo sobre a cadeia de carvão vegetal, e a posterior análise de dados reais em escala industrial, este trabalho avaliou a produtividade de um sistema de fornos cilíndricos metálicos para carbonização, concluindo que tal sistema apresenta rendimento gravimétrico inferior a 25% e produtividade real de 1/3 da produtividade nominal, sendo inviável economicamente para a produção de carvão vegetal.

Palavras-chave: carvão vegetal, fornos cilíndricos metálicos, carbonização, pirólise lenta.

ABSTRACT

Brazil is the world's largest producer of charcoal, with a production value around R\$ 3 billion per year. The production of charcoal is mainly carried out in artisanal kilns (called "hot tail"), in highly empirical, polluting processes, dependent on manual labor and with low yield. In this context, new technologies emerge to solve the problems of hot tail kilns and replace them as fast as possible, where metal kilns become a possible solution. This study evaluated the productivity of carbonization metal kilns, concluding that charcoal yield in these kilns is less than 25% and the real productivity is 1/3 of the nominal productivity, being economically unviable.

Keywords: charcoal, metal kilns, carbonization, slow pyrolysis.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XVIII
LISTA DE TABELAS.....	XXII
LISTA DE ABREVIATURAS	XXIII
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	10
CAPÍTULO 2.....	11
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1 O CARVÃO VEGETAL.....	11
2.1.1 <i>Classificação do Carvão</i>	<i>12</i>
2.2 PIRÓLISE DE BIOMASSA.....	15
2.2.1 <i>Características da Matéria-Prima</i>	<i>18</i>
2.2.1.1 Densidade Básica da Madeira	21
2.2.1.2 Teores de Lignina, Celulose e Hemicelulose	22
2.2.1.3 Umidade	25
2.2.2 <i>Fases do Processo de Carbonização</i>	<i>26</i>
2.2.2.1 Modelos Cinéticos.....	27
2.2.2.1.1 Modelo A: Quatro reações paralelas e independentes	28
2.2.2.1.2 Modelo B: Uma reação seguida de duas reações concorrentes.....	29
2.2.2.1.3 Modelo C: Três reações paralelas concorrentes	29
2.2.2.1.4 Modelo D: Uma única reação.....	29
2.2.3 <i>Variáveis de Processo</i>	<i>31</i>
2.2.3.1 Temperatura	31
2.2.3.2 Tempo de Residência	33

2.2.3.3	Taxa de Aquecimento.....	33
2.2.3.4	Pressão.....	34
2.3	TECNOLOGIAS PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO	34
2.3.1	<i>Forno Rabo Quente</i>	35
2.3.2	<i>Forno de Encosta e Forno Subterrâneo</i>	36
2.3.3	<i>Forno Circular</i>	37
2.3.4	<i>Forno Retangular</i>	38
2.3.5	<i>Fornos Cilíndricos Metálicos</i>	40
2.3.6	<i>Tecnologia Ondatec</i>	41
2.3.7	<i>Tecnologia DPC</i>	42
2.3.8	<i>Fornos Contínuos (Retortas)</i>	44
CAPÍTULO 3		46
MATERIAIS E MÉTODOS		46
3.1 AVALIAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DOS FORNOS		46
3.1.1	<i>Materiais</i>	46
3.1.2	<i>Métodos</i>	47
3.1.2.1	Seleção da Madeira	47
3.1.2.2	Carregamento dos Cilindros.....	47
3.1.2.3	Ignição dos Fornos	48
3.1.2.4	Procedimento de Carbonização	48
3.1.2.5	Controle de Temperatura.....	51
3.1.2.6	Resfriamento e Descarga.....	51
3.2.1	<i>Parâmetros Físico-Químicos</i>	53
3.2.1.1	Densidade	53
3.2.1.1.1	Densidade a Granel	54
3.2.1.1.2	Densidade Aparente, Densidade Verdadeira e Porosidade	54
3.2.1.2	Carbono Fixo.....	55
3.2.1.3	Resistência Mecânica	56
3.2.1.4	Umidade	57
3.2.1.5	Cinzas	57
3.2.1.6	Matérias Voláteis.....	58
3.2.1.7	Poder Calorífico	59
3.2.2	<i>Materiais</i>	59

3.2.2.1	Amostra selecionada	59
3.2.2.2	Laboratório selecionado	60
3.2.3	<i>Métodos</i>	60
3.2.3.1	Amostragem	60
3.2.3.2	Métodos de Ensaios	61
CAPÍTULO 4	.....	62
RESULTADOS E DISCUSSÃO	.....	62
4.1 AVALIAÇÃO DE PRODUTIVIDADE DOS FORNOS	.....	62
4.1.1	<i>Análise Descritiva dos Dados</i>	62
4.1.2	<i>Operação Contínua da Unidade e Produtividade Real</i>	67
4.1.3	<i>Temperatura de Carbonização</i>	70
4.1.4	<i>Ajuste de Modelos</i>	72
4.1.5	<i>Subprodutos e Composição dos Gases da Carbonização</i>	77
4.2 ANÁLISE DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DO CARVÃO	.....	78
CAPÍTULO 5	.....	83
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	.....	83
REFERÊNCIAS	.....	85
APÊNDICE A – LICENCIAMENTO AMBIENTAL	.....	94
APÊNDICE B – DOCUMENTO DE ORIGEM FLORESTAL	.....	99
APÊNDICE C – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS	.....	101
APÊNDICE D – TRANSPORTE DE CARVÃO A GRANEL	.....	104
APÊNDICE E – REQUISITOS DE QUALIDADE PARA O CARVÃO	.....	106
APÊNDICE F – PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DE MADEIRA EMPILHADA	.....	109
APÊNDICE G – NORMAS BRASILEIRAS TÉCNICAS	.....	113
APÊNDICE H – CADEIA DE CARVÃO E OS CRÉDITOS DE CARBONO	.....	115
APÊNDICE I – MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA	.....	121
ANEXO A – COMUNICADO SUCAR – TRANSPORTE DE CARVÃO VEGETAL	.....	125
ANEXO B – PROCEDIMENTO PARA TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARVÃO VEGETAL (ANTT)	.....	127

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1. Matriz energética do Brasil em 2016 e matriz energética mundial em 2015, respectivamente (EPE, 2018).</i>	3
<i>Figura 1.2. Comparação entre as matrizes energéticas do Brasil (em 2016) e do restante do mundo (em 2015) (EPE, 2018).</i>	3
<i>Figura 1.3. Matriz elétrica do Brasil em 2016 e matriz elétrica mundial em 2015, respectivamente (EPE, 2018).</i>	4
<i>Figura 1.4. Comparação entre as matrizes elétricas do Brasil (em 2016) e do restante do mundo (em 2015) (EPE, 2018).</i>	4
<i>Figura 1.5. Maiores produtores de carvão vegetal em 2015 (FAO, 2017).</i>	5
<i>Figura 1.6. Produção de carvão no Brasil, em milhões de toneladas (IBGE, 2018).</i>	6
<i>Figura 1.7. Produção de carvão, por unidade da federação, no ano de 2016 (IBGE, 2018).</i> ..	7
<i>Figura 1.8. Valor da produção de carvão, em milhões de reais (IBGE, 2018)</i>	7
<i>Figura 1.9. Produção de carvão e ferro-gusa no Brasil, em milhões de toneladas (IBGE, 2018).</i>	8
<i>Figura 2.1. Produção de carvão por espécie florestal no Brasil (IBGE, 2018).</i>	19
<i>Figura 2.2. Produção de lenha de eucalipto e tora de eucalipto (exceto para celulose) no Brasil, em milhões de m³ (IBGE, 2018).</i>	20
<i>Figura 2.3. Produção de lenha de eucalipto e tora de eucalipto (exceto para celulose), por unidade da federação, no ano de 2016 (IBGE, 2018).</i>	20
<i>Figura 2.4. Análise termogravimétrica da pirólise da lignina, hemicelulose e celulose (YANG, YAN, et al., 2007).</i>	23
<i>Figura 2.5. Principais radicais da molécula de lignina (SANTOS, 2010).</i>	24
<i>Figura 2.6. Uma estrutura proposta para a lignina (AZADI, INDERWILDI, et al., 2013).</i> ...	24
<i>Figura 2.7. Reações do modelo cinético A, onde A: madeira; G₁: gases não condensáveis; G₂: alcatrão; C: carvão (GRØNLI, 1996) citado por (LARFELDT, LECKNER e MELAAEN, 2000).</i>	28

Figura 2.8. Reações do modelo cinético B, onde A: madeira; I: intermediário (não definido); G ₁ : gases não condensáveis; G ₂ : alcatrão; C: carvão (BROIDO, 1976) e (SHAFIZADEH, 1984), citados por (LARFELDT, LECKNER e MELAAEN, 2000).	29
Figura 2.9. Reações do modelo cinético C, onde A: madeira; G ₁ : gases não condensáveis; G ₂ : alcatrão; C: carvão (CHAN, KELBON e KRIEGER, 1985) citado por (LARFELDT, LECKNER e MELAAEN, 2000).	29
Figura 2.10. Reação do modelo cinético D, onde A: madeira; G ₁ : gases não condensáveis; G ₂ : alcatrão; C: carvão (GRØNLI, 1996) citado por (LARFELDT, LECKNER e MELAAEN, 2000).	30
Figura 2.11. Resultados da modelagem da pirólise de madeira de Bétula a 700 °C e com taxa de aquecimento de 50 °C/min (LARFELDT, LECKNER e MELAAEN, 2000).	30
Figura 2.12. Perfis térmicos da carbonização de eucalipto em fornos circulares acoplados a uma fornalha (OLIVEIRA, CARNEIRO, et al., 2013).	32
Figura 2.13. Densidade verdadeira e densidade aparente de carvão de eucalipto em função da temperatura de carbonização (SOMERVILLE e JAHANSHAH, 2015).	33
Figura 2.14. Forno “rabo quente” (FLORESTALENGENHARIA, 2010).	36
Figura 2.15. Fornos subterrâneos ou cobertos de terra, em encostas (LEHMANN e JOSEPH, 2009).	37
Figura 2.16. Forno subterrâneo (BIOCOAL, 2018).	37
Figura 2.17. Exemplo de desenho de dois fornos circulares acoplados a uma fornalha (medidas em centímetros) (CARNEIRO, LANA, et al., 2012).	38
Figura 2.18. Vista aérea de praça de carbonização com fornos retangulares (ArcelorMittal).	40
Figura 2.19. Carregamento mecanizado de matéria-prima no forno (Grupo Mutum).	40
Figura 2.20. Fluxo simplificado do processo Ondatec (ONDATEC, 2018).	42
Figura 2.21. Diagrama básico do processo DPC (DPC, 2018).	43
Figura 2.22. Unidade DPC (DPC, 2018).	43
Figura 2.23. Esquema de produção de carvão em retortas (CARNEIRO, BARCELLOS, et al., 2012).	44
Figura 3.1. Visualização do cilindro no suporte de carregamento (acervo do autor).	48
Figura 3.2. Ignição do forno (acervo do autor).	48
Figura 3.3. Os cilindros são içados e transportados por uma ponte rolante (acervo do autor).	49

Figura 3.4. Vista em corte da câmara de combustão do forno onde: (a) duto de condução dos gases dos fornos até o processador de gases (manilhas), (b) dutos para o fornecimento de ar de combustão, (c) piso de acabamento do forno, (d) revestimento interno em tijolos refratários, (e) segmentos em ferro fundido especial, (f) conector de fumaça e (g) caixa de entrada dos gases (acervo do autor).....	49
Figura 3.5. Pontos de medição de temperatura. (a) Ponto de medição superior localizado a aproximadamente 10 cm acima dos crivos. (b) Ponto central e (c) ponto inferior, a aproximadamente 25 cm da base do cilindro (acervo do autor).	50
Figura 3.6. Tiços da carbonização (acervo do autor).....	52
Figura 4.1. Boxplot da produção de carvão por cilindro associada à classe de diâmetro da lenha.....	63
Figura 4.2. Histograma da produção de carvão por cilindro.....	63
Figura 4.3. Boxplot do rendimento gravimétrico associado à classe de diâmetro da lenha. .	64
Figura 4.4. Histograma do rendimento gravimétrico (%).	64
Figura 4.5. Boxplot do tempo de carbonização associado à classe de diâmetro da lenha.....	65
Figura 4.6. Histograma do tempo de carbonização (em horas).	65
Figura 4.7. Boxplot da produtividade associada à classe de diâmetro da lenha.....	66
Figura 4.8. Histograma da produtividade por cilindro (kg carvão/h carbonização).	66
Figura 4.9. Boxplot do percentual de tiços associado à classe de diâmetro da lenha.....	67
Figura 4.10. Histograma do percentual de tiços.....	67
Figura 4.11. Aspecto do simulador para a UPC.....	69
Figura 4.12. Parâmetros de ajuste do simulador.....	69
Figura 4.13. Exemplo de heterogeneidade térmica entre as faces dos cilindros (vista superior).....	70
Figura 4.14. Exemplo de perfil térmico. As cores das linhas representam cada face do cilindro.	71
Figura 4.15. Aspecto da base do forno na saída do cilindro.	72
Figura 4.16. Modelo normal $N(456; 5347)$ ajustado para produção de carvão (kg) por cilindro.	73
Figura 4.17. Modelo normal $N(20; 6)$ ajustado para o rendimento gravimétrico (%).	74
Figura 4.18. Modelo normal $N(14,6; 3)$ ajustado para tempo de carbonização (h).	74
Figura 4.19. Modelo normal $N(31,5; 22,6)$ ajustado para produtividade por carbonização (kg/h).	74

Figura 4.20. Modelo normal $N(2,63; 0,1324)$ ajustado para o $\log(\text{Percentual de Tiços})$ – equivalente a um modelo Lognormal $2,63; 0,1324$ para o percentual de tiços.	75
Figura 4.21. Boxplot da umidade total (%) associada à espécie florestal do carvão.	79
Figura 4.22. Boxplot da umidade de higroscopia (%) associada à espécie florestal do carvão.	79
Figura 4.23. Boxplot do teor de cinzas (% b.s.) associado à espécie florestal do carvão.	79
Figura 4.24. Boxplot de matérias voláteis (% b.s.) associadas à espécie florestal do carvão.	80
Figura 4.25. Boxplot do carbono fixo (% b.s.) associado à espécie florestal do carvão.	80
Figura 4.26. Boxplot do PCS (J/g) associado à espécie florestal do carvão.	80
Figura 4.27. Diagramas de dispersão entre os parâmetros físico-químicos ensaiados.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. <i>Exportações do Brasil no ano de 2017 (MDIC, 2018).</i>	2
Tabela 2.1. <i>Classificação do carvão vegetal utilizado como combustível ou agente redutor (FAO, 1983).</i>	13
Tabela 2.2. <i>Sumário de classificações para o carvão.</i>	14
Tabela 2.3. <i>Principais parâmetros de processo que afetam o rendimento e a composição dos produtos da pirólise de biomassa (PEACOCKE, 1994).</i>	15
Tabela 2.4. <i>Comparação da pirólise lenta com a pirólise rápida de biomassa (BOATENG, 2014) e (BALAT, KIRTAY, et al., 2009).</i>	17
Tabela 2.5. <i>Densidade básica de diferentes espécies de eucalipto (IWAKIRI, MATOS, et al., 2013).</i>	21
Tabela 2.6. <i>Valores médios da densidade básica e características químicas da madeira, rendimentos gravimétricos e características químicas do carvão (SOARES, BIANCHI, et al., 2014).</i>	26
Tabela 2.7. <i>Evolução da carbonização (PETROFF e DOAT, 1978) citado em (CETEC, 1982).</i>	27
Tabela 2.8. <i>Intervalos de rendimento gravimétrico para cada tipo de forno reportados na literatura (FAO, 2017).</i>	45
Tabela 3.1. <i>Ensaio realizados junto à Cientec.</i>	61
Tabela 4.1. <i>Resultados do Teste de Kolmogorov-Smirnov para os modelos propostos.</i>	76
Tabela 4.2. <i>Resultados dos ensaios em laboratório.</i>	78

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALRS	Assembleia Legislativa do estado do Rio Grande do Sul
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Cetesb	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
Cientec	Fundação de Ciência e Tecnologia
Conama	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Copam	Conselho Estadual de Política Ambiental
DOF	Documento de Origem Florestal
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
Fepam	Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler
FOB	<i>Free On Board</i>
GHG	<i>GreenHouse Gases</i>
Ibama	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBI	<i>International Biochar Initiative</i>
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LAC	Licenciamento Ambiental Concomitante

LAS	Licenciamento Ambiental Simplificado
LI	Licença de Instalação
LO	Licença de Operação
LP	Licença Prévia
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações
MDIC	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PEVS	Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura
RAS	Relatório Ambiental Simplificado
RCE	Reduções Certificadas de Emissões
RG	Rendimento Gravimétrico em Carvão
SAA	Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo
SIAM	Sistema Integrado de Informação Ambiental
Sisflora	Sistema de Comercialização e Transporte de Produtos Florestais do Pará
Sisnama	Sistema Nacional de Meio Ambiente
UNFCCC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
UPC	Unidade de Produção de Carvão Vegetal

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A localização geográfica do Brasil, seus aspectos climáticos e sua vasta floresta nativa colocam o país em posição privilegiada para a execução de práticas agrícolas e florestais, em comparação aos demais países do mundo. A forte vocação agrícola-florestal do Brasil, e sua importância para a economia nacional, não é privilégio dos dias atuais ou consequência das modernas tecnologias: essa vocação faz parte da gênese do país.

A economia do território brasileiro – desde o Brasil Colônia, Império até à República – sempre esteve fortemente associada a produtos provenientes da terra. Nossa história conta que já se experimentou, por exemplo, os ciclos do Pau-Brasil, da cana-de-açúcar, ouro e café, onde esses produtos representaram, cada um em sua época, o carro-chefe da economia brasileira. Atualmente, mesmo em uma economia bastante diversificada e depois da industrialização experimentada pelo Brasil desde o início do século XX, a agricultura, a pecuária e a silvicultura permanecem ocupando uma posição de destaque na economia nacional.

A importância da agropecuária, silvicultura e pesca para a economia brasileira é evidenciada por sua representatividade na pauta de exportações brasileiras, respondendo por quase 40% das exportações do Brasil no ano de 2017 (Tabela 1.1).

Tabela 1.1. Exportações do Brasil no ano de 2017 (MDIC, 2018).

<i>GRUPO DE PRODUTO</i>	<i>VALOR (milhões US\$ FOB)</i>	<i>Peso (%)</i>
<i>Soja</i>	31 722,22	14,57
<i>Carne</i>	15 091,65	6,93
<i>Açúcar e Alcool</i>	12 213,86	5,61
<i>Papel e Celulose</i>	8 268,41	3,80
<i>Café</i>	5 197,38	2,39
<i>Madeiras e Manufaturas de Madeiras</i>	2 779,92	1,28
<i>Fumo e Cigarros</i>	2 092,16	0,96
<i>Suco de Laranja</i>	1 940,17	0,89
<i>Frutas</i>	875,76	0,40
<i>Cacau e suas preparações</i>	364,14	0,17
<i>Pescados</i>	233,65	0,11
<i>Mel Natural</i>	121,30	0,06
<i>Leite e Derivados</i>	102,15	0,05
<i>Ovos e Gemas</i>	56,31	0,03
TOTAL GERAL	81 059,08	37,25

Além da importância econômica, o forte desenvolvimento da agricultura e silvicultura alçam a matriz energética do Brasil a uma condição ímpar, quando comparada à matriz energética mundial, conforme mostra a Figura 1.1. A contribuição energética das fontes renováveis na matriz brasileira é uma evidência de como o Brasil está um passo adiante, em relação ao mundo, na diversificação de suas fontes energéticas e na substituição das fontes energéticas esgotáveis (como combustíveis fósseis) por fontes renováveis, conforme mostra a Figura 1.2.

Figura 1.1. Matriz energética do Brasil em 2016 e matriz energética mundial em 2015, respectivamente (EPE, 2018).

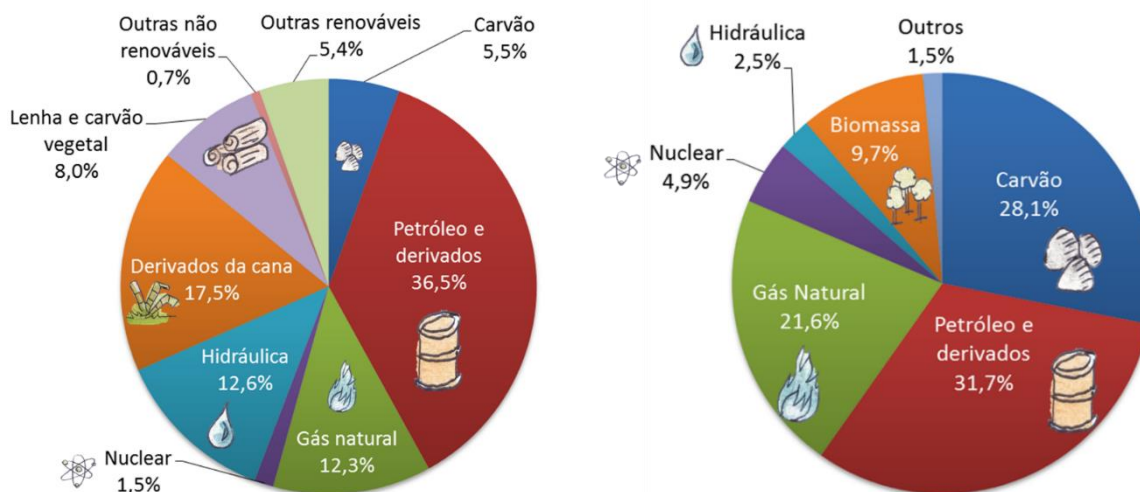
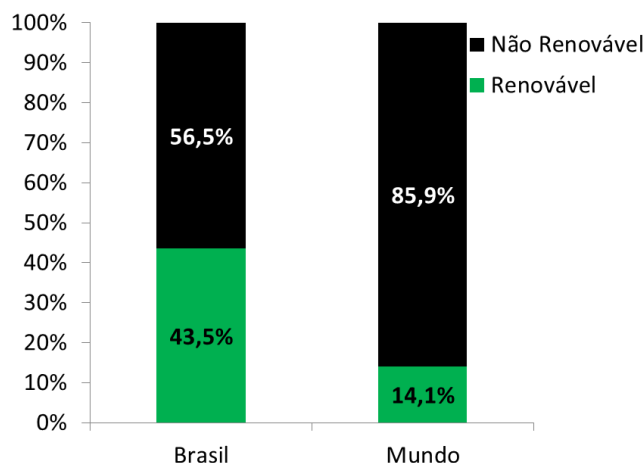


Figura 1.2. Comparação entre as matrizes energéticas do Brasil (em 2016) e do restante do mundo (em 2015) (EPE, 2018).



Quando se consideram somente as fontes de energia destinadas exclusivamente para a produção de energia elétrica, o Brasil notabiliza-se, ainda mais, pelo uso de fontes renováveis, conforme mostram as Figuras 1.3 e 1.4.

Figura 1.3. Matriz elétrica do Brasil em 2016 e matriz elétrica mundial em 2015, respectivamente (EPE, 2018).

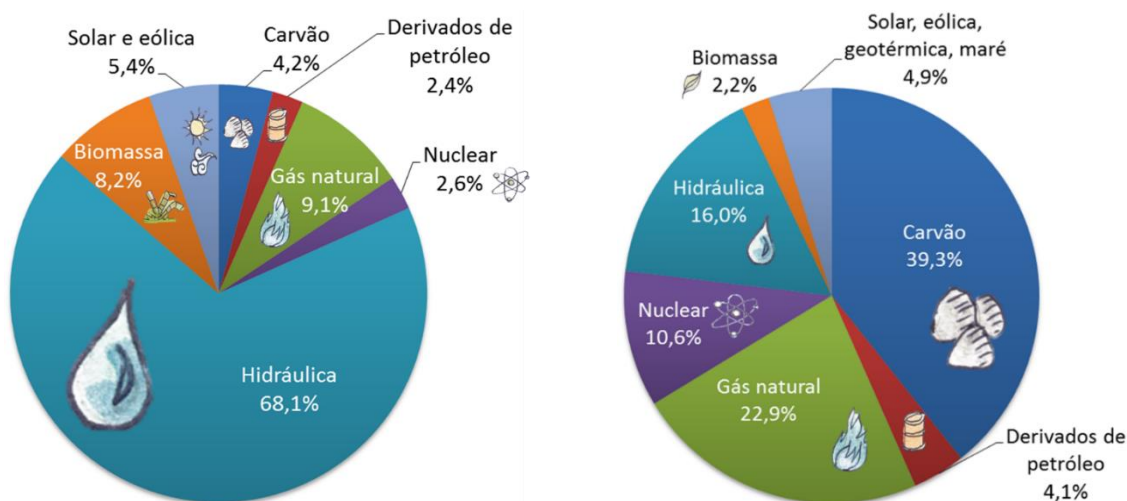
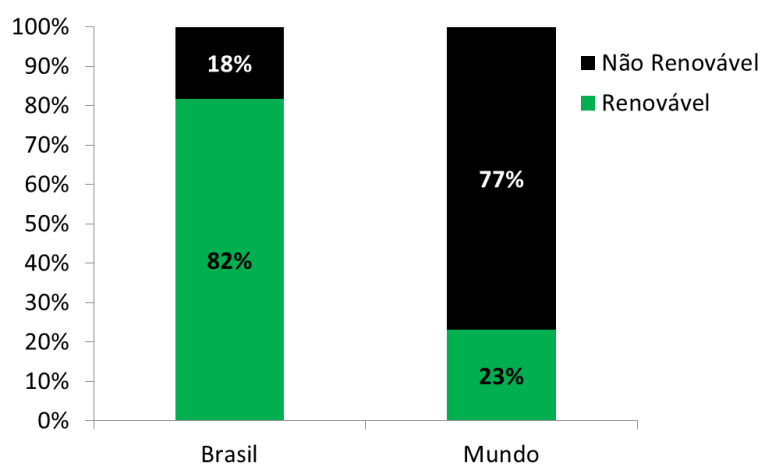


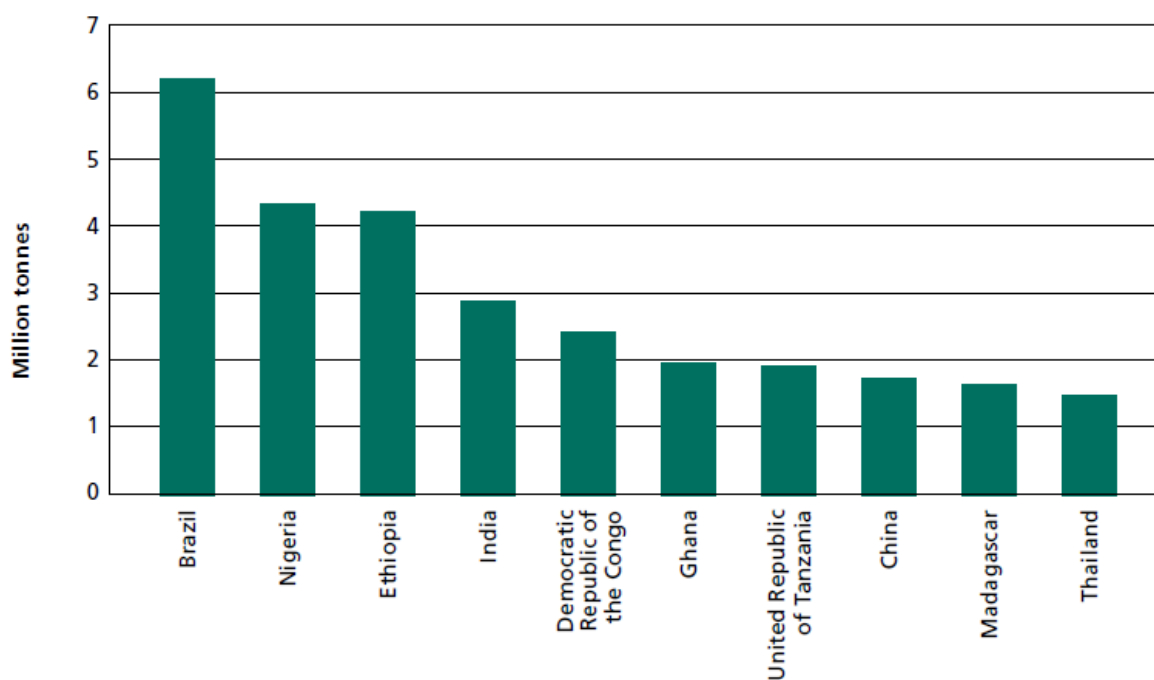
Figura 1.4. Comparação entre as matrizes elétricas do Brasil (em 2016) e do restante do mundo (em 2015) (EPE, 2018).



Ademais, o contexto ambiental também passa a se fazer presente. Em um mundo que atualmente conta com 7,6 bilhões de habitantes e projeta-se atingir 8,6 bilhões em 2030, 9,8 bilhões em 2050 e 11,2 bilhões em 2100 (ONU, 2018), reduzir a poluição atmosférica, mitigar os gases causadores do efeito estufa (GHG), diminuir os impactos ambientais nos arranjos produtivos, encontrar maneiras viáveis (técnica e economicamente) de gerar produtos de forma sustentável e atender à demanda energética, alimentícia e de demais recursos – sem incorrer em prejuízo no modo de vida contemporâneo – são assuntos que preocupam, e ocupam, os pesquisadores e cientistas das diversas áreas.

Dentre os diversos produtos que compõem o portfólio de produtos agrícola-florestais, destaca-se o *carvão vegetal*¹. Apesar de pouco divulgado, o Brasil é o maior produtor mundial de carvão (Figura 1.5), correspondendo a 12% da produção mundial (FAO, 2017). Ainda considerado um combustível de países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento, estima-se que mais de 2,4 bilhões de pessoas (quase 1/3 da população mundial) ainda utilize a madeira ou combustíveis derivados da madeira para a cocção de alimentos, bem como em pequenos empreendimentos como panificações, olarias ou no processamento de chás (FAO, 2017). Estima-se que 50% da madeira extraída no mundo seja utilizada como combustível direto ou para a produção de carvão vegetal (FAO, 2017). Além de combustível, o carvão vegetal possui outros usos, como agente redutor na produção de ferro-gusa, adsorvente (na forma de carvão ativado) e corretivo de solos.

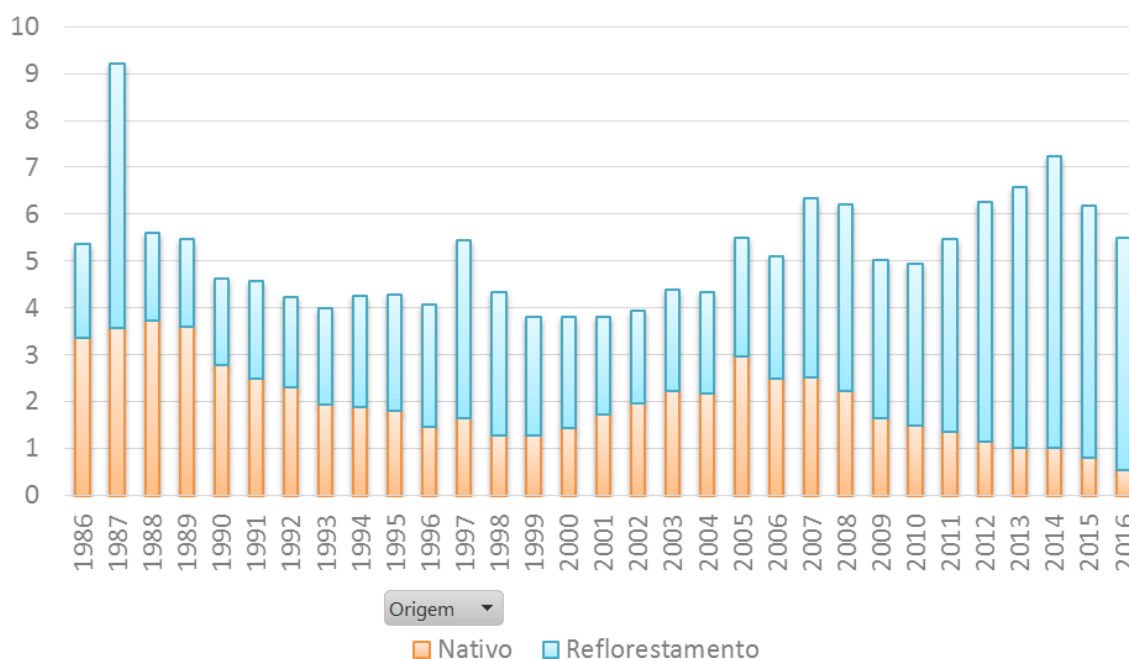
Figura 1.5. Maiores produtores de carvão vegetal em 2015 (FAO, 2017).



¹ Diferentemente do idioma inglês, onde há um único vocábulo para designar o carvão mineral (*coal*) e um vocábulo para designar o carvão vegetal (*charcoal* ou, modernamente, *biochar*), o idioma português não possui tais vocábulos únicos, forçando a utilização de duas palavras para designar os tipos de carvão de acordo com sua origem. Por ser “carvão vegetal” a temática deste trabalho, o vocábulo “carvão” será utilizado para designar exclusivamente “carvão vegetal”. Quando as sentenças tratarem dos diferentes tipos de carvão, a designação por extenso será empregada a fim de evitar equívocos de entendimento.

O carvão é produzido há séculos e possui um mercado solidamente estabelecido. Os dados estatísticos da produção nacional de carvão e do valor da produção² são apresentados nas Figuras 1.6, 1.7 e 1.8. A participação do carvão oriundo de florestas nativas decai ano após ano em comparação com a produção de carvão a partir de florestas plantadas. Ainda, nota-se que o valor da produção de carvão, no Brasil, gira em torno de R\$ 3 bilhões nos recentes anos, sendo que os estados de Minas Gerais e Maranhão despontam como os maiores estados produtores de carvão.

Figura 1.6. Produção de carvão no Brasil, em milhões de toneladas (IBGE, 2018).



² Valor da produção: variável derivada calculada pela média ponderada das informações de quantidade e preço médio corrente pago ao produtor, de acordo com os períodos de colheita e comercialização de cada produto. As despesas de frete, taxas e impostos não são incluídas no preço (IBGE, 2016).

Figura 1.7. Produção de carvão, por unidade da federação, no ano de 2016 (IBGE, 2018).

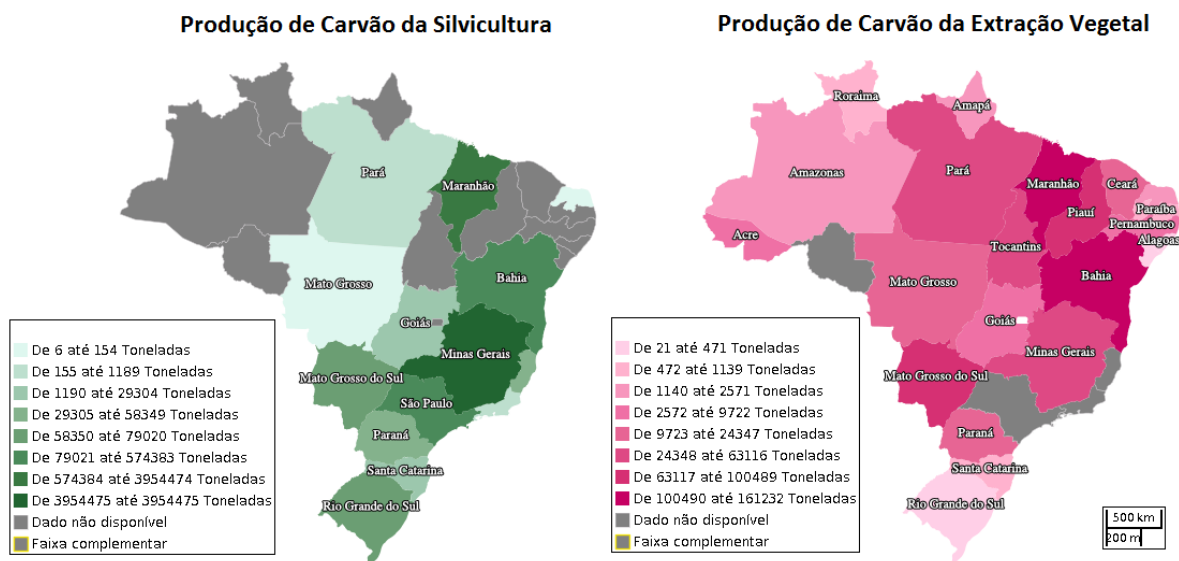
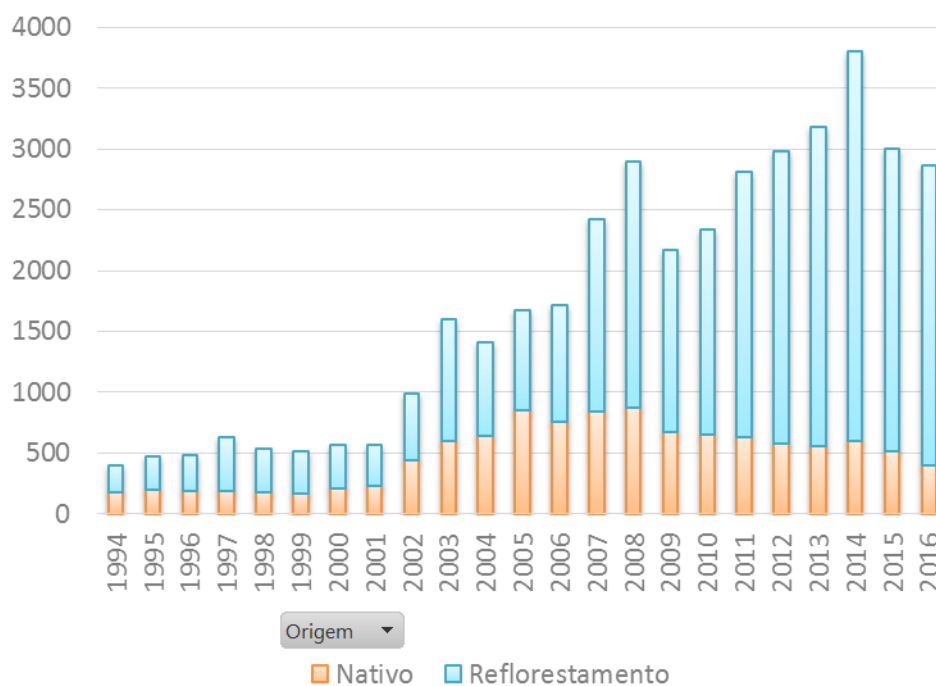
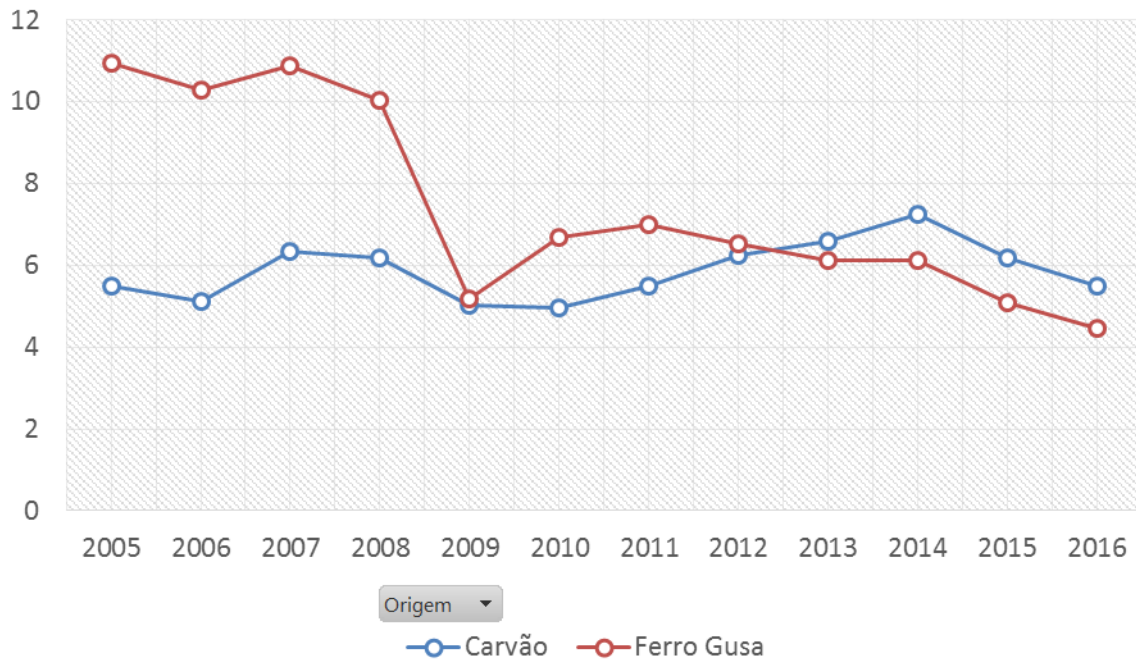


Figura 1.8. Valor da produção de carvão, em milhões de reais (IBGE, 2018)



No Brasil, o carvão é majoritariamente destinado à indústria siderúrgica, principalmente na produção de ferro-gusa, onde o carvão é um insumo alternativo ao coque. Ao comparar qualitativamente a produção nacional de carvão com a de ferro-gusa, há uma aparente associação entre as variáveis (Figura 1.9).

Figura 1.9. Produção de carvão e ferro-gusa no Brasil, em milhões de toneladas (IBGE, 2018).



Apesar de sua importância para a indústria siderúrgica, a produção de carvão é pulverizada e dominada por pequenos produtores rurais, onde se estima que a participação destes corresponde a mais de 80% da produção brasileira (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012). A maior parte das estatísticas relacionadas ao setor carvoeiro apresentam distorções, em função da alta informalidade (e até mesmo ilegalidade) existente no setor, bem como da dificuldade em se calcular e dimensionar corretamente alguns números – muitos dos quais são baseados em autodeclaração, como por exemplo no Censo Agropecuário (IBGE, 2017).

A alta participação dos pequenos produtores permite afirmar que mais de 80% do carvão brasileiro ainda é produzido em fornos artesanais de baixo rendimento (feitos de barro ou tijolos, popularmente denominados de “rabo quente”), nos quais não há controle da temperatura de carbonização e nem de emissões atmosféricas (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012). Ainda, a precarização das condições de trabalho nas carvoarias é preocupante: em alguns casos, os órgãos de fiscalização, como Ministério do Trabalho e Ibama, constataam trabalhadores em regime análogo à escravidão. Por exemplo, no ano de 2014, aproximadamente 20% do Cadastro de Empregadores do Ministério do Trabalho, a chamada “lista suja” de empresas que utilizam

mão de obra em condições análogas à escravidão, era composto por carvoarias (REPÓRTERBRASIL, 2014).

Diante deste cenário, a produção brasileira de carvão vegetal pode ser qualitativamente descrita por:

- a) utilizar fornos artesanais, de baixo rendimento, e altamente poluentes, não possuindo qualquer sistema de reaproveitamento ou queima de gases, emitindo gás metano (CH₄) e outros compostos voláteis oriundos das reações de carbonização diretamente para a atmosfera;
- b) empregar processos produtivos sem aproveitamento de subprodutos ou reaproveitamento energético, sendo o único objetivo a produção de carvão, e;
- c) adotar processos totalmente dependentes do trabalho manual, com controle empírico das reações químicas, escasso uso de instrumentos de medição, pouca ou nenhuma automação e exposição de funcionários a situações de risco ocupacional.

As exceções a esse cenário correspondem a menos de 20% da produção nacional, predominantemente concentrado em empresas de médio e grande porte do setor florestal e siderúrgico, as quais empregam tecnologias mais inovadoras (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012).

Pelo fato de o forno “rabo quente” ser artesanal, onde sua construção (material, dimensões, geometria etc) é bastante variável de produtor para produtor, e cuja operação é puramente empírica (depende tão-somente do conhecimento prático do operador³), há forte probabilidade de que o carvão produzido por esses fornos possua elevada variabilidade em suas principais características físico-químicas (densidade, umidade, carbono fixo, poder calorífico, matérias voláteis etc).

O carvão vegetal utilizado na siderurgia necessita atender a determinados limites para seus parâmetros físico-químicos, pois, do contrário, coloca sob risco o rendimento das reações químicas nos altos fornos, havendo forte clareza para este segmento quais são os parâmetros desejáveis para o carvão (NOUMI, BLIN, *et al.*, 2014).

Apesar de não existir, a nível nacional, uma exigência formal para as características físico-químicas do carvão para uso doméstico, algumas iniciativas a nível regional já foram

³ Popularmente chamado de “carvoeiro”.

estabelecidas de forma a caracterizar o carvão para uso doméstico, como é o caso do estado de São Paulo (SAA, 2003; SAA, 2015).

Neste cenário, onde a produção é majoritariamente empírica e altamente poluente, empresas desenvolveram novas tecnologias para a carbonização da madeira, com promessas de contornar o empirismo, poluição, baixos rendimentos, ambiente de trabalho insalubre e automação, mesmo que parcial, dos fornos “rabo quente”. A principal questão que recai sobre tais tecnologias é o fato de que ainda há pouca informação disponível sobre a produtividade e viabilidade em escala industrial dessas, o que as colocam como incógnitas como possíveis soluções aos fornos artesanais.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivos principais:

- realizar um estudo sobre os aspectos produtivos, tecnológicos e de qualidade do carvão vegetal;
- avaliar os aspectos de produtividade dos fornos cilíndricos metálicos para produção de carvão vegetal, empregando dados reais de produção em escala industrial.

Como objetivo secundário, este trabalho apresenta uma análise dos principais parâmetros físico-químicos de qualidade (umidade, teor de cinzas, matérias voláteis, carbono fixo e poder calorífico) de 9 marcas de carvão produzidas no estado do Rio Grande do Sul e disponíveis no mercado varejista de Porto Alegre, RS.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Carvão Vegetal

Genericamente, o carvão é o produto sólido (rico em carbono) obtido quando a biomassa – como madeira, folhas ou outros resíduos de biomassa –, é levada a altas temperaturas em fornos com pouca ou nenhuma quantidade de ar (LEHMANN e JOSEPH, 2009). De forma mais técnica, mas ainda genérica, o carvão é o produto da decomposição térmica da matéria orgânica em atmosfera carente de gás oxigênio (O_2), a temperaturas entre 400 e 700 °C, processo denominado como *pirólise* ou *carbonização*. Além de carvão, a pirólise da biomassa produz gases não condensáveis (como CO_2 , CH_4 , CO e H_2) e gases condensáveis (alcatrão vegetal, bio-óleo ou licor pirolenhoso) (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2009).

Segundo Peacocke (1994), a variação dos parâmetros relacionados à biomassa, a operação do reator de pirólise e às condições de recuperação dos produtos finais conduz a diferentes tipos de carvão, com diferentes características físico-químicas – carbono fixo, teor de matérias voláteis, cinzas, densidade, resistência mecânica, granulometria, poder calorífico, teor de enxofre etc – as quais possuem valores desejáveis a depender da utilização do carvão. Além de afetar a qualidade do carvão, a variação dos parâmetros reacionais de pirólise também maximiza ou minimiza a produção de carvão e dos demais subprodutos da pirólise.

Para maximizar a produção de carvão, a biomassa deve ser submetida a processos de pirólise lenta, com temperaturas da ordem de 350 °C a 600 °C em atmosfera empobrecida de oxigênio (O_2) (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2009). Segundo Boateng (2014), a pirólise lenta caracteriza-se por possuir uma taxa de aquecimento branda (< 100 °C/s) no forno e um elevado

tempo de residência, variável esta que usualmente varia de 3 a 7 dias, a depender da velocidade de circulação e exaustão dos gases da pirólise, geometria e tipo do forno, disposição da biomassa no forno e outros fatores, que influenciam na cinética das reações de pirólise.

Quando se menciona a pirólise lenta, não se pode deixar de fazer uma citação à pirólise rápida de biomassa. As duas principais diferenças entre a pirólise rápida de biomassa e a pirólise lenta são a taxa de aquecimento e o tempo de residência no reator, variáveis que influenciam fortemente na fração de produtos obtida ao término do processo. Enquanto na pirólise lenta busca-se maximizar a produção de carvão, na pirólise rápida busca-se maximizar a produção de bio-óleo, o que é alcançado com tempos de residência no reator bastante reduzidos (da ordem de alguns segundos) e com taxas de aquecimento superiores a 1000 °C/s (BOATENG, 2014).

Ainda segundo Boateng (2014), existem desafios a serem contornados em torno do bio-óleo produzido a partir da pirólise rápida, de forma a obter produtos estáveis e com características físico-químicas conhecidas, que permitam seu posterior refino para obtenção de produtos químicos desejáveis; tal área de estudo e mercado ainda está em desenvolvimento, principalmente em países como Estados Unidos, Canadá e Alemanha. De outro lado, o carvão é um produto secular com mercado bem estabelecido.

2.1.1 *Classificação do Carvão*

A existência de muitos nomes para designar diferentes tipos de carvão força o estabelecimento de um sistema de classificação a fim de evitar equívocos.

Ao consultar a literatura sobre carvão no idioma inglês, há uma série de vocábulos para designar diferentes tipos de carvão vegetal, como por exemplo, *char*, *amorphous carbon*, *charcoal*, *activated carbon*, *black carbon*, *biochar*, *AgricharTM* etc, existindo também o termo *coal* para designar o carvão mineral.

Quando se está no idioma português, a terminologia empregada nesta área praticamente se resume aos vocábulos “carvão vegetal”, “carvão ativado” e “carvão mineral”⁴, havendo ainda

⁴ De forma genérica, quando a literatura em português se refere a uma massa de carbono resultante de uma reação química, a expressão genérica “carvão” é utilizada. O neologismo “biocarvão” é encontrado, por vezes, para designar o *biochar*, como em Cortez et al. (2009). Contudo, tal utilização não é unanimidade na literatura em português.

o inconveniente de formar o texto com composição de duas ou mais palavras, enquanto no idioma inglês há um único vocábulo para tanto.

Não raro, pela necessidade de evitar dupla interpretação ou ainda para deixar a redação de forma mais direta, os vocábulos em inglês são incorporados pelos autores brasileiros na literatura sobre carvão em português, como é o caso de *char* e *biochar*, utilizados, por exemplo, em Barbieri (2013), Schena (2015) e Leal (2015).

Lehmann e Joseph (2009) dedicam um capítulo inteiro de seu livro *Biochar for Environmental Management* sobre a necessidade de se estabelecer um sistema de classificação para o *biochar*⁵, pesquisando as definições e normas existentes para carvão vegetal e propondo um sistema de classificação para o *biochar*.

A FAO (1983) distinguiu o carvão vegetal de acordo com a aplicação, se industrial ou doméstica, tanto no uso como combustível ou como agente redutor, conforme Tabela 2.1, de acordo com suas propriedades físico-químicas.

Tabela 2.1. Classificação do carvão vegetal utilizado como combustível ou agente redutor (FAO, 1983).

Aplicação	Carbono fixo (%)	Matérias voláteis (%)	Teor de cinzas (%)	Densidade aparente (kg m ⁻³)
Industrial	60-80	15-20	3-5	180-200
Doméstica	60-80	20-25	<5	Não especificado

Em 2017, a FAO considerou que *biochar* é “o carvão vegetal em que, de acordo suas propriedades inerentes, há consenso científico de que sua aplicação em determinado solo possibilite, simultaneamente, o sequestro sustentável de carbono e a melhoria das propriedades do solo”.

A *International Biochar Initiative* (IBI, 2017) distingue o *biochar* do carvão vegetal considerando que, enquanto o carvão vegetal é usado principalmente como combustível, o *biochar* é o carvão vegetal produzido e utilizado fundamentalmente com o objetivo de ser utilizado como um aditivo de solos, de forma a melhorar suas propriedades e reduzir emissões de GHG (*greenhouse gases* – gases do efeito estufa).

⁵ O livro de Johannes Lehmann e Stephen Joseph (2009) gravita em torno do *biochar*, o qual será visto ser um tipo de carvão vegetal utilizado em aplicações específicas.

Neste contexto, considerando as diferentes classificações apresentadas na literatura, a Tabela 2.2 sintetiza uma classificação para os possíveis produtos obtidos da carbonização da matéria orgânica de acordo com sua aplicação, onde cada termo, naturalmente, pode subdividir-se em outras subclassificações mais específicas.

Tabela 2.2. Sumário de classificações para o carvão.

Termo em inglês	Termo em português	Definição
<i>Char</i>	Resíduo carbonoso ⁶	Resíduo rico em carbono obtido na pirólise de qualquer combustível
<i>Charcoal</i>	Carvão vegetal	Produto rico em carbono obtido da pirólise da biomassa, cuja aplicação será a utilização como combustível ou agente redutor
<i>Biochar</i>	Biocarvão	Produto rico em carbono obtido da pirólise da biomassa, cuja aplicação será a utilização como corretivo de solos
<i>Activated carbon</i>	Carvão ativado	Carvão ⁷ que passou por um processo de ativação. É caracterizado por possuir elevada área superficial, alto teor de carbono e elevada porosidade, sendo utilizado como adsorvente, catalisador ou suporte (ZANELLA, 2015).

Diante do fato de que a produção brasileira de carvão vegetal está fortemente associada ao fornecimento de carvão para uso siderúrgico, e também considerando que o Rio Grande do Sul concentra sua produção de carvão para o fornecimento de combustível para uso doméstico, principalmente no preparado de assados, este trabalho concentrará o estudo da cadeia de carvão, e suas propriedades, no bojo dessas finalidades.

⁶ De forma genérica.

⁷ Tanto o carvão mineral como o carvão vegetal podem passar por processo de ativação.

2.2 Pirólise de Biomassa

“A pirólise é um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas relativamente baixas (500-800 °C) em atmosfera não oxidante, dando lugar a formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis (licor pirolenhoso). As proporções desses compostos dependem do método de pirólise empregado, dos parâmetros do processo e das características do material a ser tratado” (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2009).

O processo de pirólise é um complexo conjunto de reações químicas e, considerando a composição heterogênea da biomassa, sua modelagem é de difícil realização. Para realizar seu estudo, é comum dividir o processo de pirólise em duas macroetapas: uma fase endotérmica e uma fase exotérmica, as quais serão apresentadas e discutidas posteriormente (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012; CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2009; LEHMANN e JOSEPH, 2009).

As combinações possíveis entre as variáveis relacionadas à biomassa utilizada e às condições de pirólise são tão altas que é muito difícil prever as características do carvão produzido (LEHMANN e JOSEPH, 2009). Essas variáveis podem ser agrupadas em três grandes dimensões: parâmetros relacionados à biomassa, parâmetros de operação do reator de pirólise e condições de recuperação dos produtos finais, conforme detalhado na Tabela 2.3 a seguir (PEACOCKE, 1994).

Tabela 2.3. Principais parâmetros de processo que afetam o rendimento e a composição dos produtos da pirólise de biomassa (PEACOCKE, 1994).

Grupo	Variável
Biomassa	<ul style="list-style-type: none">• Pré-tratamento: aditivos, teor de cinzas, umidade e composição química;• Densidade;• Tamanho das partículas (granulometria);• Fator de forma das partículas;• Calor específico, condutividade térmica e permeabilidade;• Outras propriedades intrínsecas da biomassa.

Grupo	Variável
Operação do reator	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de pirólise; • Tempo de residência dos produtos gasosos; • Temperatura dos produtos gasosos; • Taxa de aquecimento da biomassa; • Coeficiente de transferência de calor para a biomassa; • Temperatura de decomposição da biomassa; • Pressão; • Atmosfera do reator (ar, gás inerte etc).
Recuperação do produto final	<ul style="list-style-type: none"> • Taxa de resfriamento dos produtos; • Temperatura de resfriamento.

Da Tabela 2.3, é importante destacar que as variáveis pertencentes ao grupo da biomassa são controláveis somente até determinado ponto, diferentemente das variáveis pertencentes aos demais grupos (PEACOCKE, 1994). Em algumas situações, determinadas variáveis características da biomassa podem ser encaradas como distúrbios no reator de pirólise.

Conforme introduzido anteriormente, as condições reacionais da pirólise podem ser direcionadas para a maximização de um ou outro produto, como o carvão ou o bio-óleo. As duas principais diferenças entre a pirólise rápida de biomassa e a pirólise lenta⁸ são a taxa de aquecimento e o tempo de residência no reator, variáveis estas que em conjunto influenciam fortemente na fração de produtos obtida ao término do processo (BOATENG, 2014). A Tabela 2.4 apresenta as principais diferenças entre a pirólise lenta e rápida de biomassa.

⁸ Neste trabalho, o termo “pirólise”, isoladamente, refere-se à pirólise lenta ou carbonização.

Tabela 2.4. Comparação da pirólise lenta com a pirólise rápida de biomassa (BOATENG, 2014) e (BALAT, KIRTAY, *et al.*, 2009).

Característica	Pirólise Lenta	Pirólise Rápida
Produto de maior interesse	Carvão vegetal	Bio-óleo
Subprodutos	Fração condensável (alcatrão e extrato pirolenhoso ⁹) e gases não condensáveis (CO ₂ , CH ₄ , CO, H ₂)	Carvão vegetal ¹⁰ (geralmente na forma de pó) e gases não condensáveis (CO ₂ , CH ₄ , CO, H ₂)
Taxa de aquecimento	< 100 °C/s	> 1000 °C/s
Tempo de residência no reator	Da ordem de horas ou dias	Da ordem de segundos
Matéria-prima	Essencialmente madeira, na forma de lenha	Qualquer biomassa, geralmente alimentada no reator em pequenas partículas
Reator	Tipicamente batelada (fornos)	Reatores contínuos (leito fixo ou fluidizado)
Presença de catalisador	Não	Há rotas catalíticas e não catalíticas
Controle e automação do processo	Usualmente pouca ou nenhuma	Imprescindível para a condução do processo

De uma forma simplificada, além do tipo de biomassa utilizada, pode-se afirmar que os principais parâmetros que têm influência direta no processo de pirólise são (MARTIN, 1989):

- temperatura;
- tempo de residência;
- taxa de aquecimento;
- pressão;
- tipo de atmosfera;
- uso de catalisadores.

⁹ O pirolenhoso (nome popular) é composto principalmente por fenóis, álcoois e ácidos carboxílicos.

¹⁰ No caso da pirólise rápida, o carvão vegetal é usualmente denominado de *biochar*.

As seções a seguir detalharão os aspectos relacionados à matéria-prima para pirólise, as fases do processo pirolítico, reações químicas envolvidas e a importância das principais variáveis de processo, lembrando que, conforme afirmado anteriormente, este trabalho tem como enfoque a pirólise lenta de biomassa (ou carbonização), cujo objetivo central é a produção de carvão.

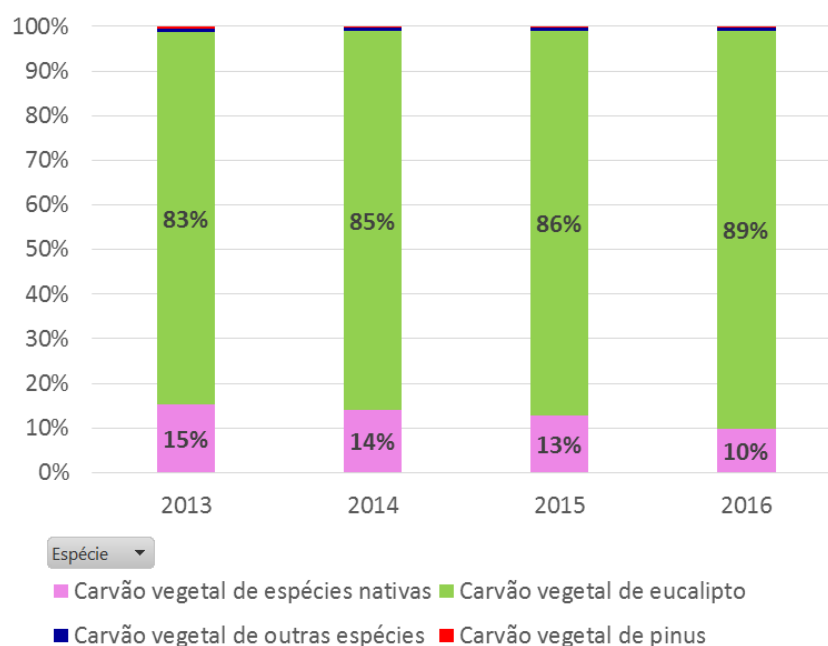
2.2.1 Características da Matéria-Prima

A qualidade do carvão está intrinsecamente associada ao tipo de biomassa utilizada. Muitos estudos buscam estabelecer relações de causa-efeito ou simplesmente encontrar associações estatísticas entre características da biomassa e do carvão produzido, como por exemplo: densidade do carvão *versus* densidade da biomassa; carbono fixo do carvão *versus* teor de lignina da biomassa etc (SOARES, BIANCHI, *et al.*, 2014; ARAÚJO, TRUGILHO, *et al.*, 2016; CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2009; LEHMANN e JOSEPH, 2009).

Em virtude de o cenário brasileiro estar fortemente calcado na produção de carvão a partir da madeira¹¹ (IBGE, 2016), este trabalho dará maior ênfase aos estudos nacionais realizados sobre as características de espécies florestais encontradas no Brasil e sua influência na produção de carvão.

Desde o ano de 2013, o IBGE passou a incluir nos dados da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS) os dados referentes à espécie florestal de origem do carvão produzido. Os dados estão apresentados na Figura 2.1.

¹¹ Exceção à produção de carvão ativado.

Figura 2.1. Produção de carvão por espécie florestal no Brasil (IBGE, 2018).

A Figura 2.1 revela que praticamente 90% da produção de carvão no Brasil é oriunda de florestas plantadas de eucalipto, o que justifica a grande concentração de estudos que investigam as propriedades desejáveis do eucalipto para maximizar e melhorar a produção de carvão. As principais espécies de eucalipto utilizadas no Brasil para a plantação de florestas energéticas são *E. grandis*, *E. saligna*, *Corymbia citriodora*, *E. camaldulensis* e *E. urophylla*, assim como seus híbridos (SANTOS, 2010).

As Figuras 2.2 e 2.3 apresentam, respectivamente, a produção nacional de lenha e toras¹² de eucalipto e a distribuição da produção por unidade da federação.

¹² Exceto para celulose.

Figura 2.2. Produção de lenha de eucalipto e tora de eucalipto (exceto para celulose) no Brasil, em milhões de m³ (IBGE, 2018).

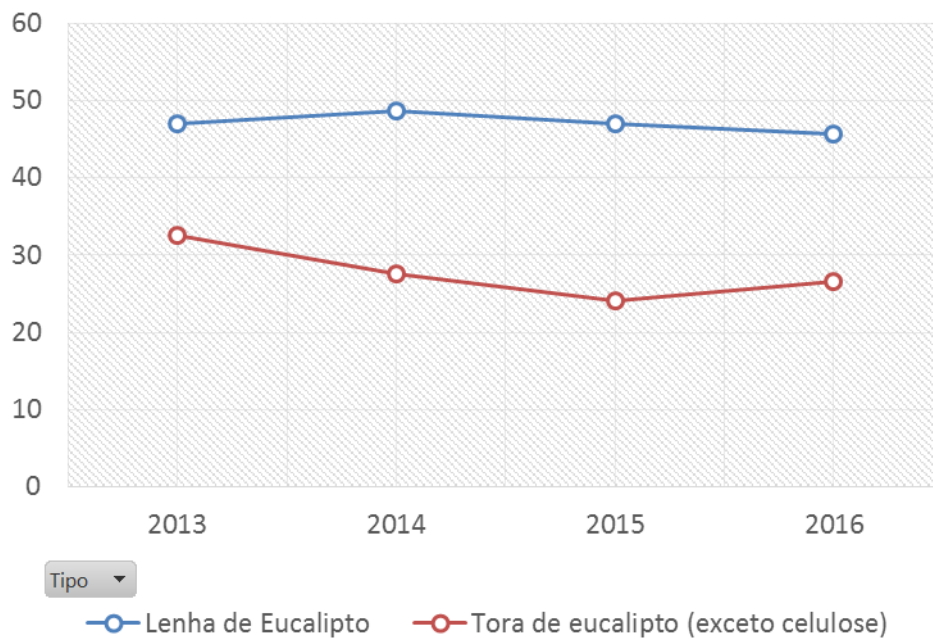
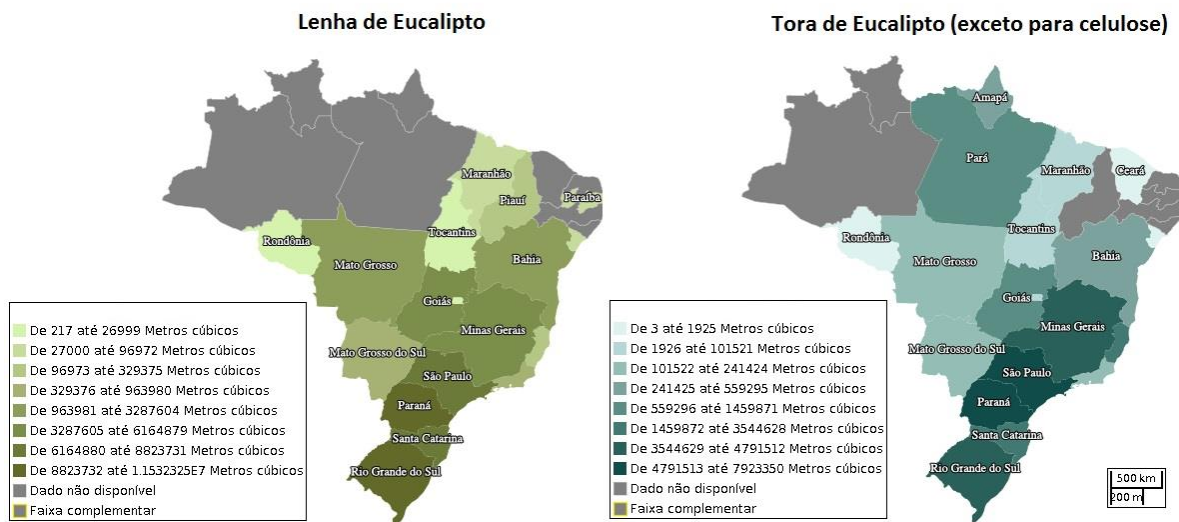


Figura 2.3. Produção de lenha de eucalipto e tora de eucalipto (exceto para celulose), por unidade da federação, no ano de 2016 (IBGE, 2018).



As próximas seções discorrem sobre as principais propriedades e características da matéria-prima desejáveis para a produção de carvão.

2.2.1.1 Densidade Básica da Madeira

A densidade básica da madeira é a relação entre a massa de madeira seca por unidade de volume. Junto com o teor de lignina, é a variável referencial para a seleção de espécies de madeira para a produção de carvão. Grande parte dos autores constaram haver uma correlação positiva entre a densidade da madeira e a densidade do carvão produzido – portanto, sendo melhor a qualidade do carvão (SANTOS, 2010; CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012; BRITO, BARRICHELO, *et al.*, 1982; CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2009). Além de ser função da espécie florestal, a densidade básica da madeira é uma função da idade da árvore (SOARES, BIANCHI, *et al.*, 2014; JUNIOR, MONTALVÃO, *et al.*, 2014; SANTOS, 2010).

Segundo Carneiro *et al.* (2012), as vantagens para se utilizar madeiras com densidade mais elevada na produção de carvão são:

- maior quantidade de energia por unidade de volume;
- redução dos custos de colheita e transporte, em função do menor volume;
- aumento da capacidade de produção;
- madeira mais densa produz carvão mais denso;
- maior concentração de carbono fixo por unidade de volume.

De um modo geral, a recomendação é a utilização de madeira com maior densidade básica (NEVES, SANTOS, *et al.*, 2014). Segundo Carneiro *et al.* (2012), a densidade básica da madeira deve ser superior a 500 kg/m³. A Tabela 2.5 apresenta a densidade de algumas espécies de eucalipto.

Tabela 2.5. Densidade básica de diferentes espécies de eucalipto (IWAKIRI, MATOS, *et al.*, 2013).

Espécie	Densidade (kg/m³)
<i>Eucalyptus grandis</i>	436
<i>Eucalyptus saligna</i>	687
<i>Eucalyptus globulus</i>	564
<i>Eucalyptus viminalis</i>	617
<i>Eucalyptus dunii</i>	561
<i>Eucalyptus robusta</i>	577
<i>Eucalyptus phaeotricha</i>	584
<i>Eucalyptus deanei</i>	571
<i>Eucalyptus pellita</i>	597

Ainda que, nacionalmente, o eucalipto seja a espécie predominante na produção de carvão, no estado do Rio Grande do Sul é bastante usual encontrar carvão para uso doméstico produzido a partir de Acácia Negra, uma das espécies florestais de destaque no estado, uma vez que da casca da acácia extrai-se, principalmente, o tanino (SCHNEIDER, FLEIG, *et al.*, 2001). A acácia notabiliza-se por ter densidade de 555 a 630 kg/m³, sendo superior à densidade do eucalipto, alçando-a à uma posição vantajosa competitiva em relação ao eucalipto (FOELKEL, 2008).

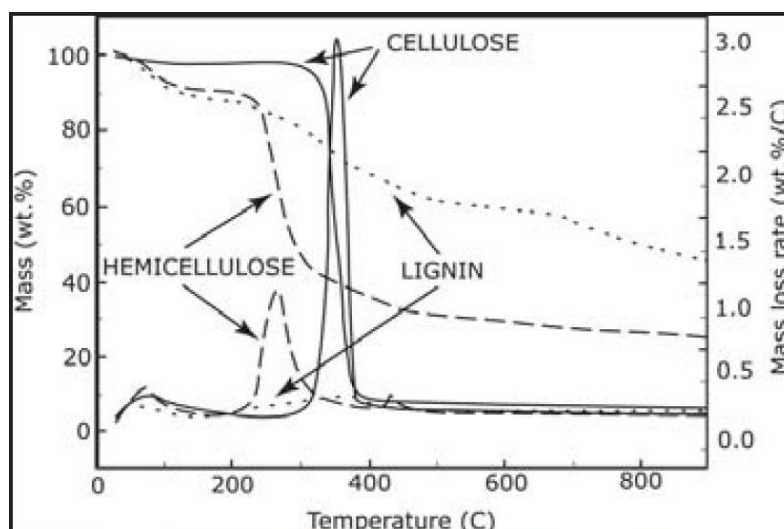
2.2.1.2 *Teores de Lignina, Celulose e Hemicelulose*

A análise química elementar da madeira (base seca), de uma forma geral, aponta que a madeira é constituída aproximadamente por 50% de carbono, 6% de hidrogênio e 44% de oxigênio, em massa. Independente da espécie, das diferenças genéticas ou da idade, essa composição é aproximadamente constante (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012). Poucos são os estudos que associam parâmetros de produção ou qualidade do carvão com a composição elementar da madeira; todavia, vários são os estudos que fazem tal associação com a composição estrutural da madeira.

Dentre os compostos estruturais que formam a madeira, as frações mais significativas em massa são os carboidratos, principalmente celulose e hemiceluloses, e as substâncias fenólicas, como a lignina (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012). Toda biomassa é composta principalmente pela mistura de três compostos: hemicelulose, celulose e lignina (BOATENG, 2014).

Como será visto posteriormente, a carbonização ocorre em temperaturas superiores a 400 °C e, destarte, a lignina é o composto estrutural da madeira que possui maior associação com o rendimento na produção de carvão, uma vez que possui maior estabilidade térmica em relação à celulose e à hemicelulose, como mostrado na análise termogravimétrica da Figura 2.4 (LEHMANN e JOSEPH, 2009). De acordo com Neves *et al.* (2014), para a produção de carvão, buscam-se sempre espécies com maiores teores de lignina.

Figura 2.4. Análise termogravimétrica da pirólise da lignina, hemicelulose e celulose (YANG, YAN, *et al.*, 2007).



“A lignina é uma macromolécula formada pela polimerização de três álcoois precursores que dão origem às unidades fenilpropanoides denominadas siringil, guaiacil e hidroxifenil. A proporção molar das unidades fenilpropanoides, hidroxifenil, siringil e guaiacil, na planta, depende principalmente do grupo vegetal. Em madeiras de folhosas existe uma mistura de quantidades significativas de subestruturas guaiacil e siringil” (ARAÚJO, TRUGILHO, *et al.*, 2016). Este autores concluíram que a relação siringil/guaiacil da lignina da madeira associa-se, respectivamente, ao teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e densidade do carvão vegetal.

A relação siringil/guaiacil da lignina apresenta melhor relação funcional com o rendimento gravimétrico¹³ em carvão vegetal seguida do teor de hemiceluloses, celulose, densidade básica e extrativos, onde clones com *menor* relação siringil/guaiacil apresentaram os melhores rendimentos gravimétricos em carvão vegetal (AYRES, SANTOS, *et al.*, 2014). A relação siringil/guaiacil mostrou-se como o melhor parâmetro para qualidade da madeira avaliado com base no rendimento da carbonização, sendo que o teor de lignina total tem implicação direta no rendimento gravimétrico do carvão vegetal (GOUVÊA, TRUGILHO, *et al.*, 2015). A relação siringil/guaiacil, em diferentes espécies de eucalipto e também para diferentes idades, pode variar de 0,5 a 4,3 (SANTOS, 2010).

¹³ Definido como a relação entre a massa de carvão produzida e a massa de madeira seca alimentada no forno.

Uma provável explicação para que uma menor relação siringil/guaiacil favorece à produção de carvão recai no fato de que o grupo guaiacila possui maior resistência à degradação térmica (SANTOS, 2010; CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012). Destarte, a busca por espécies florestais com maior teor de lignina e menor relação siringil/guaiacil é desejável para maximizar a produção e qualidade do carvão. A Figura 2.5 a seguir mostra os principais radicais da molécula de lignina e a Figura 2.6 apresenta uma estrutura proposta para a referida molécula.

Figura 2.5. Principais radicais da molécula de lignina (SANTOS, 2010).

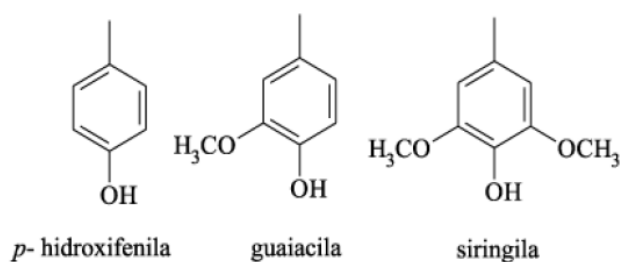
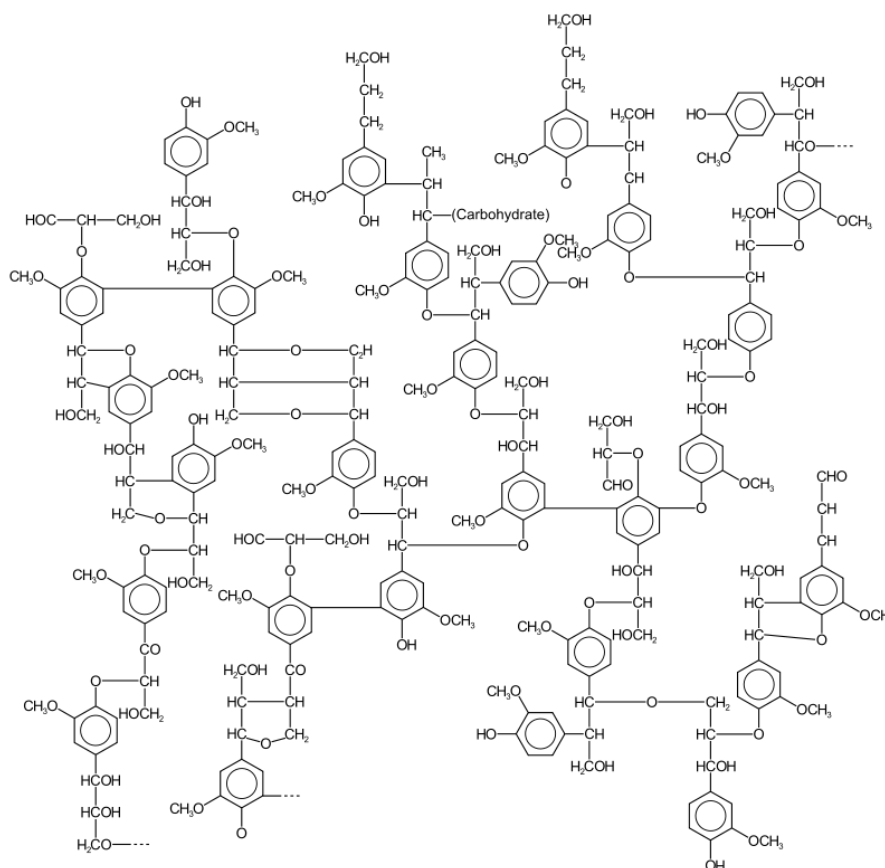


Figura 2.6. Uma estrutura proposta para a lignina (AZADI, INDERWILDI, *et al.*, 2013).



2.2.1.3 *Umidade*

Diferentemente da densidade da madeira e de sua composição estrutural – variáveis inerentes à espécie florestal ou influenciadas pelo manejo florestal –, a umidade da madeira constitui importante variável com forte influência na carbonização (e qualidade do carvão) mas que pode ser monitorada e controlada depois do corte da floresta e antes de sua carbonização.

De uma forma geral, as reações de carbonização têm início a partir de 400 °C de temperatura, sendo que antes de atingir tal temperatura, a madeira passará por um processo de perda de umidade dentro do forno de carbonização.

De acordo com Carneiro et al. (2012), uma medida necessária e de suma importância para a carbonização é a secagem prévia da madeira, preferencialmente de forma natural, sendo que a secagem da madeira confere as seguintes vantagens à produção de carvão:

- menor tempo gasto na carbonização;
- maior rendimento gravimétrico do forno;
- maior resistência mecânica e tamanho de grão do carvão;
- menor energia gasta no transporte da lenha e carregamento de fornos;
- menor geração de finos de carvão.

Segundo Carneiro et al. (2012) e Barcellos (2014), de uma forma geral, a madeira para ser carbonizada deve ter sua umidade entre 30 e 40% em base seca, sendo que dentre todas as variáveis da madeira, o diâmetro das peças constitui o maior dificultador para a secagem. Peças com maior diâmetro possuem, em média, maior umidade e maior dificuldade para a secagem (SANTOS, 2010). O rendimento gravimétrico é uma das variáveis que é mais afetada pelo aumento da umidade da madeira a ser carbonizada, sendo que o aumento da umidade faz diminuir o rendimento gravimétrico em carvão (CANAL, MAGALHÃES, *et al.*, 2014).

A Tabela 2.6 apresenta um sumário de resultados experimentais para diferentes híbridos de eucalipto com as características do carvão produzido (SOARES, BIANCHI, *et al.*, 2014). Observa-se na referida tabela que a densidade da madeira cresce em função da idade de corte da árvore, a qual também enriquece em teor de carbono, contribuindo para o aumento do rendimento gravimétrico na produção de carvão.

Tabela 2.6. Valores médios da densidade básica e características químicas da madeira, rendimentos gravimétricos e características químicas do carvão (SOARES, BIANCHI, *et al.*, 2014).

	Madeira			Carvão vegetal			
	3 anos	5 anos	7 anos		3 anos	5 anos	7 anos
d (g cm ⁻³)	0,37	0,44	0,54	RGC (%)	31,61	30,55	33,06
Lig* (%)	21,52	21,52	21,97	RLP (%)	40,22	44,19	38,55
Extrativos (%)	8,26	9,44	9,43	RGNC (%)	28,18	25,26	28,39
Holo (%)	73,47	72,60	72,42	TMV (%)	20,08	18,85	22,82
Celulose (%)	43,58	42,30	42,70	TCF (%)	78,39	80,29	76,85
Hemi (%)	29,89	30,30	29,72				
TCZ (%)	0,41	0,31	0,18	TCZ (%)	1,53	0,87	0,33
PCS (kcal kg ⁻¹)	4454	4547	4385	PCS (kcal kg ⁻¹)	7062	7215	7193
C (%)	43,97	44,49	45,60	C (%)	81,28	81,60	79,81
H* (%)	6,18	6,18	6,17	H (%)	3,27	3,29	3,42
N (%)	0,27	0,22	0,19	N (%)	0,25	0,18	0,16
S (%)	0,38	0,36	0,29	S (%)	0,04	0,04	0,02
O (%)	49,22	48,75	47,75	O (%)	15,16	14,89	16,60
C/H	7,12	7,20	7,39	C/H	24,84	24,82	23,43
S/G	3,50	3,20	2,30				

*Propriedades sem diferença significativa entre as idades: d = densidade básica; Lig = lignina; Holo = holocelulose; Hemi = hemiceluloses; TCZ = teor de cinzas; PCS = poder calorífico superior; S/G = relação siringil-guaiacil; RGC = rendimento gravimétrico em carvão vegetal; RLP = rendimento gravimétrico em líquido pirolenhoso; RGNC = rendimento gravimétrico em gases não condensáveis; TMV = teor de materiais voláteis; e TCF = teor de carbono fixo.

2.2.2 Fases do Processo de Carbonização

Tipicamente, o processo de carbonização ocorre em duas fases: uma fase inicial endotérmica, a temperaturas mais brandas; e uma fase posterior exotérmica, a maiores temperaturas. Muitos autores estabelecem intervalos de temperatura para tipificarem cada etapa do processo de carbonização (CETEC, 1982; BALAT, *et al.*, 2009; BOATENG, 2014; CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012; CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2009; NOUMI, BLIN, *et al.*, 2014). Todavia, tais intervalos variam de acordo com cada tipo de biomassa carbonizada e, principalmente, de acordo com a taxa de aquecimento – que influencia fortemente na fração de produtos de cada etapa (BALAT, KIRTAY, *et al.*, 2009).

Para a carbonização da madeira, uma divisão e descrição de etapas bastante utilizada, salvo pequenas variações, é aquela adotada pela Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC, 1982), estabelecida por Petroff & Doat (1978).

O processo de carbonização pode ser dividido em quatro fases distintas:

- I. **secagem:** fase endotérmica que consiste na vaporização da água contida na madeira sob as formas higroscópica (no interior das fibras, até 110 °C), adsorvida pelas paredes das células (de 110 °C a 150 °C) e quimicamente ligada (de 150 a 200 °C);

- II. **pré-Carbonização:** fase endotérmica do processo na qual uma fração do licor pirolenhoso e pequenas quantidades de gases não condensáveis são produzidas – de 180 a 200 °C até 250 a 300 °C;
- III. **carbonização:** período caracterizado por reações exotérmicas, onde a maior parte do alcatrão e pirolenhoso são produzidos – até 380 °C;
- IV. **fase final:** exotérmica, com aumento de temperatura (acima de 300 °C) caracterizado pelo aumento de teor de carbono no carvão e menor produção de voláteis. *A priori*, quanto maior a temperatura nesta fase, maior o teor de carbono fixo.

A Tabela 2.7 apresenta as fases da carbonização, composição dos produtos de cada fase e intervalos de temperatura propostos por Petroff & Doat (1978).

Tabela 2.7. Evolução da carbonização (PETROFF e DOAT, 1978) citado em (CETEC, 1982).

Fase da carbonização	Secagem Água	Produção gases oxigenados	Início da produção de hidrocarbonetos	Fase dos hidrocarbonetos	Dissociação	Fase do Hidrogênio
Temperatura (°C)	150-200	200-280	280-380	380-500	500-700	700-900
Teor de Carbono (% mássica)	60	68	78	84	89	91
Gases não condensáveis (%)						
CO ₂	68,0	66,5	35,5	31,5	12,2	0,5
CO	30,0	30,0	20,5	12,3	24,6	9,7
H ₂	0,0	0,2	6,5	7,5	42,7	80,9
Hidrocarbonetos	2,0	3,3	37,5	48,7	20,5	8,9
PCS (kcal/Nm ³)	1100	1210	3920	4780	3630	3160
Constituintes condensáveis dos voláteis	Vapor d'água	Vapor d'água + ácido acético	Ácido acético + metanol + alcatrão leve	Alcatrão pesado	Alcatrão	---
Quantidade dos voláteis	Muito pequena	Pequena	Importante	Importante	Pequena	Muito pequena

2.2.2.1 Modelos Cinéticos

Para cada etapa do processo de carbonização, diversas reações químicas ocorrem, as quais também diferem seja em função das condições de operação do forno de carbonização, seja em função da madeira carbonizada.

Alguns autores buscaram estabelecer associações estatísticas, utilizando modelos de regressão, entre variáveis de processo (temperatura de carbonização, tempo de residência etc), ou entre parâmetros da madeira (umidade, espécie florestal, diâmetro das peças, idade da

árvore, teor de lignina, relação siringil/guaiacil etc) com os parâmetros de qualidade do carvão produzido (SOARES, BIANCHI, *et al.*, 2014; AYRES, SANTOS, *et al.*, 2014; CANAL, MAGALHÃES, *et al.*, 2014).

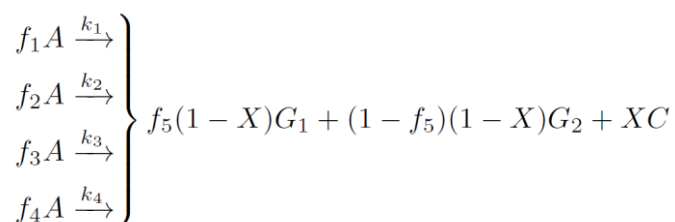
Outros autores buscaram investigar e propor um modelo cinético para a carbonização, com o ajuste de parâmetros cinéticos. Larfeldt et al. (2000) avaliaram a aderência de quatro modelos cinéticos (Figuras 2.7, 2.8, 2.9 e 2.10) propostos na literatura com dados experimentais de pirólise de madeira de Bétula¹⁴, a 700 °C em atmosfera inerte, e concluíram que somente um modelo cinético teve resultados compatíveis com os resultados experimentais, sugerindo que a avaliação também deveria ser repetida para outras dimensões de madeira.

É importante salientar que dada a imensa e inerente variabilidade da biomassa, sempre se deve ter cautela ao selecionar e aplicar um modelo (seja estatístico, seja cinético) para descrever a pirólise. Deve-se sempre investigar, cautelosamente, com qual tipo de biomassa e sob quais condições reacionais o modelo foi desenvolvido, antes de utilizá-lo, de forma a não obter resultados absurdos ou completamente inaplicáveis.

2.2.2.1.1 Modelo A: Quatro reações paralelas e independentes

O Modelo A parte do pressuposto que a conversão de madeira em alcatrão, gases não condensáveis e carvão ocorrem de forma independente e paralelas entre si, com cinéticas distintas, sendo que cada fração de madeira (f_1, \dots, f_5) se converte somente em um produto, sendo X a conversão em carvão. Os dados cinéticos são obtidos a partir de dados empíricos de perda de massa de madeira e da formação de produtos.

Figura 2.7. Reações do modelo cinético A, onde A : madeira; G_1 : gases não condensáveis; G_2 : alcatrão; C : carvão (GRØNLI, 1996) citado por (LARFELDT, LECKNER e MELAAEN, 2000).

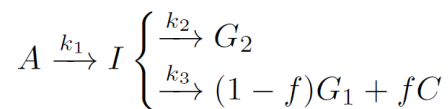


¹⁴ Espécie florestal do hemisfério norte e de climas temperados, do género *Betulaceae*, próxima aos carvalhos *Fagaceae*.

2.2.2.1.2 Modelo B: Uma reação seguida de duas reações concorrentes

Este modelo assume que a madeira se converte em um produto intermediário e, em seguida, duas reações químicas paralelas concorrentes formam, em uma, alcatrão, e na outra, gases não condensáveis e carvão, sendo f a conversão em carvão.

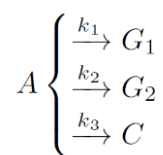
Figura 2.8. Reações do modelo cinético B, onde A : madeira; I : intermediário (não definido); G_1 : gases não condensáveis; G_2 : alcatrão; C : carvão (BROIDO, 1976) e (SHAFIZADEH, 1984), citados por (LARFELDT, LECKNER e MELAAEN, 2000).



2.2.2.1.3 Modelo C: Três reações paralelas concorrentes

O Modelo C prevê a ocorrência de três reações químicas paralelas concorrentes, que formam gás, alcatrão e carvão.

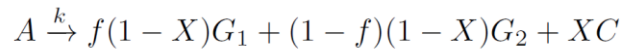
Figura 2.9. Reações do modelo cinético C, onde A : madeira; G_1 : gases não condensáveis; G_2 : alcatrão; C : carvão (CHAN, KELBON e KRIEGER, 1985) citado por (LARFELDT, LECKNER e MELAAEN, 2000).



2.2.2.1.4 Modelo D: Uma única reação

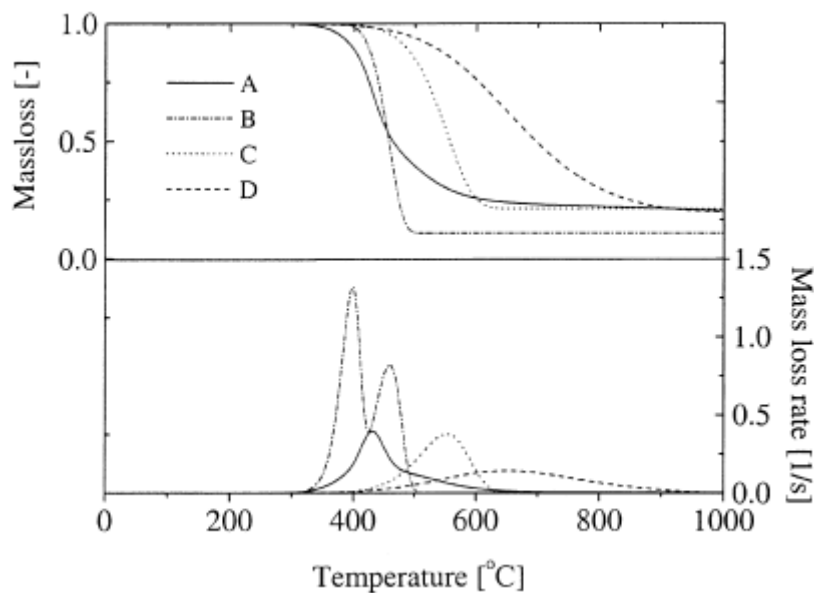
Este é o modelo mais simples proposto para a carbonização. Nele, a madeira converte-se, sob uma única cinética, em carvão, gás e alcatrão, sendo X a conversão em carvão e f a fração de gases não condensáveis.

Figura 2.10. Reação do modelo cinético D, onde A: *madeira*; G_1 : *gases não condensáveis*; G_2 : *alcatrão*; C: *carvão* (GRØNLI, 1996) citado por (LARFELDT, LECKNER e MELAAEN, 2000).



A Figura 2.11 ilustra a perda de massa da madeira calculada com os quatro modelos avaliados.

Figura 2.11. Resultados da modelagem da pirólise de madeira de Bétula a 700 °C e com taxa de aquecimento de 50 °C/min (LARFELDT, LECKNER e MELAAEN, 2000).



Larfeldt, et al. (2000) concluíram que o mecanismo reacional do Modelo A foi o único capaz de prever o início da carbonização à temperatura de 300 °C conforme os dados experimentais.

Blasi (2008) realizou uma densa investigação na literatura sobre modelos cinéticos para pirólise de madeira e biomassa, modelos para a transferência de calor na biomassa durante a pirólise e modelos para reatores de pirólise. Os modelos cinéticos com reações paralelas (análogo aos Modelos A e B), via de regra, explicam melhor a pirólise da biomassa, ao prever conversões de carvão e faixas de temperatura. Contudo, para cada taxa de aquecimento e biomassa utilizada, os modelos podem sofrer variações bruscas ao explicar a pirólise e possuem bons resultados somente em determinadas faixas de temperatura e intervalos de tempo.

2.2.3 *Variáveis de Processo*

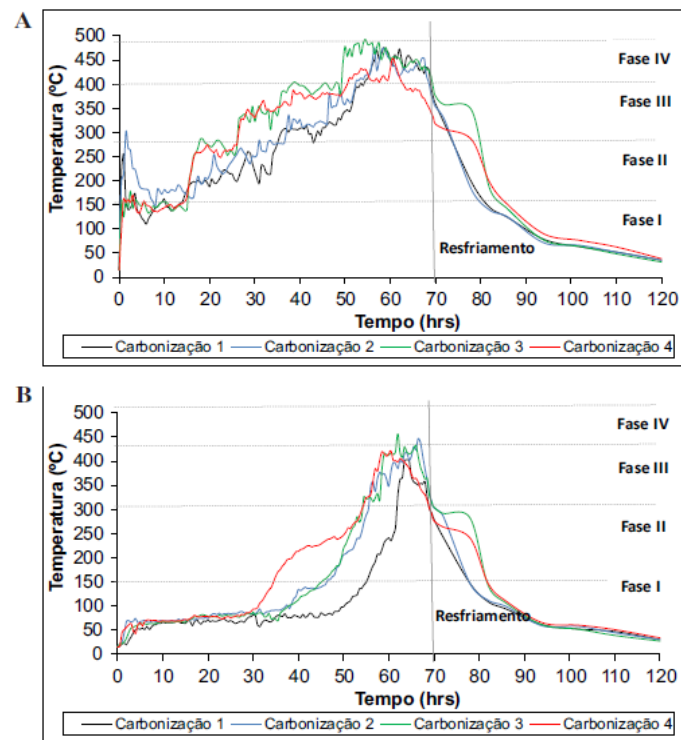
2.2.3.1 *Temperatura*

Segundo CETEC (1982), Boateng (2014) e Carneiro et al. (2012), a temperatura é a variável de processo com maior importância para a carbonização. Conforme fora apresentado na Figura 2.4, a degradação da hemicelulose, celulose e lignina ocorre principalmente a partir de 350 °C. De acordo com Lehmann & Joseph (2009), controlar a temperatura de um forno é de suma importância para a conversão dos produtos desejados da carbonização.

Uma das formas de controlar a carbonização e buscar maximizar o rendimento da produção de carvão é justamente através do controle das faixas de carbonização, em função da temperatura no forno e do tempo de residência, segundo Oliveira et al. (2013). Estes autores realizaram carbonizações de madeira de eucalipto com 7 anos de idade, diâmetro entre 10 e 30 cm, altura de 1,50 a 2,20 m e umidade média (base seca) de 42,50%, em fornos circulares de superfície, conectados a uma fornalha (cuja apresentação será realizada na seção 2.3.3), de forma a traçar perfis térmicos em relação ao tempo, e caracterizar as fases de carbonização.

A Figura 2.12 ilustra os perfis térmicos obtidos, onde o gráfico (A) apresenta o perfil térmico na cúpula do forno e o gráfico (B) o perfil na parede do forno. As fases I, II, III e IV referem-se, respectivamente, a: secagem da madeira (endotérmica); degradação de hemiceluloses e eliminação de gases (endotérmica); degradação da celulose, grande produção de gases e formação do carvão (exotérmica); redução de emissão de gases e aumento na concentração de carbono do carvão (exotérmica).

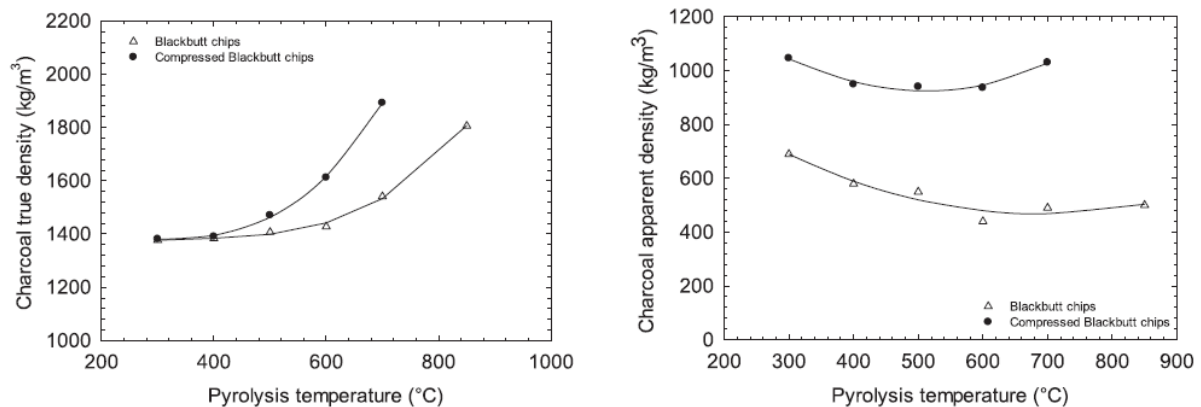
Figura 2.12. Perfis térmicos da carbonização de eucalipto em fornos circulares acoplados a uma fornalha (OLIVEIRA, CARNEIRO, *et al.*, 2013).



O teor de carbono fixo no carvão cresce com o aumento da temperatura de carbonização, enquanto decresce o teor de materiais voláteis. Todavia, isso é acompanhado de uma redução no rendimento e na perda de resistência do carvão (CETEC, 1982; CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012).

A densidade verdadeira do carvão e sua porosidade também aumentam com a elevação da temperatura de carbonização, enquanto a densidade aparente diminui (SOMERVILLE e JAHANSHAH, 2015).

Figura 2.13. Densidade verdadeira e densidade aparente de carvão de eucalipto em função da temperatura de carbonização (SOMERVILLE e JAHANSHAH, 2015).



2.2.3.2 *Tempo de Residência*

Conforme introduzido na seção anterior, o tempo de residência no forno também afeta a produção e qualidade do carvão. Para as reações de carbonização, o tempo de residência normalmente está atrelado ao tipo de forno e sua capacidade, tipo da matéria-prima, taxa de aquecimento e temperatura de carbonização.

O tempo de residência deve ser dimensionado de forma a assegurar que a carga de madeira do forno seja suficientemente carbonizada e o carvão produzido atinja o patamar desejável, principalmente, de carbono fixo.

2.2.3.3 *Taxa de Aquecimento*

A taxa de aquecimento, juntamente com a temperatura, possui impacto significativo principalmente na maximização da formação seja de carvão, seja de alcatrão (ou bio-óleo).

Usualmente, taxas de aquecimento inferiores a 100 °C/s conduzem à carbonização e à maximização na produção de carvão (BOATENG, 2014).

Conforme será visto posteriormente nas tecnologias para produção de carvão, o controle da taxa de aquecimento na maioria dos fornos de carbonização é bastante difícil de ser realizado, razão essa pela qual o enfoque é dado no controle da temperatura dos fornos e não na sua taxa de aquecimento.

2.2.3.4 Pressão

A maior parte das tecnologias de produção de carvão operam a pressão atmosférica, havendo poucos estudos realizados sobre carbonização de madeira sob pressão, ainda que se saiba que a pressão do forno de carbonização também afeta a carbonização.

Resultados experimentais indicam que o aumento da pressão no forno eleva o rendimento em carvão vegetal e eleva a densidade aparente do carvão e o rendimento gravimétrico (GOMES et al., 2013; ROUSSET, FIGUEIREDO, *et al.*, 2011). Quanto à umidade e o teor de carbono fixo, deve-se avaliar conjuntamente a combinação de pressão com temperatura, pois o comportamento dessas variáveis não é monótono com a pressão (ROUSSET, FIGUEIREDO, *et al.*, 2011).

2.3 Tecnologias para Produção de Carvão

A maior parte da produção nacional de carvão vegetal é proveniente de fornos artesanais tipo “rabo quente” (CGEE, 2015). Porém, algumas inovações tecnológicas para se produzir carvão já estão disponíveis, resolvendo em parte os problemas daqueles fornos.

Com exceção da tecnologia Ondatec, todas as demais tecnologias são compostas por reatores batelada. Ou seja, invariavelmente o ciclo de um reator ou forno passa pelas seguintes etapas: carregamento de matéria-prima, carbonização, resfriamento e descarga de carvão vegetal. Somente após a conclusão destas etapas é que o volume do reator estará disponível para um novo ciclo reacional.

É importante destacar que ao término da carbonização não é possível descarregar diretamente o carvão vegetal e deixá-lo em contato com a atmosfera (seja para embalar ou carregá-lo em caminhões), pois, por estar em elevada temperatura, o produto entraria em combustão ao entrar em contato com o oxigênio do ar. Desta forma, os fornos passam sempre por uma etapa de resfriamento posterior ao término da carbonização.

Nos tópicos a seguir, serão apresentadas as principais tecnologias nacionais para produção de carvão vegetal.

2.3.1 *Forno Rabo Quente*

O forno “rabo quente” é caracterizado por possuir baixo custo de instalação, não necessitar de mão-de-obra especializada na sua construção ou manutenção e ser de simples operação. Obviamente, isto não elimina a necessidade de se ter acesso a profissionais com experiência e conhecimento em carbonização a fim de que se alcance rendimentos gravimétricos razoáveis. Porém, estes conhecimentos são basicamente empíricos, ainda mais pelo fato do forno “rabo quente” não possuir qualquer tipo de padronização. Por conta destas facilidades, é o principal forno utilizado por pequenos produtores rurais.

O processo de carbonização é iniciado e controlado de forma totalmente empírica. Para dar ignição no forno, o operador (conhecido como “carvoeiro”) incendeia uma porção de lenha alimentada no forno, próxima às paredes do forno. Normalmente, durante a ignição, a porta de acesso do forno está aberta. A combustão desta porção de lenha é controlada mediante a abertura de orifícios no forno (denominados de “tatus”) para entrada de ar, mostrados na Figura 2.14.

Quando se observa que a energia liberada pela combustão desta porção inicial de lenha é suficiente para iniciar a carbonização da massa total de lenha alimentada no forno, o operador veda o forno com barro e tijolo, impedindo a entrada de ar. O operador detecta este momento de forma visual pela coloração dos gases que saem do forno.

Durante a condução da carbonização, o forno ainda possui orifícios abertos, os quais têm a função de exaurir os gases da carbonização, além de fornecerem, em pequenas seções do forno, uma pouca quantidade de oxigênio – necessária principalmente para manter a temperatura do forno elevada, até se atingir a fase exotérmica da carbonização.

Como os fornos “rabo quente” normalmente estão situados em ambiente aberto, eles estão sujeitos à chuva, ventos e outras intempéries que fazem com que o reator perca energia, podendo em alguns casos interromper as reações de carbonização ou até mesmo danificar ou destruir o forno.

Caso não ocorram imprevistos e a carbonização seja bem-sucedida, o forno é completamente vedado ao término da carbonização e o operador aguarda até o seu resfriamento à temperatura ambiente, para realizar a abertura do forno e descarregar o carvão vegetal. Caso

a abertura do forno seja realizada antes do resfriamento do carvão, o forno incendeia-se e parte do carvão produzido é perdido¹⁵.

O tempo de residência da lenha no forno varia muito, principalmente por conta da temperatura ambiente, regime de ventos, ocorrência de chuva, umidade da lenha alimentada, diâmetro das toras e espécie de madeira a ser pirolisada. Como praticamente a totalidade destas variáveis de processo não é sequer medida, o operador determina o tempo de residência baseado em seus conhecimentos prévios – sendo que usualmente tem-se 3 dias para ocorrência da carbonização e 4 dias dedicados para o resfriamento do forno (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012). O rendimento gravimétrico observado nos fornos “rabo quente” situa-se entre 9 e 30% (FAO, 2017) e a produção estimada, com base nas dimensões usuais dos fornos “rabo quente”, é de 1 tonelada de carvão vegetal por 3 toneladas de madeira.

Figura 2.14. Forno “rabo quente” (FLORESTALENGENHARIA, 2010).



2.3.2 Forno de Encosta e Forno Subterrâneo

Bastante similares aos fornos do tipo “rabo quente”, são construídos recostados em um barranco ou ainda construídos em uma vala no chão, estes últimos sendo fechados usualmente com terra (Figuras 2.15 e 2.16).

Em termos de rendimento gravimétrico, não há muitas informações consistentes se estes fornos conferem maior rendimento que os fornos do tipo “rabo quente”, apesar de possuírem menor perda térmica.

¹⁵ É bastante usual ocorrerem incêndios de fornos nesta etapa.

Figura 2.15. Fornos subterrâneos ou cobertos de terra, em encostas (LEHMANN e JOSEPH, 2009).

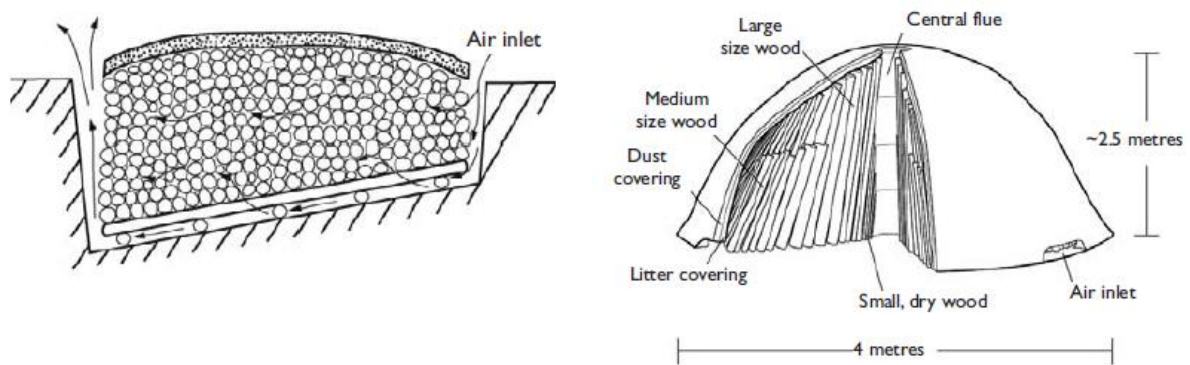


Figura 2.16. Forno subterrâneo (BIOCOAL, 2018).



2.3.3 Forno Circular

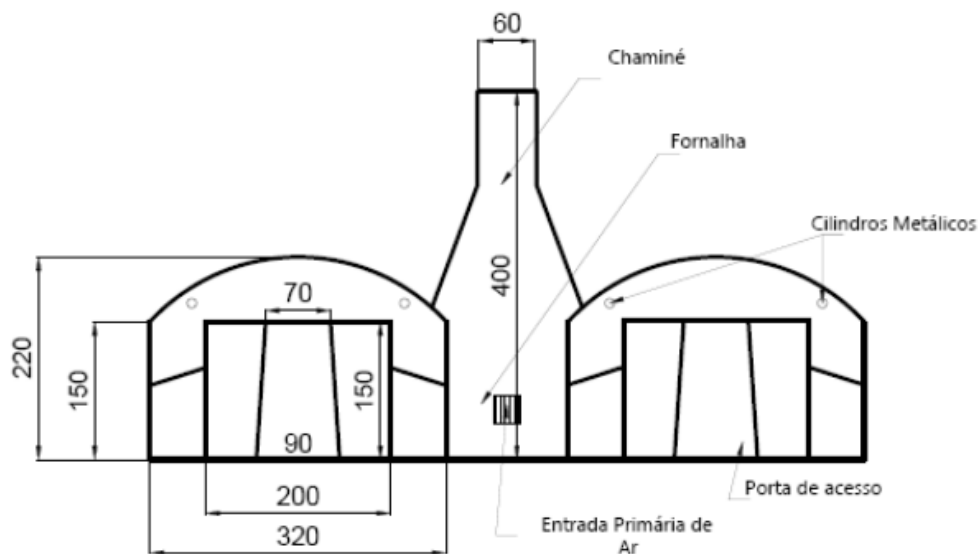
O forno circular, em sua concepção e condução da carbonização, não apresenta significativas diferenças em relação aos fornos “rabo quente”. Seu principal diferencial é que, construído com tijolos cozidos, possui um padrão construtivo dimensional e de material, facilitando as manutenções, a predição de tempo de carbonização, produtividade por forno e produção mensal em uma bateria de fornos (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012). Em alguns casos, são instalados termopares em diferentes pontos do forno a fim de monitorar a temperatura de carbonização.

O forno circular (Figura 2.17) normalmente está presente em pequenos e médios produtores de carvão, sendo que se pode afirmar que, em uma escala de melhoria, é o primeiro degrau acima do forno “rabo quente”.

Existem baterias de fornos circulares dotadas de sistema de canalização e combustão dos gases da carbonização, o que faz reduzir, em média, 90% a emissão de gases metano e monóxido de carbono (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012). Porém, estas são exceções à maior parte dos produtores que utilizam estes fornos.

Tanto nos fornos “rabo quente” como nos fornos circulares, a alimentação de lenha no forno é realizada manualmente pelos carvoeiros, bem como a descarga de carvão vegetal. Em poucos casos, para fornos circulares, há carregamento e descarga mecanizados.

Figura 2.17. Exemplo de desenho de dois fornos circulares acoplados a uma fornalha (medidas em centímetros) (CARNEIRO, LANA, *et al.*, 2012).



2.3.4 Forno Retangular

Se o forno “rabo quente” apresenta sua importância e destaque pelo fato de responder pela maior parte da produção nacional de carvão vegetal, concentrada nos pequenos produtores, o forno retangular tem seu destaque pelo fato de ser o principal forno utilizado pelos grandes produtores de carvão vegetal do Brasil.

“Os fornos retangulares foram implantados visando a semi-mecanização ou a mecanização do processo e, pelas suas dimensões, permitem carbonizar volume de madeira

variável atingindo produção de até 100 m³ de carvão. No entanto, hoje em dia encontram-se fornos com capacidade média de até 700 m³ de madeira, atingindo uma produção média em carvão de 350 m³. Esses fornos apresentam rendimentos gravimétricos em carvão vegetal de 30 a 35%, em média, e são os mais avançados em uso atualmente no país” (CARNEIRO, BARCELLOS, et al., 2012).

Os fornos retangulares geralmente são construídos com tijolos especiais e contam com uma estruturação em concreto armado e aço para sustentação das paredes, bem como portas metálicas, o que permite a alimentação de madeira e a descarga de carvão com máquinas, reduzindo com isso a mão-de-obra na unidade.

O princípio de ignição e condução da carbonização é similar ao forno “rabo quente”, havendo a principal diferença das unidades com fornos retangulares contarem com instrumentação e profissionais treinados e especializados.

“O ciclo médio de carbonização nos fornos retangulares é de 12 dias, sendo 4 dias para carbonizar e 8 dias para resfriar. Para acelerar o processo de resfriamento, podem ser utilizados nebulizadores, injetores de vapores, barreladores, trocadores de calor (gás/ar; gás/água) e outros” (CARNEIRO, BARCELLOS, et al., 2012).

Pelo fato de ser o tipo principal de forno utilizado pelas grandes produtoras de carvão, como Arcelor Mittal, Vallourec, Aperam Bioenergia, Votorantim Siderurgia, Plantar Siderúrgica, Queiroz & Galvão e outras – as quais possuem reflorestamentos, produzem carvão vegetal e utilizam em suas próprias unidades siderúrgicas – a maior parte das inovações e melhorias existentes concentram-se nos fornos retangulares.

A maior parte destas unidades contam com sistema de fornalha para queima dos gases da carbonização, reduzindo as emissões. Algumas destas empresas possuem projetos para aproveitamento de gases para a geração de energia elétrica como a ArcelorMittal (2014), a instalação de trocadores de calor para acelerar o resfriamento dos fornos de acordo com Martins (2014), sistema de automação para gerenciamento e controle da carbonização como a Plantar Siderúrgica (2014) e o aproveitamento dos gases combustos da carbonização para realizar a secagem da madeira (BARCELLOS, 2014).

A Figura 2.18 mostra uma vista aérea de praça de carbonização com fornos retangulares da ArcelorMittal e a Figura 2.19 mostra o carregamento mecanizado de matéria-prima no forno do Grupo Mutum.

Figura 2.18. Vista aérea de praça de carbonização com fornos retangulares (ArcelorMittal).



Figura 2.19. Carregamento mecanizado de matéria-prima no forno (Grupo Mutum).



2.3.5 Fornos Cilíndricos Metálicos

Com a intenção de reduzir o tempo de carbonização, permitir uma produção com maior grau de mecanização e possibilitar a instalação de fornos em um ambiente industrial, os fornos cilíndricos metálicos, com exaustão forçada, possuem a proposta de acelerar as reações de carbonização, alcançando tempos de residência da ordem de 16 h, com o resfriamento do carvão da ordem de 30 h.

Os cilindros metálicos são carregados com lenha, transportados com o auxílio de uma ponte rolante, e acomodados sobre bases, as quais fornecem a energia necessária para iniciar a

carbonização (mediante combustão de lenha). A proposta desses fornos é monitorar o avanço da carbonização a partir da perda de massa observada no forno, inferindo-se, assim, sobre a marcha de carbonização. A exaustão forçada dos gases da carbonização é realizada pela parte inferior das bases, direcionando-os para uma fornalha, a qual faz a combustão antes de liberá-los para a atmosfera.

Ao final da carbonização, o cilindro metálico é retirado da base e conduzido a um local específico para resfriamento sob convecção natural, enquanto um novo cilindro é colocado na base. Ou seja, ainda que os fornos sejam batelada, o sistema funciona sob ciclos, sendo que para cada base (forno), o fabricante dimensiona a necessidade de 3 cilindros, com a intenção de manter o sistema sob produção contínua.

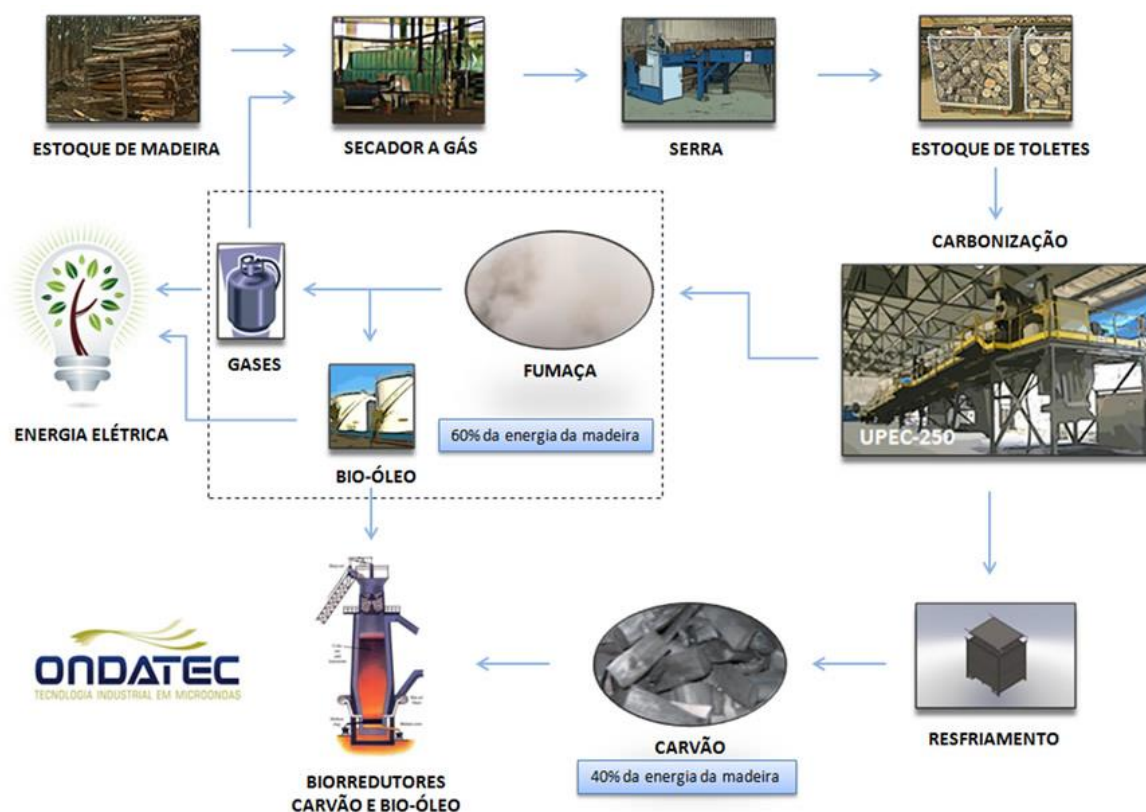
A avaliação desses fornos e maiores detalhes sobre seu *modus operandi*, dados de produção e rendimento gravimétrico serão apresentados e discutidos no Capítulo 4 deste trabalho.

2.3.6 Tecnologia Ondatec

Diferentemente dos demais fornos apresentados, a tecnologia Ondatec é composta por um forno horizontal contínuo, onde a madeira é continuamente alimentada na seção inicial do forno e, sobre uma esteira, percorre toda sua extensão, saindo o carvão convertido ao final (Figura 2.20). A particularidade da tecnologia Ondatec é que o forno fornece energia à madeira na forma de micro-ondas, diferentemente dos outros processos onde a energia é essencialmente fornecida por fogo direto. Em sua proposta, a tecnologia permite o aproveitamento energético da queima dos gases da carbonização para efetuar a secagem prévia da madeira antes de alimentá-la no forno micro-ondas.

Durante a pesquisa realizada, não foram encontradas informações sobre a existência de plantas industriais instaladas com esta tecnologia, havendo incertezas quanto ao seu sucesso e sua viabilidade econômica.

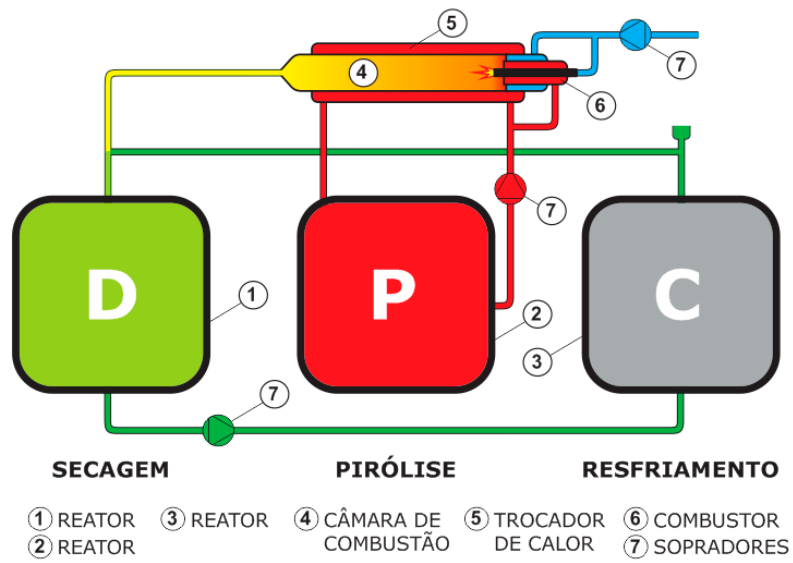
Figura 2.20. Fluxo simplificado do processo Ondatec (ONDATEC, 2018).



2.3.7 Tecnologia DPC

A tecnologia DPC (*Drying, Pyrolysis, Cooling*) é baseada em fornos batelada muito similares aos fornos retangulares. Porém, os fornos não são independentes entre si, mas sim interligados. A premissa principal da tecnologia DPC com o interligamento entre os fornos é justamente aproveitar o máximo possível da energia dos gases da carbonização, seja para efetuar a secagem da madeira em um forno onde a madeira foi recentemente alimentada, seja para efetuar trocas de calor em um forno onde as reações de carbonização encontram-se na fase endotérmica.

Ainda que, durante a pesquisa, foram encontradas menções à existência de 11 unidades com a tecnologia DPC, não foram encontradas informações sobre a localização de tais unidades e parâmetros de produtividade. O fabricante da tecnologia DPC menciona também que o processo é pressurizado, mas também não fornece detalhes sob operação da carbonização sob pressão (DPC, 2018). A Figura 2.21 mostra o diagrama básico do processo DPC e a Figura 2.22 mostra uma unidade DPC.

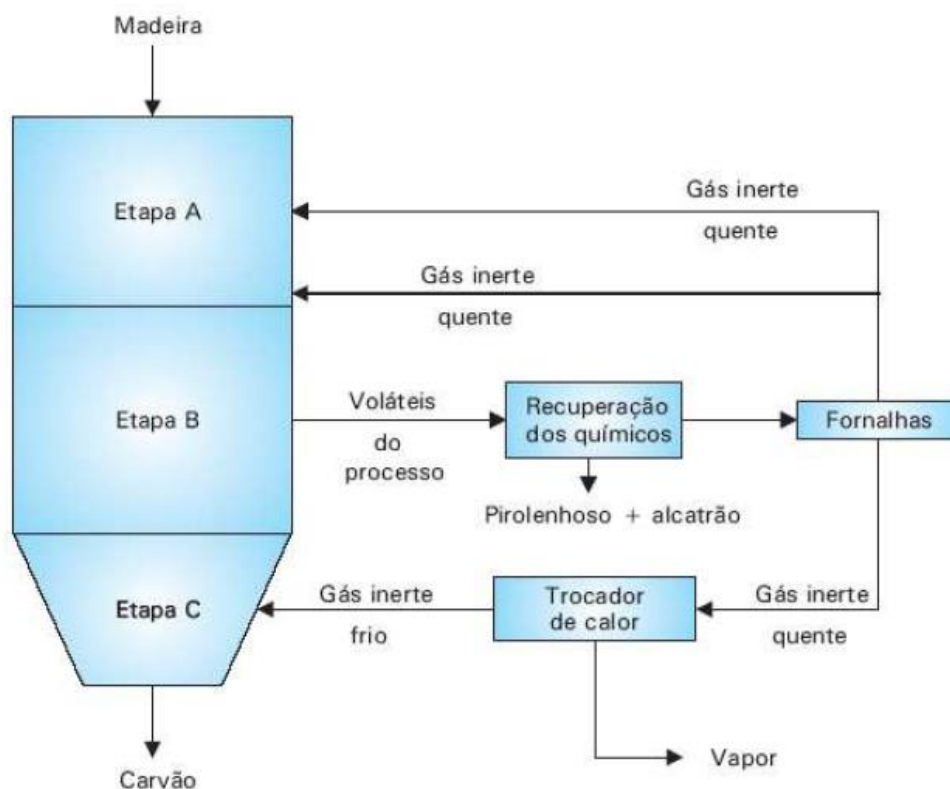
Figura 2.21. Diagrama básico do processo DPC (DPC, 2018).**Figura 2.22.** Unidade DPC (DPC, 2018).

2.3.8 Fornos Contínuos (Retortas)

As retortas são fornos contínuos (horizontais ou verticais, fabricados em material metálico e de grandes dimensões) que se utilizam da energia proveniente da combustão dos gases da própria carbonização para provimento energético à carbonização.

“Além da recuperação e queima dos gases do próprio processo para a geração de calor, são obtidos gases inertes, utilizados no resfriamento do carvão produzido. A recuperação dos gases permite obter os produtos químicos contidos nos mesmos. Qualitativamente, a variedade de produtos que podem ser obtidos é bastante grande. Na prática, os compostos químicos são recuperados, na massa de dois produtos líquidos básicos condensáveis, o alcatrão e o pirolenhoso” (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012). A Figura 2.23 mostra um esquema de produção de carvão em retortas.

Figura 2.23. Esquema de produção de carvão em retortas (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012).



Ainda que as retortas sejam utilizadas na Europa, no Brasil praticamente não existem unidades desse tipo em funcionamento, provavelmente pelo elevado custo.

A FAO realizou uma compilação do intervalo de rendimento gravimétrico reportado na literatura para cada tipo de forno para produção de carvão, mediante uma densa investigação em diversos autores (FAO, 2017). Esses resultados são apresentados na Tabela 2.8.

Tabela 2.8. Intervalos de rendimento gravimétrico para cada tipo de forno reportados na literatura (FAO, 2017).

<i>Tipo do Forno</i>	<i>Rendimento Gravimétrico (%)</i>
<i>Rabo quente</i>	9–30
<i>Encosta</i>	17–30
<i>Subterrâneo</i>	12–30
<i>Metálicos</i>	20–38
<i>Retangular</i>	27–35
<i>Retorta</i>	22–40

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental deste trabalho divide-se em dois eixos independentes:

- avaliação da produtividade do fornos cilíndricos metálicos de carbonização, por intermédio de dados reais de produção em escala industrial;
- amostragem de 9 marcas de carvão produzidas no estado do Rio Grande do Sul e análise de umidade, teor de cinzas, matérias voláteis, carbono fixo e PCS.

3.1 Avaliação de Produtividade dos Fornos

3.1.1 *Materiais*

A unidade de produção de carvão vegetal (UPC) avaliada, instalada no município de Camaquã, RS, possui um sistema composto por 6 fornos (bases) e 18 cilindros metálicos, com capacidade nominal de produção de 300 toneladas de carvão por mês. Os cilindros metálicos, conforme projeto do fabricante, possuem capacidade para 8 m³ de madeira.

As carbonizações na unidade foram realizadas com madeira de acácia negra de 2,20 m de comprimento e diâmetro de 6 a 18 cm, cortadas há pelo menos 6 meses, com umidade média de 25,7% em base seca. A umidade média foi determinada a partir de medições realizadas antes de cada cilindro de carbonização ser alimentado, com auxílio de um medidor portátil de umidade para madeira (Marrari M51).

A matéria-prima utilizada foi fornecida por um único fornecedor, proveniente de mesmo lote e talhões de reflorestamento, dos municípios de Mariana Pimentel, RS e São Lourenço do Sul, RS.

3.1.2 Métodos

As carbonizações foram realizadas entre 05/01/2015 e 27/03/2015, em estrita observância ao procedimento de carbonização estabelecido no manual de operação do fabricante, conforme relatado a seguir, em um total de 112 carbonizações executadas.

3.1.2.1 Seleção da Madeira

A lenha foi classificada em três classes de diâmetro, conforme estabelecido no manual do fabricante:

- madeira fina: 6 a 10 cm;
- madeira média: 11 a 15 cm;
- madeira grossa: 16 a 18 cm.

Para realizar a classificação da lenha, os diâmetros foram medidos à altura média da lenha com o auxílio de dois gabaritos em formato U, da forma “encaixa e não encaixa”, de forma a agrupar o lote nas três classes de diâmetro.

3.1.2.2 Carregamento dos Cilindros

Os cilindros foram acomodados no suporte de carregamento (Figura 3.1) e carregados manualmente com lenha, sendo preparados cilindros para cada classe de diâmetro.

Figura 3.1. Visualização do cilindro no suporte de carregamento (acervo do autor).



3.1.2.3 *Ignição dos Fornos*

A ignição dos fornos dá-se com a combustão (Figura 3.2) de aproximadamente 0,4 m³ de lenha na câmara de combustão (base) do forno, conforme prescrito no manual de operação: “*Antes de inserir o cilindro carregado com lenha na base do forno, a câmara de combustão deve estar acesa e com o fogo bem distribuído o que ocorre em até 30 minutos após o início da ignição*”.

Figura 3.2. Ignição do forno (acervo do autor).



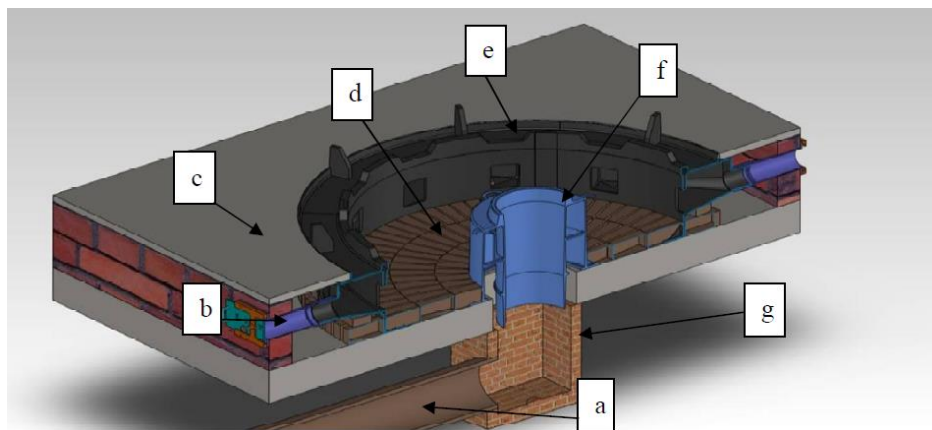
3.1.2.4 *Procedimento de Carbonização*

Em seguida à ignição, os cilindros carregados com lenha foram acomodados sobre as bases dos fornos (Figura 3.4), iniciando-se, assim, a marcha de carbonização. Todas as operações de movimentação foram realizadas com ponte rolante de capacidade para 10 t.

Figura 3.3. Os cilindros são içados e transportados por uma ponte rolante (acervo do autor).



Figura 3.4. Vista em corte da câmara de combustão do forno onde: (a) duto de condução dos gases dos fornos até o processador de gases (manilhas), (b) dutos para o fornecimento de ar de combustão, (c) piso de acabamento do forno, (d) revestimento interno em tijolos refratários, (e) segmentos em ferro fundido especial, (f) conector de fumaça e (g) caixa de entrada dos gases (acervo do autor).



“O controle do avanço da frente de carbonização é feito através da abertura e fechamento das entradas de ar das cornetas (principalmente nas primeiras três horas de carbonização) e dos crivos (após o fechamento das cornetas) alterando o fornecimento de ar de combustão”.

A condução do processo foi realizada conforme indicado pelo Manual:

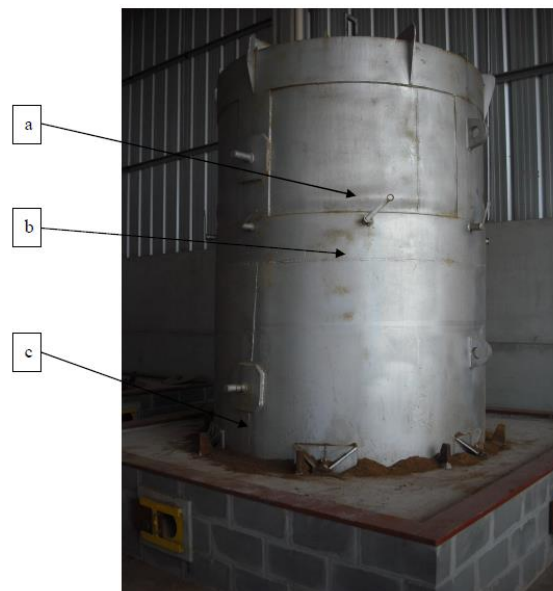
- *todas as cornetas¹⁶ da câmara de ignição no início da carbonização devem obrigatoriamente estar 100% abertas e os crivos¹⁷ na porção superior do cilindro todos fechados;*

¹⁶ Dutos para o fornecimento de ar de combustão na base do forno (item (b) da Figura 3.4).

¹⁷ Válvulas de entrada de ar no meio do cilindro (entre os pontos (a) e (b) da Figura 3.5).

- *as medições de temperatura devem ser realizadas de hora em hora, a fim de verificar a existência de discrepâncias de temperatura nas faces do cilindro;*
- *as medições de temperatura são realizadas com o termômetro infravermelho, devendo ser feitas nas quatro faces do cilindro sendo: frente, direita, atrás e esquerda em 3 alturas diferentes. A 1ª altura localizada a aproximadamente 25 cm da base do cilindro, a 2ª altura localizada a aproximadamente 5 cm acima do cordão de solda que une o anel inferior ao anel superior do cilindro e a 3ª altura localizada a aproximadamente 10 cm acima da altura dos crivos, conforme mostrado na Figura 3.5.*

Figura 3.5. Pontos de medição de temperatura. (a) Ponto de medição superior localizado a aproximadamente 10 cm acima dos crivos. (b) Ponto central e (c) ponto inferior, a aproximadamente 25 cm da base do cilindro (acervo do autor).



Os cilindros foram pesados a cada 3 horas de carbonização, sendo a pesagem realizada com uma balança para 10 t, acoplada na ponte rolante.

A decisão por encerrar o processo de carbonização foi realizada de acordo com o acompanhamento da perda de massa do cilindro. Para decidir pelo término da carbonização, calcula-se – a partir de uma conversão teórica de 35% do peso de madeira seca enfiada em carvão –, o peso de saída do cilindro.

3.1.2.5 *Controle de Temperatura*

O controle de temperatura do forno foi realizado conforme estabelecido pelo fabricante, por intermédio da:

- abertura e fechamento de cornetas (entradas de ar na base do forno);
- abertura e fechamento de crivos (entradas de ar no meio do cilindro);
- giro de 180° nos cilindros.

As intervenções estabelecidas pelo Manual devem sempre ser realizadas quando se constatarem discrepâncias de temperatura entre as faces do cilindro (posterior, anterior, lateral esquerda e lateral direita) nas medições de temperatura, que são realizadas de hora em hora.

O controle de temperatura dos fornos é realizado somente com aberturas e fechamento das entradas de ar disponíveis, manualmente, mediante o monitoramento da temperatura externa do cilindro (conforme item 3.1.2.4).

3.1.2.6 *Resfriamento e Descarga*

Encerrada a carbonização, os cilindros foram acomodados em uma cancha de areia, onde permaneceram por pelo menos 30 h para resfriamento. A abertura dos cilindros foi realizada quando a temperatura da parede externa do cilindro não excedia a 35 °C. Em seguida, o carvão foi descarregado e os tiços¹⁸ foram separados (Figura 3.6), sendo pesados para cálculo do rendimento gravimétrico em carvão da carbonização (Equação 1) e percentual de tiços (Equação 2).

$$RG (\%) = 100 * \frac{m_{\text{carvão}}}{m_{\text{madeira seca}}} \quad (1)$$

$$Tiços(\%) = 100 * \frac{m_{\text{tiço}}}{m_{\text{madeira seca}}} \quad (2)$$

A massa de carvão foi determinada por diferença entre o peso líquido total do cilindro (carvão + tiços + finos) e a parcela de subprodutos (finos + tiços).

¹⁸ Tiço ou atiço é um nome popular para designar a lenha não carbonizada. Os tiços podem ser utilizados como combustível para ignição dos fornos e alimentação da fornalha.

Como todos os cilindros foram pesados previamente à entrada no forno (quando carregados com madeira), de posse do peso de cada cilindro vazio e da umidade média do lote de madeira, é possível determinar a massa de madeira seca dentro do cilindro e utilização das Equações (1) e (2).

É importante frisar que os cálculos de rendimento gravimétrico não consideraram o consumo de madeira para ignição do forno (madeira alimentada na base do forno, e consumida por combustão) nem consideraram o consumo de madeira na fornalha da unidade (para abatimento das emissões atmosféricas), de forma que os resultados de rendimento gravimétrico apresentam um viés, com resultados ligeiramente superestimados.

O motivo para não se ter realizado as medições, em massa, de consumo de madeira na ignição dos fornos e na fornalha deveu-se ao fato da impraticabilidade de se realizar tais medidas, continuamente, em uma escala de produção industrial – diferentemente do peso da madeira alimentada nos cilindros, a qual é facilmente medida com o auxílio da balança acoplada na ponte rolante.

Figura 3.6. Tiços da carbonização (acervo do autor).



3.2 Análise de Parâmetros Físico-Químicos do Carvão

3.2.1 Parâmetros Físico-Químicos

As principais características físico-químicas do carvão vegetal são apresentadas a seguir.

3.2.1.1 Densidade

A densidade¹⁹ do carvão é, genericamente, a relação entre a quantidade de massa de carvão existente em um determinado volume.

Como o carvão normalmente é utilizado na forma sólida, sendo caracterizado por ter geometria irregular e porosidade, existem diferentes formas de determinar e expressar a densidade do carvão (BRITO, BARRICHELO, *et al.*, 1982).

A densidade é um dos parâmetros mais importantes para determinar a qualidade do carvão. Por exemplo, para a siderurgia de acordo com Latorre (2014), o carvão deve possuir a maior densidade a granel possível ($> 250 \text{ kg/m}^3$), de forma que o mesmo (agente redutor) ocupe o menor volume possível no alto forno.

A densidade do carvão depende do tipo de biomassa utilizada na sua produção e das condições do processo de pirólise (PANDOLFO, AMINI-AMOLI e KILLINGLEY, 1998). A densidade do carvão aumenta em função do aumento da temperatura de pirólise e do tempo de residência, devido ao rearranjo dos átomos de carbono na microestrutura do carvão (BYRNE, 1996). Já os carvões com baixo teor de voláteis e cinzas (matérias de menor massa molecular que o carbono) possuem maior densidade (JANKOWSKA, SWIATKOWSKI e CHOMA, 1991).

Dentre as diferentes maneiras de determinar a densidade do carvão, a forma mais utilizada (em consonância com o fato de que a maioria do carvão é destinado à siderurgia) é a *densidade a granel*. Diante da dificuldade na determinação, as demais formas de expressão da densidade do carvão possuem pouca aplicação prática e são restritas a trabalhos acadêmicos ou estudos em laboratório (BRITO, BARRICHELO, *et al.*, 1982).

¹⁹ Neste trabalho, os termos “densidade” e “massa específica” são tratados como sinônimos.

3.2.1.1.1 *Densidade a Granel*

A norma ABNT NBR 6922:1981 – *Carvão vegetal – Ensaio físico determinação da massa específica (densidade à granel)* estabelece que a densidade a granel do carvão é simplesmente a razão entre a massa de carvão ocupada em uma caixa de paredes rígidas com 600 mm x 600 mm x 600 mm de dimensões internas (volume de 0,216 m³) (ABNT, 1981). Esta norma da ABNT não pormenoriza como se deve dar o empilhamento dos grãos de carvão no interior da caixa, apenas estabelecendo que “*a quantidade final da amostra deve ser tal que forneça o volume suficiente para encher a caixa definida [acima]*”.

Em 10 de dezembro de 2014, a norma ABNT NBR 6922:1981 foi *cancelada* sob a justificativa de que “*esta Norma não é mais utilizada pelo setor*”, inexistindo, atualmente, uma norma brasileira para determinação de densidade de carvão vegetal.

Ainda que a referida norma tenha sido cancelada, é usual determinar a densidade a granel do carvão de forma análoga ao estabelecido na norma citada. No cotidiano, produtores costumam determinar a densidade a granel do carvão por intermédio da razão entre a carga de carvão transportada e as dimensões do compartimento de carga dos caminhões, por exemplo.

3.2.1.1.2 *Densidade Aparente, Densidade Verdadeira e Porosidade*

A norma ABNT NBR 9165:1985 – *Carvão vegetal – Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade - Método de ensaio* prescreve os métodos para determinação da densidade aparente.

A densidade aparente representa a densidade a granel descontados os volumes vazios existentes entre os grãos de carvão, considerando, no entanto, os poros existentes nos mesmos (ABNT, 1985).

A densidade verdadeira equivale à densidade aparente descontada a porosidade interna do carvão (ABNT, 1985).

Em 10 de abril de 2015, a norma ABNT NBR 9165:1985 também foi *cancelada*, sob a justificativa de que “*esta Norma não é mais utilizada pelo setor*”.

Diferentemente da densidade a granel, que é vastamente utilizada, a densidade aparente, densidade verdadeira e porosidade do carvão somente são determinadas quando uma maior

exatidão para sua densidade é requerida, como por exemplo no caso de adsorventes ou outras finalidades específicas.

Há certa dificuldade em obter uma amostra de carvão com geometria e dimensões bem definidas, havendo uma alta incerteza de medição na execução do método da norma ABNT NBR 9165, como demonstraram os resultados experimentais de ensaios obtidos por Brito e Barrichelo (1982).

3.2.1.2 *Carbono Fixo*

Junto à densidade, o carbono fixo é outra importante variável utilizada para caracterizar o carvão. O carbono fixo representa a relação entre a massa de carbono existente no carvão (m_c) e a massa total de carvão ($m_{carvão}$), geralmente expressando seu resultado final em percentual.

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 \frac{m_c}{m_{carvão}} \quad (3)$$

Para a siderurgia, o carbono fixo é essencial para determinar a quantidade de carvão (e, conseqüentemente, de carbono) a ser adicionada no alto forno para a redução do minério de ferro, sendo que é desejável que o carvão possua o maior teor de carbono fixo possível (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012); (LATORRE, 2014); (UHLIG, GOLDEMBERG e COELHO, 2008).

O carbono fixo apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina e densidade da biomassa, bem como em relação à temperatura de carbonização (CARNEIRO, BARCELLOS, *et al.*, 2012).

Inexiste norma brasileira para a determinação de carbono fixo em carvão, sendo que usualmente adota-se a norma *ASTM D7582:2013 – Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis*, a qual prescreve métodos para a determinação de umidade, matérias voláteis e cinzas, e obtenção do teor de carbono fixo por cálculo, para carvão mineral e coque. Apesar de a norma ASTM D7582:2013 ter sido desenvolvida para carvão mineral e coque, laboratórios tipicamente a utilizam para ensaios em carvão vegetal – mesmo com a existência da norma *ASTM D1762:2013 – Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal (original de 1984)*, sendo esta última uma

norma bastante simplificada e sem dados disponíveis sobre precisão e vieses estatísticos do ensaio, diferentemente da norma ASTM D7582:2013 (ASTM, 2003).

Dada a dificuldade de determinar diretamente a massa de carbono para utilizar a equação (3), o carbono fixo é determinado por intermédio de cálculo (ASTM, 2013), através da equação (4):

$$\text{Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{Umidade(\%)} + \text{Voláteis(\%)} + \text{Cinzas(\%)}] \quad (4)$$

3.2.1.3 Resistência Mecânica

A resistência mecânica do carvão está relacionada com a densidade verdadeira do carvão, ou seja, tal qual a densidade, também é uma variável derivada do tipo de biomassa utilizada e das condições de pirólise. Carvões de maior densidade verdadeira possuem maior resistência mecânica (LEHMANN e JOSEPH, 2009). O maior ordenamento molecular confere ao carvão maior resistência mecânica do que a biomassa que o originou. Neste sentido, resultados demonstraram que houve aumento de 28% na resistência mecânica da madeira de tulipeiro²⁰ depois de sua pirólise a 1550 °C (BYRNE e NAGLE, 1997).

Resíduos agrícolas, tais como cascas de nozes e caroços de frutas (pêssego, azeitona etc), são matérias ricas em lignina e com baixo teor de cinzas, excelentes para a produção de carvão com alta resistência mecânica. A resistência mecânica é uma característica de qualidade para os carvões ativados, por associar à sua capacidade de ser reutilizado (LEHMANN e JOSEPH, 2009). Para o uso siderúrgico em altos fornos, o carvão deve possuir a maior resistência mecânica possível (LATORRE, 2014).

A resistência mecânica do carvão está intimamente relacionada com a densidade verdadeira do mesmo, sendo que as condições de carbonização que maximizam a densidade – tal qual já discutido – também maximizam sua resistência mecânica.

A norma ABNT NBR 8740:1985 – *Carvão vegetal – Determinação do índice de quebra e abrasão – Método de ensaio* estabelece um procedimento para determinar a resistência mecânica do carvão, ao deixar cair e rolar dentro de um tambor rotativo, sob condições padronizadas, uma amostra representativa de carvão (ABNT, 1985). A norma define o índice

²⁰ *Liriodendron tulipifera*, popularmente denominada *tulipeiro*, é uma espécie de árvore típica do hemisfério norte, com ocorrência na costa leste dos Estados Unidos.

de quebra e abrasão (I) (equação 5), que representa uma relação entre o fragmento médio da amostra de carvão depois da realização do ensaio (f) e o fragmento médio do carvão antes do ensaio (F).

$$I = 1 - \frac{f}{F} \quad (5)$$

3.2.1.4 Umidade

A umidade do carvão é a relação entre a massa de água total (H_2O) existente no carvão (m_{H_2O}) e a massa total de carvão ($m_{carvão}$), geralmente expressando seu resultado final em percentual.

$$Umidade (U) = \frac{m_{H_2O}}{m_{carvão}} \quad (6)$$

Praticamente em todas as suas utilizações (combustão, redução, adsorção etc), deseja-se que o carvão possua o menor teor de umidade possível, pois a presença de água prejudica nos demais processos onde o carvão será utilizado.

A umidade do carvão é determinada de acordo com a norma *ASTM D7582:2013 – Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis*.

3.2.1.5 Cinzas

Cinza é uma designação geral para uma mistura de sais minerais, compostos por silício, alumínio, ferro, cálcio, sódio, potássio, magnésio, fósforo dentre outros elementos. Destarte, o teor de cinzas do carvão é a fração mássica do somatório de tais compostos existentes no carvão.

O teor de cinzas do carvão está associado basicamente ao tipo de biomassa pirolisada e às condições de pirólise (LEHMANN e JOSEPH, 2009). Diferentes tipos de biomassa podem possuir teores de cinzas bastante diferentes entre si, os quais influenciarão no teor de cinzas do carvão produzido.

De uma forma geral, a madeira possui baixo teor de cinzas (< 1%), enquanto capins e cascas de grãos (como a casca de arroz, por exemplo) possuem elevados teores de cinzas (> 20%) (LEHMANN e JOSEPH, 2009).

Para o carvão siderúrgico, o teor de cinzas deve ser o menor possível (LATORRE, 2014). Esta é uma das razões pelas quais o carvão produzido a partir da madeira é utilizado em substituição ao coque mineral, pelo fato de aquele possuir menor teor de cinzas do que este. “De modo geral, dentro dos altos fornos, alto teor de cinzas eleva o consumo de carvão vegetal, aumenta o desgaste dos refratários e possibilita a criação de cascão, além de perda nas propriedades físicas e mecânicas dos produtos acabados” (CARNEIRO, BARCELLOS, et al., 2012).

O teor de cinzas do carvão é determinado como o resíduo final sólido restante após a total combustão do carvão. A determinação é realizada conforme a norma *ASTM D7582:2013 – Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis*.

3.2.1.6 Matérias Voláteis

As matérias voláteis presentes no carvão são compostos orgânicos (tais como fenóis, ácidos carboxílicos, ésteres etc), formados principalmente durante as reações de pirólise da biomassa.

De acordo com Carneiro et al. (2014), a presença de voláteis no carvão é influenciada pela temperatura de carbonização, taxa de aquecimento e composição química da biomassa, sendo a temperatura o principal parâmetro que regula o teor de voláteis e carbono fixo do carvão. “O teor de matérias voláteis pode influenciar a degradação do carvão no alto-forno, ao acarretar mudanças na porosidade e na resistência mecânica”. Segundo Latorre (2014), quanto menor for o teor de voláteis no carvão, melhor.

O teor de voláteis do carvão é determinado de acordo com a norma *ASTM D7582:2013 – Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis*.

3.2.1.7 Poder Calorífico

“O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia por unidade de massa ou volume, liberada durante a queima do mesmo. O poder calorífico pode ser classificado de duas formas: Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI). O poder calorífico superior é a quantidade de energia liberada na forma de calor, na combustão completa de uma quantidade definida de combustível com o ar, à pressão ou volume constante, sendo que a água formada no processo de combustão se encontra no estado líquido. A diferença do poder calorífico inferior em relação ao poder calorífico superior é que a água formada no processo de combustão se encontra na forma vapor. Para combustíveis que não possuem hidrogênio em sua composição, o valor do PCS é igual ao do PCI, pois não há formação de água e, portanto, conseqüente gasto de energia para a sua vaporização. Diante desse fato, o PCS será sempre maior ou igual ao PCI” (SILVA, 2009).

Segundo Cortez et al. (2009), “o PCS aumenta com a concentração de carbono na composição do sólido”. Ou seja, quanto maior for o teor de carbono fixo do carvão, maior será seu poder calorífico superior.

Analogamente ao teor de voláteis, cinzas, umidade e carbono fixo, para determinar o poder calorífico superior também se utiliza, usualmente, normativo para carvão mineral e coque, sendo adotada a norma *ASTM D5865:2013 – Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke* (ASTM, 2013).

3.2.2 Materiais

3.2.2.1 Amostra selecionada

Como o estado do Rio Grande do Sul notabiliza-se por produzir carvão para uso doméstico, principalmente para o preparo de churrasco, a amostra selecionada foi composta por 9 marcas comerciais de carvão para churrasco, produzidos a partir de lenha de acácia negra e eucalipto.

As marcas selecionadas são exclusivamente de carvão produzido no estado do Rio Grande do Sul e comercializada no mercado varejista de Porto Alegre, RS.

3.2.2.2 *Laboratório selecionado*

Para a realização dos ensaios, foi selecionado o Laboratório de Ensaio em Combustíveis da Fundação de Ciência e Tecnologia (Cientec), que atende a empresas produtoras e consumidoras de carvão e combustíveis líquidos. A Cientec realiza ensaios de caracterização de combustíveis sólidos (carvão, coque, biomassa) para utilização na geração de energia ou para fins de pesquisa, cobrindo praticamente a totalidade das determinações necessárias para sua caracterização (CIENTEC, 2018).

É importante salientar que quando da realização dos ensaios, o Laboratório de Ensaio em Combustíveis da Cientec possuía acreditação ativa junto ao Inmetro (CRL-0145) segundo a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005. Todavia, por força do Decreto Estadual nº 53.756/2017, que regulamenta a extinção de Fundações, incluindo a Cientec, desde 03 de novembro de 2017 a Cientec não recebe mais amostras, abre novos pedidos e não efetiva a contratação de quaisquer novos serviços, estando atualmente com sua acreditação cancelada junto ao Inmetro.

3.2.3 *Métodos*

3.2.3.1 *Amostragem*

As marcas de carvão para compor o estudo foram selecionadas de forma aleatória²¹ no mercado varejista de Porto Alegre, RS, tendo sido sorteadas 5 marcas de carvão de acácia negra e 4 marcas de carvão de eucalipto.

Em função do elevado custo para a realização dos ensaios em laboratório, foram elaboradas amostras combinadas para cada uma das 9 marcas de carvão, realizando uma mistura proveniente de 30 embalagens comerciais de 3 kg de cada marca – formando, destarte, 9 misturas combinadas de 90 kg cada.

²¹ Diante da falta de informação nas embalagens de carvão sobre o tipo de forno em que o carvão foi produzido ou ainda da região produtora (muitas embalagens trazem somente o endereço do empacotador ou do distribuidor), optou-se por realizar a amostragem aleatória simples de marcas, não tendo sido realizada qualquer estratificação.

Posteriormente, de cada amostra combinada, foram retiradas peças de carvão (de forma aleatória) de forma a compor uma alíquota de 3 kg, a qual foi submetida para ensaio em laboratório.

3.2.3.2 *Métodos de Ensaio*

Os ensaios contratados junto à Cientec foram realizados entre 16 de novembro de 2016 e 23 de dezembro de 2016, de acordo com normas internacionais, conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Ensaio realizados junto à Cientec.

Ensaio	Norma
Preparação de Amostra	BS-EN 14780:2011 BS-EN 14774-1:2009
Umidade	ASTM D7582:2015
Cinzas	ASTM D7582:2015
Matérias voláteis	ASTM D7582:2015
Carbono fixo	ASTM D7582:2015
Poder calorífico superior	ASTM D5865:2013

Capítulo 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos na parte experimental deste trabalho de dissertação.

4.1 Avaliação de Produtividade dos Fornos

Conforme salientado na revisão bibliográfica, o sistema é composto por 6 fornos (bases) e 18 cilindros metálicos, com capacidade nominal de produção de 300 toneladas de carvão vegetal por mês. Os cilindros metálicos, conforme projeto do fabricante, possuem capacidade para 8 m³ de madeira. A seguir será feita uma análise descritiva dos dados experimentais obtidos neste sistema.

4.1.1 Análise Descritiva dos Dados

Antes de fazer afirmações sobre a produtividade dos fornos cilíndricos metálicos, é prudente realizar uma análise descritiva dos dados levantados. Tal análise descritiva versará sobre os dados de:

- produção de carvão por cilindro;
- rendimento gravimétrico;
- tempo de carbonização;
- produtividade por cilindro;
- percentual de tiços.

O *boxplot* da Figura 4.1 ilustra a distribuição dos resultados de produção de carvão por cilindro (em kg) associada à classe de diâmetro da lenha. Ao todo, foram realizadas 11 carbonizações com lenha fina, 90 com lenha média e 11 com lenha grossa. O histograma da Figura 4.2 apresenta os resultados de produção de carvão (em kg, por cilindro) considerando as 112 carbonizações, onde a média de produção foi de 456 kg por cilindro.

Figura 4.1. *Boxplot* da produção de carvão por cilindro associada à classe de diâmetro da lenha.

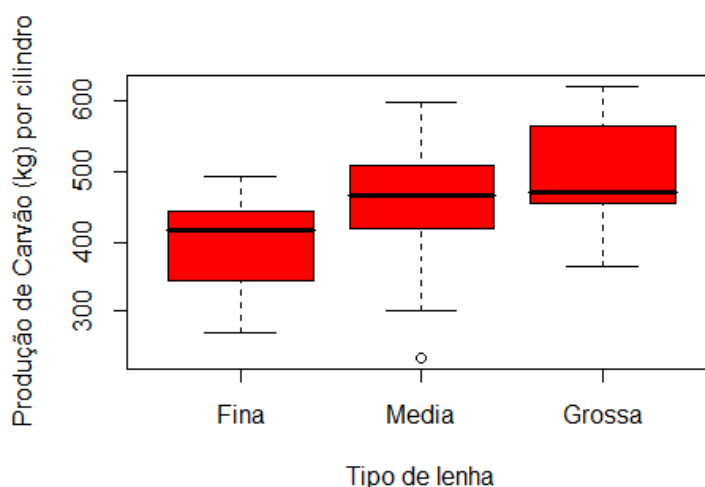
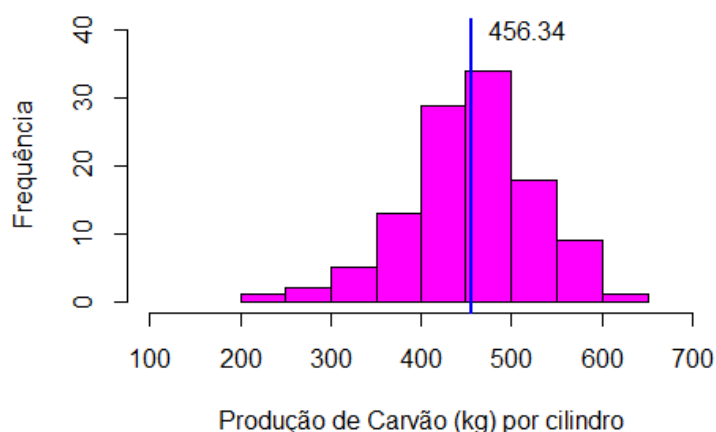


Figura 4.2. Histograma da produção de carvão por cilindro.



Ainda que tenham sido realizadas poucas carbonizações com lenha fina e lenha grossa, da análise descritiva dos dados (Figura 4.1) é possível notar que a lenha grossa apresenta posição superior, o que a caracteriza por produzir maior massa de carvão por cilindro, enquanto a lenha fina possui menor produção. Tal fato é explicado pois nos cilindros com lenha grossa a massa de madeira alimentada é superior à massa de madeira dos cilindros com lenha fina.

Quando se consideram as 112 carbonizações (Figura 4.2), nota-se que os dados estão distribuídos entre 200 e 650 kg por cilindro, com um perfil similar ao de uma distribuição normal.

Os dados absolutos de produção não revelam a produtividade do sistema, uma vez que não levam em conta a massa de madeira alimentada por forno e também o tempo dispendido na carbonização. Desta forma, o *boxplot* da Figura 4.3 apresenta o rendimento gravimétrico (RG) para cada classe de diâmetro e o histograma da Figura 4.4 apresenta o rendimento gravimétrico considerando todas as carbonizações realizadas, sendo o rendimento gravimétrico médio de 20% – lembrando que o RG é a relação entre a massa de carvão produzido e a massa de madeira seca alimentada no cilindro.

Figura 4.3. *Boxplot* do rendimento gravimétrico associado à classe de diâmetro da lenha.

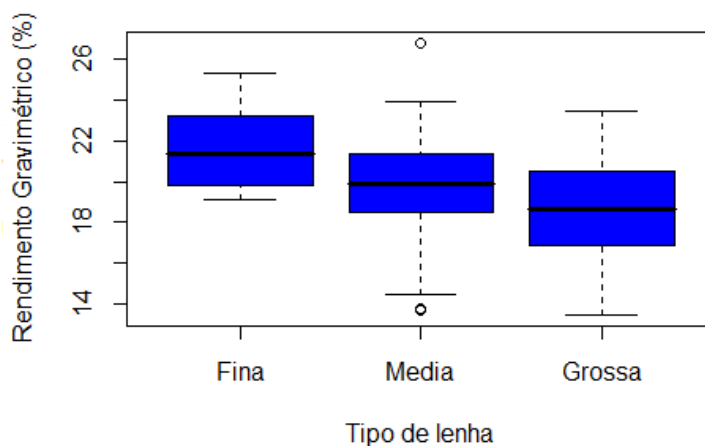
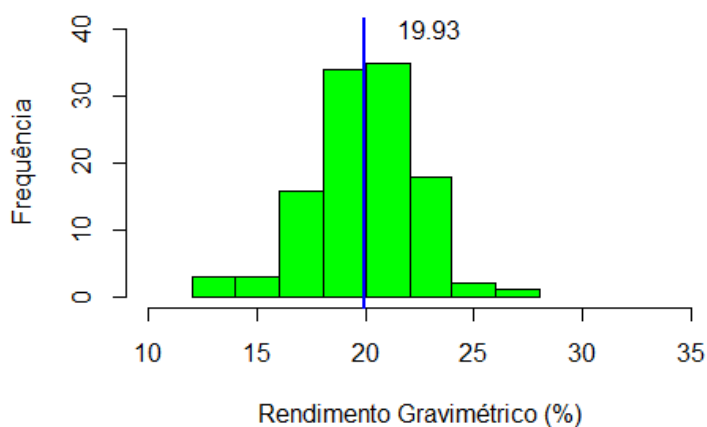


Figura 4.4. Histograma do rendimento gravimétrico (%).



Em contraponto à produção absoluta de carvão por cilindro, nota-se que os melhores rendimentos gravimétricos foram observados ao carbonizar lenha fina – ou seja, em relação à conversão da madeira em carvão, a lenha fina possui melhor desempenho (Figura 4.3). Também, conforme Figura 4.4, o rendimento gravimétrico apresenta perfil similar ao de uma distribuição normal, notando-se que os dados de rendimento gravimétrico foram observados entre 10 e 30%.

Complementando a análise, de forma similar, tem-se o *boxplot* (Figura 4.5) e histograma (Figura 4.6) para o tempo de carbonização, sendo o tempo médio de carbonização de 14,6 h.

Figura 4.5. *Boxplot* do tempo de carbonização associado à classe de diâmetro da lenha.

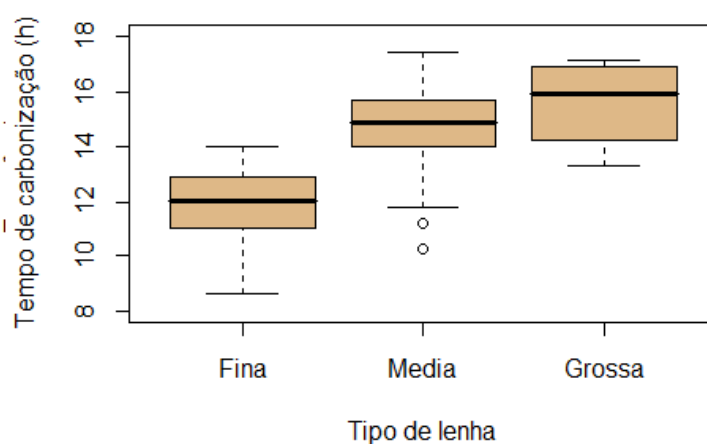
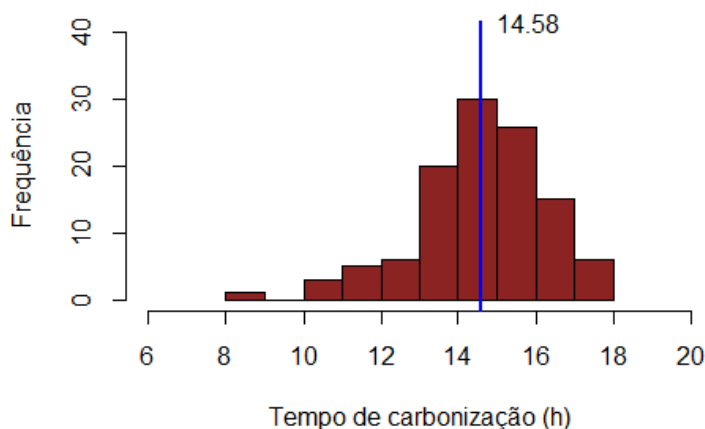


Figura 4.6. Histograma do tempo de carbonização (em horas).



O tempo de carbonização esteve concentrado principalmente entre 10 e 18 h, sendo que – dentre os dados observados – a lenha de classe fina carbonizou em menor tempo do que a lenha de diâmetro grosso, conforme esperava-se, haja visto que um menor diâmetro de madeira favorece a transferência de calor e massa, acelerando as reações de carbonização.

De forma a levar em conta, simultaneamente, a produção de carvão e o tempo de carbonização, é conveniente tomar em conta a produtividade de cada cilindro a partir da relação entre a quantidade de carvão produzida pelo seu tempo de carbonização. As Figuras 4.7 e 4.8 resumizam os dados (produtividade média observado por cilindro de 31,5 kg carvão/h.).

Figura 4.7. *Boxplot* da produtividade associada à classe de diâmetro da lenha.

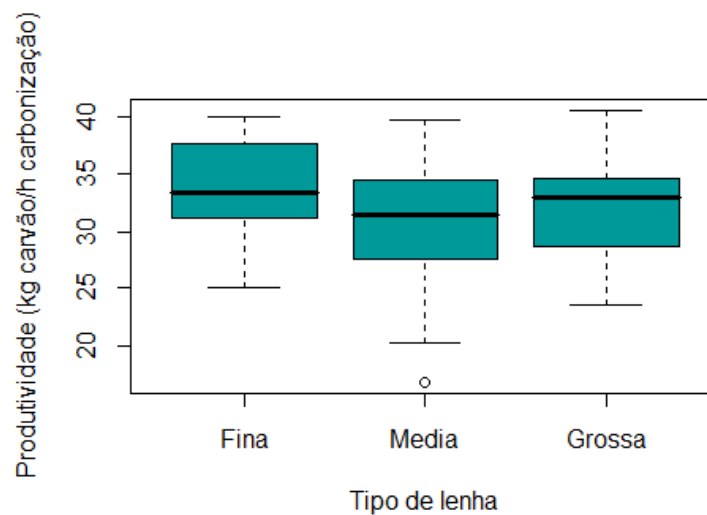
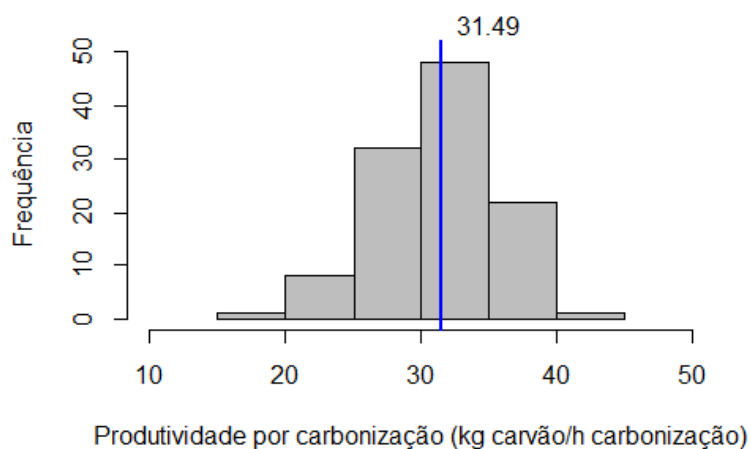


Figura 4.8. Histograma da produtividade por cilindro (kg carvão/h carbonização).



O percentual de tiços também está descrito nos gráficos das Figuras 4.9 e 4.10, onde o teor médio de tiços foi de 15%.

Figura 4.9. *Boxplot* do percentual de tiços associado à classe de diâmetro da lenha.

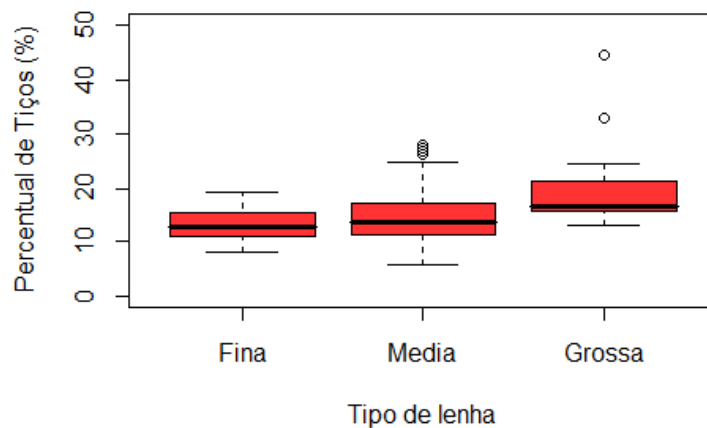
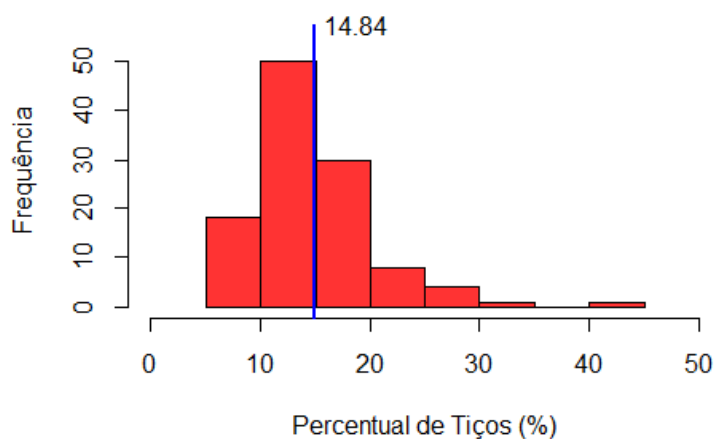


Figura 4.10. Histograma do percentual de tiços.



4.1.2 Operação Contínua da Unidade e Produtividade Real

Para se estimar a produtividade real mensal de uma unidade com o sistema de fornos analisado, é um equívoco tomar-se meramente a produtividade por cilindro (Figura 4.8) e extrapolar aritmeticamente os resultados, multiplicando-se tal produtividade pelo número de fornos e pelo total de horas trabalhadas em um mês²². Todo o sistema funciona sob a ação de

²² Um mês contínuo de trabalho contabiliza 28 dias, em virtude da necessidade de se realizar manutenção periódica nos equipamentos, conforme estabelecido no Manual do Fabricante.

uma ponte rolante, sendo imprescindível considerar os tempos de movimentação – quando uma operação de movimentação está sob execução²³, é impossível a realização de qualquer outra operação, pelo fato de a ponte rolante estar em uso, devendo-se aguardar a conclusão de uma tarefa para a realização de outra.

Ainda, como as operações são sequenciais (carregamento, carbonização, resfriamento e descarregamento), uma carbonização realizada em tempos menores não assegura alta produtividade na UPC como um todo, haja visto que a etapa lenta e limitante do processo (resfriamento) leva pelo menos 30 h para ser concluída²⁴. Também, ainda que fosse possível a realização de todas as etapas de forma mais rápida, a capacidade de trabalho da ponte rolante deve ser considerada, a fim de avaliar a viabilidade de executar todas as atividades.

Em suma, diante deste cenário em que as operações são interligadas e dependentes da ação de ponte rolante para a execução, imprescindível é a elaboração de um simulador de operação da unidade, computando o tempo de execução de todas as etapas do processo e também das etapas de movimentação, respeitando as restrições elencadas anteriormente, de forma a simular a produção mensal real exequível da UPC.

Um simulador de funcionamento da unidade foi desenvolvido em linguagem VBA do Excel (Figura 4.11 e Figura 4.12), onde é possível entrar com todos os parâmetros de funcionamento da unidade e gerar uma operação simulada por tempo definido, a fim de se verificar a real produtividade mensal da unidade.

Por exemplo, por mera extrapolação matemática, a produtividade média de 31,5 kg carvão/h levaria a uma produção mensal de 127 toneladas, para a UPC com 6 fornos operando por 24 h diárias, durante 28 dias. Contudo, ao executar o simulador global da UPC, com a mesma produtividade, alcançam-se 113 t/mês (11% a menos). Tal diferença é justificada pois no equivocado cálculo aritmético por extrapolação, ignora-se o fato de a etapa limitante do processo ser o resfriamento e também se parte de uma consideração incorreta, a qual presume que *instantaneamente* à saída de um cilindro do forno, entra-se um novo cilindro para o início de uma nova carbonização, como se não houvesse tempos inoperantes na unidade.

²³ As operações de movimentação são: movimentação de cilindro vazio até o suporte de carregamento de lenha, retirada de grelha, colocação de grelha, movimentação de cilindro com lenha até o forno, pesagem de todos os cilindros a cada 3 horas de carbonização, retirada do cilindro com carvão até a cancha de resfriamento, movimentação de cilindro com carvão até o local de descarregamento, movimentação de descarga de cilindro e retirada de grelha.

²⁴ Ao longo das 112 carbonizações realizadas, em nenhum cilindro foi observado um resfriamento em tempo inferior a 30 h, sendo que inclusive houve ao menos 5 casos de princípio de incêndio em cilindros que foram abertos com tempo superior a 30 h.

Quando se estima a produção mensal da UPC, as diferenças entre o resultado do simulador e do cálculo aritmético simples ficam mais pronunciadas quanto menor é o tempo de carbonização. No caso limítrofe, para o menor tempo de carbonização observado, a diferença entre o simulador e o cálculo aritmético foi 38% menor. O simulador considera o tempo de início e término de cada operação, a disponibilidade da ponte rolante para movimentações e totaliza a produção da unidade a cada operação de descarga do cilindro, onde a duração de cada etapa, tempos de movimentação e produtividade podem ser definidos pelo usuário.

Figura 4.11. Aspecto do simulador para a UPC.

The screenshot shows the main interface of the UPC simulator. On the left, there is a vertical stack of six 'BASE' buttons labeled 1 through 6, with a large red number '13' displayed in the first one. At the top left, a 'RELÓGIO' (clock) shows the date and time '6/6/18 14:10'. In the center, a table titled 'Operações autorizadas' lists various operations with their status (all 'VERDADEIRO') and a 'Status operação' column. To the right, there are controls for 'Cilindros no suporte de...' (Cylinders on support of...) with 'Carregamento' (0) and 'Descarga' (0) counts, and buttons for 'Rodar simulação' (Run simulation) and 'Reset'. At the bottom right, a 'Produção' (Production) box shows a value of 16,42824. A detailed table at the bottom center lists individual operations with columns for 'N.º', 'Operação', 'Início', 'Fim', 'Local', and 'Status'.

N.º	Operação	Início	Fim	Local	Status
13	Carbonização	06/06/18 03:30	06/06/18 18:04	BASE_1	1
1	Resfriamento	05/06/18 12:19	06/06/18 18:19		4
2	Resfriamento	05/06/18 13:04	06/06/18 19:04		4
14	Carbonização	06/06/18 04:39	06/06/18 19:13	BASE_2	1
3	Resfriamento	05/06/18 13:51	06/06/18 19:51		4
15	Carbonização	06/06/18 05:30	06/06/18 20:04	BASE_3	1
4	Resfriamento	05/06/18 14:36	06/06/18 20:36		4
16	Carbonização	06/06/18 06:15	06/06/18 20:49	BASE_4	1
5	Resfriamento	05/06/18 15:21	06/06/18 21:21		4
17	Carbonização	06/06/18 07:02	06/06/18 21:36	BASE_5	1
6	Resfriamento	05/06/18 16:09	06/06/18 22:09		4
18	Carbonização	06/06/18 07:52	06/06/18 22:26	BASE_6	1
7	Resfriamento	06/06/18 03:15	07/06/18 09:15		4
8	Resfriamento	06/06/18 03:59	07/06/18 09:53		4
3	Resfriamento	06/06/18 05:01	07/06/18 11:01		4
10	Resfriamento	06/06/18 05:50	07/06/18 11:50		4
11	Resfriamento	06/06/18 06:20	07/06/18 12:20		4
12	Resfriamento	06/06/18 07:07	07/06/18 13:07		4

Figura 4.12. Parâmetros de ajuste do simulador.

The screenshot shows the 'PARAMETROS_SIMULACAO' (Simulation Parameters) screen. It contains several input fields and tables. At the top, 'Dados para simulação' (Simulation data) includes 'Dias de simulação (dias)' (28) and 'Passo de tempo (min)' (2). Below this is a table for 'Duração das operações' (Operation duration) with columns for 'Operação', 'Min', and 'Horas'. The next section is 'Tempo de movimentação (operação autorizada)' (Movement time) with a 'Min' column. At the bottom, there are fields for 'N.º suportes carregamento' (2), 'N.º suportes descarga' (1), and 'Produção (t carvão/cilindro)' (0,45634).

Operação	Min	Horas
Carregamento	60	1 h
Espera	0	0 h
Carbonização	874,8	14,58 h
Resfriamento	1800	30 h
Descarga	15	0,25 h
Espera (vazio)	0	0 h

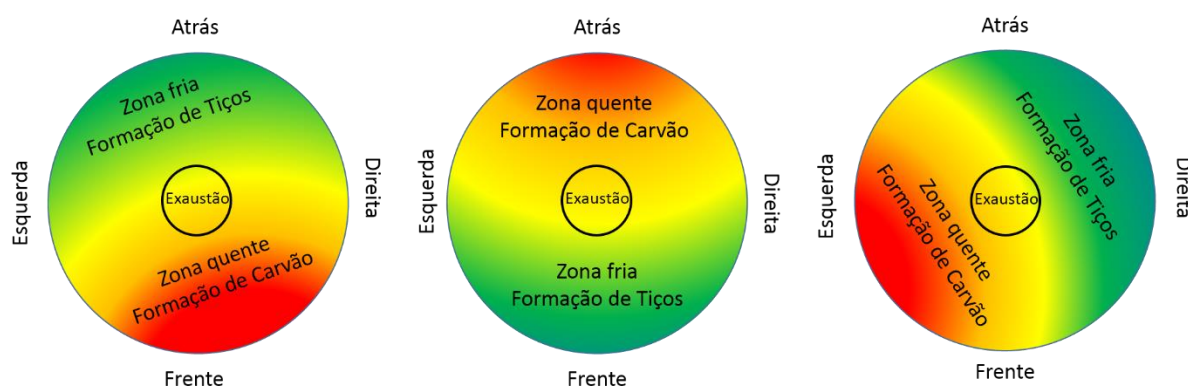
Operação	Min
Carregamento	15
Espera	0
Carbonização	15
Resfriamento	5
Descarga	10
Espera (vazio)	0

4.1.3 Temperatura de Carbonização

O sistema de fornos em questão não permite o monitoramento interno da temperatura nos cilindros durante a carbonização, somente sendo possível a medição da temperatura na parede externa do cilindro metálico, por intermédio de um medidor infravermelho.

Uma situação constatada em todas as carbonizações foi a heterogeneidade de temperatura entre as faces do cilindro, conforme esquematicamente ilustrado na Figura 4.13.

Figura 4.13. Exemplo de heterogeneidade térmica entre as faces dos cilindros (vista superior).

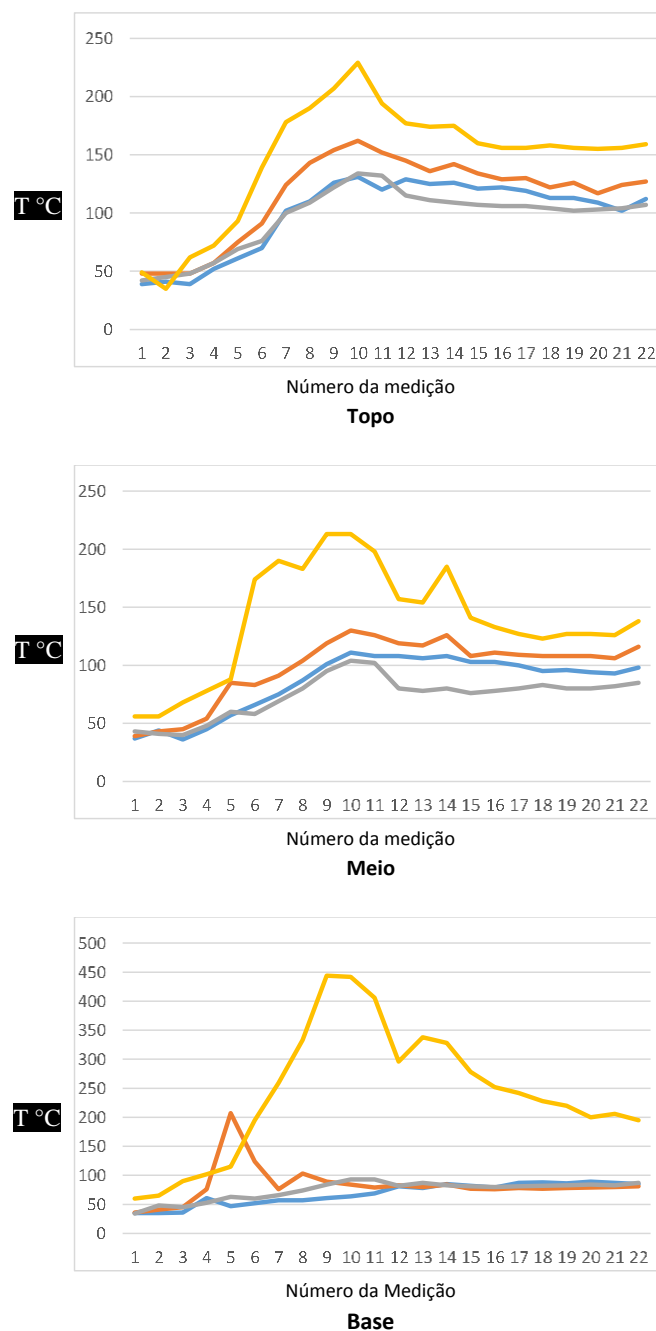


Ao longo de todas as carbonizações, uma zona do cilindro aumentava significativamente a temperatura (atingindo entre 300 e 350 °C) enquanto a zona oposta permanecia fria (entre 80 e 150 °C) durante toda a carbonização. As intervenções para homogeneizar a temperatura do cilindro recomendadas, como giro de cilindros, abertura e fechamento de crivos e cornetas demonstraram-se inócuas e ineficazes, uma vez que a heterogeneidade térmica permanecia inalterada.

Tal heterogeneidade pode ser explicada por caminhos preferenciais existentes entre a lenha enforada: na região de maior turbulência e circulação de gases, há a tendência de aumento de temperatura e início antecipado da carbonização; na região de menor turbulência, a temperatura permanece em patamares inferiores e não ocorre a formação de carvão. Ademais, as perdas térmicas nos cilindros são consideráveis, haja vista que os cilindros não possuem isolamento térmico e são fabricados em aço (material condutor de calor), diferentemente de outros fornos cujas paredes normalmente são duplas e de material isolante (tijolos).

Em virtude da absoluta discrepância de temperatura entre as faces, do comportamento anômalo da temperatura nos cilindros e da ineficácia do controle de temperatura – constatado em todas as carbonizações –, apresentar-se-á os perfis térmicos de algumas carbonizações para ilustração.

Figura 4.14. Exemplo de perfil térmico. As cores das linhas representam cada face do cilindro²⁵.



²⁵ Frente, esquerda, direita e atrás do cilindro. Como os cilindros podem ser girados em 180° ao longo da carbonização, as linhas referem-se à posição da face no início da carbonização.

O controle de temperatura ineficaz certamente é a causa-raiz para a alta geração de tiços, baixa produtividade e baixo rendimento gravimétrico. Tal heterogeneidade térmica é constatada na abertura do cilindro (onde se nota que os tiços ficaram concentrados na zona fria do cilindro), bem como no aspecto da base do forno quando da saída do cilindro. A coloração escura (Figura 4.15) representa a zona fria (onde houve formação de tiço) e a zona clara onde houve formação de carvão.

Figura 4.15. Aspecto da base do forno na saída do cilindro.



Em função de tal comportamento anômalo, inexistência de padrão em qual face dar-se-ia a maior temperatura e ineficácia do controle de temperatura, nenhuma modelagem ou busca por correlação foi elaborada para a temperatura de carbonização.

4.1.4 Ajuste de Modelos

Os dados observados para as variáveis produção de carvão por cilindro, rendimento gravimétrico, tempo de carbonização e produtividade por cilindro, nas 112 carbonizações realizadas, apresentam indícios de que seguem uma distribuição Normal²⁶, de média e variância desconhecidas. Já o histograma de teor de tiços apresenta um perfil assimétrico à direita,

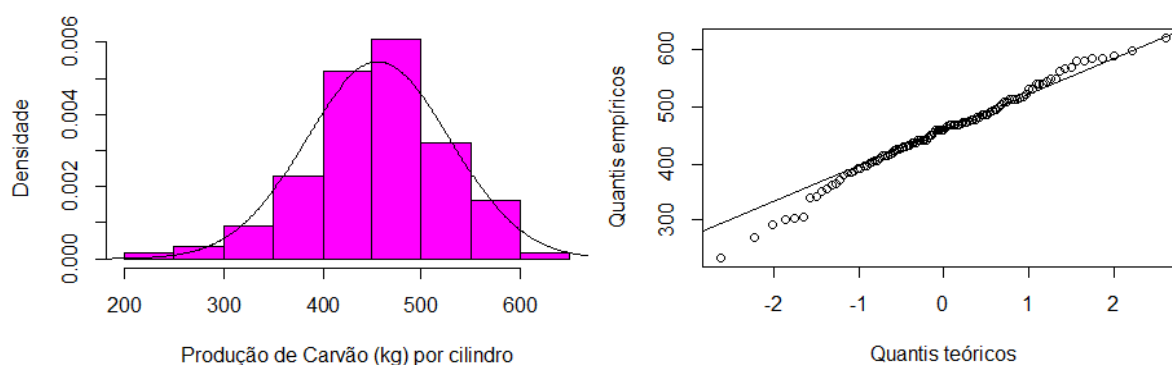
²⁶ Os indícios são simetria e caudas leves (baixa frequência de resultados extremos).

sugerindo que modelos que deem conta de assimetria positiva, como por exemplo Lognormal ou Gama, explicam tal variável²⁷.

Partindo do pressuposto que o número de carbonizações foi relativamente elevado ($n = 112$), uma forma conveniente de verificar a aderência de um modelo probabilístico aos dados é por intermédio do Teste de Kolmogorov-Smirnov (DEGROOT e SCHERVISH, 2012).

Os gráficos a seguir, mostrados nas Figuras 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 apresentam os histogramas das variáveis produção de carvão por cilindro, rendimento gravimétrico, tempo de carbonização, produtividade por carbonização e percentual de tiços, respectivamente. A linha contínua na cor preta sobre os histogramas representa a curva de densidade de um modelo probabilístico proposto para cada conjunto de dados. Os modelos que foram propostos foram normais $N(\mu, \sigma^2)$, com média e variância estimadas pela média amostral e variância amostral de cada conjunto de dados – com exceção ao teor de tiços, cujo modelo proposto foi *Lognormal* (μ, σ^2) , onde os parâmetros foram, respectivamente, estimados pelos logaritmos da média amostral e da variância amostral. Ao lado direito de cada histograma, foram plotados gráficos de *quantis* teóricos da normal e amostrais, para análise dos modelos.

Figura 4.16. Modelo normal $N(456; 5347)$ ajustado para produção de carvão (kg) por cilindro.



²⁷ Importante ressaltar que tanto o tempo de carbonização como o teor de tiços são variáveis contínuas e estritamente positivas, condição que deve ser satisfeita para a aplicação do modelo Lognormal.

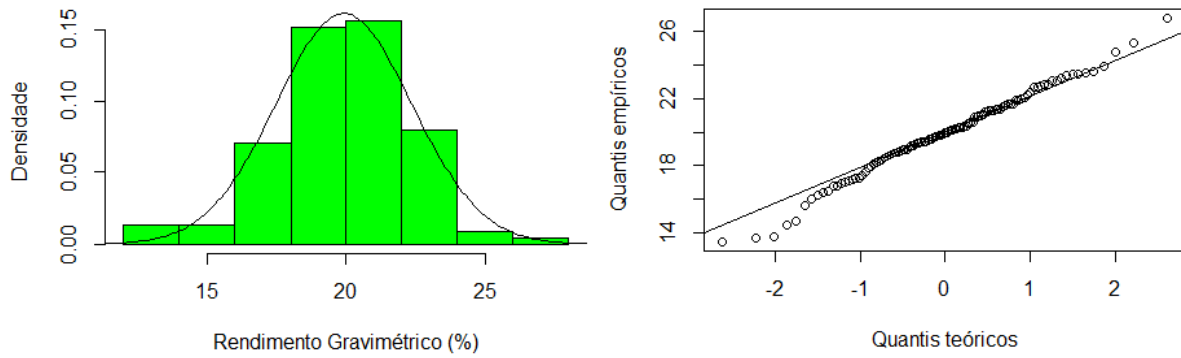
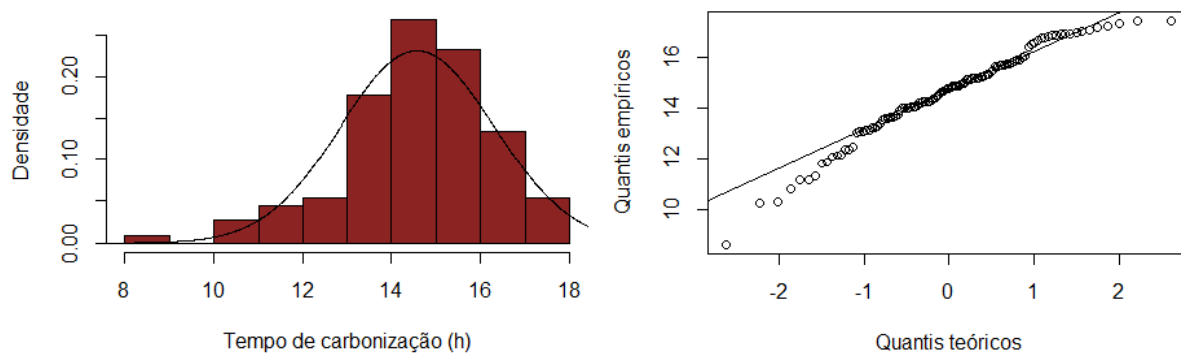
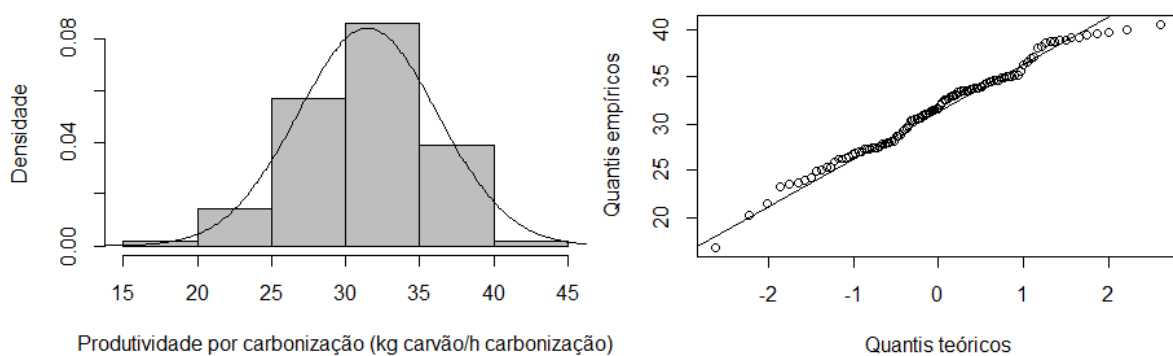
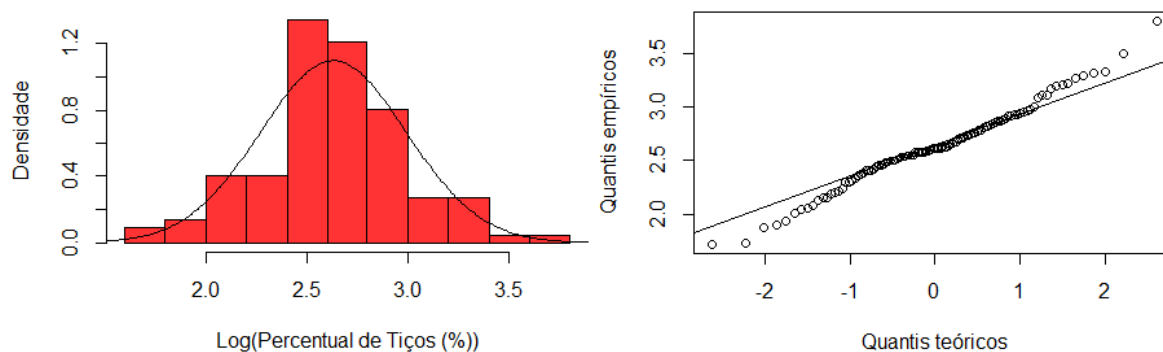
Figura 4.17. Modelo normal $N(20; 6)$ ajustado para o rendimento gravimétrico (%).**Figura 4.18.** Modelo normal $N(14,6; 3)$ ajustado para tempo de carbonização (h).**Figura 4.19.** Modelo normal $N(31,5; 22,6)$ ajustado para produtividade por carbonização (kg/h).

Figura 4.20. Modelo normal $N(2,63; 0,1324)$ ajustado para o $\log(\text{Percentual de Tiços})$ – equivalente a um modelo $\text{Lognormal}(2,63; 0,1324)$ para o percentual de tiços.



Uma análise qualitativa do ajuste dos modelos normais sobre os histogramas e dos gráficos *qqplot*²⁸ das Figuras 4.16 a 4.20 sugerem que o modelo normal é adequado aos dados observados, salvo desvios da normalidade que são observados em valores extremos.

Considerando que o número de observações é suficientemente grande para convergência e aplicação do Teste de Kolmogorov-Smirnov, pode-se testar a aderência dos modelos propostos com o Teste de Kolmogorov-Smirnov, testando-se as seguintes hipóteses gerais:

$$\begin{cases} H_0: \text{Modelo adere aos dados} \\ H_1: \text{A hipótese } H_0 \text{ não é verdadeira} \end{cases}$$

A Tabela 4.1 apresenta os resultados do Teste de Kolmogorov-Smirnov, sendo que a última coluna da tabela apresenta a decisão tomada em cada teste, caso adote-se um nível de significância de 5%.

²⁸ Gráfico que associa os *quantis* teóricos da distribuição normal com os *quantis* empíricos observados.

Tabela 4.1. Resultados do Teste de Kolmogorov-Smirnov para os modelos propostos.

Variável	Modelo	p-valor	Decisão
Produção de carvão por forno (kg)	$N(456; 5347)$	0,828	Não se rejeita H_0
Rendimento Gravimétrico (%)	$N(20; 6)$	0,904	Não se rejeita H_0
Tempo de Carbonização (h)	$N(14,6; 3)$	0,468	Não se rejeita H_0
Produtividade (kg/h)	$N(31,5; 22,6)$	0,678	Não se rejeita H_0
Percentual de Tiços (%)	$Lognormal(2,63; 0,1324)$	0,649	Não se rejeita H_0

A decisão do Teste de Kolmogorov-Smirnov para todos os modelos propostos foi em não rejeitar a hipótese nula, a um nível de significância de 5%²⁹. Ou seja, por intermédio dos dados observados de cada variável, não há evidência de que os dados não aderem aos modelos propostos – logo, tais modelos não são rejeitados.

A produtividade nominal da unidade com 6 fornos, tal qual afirmado pelo fabricante, é de 300 t/mês. Em seu Manual, o fabricante afirma que a produtividade máxima da UPC é de 314 t/mês. Para atingir tais produções mensais afirmadas pelo fabricante, ainda que fosse realizado o cálculo aritmético simples (conforme explanado na Seção 4.1.2), as produtividades deveriam ser de 74,4 kg/h (para 300 t/mês) e 77,9 kg/h (para 314 t/mês)

Mediante o modelo ajustado de produtividade, tem-se que a probabilidade de ocorrer uma produtividade maior ou igual a 74,4 kg/h é igual a zero³⁰. Ou seja, à luz dos dados observados e do modelo ajustado, a produtividade afirmada pelo fabricante é inexistente.

Uma outra abordagem ainda pode ser realizada para testar a afirmação do fabricante sobre a produtividade da UPC. É afirmado que as produtividades mínima e máxima da UPC são, respectivamente, 109 t/mês e 314 t/mês (ou uma produtividade aritmética simples de 27,0 kg/h e 77,9 kg/h, respectivamente). Partindo-se da premissa que a produtividade por forno segue uma distribuição normal $N(\mu, \sigma^2)$, com média e variância desconhecidas, e também se adotando a simetria entre as afirmações do fabricante (que levaria a uma média afirmada de

²⁹ A hipótese nula só seria rejeitada caso se adotasse nível de significância igual ou maior ao valor do p-valor de cada teste que, por intermédio da Tabela 4.1, nota-se que foram elevados.

³⁰ Tanto o Microsoft Excel como o *software* R retornam resultado zero para essa probabilidade.

52,5 kg/h – 262 t/mês), as seguintes hipóteses sobre a produtividade por cilindro podem ser testadas:

$$\begin{cases} H_0: \mu \geq 52,5 \text{ kg/h} \\ H_1: \mu < 52,5 \text{ kg/h} \end{cases}$$

Ou seja, testar-se-á se a produtividade média é superior a 52,5 kg/h (superior a 262 t/mês) ou se é inferior.

A partir das 112 observações de produtividade, chega-se a $p\text{-valor} = 2,2 \cdot 10^{-6}$, ou seja, os dados trazem evidências bastante fortes para rejeitar-se a hipótese de que a média da produtividade da UPC é superior a 52,5 kg/h (ou superior a 262 t/mês).

Por fim, importante também analisar o modelo ajustado para o rendimento gravimétrico. Em tal modelo, a probabilidade de se obter um rendimento gravimétrico superior a 25% é de apenas 2%: ainda que seja possível, é bastante rara a ocorrência de rendimentos gravimétricos superiores a 25%.

4.1.5 Subprodutos e Composição dos Gases da Carbonização

A caracterização dos gases e demais subprodutos da carbonização não foi objeto de estudo neste trabalho para os fornos analisados. Todavia, algumas constatações qualitativas foram extraídas durante a execução do trabalho experimental.

A condensação de alcatrão nos dutos de comunicação entre os fornos e a fornalha foi considerável, fato este indesejável para a operação dos fornos, haja vista que periodicamente deve-se interromper o funcionamento da unidade para efetuar a limpeza das tubulações, de forma a evitar o acúmulo excessivo de alcatrão e prevenir problemas na exaustão dos gases.

Quanto à operação da fornalha, constatou-se a instabilidade de sua operação, uma vez que a oscilação da coloração dos gases emitidos pela chaminé foi observada durante todas as fases da carbonização (ora, gases com coloração marrom-amarelada, ora incolor). Mesmo durante as fases mais avançadas da carbonização, onde se esperaria que os gases gerados possuíam máximo poder calorífico, permitindo uma operação estável da fornalha, ainda nesses momentos a fornalha foi incapaz de estabilizar termicamente e realizar o abatimento dos poluentes de forma eficaz³¹.

³¹ Conforme relatado, tais constatações foram meramente qualitativas.

4.2 Análise de Parâmetros Físico-Químicos do Carvão

Os resultados dos ensaios em laboratório para as 9 marcas de carvão selecionadas são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Resultados dos ensaios em laboratório.

Característica	Acácia Negra					Eucalipto				Incerteza de Medição
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Umidade Total, %	7,45	7,21	9,04	6,2	8,1	8,89	6,72	7,76	7,43	± 0,57
Umidade de higroscopia, %	3,19	2,67	3,09	2,74	3,52	3,48	1,95	3,21	2,8	± 0,41
Cinza (b.s.), %	1,67	2,47	1,31	1,7	1,53	1,65	6,66	8,26	5,8	± 0,13
Matérias voláteis (b.s.), %	32,88	29,14	19,39	39,2	25,39	29,82	11,01	26,29	22,09	± 1,58
Carbono Fixo (b.s.), %	65,45	68,39	79,3	59,1	73,08	68,53	82,33	65,45	72,11	± 1,70
Poder calorífico Superior (b.s.), kcal/kg	7225	7200	7650	6875	7345	7265	7530	6715	7130	± 25
Poder calorífico Superior(b.s.), J/g	30250	30250	32030	28785	30750	30415	31525	28115	29850	± 105

Ainda que tenham sido preparadas amostras combinadas a partir de 30 embalagens para cada marca de carvão, de forma que o valor ensaiado tivesse uma maior representatividade do parâmetro da marca, com uma única observação é inviável de se ter informações sobre a variabilidade de cada parâmetro.

Mesmo que seja possível tentar estabelecer modelos de regressão entre as variáveis (por exemplo, buscar se há associação entre o carbono fixo e o PCS), o número total de observações ($n = 9$) é baixo, o que prejudica a avaliação das premissas de modelos de regressão.

Neste contexto, a análise dos parâmetros ensaiados limitar-se-á a uma análise descritiva dos dados. Qualquer conclusão, neste sentido, limita-se às observações coletadas.

Para os dados da Tabela 4.2, são apresentados *boxplot* dos parâmetros físico-químicos associados à espécie florestal que originou o carvão (Figuras 4.21 a 4.26), bem como os diagramas de dispersão entre cada parâmetro físico-químico (Figura 4.27).

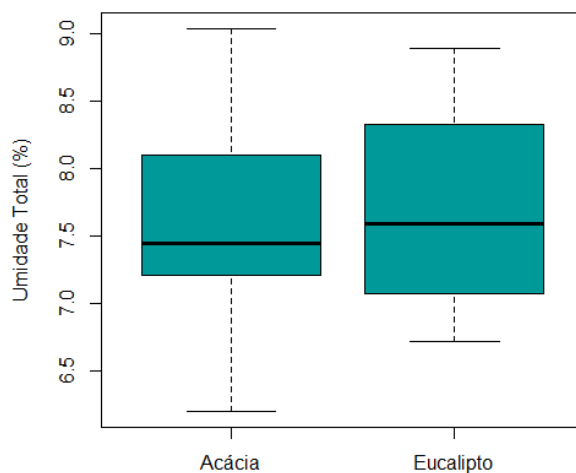
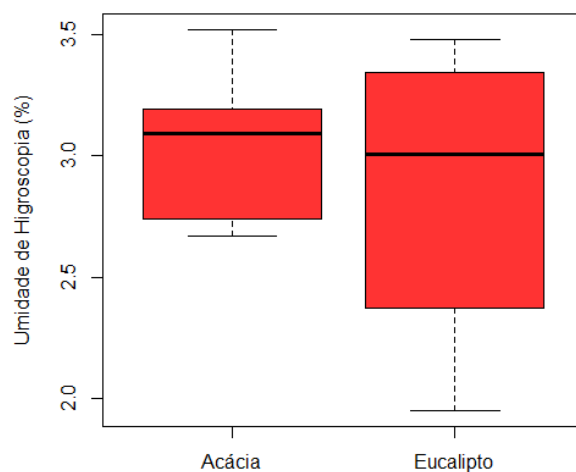
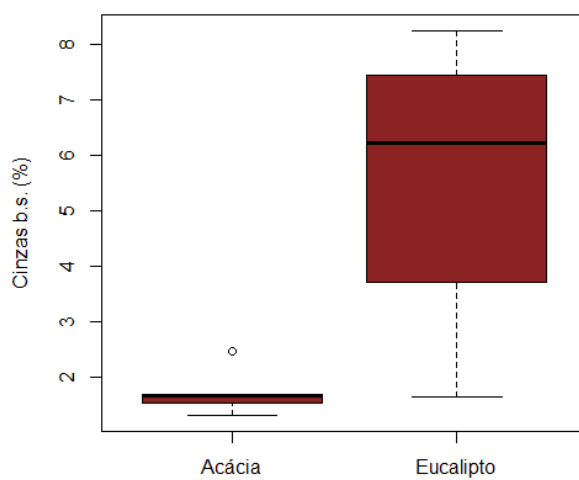
Figura 4.21. *Boxplot* da umidade total (%) associada à espécie florestal do carvão.**Figura 4.22.** *Boxplot* da umidade de higroscopia (%) associada à espécie florestal do carvão.**Figura 4.23.** *Boxplot* do teor de cinzas (% b.s.) associado à espécie florestal do carvão.

Figura 4.24. *Boxplot* de matérias voláteis (% b.s.) associadas à espécie florestal do carvão.

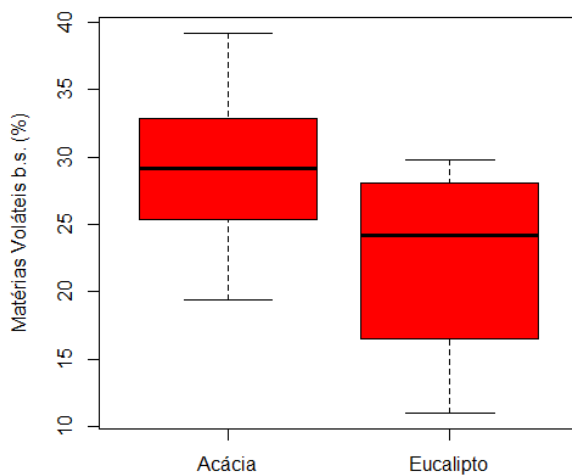


Figura 4.25. *Boxplot* do carbono fixo (% b.s.) associado à espécie florestal do carvão.

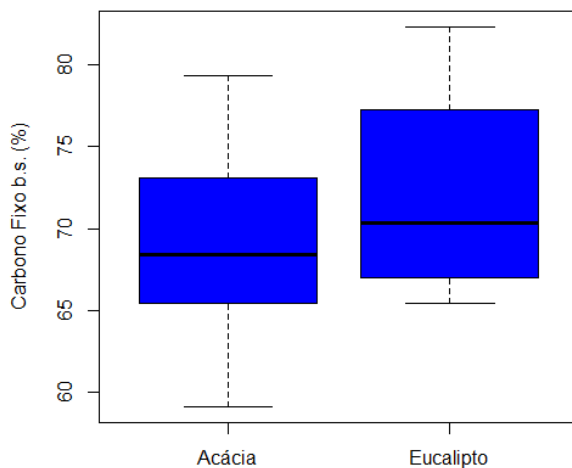
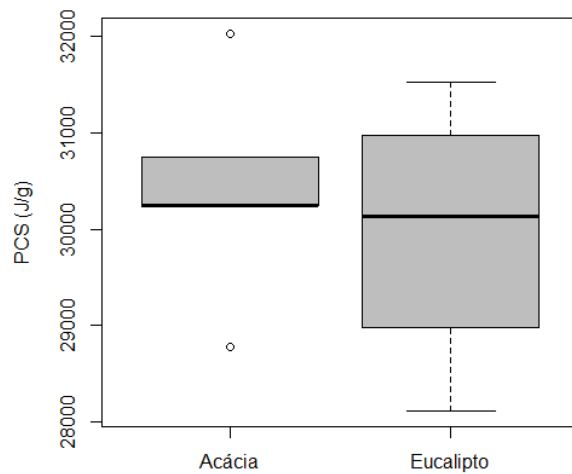


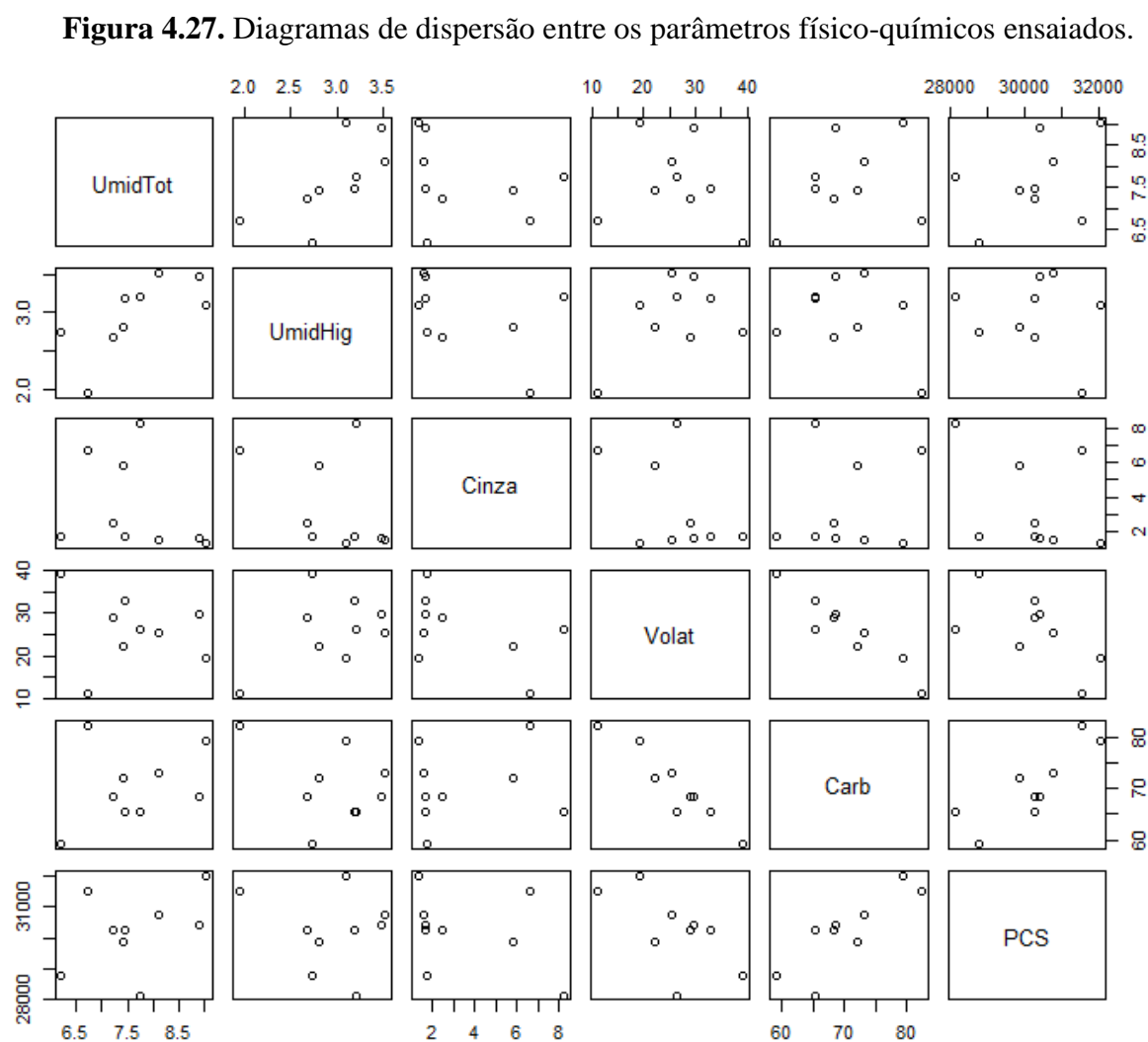
Figura 4.26. *Boxplot* do PCS (J/g) associado à espécie florestal do carvão.



De uma análise qualitativa e descritiva dos dados das 9 marcas amostradas, comparando a espécie florestal de origem do carvão, nota-se que:

- o carvão de acácia possui teor de cinzas bastante inferior ao carvão de eucalipto;
- os dados de matérias voláteis e do PCS do carvão de acácia possuem localização ligeiramente superior ao carvão de eucalipto;
- o teor de carbono fixo do carvão de eucalipto foi superior ao carvão de acácia;
- com exceção do teor de cinzas e PCS para o carvão de acácia, a variabilidade dos demais parâmetros físico-químicos é considerável e similar entre as espécies florestais.

A seguir, na Figura 4.27, apresentam-se os diagramas de dispersão entre os parâmetros físico-químicos ensaiados.



Pelos diagramas de dispersão (Figura 4.27), nota-se que há aparente associação entre:

- umidade total e umidade de higroscopia;
- matérias voláteis e carbono fixo;
- matérias voláteis e PCS;
- carbono fixo e PCS.

As associações entre as variáveis supracitadas, conforme discutido na revisão bibliográfica, eram esperadas e foram observadas mesmo com um baixo número de observações ($n = 9$). A busca por associação entre as variáveis seria uma possibilidade a fim de se baratear, futuramente, ensaios para caracterização de carvão – com a obtenção de modelos de regressão.

Capítulo 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O cenário brasileiro da produção de carvão vegetal ainda requer muitos avanços tecnológicos. O desafio de desenvolver uma tecnologia viável para substituir os fornos “rabo quente” ainda persiste. Apesar de os fornos “rabo quente” apresentarem problemas, como baixo rendimento, alto potencial poluente, nenhum aproveitamento energético dos gases da carbonização, trabalho manual e empirismo em sua operação, a substituição de tais fornos por uma nova tecnologia deve apresentar-se atraente o suficiente aos pequenos produtores, seja pelo baixo custo ou pela simplicidade na operação.

Novas tecnologias foram propostas para a produção de carvão vegetal, mas é imprescindível que a reprodutibilidade de seus resultados seja profundamente investigada em escala industrial, a fim de evitar a inviabilidade técnica e econômica de suas unidades.

Da parte experimental deste trabalho, extraem-se as seguintes conclusões:

- os fornos cilíndricos metálicos analisados apresentam rendimento similar ao observado nos fornos “rabo quente”, com rendimento gravimétrico inferior a 25%;
- a produtividade real da unidade é cerca de 1/3 da produtividade nominal;
- os fornos cilíndricos metálicos analisados não são viáveis economicamente para a produção de carvão vegetal;
- a variabilidade de parâmetros físico-químicos como umidade, matérias voláteis, e carbono fixo, dentre as marcas de carvão vegetal avaliadas e em função da espécie florestal, é considerável, não permitindo uma clara distinção entre os parâmetros.

Conclui-se que a ineficiência dos fornos cilíndricos metálicos em estudo deve-se, basicamente, às seguintes causas-raiz:

- ineficácia do controle de temperatura dos fornos, sendo que todas as intervenções recomendadas para controlar a temperatura dos fornos foram inócuas;
- superdimensionamento da vazão e localização da exaustão forçada de cada forno na posição central e inferior, favorecendo a formação de caminhos preferenciais e turbulências no interior do cilindro, ocasionando a heterogeneidade térmica;
- inexistência de isolamento térmico entre o cilindro metálico e o ambiente, o que promove consideráveis perdas energéticas no cilindro de carbonização.

Para trabalhos futuros, sugerem-se os seguintes aspectos:

- avaliação de dados de produtividade em escala industrial para as novas tecnologias DPC e Ondatec;
- realização de novos ensaios sobre os parâmetros de qualidade de carvão vegetal, ampliando-se a amostra de estudo e as marcas testadas, a fim de possibilitar o ajuste de modelos estatísticos por marca e por espécie florestal;
- estudo de correlações em escala industrial entre as variáveis de processo (como temperatura de carbonização, tempo de carbonização, parâmetros diversos da matéria-prima etc) e os aspectos de produtividade do forno e qualidade do carvão produzido;
- modelagem cinética da carbonização em escala industrial;
- desenvolvimento de modelos de regressão entre parâmetros físico-químicos de carvão, de forma a baratear futuros ensaios laboratoriais para caracterização do carvão vegetal.

REFERÊNCIAS

ABNT. ABNT NBR 6922:1981 – Carvão vegetal – Ensaio físico determinação da massa específica (densidade à granel). Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1981. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br>>.

ABNT. ABNT NBR 8740:1985 – Carvão vegetal – Determinação do índice de quebra e abrasão – Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1985. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br>>.

ABNT. ABNT NBR 9165:1985 – Carvão vegetal – Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade - Método de ensaio. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1985. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br>>.

ABNT. ABNT Catálogo, 2018. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br>>.

ALRS. Carvão vegetal deve ser retirado da lista de cargas perigosas, 2006. Disponível em: <<http://www2.al.rs.gov.br/noticias/ExibeNoticia/tabid/5374/IdMateria/163366/language/pt-BR/Default.aspx>>.

ANEEL. **Micro e Minigeração Distribuída. Sistema de Compensação de Energia Elétrica.** 2.^a. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016.

ANTT. Perguntas Frequentes sobre Produtos Perigosos, 2018. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/perguntas_frequentes/cargas.html>.

ARAÚJO, A. C. C. et al. Efeito da relação siringil/guaiacil e de fenóis derivados da lignina nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 110, p. 405-414, 2016.

ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia.** São Paulo: Editora Arte e Ciência, 1997.

ARCELORMITTAL. **Cogeração de energia elétrica a partir de gases da carbonização de madeira.** Belo Horizonte: III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.

- ASTM. ASTM D1762:2013 – Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. American Society for Testing and Materials, 2003.
- ASTM. ASTM D5865:2013 – Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. American Society for Testing and Materials, 2013. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br>>.
- ASTM. ASTM D7582:2013 – Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis. American Society for Testing and Materials, 2013. Disponível em: <<http://www.abntcolecao.com.br>>.
- AYRES, V. G. T. et al. **Correlações entre as Propriedades da Madeira e as do Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.
- AZADI, P. et al. Liquid fuels, hydrogen and chemicals from lignin: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 21, 2013. 506-523.
- BALAT, M. et al. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. **Energy Conversion and Management**, 2009. 3147-3157.
- BARBIERI, C. C. T. **Estudos de Misturas de Carvões e Biomassa visando a Combustão em Alto-Forno**. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, UFRGS, 2013.
- BARCELLOS, D. C. **Secagem de Madeira para a Produção de Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.
- BARCELLOS, D. C. **Secagem de Madeira para Produção de Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.
- BIOCOAL. Traditional Earth Mound Kiln & charcoal consumption, 2018. Disponível em: <<https://www.biocoal.org/earth-mound-kiln/>>.
- BLASI, C. D. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. **Progress in Energy and Combustion Science**, 34, 2008. 47-90.
- BOATENG, A. A. **Curso: Pyrolysis of Biomass for Fuel & Chemicals**. Porto Alegre: ARS-USDA, 2014.
- BRITO, J. O. et al. Estimativa da Densidade a Granel do Carvão Vegetal a partir de sua Densidade Aparente. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - Circular Técnica n.º 150**, p. 1-6, 1982.

- BROIDO, A. Kinetics of solid-phase cellulose pyrolysis. In: SHAFIZADEH, F.; SARKAREN, K. V.; TILLMAN, D. A. **Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins**. New York: Academic Press, 1976.
- BYRNE, C. **Polymer, Ceramic, and Carbon Composites Derived from Wood - PhD thesis**. [S.l.]: The John Hopkins University, US, 1996.
- BYRNE, C. E.; NAGLE, D. C. Carbonized wood monoliths - characterization. **Carbon**, 35, 1997. 267-273.
- CANAL, W. D. et al. **Influência da Umidade da Madeira nas Propriedades do Carvão**. Belo Horizonte: III Forum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.
- CARNEIRO, A. C. O. et al. **Estudo da Viabilidade Técnica e Econômica da Produção de Carvão Vegetal em Fornos Circulares com Baixa Emissão de Poluentes**. Viçosa: Centro de Pesquisas em Economia Aplicada – CEPEA/ES, 2012.
- CARNEIRO, A. C. O. et al. **Treinamento sobre Carvão Vegetal - Apostila Teórica e Prática**. Viçosa, MG. 2012.
- CETEC. **Produção e Utilização de Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 1982.
- CGEE. Modernização da Produção de Carvão Vegetal - Subsídios para Revisão do Plano Siderurgia. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2015. Disponível em: <https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Carvao_Vegetal_WEB_02102015_10225.PDF/a3cd6c7c-5b5b-450a-955b-2770e7d25f5c?version=1.3>.
- CHAN, W.-C.; KELBON, M.; KRIEGER, B. Modelling and experimental verification of physical and chemical processes during pyrolysis of a large biomass particle. **Fuel**, 64, 1985. 1505-1513.
- CIENTEC. Laboratório de Ensaios em Combustíveis, 2018. Disponível em: <<http://www.cientec.rs.gov.br/?model=conteudo&menu=153&id=332>>.
- COPAM/MG. Deliberação Normativa Copam nº 217, de 06 de dezembro de 2017, 2017. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=45558>>.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para Energia**. 1.^a edição. ed. Campinas: Editora Unicamp, 2009.

DEGROOT, M. H.; SCHERVISH, M. J. **Probability and Statistics**. 4th Edition. ed. Boston: Pearson, 2012.

DPC. DPC Processos Termoquímicos, 2018. Disponível em: <<http://dpcbiomassa.com.br>>.

EPE. Matriz Energética e Elétrica. Empresa de Pesquisa Energética, 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>.

FAO. **Simple Technologies for Charcoal Making**. Roma: FAO Forestry Paper 41, 1983.

FAO. **The Charcoal Transition: greening the charcoal value chain to mitigate climate change and improve local livelihoods**, by J. van Dam. Roma: Food and Agriculture Organization of The United Nations, 2017.

FEPAM. Licenciamento Ambiental, 2018. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/licenciamento/area1/popup3.asp?t=0&tabela=3>>.

FLORESTALENGENHARIA. Silvicultura e Carvão Vegetal, 2010. Disponível em: <<http://florestalengenharia.blogspot.com/2010/12/fornos-de-carvoejamento-rabo-quente-o.html>>.

FOELKEL, C. **Os Eucaliptos e as Leguminosas - Parte 01: Acacia mearnsii**. [S.l.]: Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel (ABTCP), 2008.

FREITAS, T. P.; RODRIGUES, B. P.; OLIVEIRA, J. T. C. **Caracterização Anatômica e Massa Específica de Platanus sp. visando a Produção de Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.

G1-MT. Dono de carvoaria ilegal, funcionário de prefeitura de cidade de MT é preso, 2017. Disponível em: <<http://g1.globo.com/mato-grosso/noticia/2017/02/dono-de-carvoaria-ilegal-funcionario-de-prefeitura-de-cidade-de-mt-e-preso.html>>.

G1-PR. Polícia Ambiental suspende atividades de carvoaria ilegal em Tapira, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pr/norte-noroeste/noticia/policia-ambiental-suspende-atividades-de-carvoaria-ilegal-em-tapira.ghtml>>.

G1-SP. Carvoaria clandestina que operava em Paulistânia é fechada pela polícia, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/bauru-marilia/noticia/carvoaria-clandestina-que-operava-em-paulistania-e-fechada-pela-policia.ghtml>>.

GOMES, I. A. S. et al. **O Aumento da Produção de Carvão Vegetal por meio da Carbonização em Alta Pressão**. São Paulo: 8º Congresso Internacional de Bioenergia, 2013.

GONÇALVES, F. G. et al. **Captação de líquido pirolenhoso da carbonização da madeira de Eucalyptus cloeziana em forno rabo quente**. Recife: Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 2010. 232-237 p.

GOUVÊA, A. F. G. et al. Avaliação do efeito da relação siringila/guaiacila da lignina de eucalipto. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, 2015. 71-78.

GRØNLI, M. **A theoretical and experimental study of the thermal degradation of biomass**. Trondheim: PhD thesis, Division of Thermal Energy and Hydro Power, 1996.

IBAMA. Instrução Normativa n.º 112, de 21 de agosto de 2006. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2006. Disponível em: <http://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/legislacao/federal/inst_normativa/2006_Instr_Norm_IBAMA_112.pdf>.

IBAMA. Documento de Origem Florestal (DOF). Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2018. Disponível em: <<https://servicos.ibama.gov.br/ctf/manual/html/160000.htm>>.

IBAMA. Sobre o Documento de Origem Florestal (DOF). Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2018. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/cadastradosof/sobre-o-dof>>.

IBGE. Produção extrativa vegetal e silvicultura, Rio de Janeiro, v. 31, p. 1-54, 2016.

IBGE. Censo Agro. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Disponível em: <<https://censoagro2017.ibge.gov.br/>>.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA, 2018. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br>>.

IBI. **International Biochar Initiative**: frequently asked questions about biochar. <http://www.biochar-international.org/biochar/faqs>: acessado em 24/08/2017, 2017.

IEA. Key World Energy Statistics. International Energy Agency, 2017. Disponível em: <<http://www.iea.org/statistics/>>.

INMETRO. Portaria Inmetro n.º 130, de 07 de dezembro de 1999. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 1999.

INMETRO. Portaria Inmetro n.º 337, de 29 de agosto de 2011. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 2011.

- IWAKIRI, S. et al. **Avaliação do potencial de uso de nove espécies do gênero *Eucalyptus* para produção de lâminas e compensados**. Lavras: Revista Cerne vol. 19 n° 2, 2013.
- JANKOWSKA, H.; SWIATKOWSKI, A.; CHOMA, J. *Active Carbon*, New York, 1991.
- JORNAL/USP. Como escolher melhor carvão para consumidor, saúde e meio ambiente, 2017. Disponível em: <<http://jornal.usp.br/ciencias/ciencias-agrarias/como-escolher-melhor-carvao-para-consumidor-saude-e-meio-ambiente/>>.
- JUNIOR, W. P. S. et al. **Densidade Básica da Madeira de Híbridos de *E. grandis* x *E. urophylla* destinados para Produção de Carvão Vegetal**. Belo Horizonte: III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.
- LARFELDT, J.; LECKNER, B.; MELAAEN, M. C. Modelling and measurements of the pyrolysis of large wood particles. *Fuel*, 79, 2000. 1637-1643.
- LATORRE, F. L. **Qualidade do Carvão Vegetal Siderúrgico**. Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal. Belo Horizonte, MG: Sociedade de Investigações Florestais (SIF). 2014.
- LATORRE, F. L. **Qualidade do Carvão Vegetal Siderúrgico**. Belo Horizonte, MG: III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.
- LEAL, O. A. **Impacto da adição de carbono pirogênico nas propriedades químicas do solo e na qualidade e quantidade de matéria orgânica de um cambissolo subtropical e de um argissolo tropical**. Porto Alegre: Tese de Doutorado em Agronomia, UFRGS, 2015.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for environmental management: science and technology**. New York: Earthscan, 2009. 416 p.
- MARTIN, M. F. *El Carbón Vegetal*. **Madri: Mundi-Prensa Castelló**, 1989.
- MARTINS, M. A. **Resfriamento Artificial de Fornos**. Belo Horizonte: III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.
- MCTIC. *Projetos MDL Aprovados*. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2018. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/mecanismo_de_desenvolvimento_limpo/submetidos/aprovados_termos_resolucao_1/index.html>.
- MDIC. *Estatísticas de Comércio Exterior: Séries Históricas*. Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, 2018. Disponível em: <<http://www.mdic.gov.br/index.php/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/series-historicas>>.

- MMA. Resolução n.º 382, de 26 de dezembro de 2006, Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=520>>.
- MMA. Resolução n.º 436, de 22 de dezembro de 2011, Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>>.
- MMA. Protocolo de Quioto. Ministério do Meio Ambiente, 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto>>.
- MMA. Resolução n.º 237, de 19 de dezembro de 1997, Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama), 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res97/res23797.html>>.
- MS-NOTÍCIAS. Carvoaria sem autorização de funcionamento é fechada em Nova Andradina, MS, 2017. Disponível em: <<http://www.msnoticias.com.br/editorias/policia-mato-grosso-do-sul/carvoaria-sem-autorizacao-de-funcionamento-e-fechada-em-nova/74158/>>.
- NEVES, K. M. et al. **Parâmetros de Qualidade da Madeira e do Carvão Vegetal de Clones de Eucalipto**. Belo Horizonte: III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.
- NOUMI, E. S. et al. **Optimization of Pyrolysis Conditions for Production of Reductant Charcoal**. Belo Horizonte: III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.
- NOUMI, E. S. et al. Optimization of Pyrolysis Conditions for Production of Reductant Charcoal. **III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal**, Belo Horizonte, 2014.
- OLIVEIRA, A. C. et al. Otimização da Produção do Carvão Vegetal por meio do Controle de Temperaturas de Carbonização. **Revista Árvore**, 37, 2013. 557-566.
- ONDATEC. Ondatec - Tecnologia do Carvão Limpo, 2018. Disponível em: <<http://www.ondatec.com>>.
- ONU. World Population Prospects: The 2017 Revision., 2018. Disponível em: <<https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-the-2017-revision.html>>.
- PAN, M. J.; VAN STADEN, J. The use of charcoal in in vitro culture - a review. **Plant Growth Regulation**, v. 26, p. 155-163, 1998.

- PANDOLFO, A. G.; AMINI-AMOLI, M.; KILLINGLEY, J. S. Activated carbons prepared from shells of different coconut varieties, 32, 1998. 1015-1019.
- PEACOCKE, G. V. C. Ablative Pyrolysis of Biomass. **PhD thesis**, Aston University, UK, 1994.
- PETROFF, G.; DOAT, J. Pyrolyse des bois tropicaux, influence de la composition chimique de bois sur les produits de distillation. **Revue B'ois et Forêts des Tropiques**, 177, 1978. 51-64.
- PLANALTO. Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011, 2011. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/LCP/Lcp140.htm>.
- PLANTARSIDERÚRGICA. **Sistema de Gerenciamento e Controle da Carbonização via Supervisório**. Belo Horizonte: III Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2014.
- QUANDL. ECX CER Emission Futures, Continuous Contract. Intercontinental Exchange (ICE), 2018. Disponível em: <https://www.quandl.com/data/CHRIS/ICE_CER1-ECX-CER-Emission-Futures-Continuous-Contract>.
- REPÓRTERBRASIL. Carvoarias representam um quinto das inclusões na 'lista suja' do trabalho escravo, 2014. Disponível em: <<http://reporterbrasil.org.br/2014/01/carvoarias-representam-um-terco-das-inclusoes-na-lista-suja-do-trabalho-escravo/>>.
- ROUSSET, P. et al. Pressure effect on the quality of eucalyptus wood charcoal for the steel industry: A statistical analysis approach. **Fuel Processing Technology**, 92, 2011. 1890-1897.
- SAA. Resolução n.º 10, de 11 de julho de 2003. Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo, 2003.
- SAA. Resolução n.º 40, de 14 de dezembro de 2015. Secretaria de Agricultura e Abastecimento de São Paulo, 2015.
- SANTOS, R. C. **Parâmetros de Qualidade da Madeira e do Carvão Vegetal de Clones de Eucalipto**. [S.l.]: Tese de Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira, UFPA, 2010.
- SCHENA, T. **Pirólise da fibra da casca de coco**: caracterização do bio-óleo antes e após a aplicação de dois processos de melhoramento. Porto Alegre: Dissertação de Mestrado em Química, UFRGS, 2015.
- SCHNEIDER, P. R. et al. Produção de Madeira e Casca Verde por Índice de Sítio e Espaçamento Inicial de Acácia Negra (*Acacia mearnsii* de wild). **Ciência Florestal**, 2001. 161-165.

SHAFIZADEH, F. The chemistry of pyrolysis and combustion. In: ROWELL, R. **The chemistry of solid wood**. Washington, DC: ACS, 1984. p. 489-529.

SILVA, R. F. **Análises Energética e Exergética de uma Micro Central de Cogeração inserida em uma Planta de Carbonização de Madeira Reflorestada**. Belo Horizonte: Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, PUC Minas, 2009.

SOARES, V. C. et al. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão. **Revista Árvore**, p. 543-549, 2014.

SOMERVILLE, M.; JAHANSHAH, S. The effect of temperature and compression during pyrolysis on the density of charcoal made from Australian eucalypt wood. **Renewable Energy**, 80, 2015. 471-478.

UHLIG, A.; GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T. O uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica brasileira e o impacto sobre as mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Energia**, 14, n. 2, 2008.

UNFCCC. List of Annex I Parties to the Convention. United Nations Climate Change, 2018. Disponível em: <http://unfccc.int/parties_and_observers/parties/annex_i/items/2774.php>.

YALLICO, Y. G. P. **Reatividade comparativa de Coque, Carvão Mineral, Carvão Vegetal e Coque Verde de Petróleo**. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, PUC-Rio, 2012.

YANG, H. et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel** 86, 2007. 1781-1788.

APÊNDICE A – LICENCIAMENTO AMBIENTAL

Segundo o Ibama, “o licenciamento ambiental é um importante instrumento de gestão da Política Nacional de Meio Ambiente (estabelecida na Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981), pelo qual a Administração Pública busca exercer o necessário controle sobre as atividades humanas que interferem nas condições ambientais”.

Na legislação ambiental, a Resolução n.º 237, de 19 de dezembro de 1997, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) constitui no marco legal fundamental para o licenciamento ambiental. O Inciso I do Art. 1º define o licenciamento ambiental como sendo o “procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental, considerando as disposições legais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis ao caso”. (MMA, 2018)

Segundo define a referida legislação, as licenças ambientais dividem-se em:

- **licença prévia (LP):** licença ambiental solicitada na fase preliminar do planejamento do empreendimento ou atividade, contendo requisitos básicos a serem atendidos para a sua viabilidade ambiental, observadas as diretrizes de planejamento e zoneamento ambientais;
- **licença de instalação (LI):** licença ambiental visando a instalação, implantação, manutenção ou reforma do empreendimento ou atividade, de acordo com as especificações constantes nos projetos e prescrições contidas nos estudos ambientais;
- **licença de operação (LO):** licença ambiental visando a operação do empreendimento ou atividade, de acordo com as prescrições contidas nos estudos ambientais.

A *exploração econômica da madeira ou lenha e subprodutos florestais* está definida como atividade sujeita ao licenciamento ambiental segundo o Anexo 1 da Resolução Conama n.º 237/1997, atividade essa onde a produção de carvão vegetal está enquadrada.

A citada Resolução Conama define as competências por realizar o licenciamento ambiental, a depender da localização e do tipo de atividade, podendo essa competência ser do órgão ambiental federal (no caso, o próprio Ibama), estadual ou municipal. Posteriormente, e adicionalmente, a Lei Complementar n.º 140, de 08 de dezembro de 2011, estabeleceu que “*o licenciamento ambiental das atividades ou empreendimentos que causem ou possam causar impacto ambiental de âmbito local, conforme tipologia definida pelos respectivos Conselhos Estaduais de Meio Ambiente, considerados os critérios de porte, potencial poluidor e natureza da atividade*” são ações administrativas dos Municípios (PLANALTO, 2011).

Ou seja, segundo a referida Lei Complementar, em função do porte, potencial poluidor e natureza da atividade, desde que o impacto ambiental seja de âmbito local, os Conselhos Estaduais de Meio Ambiente definem se o licenciamento ambiental da atividade dar-se-á em esfera estadual ou municipal.

No estado do Rio Grande do Sul, a Fepam, instituição responsável pelo licenciamento ambiental estadual, classifica a atividade de *produção de carvão vegetal em fornos* (cód. 3.017,00) como sendo de potencial poluidor baixo, independentemente do porte do empreendimento, recaindo o licenciamento ambiental exclusivamente para a esfera municipal, conforme Resoluções Consema n.º 315/2016 e 365/2017 (FEPAM, 2018).

Tal simplificação do licenciamento ambiental, contudo, não é observada ao se consultar a legislação de outros estados. Em Minas Gerais – importante estado siderúrgico e grande produtor de carvão –, a classificação do potencial poluidor da produção de carvão não possui um critério único e independente do porte do empreendimento. A Deliberação Normativa n.º 217, de 06 de dezembro de 2017, do Conselho Estadual de Política Ambiental (Copam) estabelece a seguinte classificação para a produção de carvão vegetal (cód. G-03-03-4).

Tabela A.1. Classificação do porte e potencial poluidor da atividade de produção de carvão vegetal no estado de Minas Gerais (cód. G-03-03-4) (COPAM/MG, 2017).

Potencial Poluidor/Degradador			
Recurso	Pequeno	Médio	Grande
Ar			X
Água	X		
Solo		X	
Geral		X	
Porte do Empreendimento			
	Pequeno	Médio	Grande
Produção nominal (P) (mdc/ano) ³²	50 000 < P < 75 000	75 000 < P < 100 000	P > 100 000

Fazendo a conjugação do porte e do potencial poluidor, determina-se a classe do empreendimento. Por fim, determina-se sua modalidade de licenciamento combinando a classe do empreendimento (Tabela A.1) com critérios locacionais (Tabela A.2).

Tabela A.2. Critérios locacionais do empreendimento. Caso a localização não se enquadre em nenhum item, atribui-se Peso 0 (COPAM/MG, 2017).

Critérios Locacionais de Enquadramento	Peso
Localização prevista em Unidade de Conservação de Proteção Integral, nas hipóteses previstas em Lei	2
Supressão de vegetação nativa em áreas prioritárias para conservação, considerada de importância biológica “extrema” ou “especial”, exceto árvores isoladas	2
Supressão de vegetação nativa, exceto árvores isoladas	1
Localização prevista em zona de amortecimento de Unidade de Conservação de Proteção Integral, ou na faixa de 3 km do seu entorno quando não houver zona de amortecimento estabelecida por Plano de Manejo; excluídas as áreas urbanas.	1
Localização prevista em Unidade de Conservação de Uso Sustentável, exceto APA	1
Localização prevista em Reserva da Biosfera, excluídas as áreas urbanas	1

³² Metros cúbicos de carvão (mdc) por ano. A medida de produção de carvão em volume (mdc ou m³) é preferencialmente utilizada no ramo siderúrgico e por fornecedores de carvão à siderurgia, em contrapartida à medida de massa (toneladas), bastante utilizada por produtores de carvão que comercializam o carvão como combustível.

Crêterios Locacionais de Enquadramento	Peso
Localiza�o prevista em Corredor Ecológico formalmente instituído, conforme previsão legal	1
Localiza�o prevista em áreas designadas como Sítios Ramsar	2
Localiza�o prevista em área de drenagem a montante de trecho de curso d'água enquadrado em classe especial	1
Capta�o de água superficial em área de Conflito por uso de recursos hídricos.	1
Localiza�o prevista em área de alto ou muito alto grau de potencialidade de ocorrência de cavidades, conforme dados oficiais do CECAV-ICMBio	1

Para a produ o de carvão vegetal, classificada com potencial poluidor/degradador “médio”, tem-se as seguintes modalidades de licenciamento (Tabela A.3) no estado de Minas Gerais, dependendo do porte (Tabela A.1) e dos critérios locacionais de enquadramento (Tabela A.2).

Tabela A.3. Modalidade de Licenciamento Ambiental para produ o de carvão vegetal em Minas Gerais (COPAM/MG, 2017).

	Porte do Empreendimento		
	Pequeno	Médio	Grande
Local Peso 0	LAS-Cadastro	LAS-RAS	LAC1
Local Peso 1	LAS-RAS	LAC1	LAC2
Local Peso 2	LAC1	LAC2	LAC2

Na modalidade de Licenciamento Ambiental Simplificado (LAS), a licença   emitida em uma única fase, mediante cadastro de informa es pelo empreendedor, com expedi o eletr nica da licença, denominada LAS-Cadastro; ou, ainda, depois de análise, em uma única fase do Relatório Ambiental Simplificado (RAS), com expedi o da licença, denominada LAS-RAS.

Na modalidade de Licenciamento Ambiental Concomitante (LAC), a licença   emitida conforme os seguintes procedimentos:

- análise, em uma única fase, das etapas de LP, LI e LO da atividade ou do empreendimento, denominada LAC1;

- análise, em uma única fase, das etapas de LP e LI do empreendimento, com análise posterior da LO; ou, análise da LP com posterior análise concomitante das etapas de LI e LO do empreendimento, denominada LAC2.

Em contrapartida, no estado de São Paulo, o licenciamento ambiental da produção de carvão vegetal dá-se de forma relativamente padronizada em âmbito estadual, realizado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb), com a exigência de LP, LI e LO, acompanhada da respectiva manifestação do órgão ambiental municipal, para fornos de qualquer porte.

Ou seja, tomando-se somente três estados distintos a título exemplificativo, nota-se a existência de procedimentos, competências e definições quanto ao licenciamento ambiental da produção de carvão vegetal bastante distintos. Também, o nível, detalhamento e organização das informações disponibilizadas ao público nos *sites* dos órgãos estaduais de meio ambiente, sobre licenciamento ambiental, é bastante heterogêneo.

Comparando-se o Rio Grande do Sul com Minas Gerais, percebe-se que o nível de preocupação com o potencial poluidor – e o conseqüente afrouxamento ou arrocho no licenciamento ambiental – difere sobremaneira nesses estados, provavelmente em função do nível de experiência que cada ente federado obteve com a produção de carvão.

APÊNDICE B – DOCUMENTO DE ORIGEM FLORESTAL

O carvão produzido no Brasil é majoritariamente proveniente de florestas plantadas, conforme discutido anteriormente, sendo que a produção de carvão a partir de espécies nativas decresce com o passar dos anos. No entanto, ainda há uma parcela razoável de carvão produzido a partir de florestas nativas.

A produção de carvão a partir de espécies nativas geralmente está associada à ilegalidade na produção de carvão e ao desmatamento; frequentes são as notícias de carvoarias fechadas por utilizarem madeira de origem nativa sem o preenchimento dos requisitos legais para tanto (G1-PR, 2018; G1-MT, 2017; G1-SP, 2018; MS-NOTÍCIAS, 2017).

A utilização de matéria-prima florestal de origem nativa, em contraponto à de origem plantada (ou reflorestada), é uma preocupação expressa na legislação, a qual busca, em síntese, a preservação dos recursos naturais nativos dos diversos biomas brasileiros. Desta maneira, o carvão produzido a partir de madeira nativa deve comprovar a origem da matéria-prima, bem como deve vir acompanhado (em seu transporte e armazenamento) de Documento de Origem Florestal (DOF) (IBAMA, 2018).

“O Documento de Origem Florestal (DOF), instituído pela Portaria n° 253, de 18 de agosto de 2006, do Ministério do Meio Ambiente (MMA), constitui licença obrigatória para o transporte e armazenamento de produtos florestais de origem nativa, inclusive o carvão vegetal nativo, contendo as informações sobre a procedência desses produtos” (IBAMA, 2018).

A emissão do documento de transporte e demais operações são realizadas eletronicamente por meio do Sistema DOF, disponibilizado via *internet* pelo Ibama, sem ônus financeiro aos setores produtor e empresarial de base florestal, na qualidade de usuários finais do serviço e aos órgãos de meio ambiente integrantes do Sistema Nacional de Meio Ambiente (Sisnama). Os critérios e procedimentos de uso do DOF são estabelecidos na Instrução Normativa Ibama n.º 21, de 23 de dezembro de 2014, válida para todos os estados da federação

que utilizam o Sistema DOF. Por exceção, três unidades da federação valem-se da prerrogativa de adotar sistemas próprios para emissão de documento de controle do transporte e armazenamento de produtos florestais de origem nativa, como Pará e Mato Grosso (que utilizam o Sisflora), e Minas Gerais, que utiliza o SIAM (IBAMA, 2018).

O transporte ou armazenamento de carvão de origem nativa, sem dispor do respectivo DOF, constitui atividade sujeita a sanções penais e administrativas na forma da Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998.

Art. 45. Cortar ou transformar em carvão madeira de lei, assim classificada por ato do Poder Público, para fins industriais, energéticos ou para qualquer outra exploração, econômica ou não, em desacordo com as determinações legais:

Pena - reclusão, de um a dois anos, e multa.

Art. 46. Receber ou adquirir, para fins comerciais ou industriais, madeira, lenha, carvão e outros produtos de origem vegetal, sem exigir a exibição de licença do vendedor, outorgada pela autoridade competente, e sem munir-se da via que deverá acompanhar o produto até final beneficiamento:

Pena - detenção, de seis meses a um ano, e multa.

Parágrafo único. Incorre nas mesmas penas quem vende, expõe à venda, tem em depósito, transporta ou guarda madeira, lenha, carvão e outros produtos de origem vegetal, sem licença válida para todo o tempo da viagem ou do armazenamento, outorgada pela autoridade competente.

APÊNDICE C – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

As Resoluções Conama n.º 382/2006 e n.º 436/2011³³ estabelecem limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. A atividade de produção de carvão vegetal não consta, especificamente, no rol de atividades estabelecida na legislação (MMA, 2006) e (MMA, 2011).

Todavia, os Anexos IV dessas Resoluções estabelecem limites de emissão para *poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de derivados da madeira*. A legislação define que a madeira em forma de lenha é entendida como um derivado de madeira e que “*processo de geração de calor por combustão externa*” é um “*processo de queima de derivados da madeira, realizado em qualquer forno ou caldeira, cujos produtos de combustão não entram em contato direto com o material ou produto processado*” (MMA, 2006) e (MMA, 2011).

Em uma interpretação não literal da legislação, pode-se enquadrar a carbonização da madeira (considerada por alguns autores como “combustão incompleta”) na definição supracitada, ainda que talvez essa não tenha sido a intenção do legislador. Para o caso em epígrafe, os limites máximos estabelecidos são para três parâmetros: NO_x, material particulado ou monóxido de carbono, a depender da potência térmica nominal, conforme Tabela C.1.

³³ Apesar de mais recente, a Resolução Conama n.º 436/2011 estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas antes de 2 de janeiro de 2007 ou que solicitaram LI anteriormente a essa data. Já a Resolução Conama n.º 382/2006, estabelece os limites máximos a serem observados para as fontes fixas instaladas a partir de 2 de janeiro de 2007 e que não solicitaram a LI anteriormente a essa data.

Tabela C.1. Limites de emissão para materiais particulados e NOx provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de derivados de madeira.

Potência Térmica Nominal ³⁴ (MW)	Materiais Particulados ³⁵ (mg/Nm ³) ³⁶	NOx ³⁷ (mg/Nm ³)
Menor que 10	730	Não aplicável
Entre 10 e 30	520	650
Entre 30 e 70	260	650
Maior que 70	130	650

Segundo o Anexo IV da Resolução Conama n.º 382/2006, a critério do órgão ambiental licenciador, para sistemas com potência de até 10 MW, alternativamente aos limites da Tabela C.1, poderá ser aceito: o monitoramento periódico de monóxido de carbono (Tabela C.2); ou avaliação periódica da concentração de material particulado através da opacidade, sendo que, neste caso, o valor máximo permissível para a emissão deste poluente não deverá exceder o padrão 1 da Escala de Ringelmann.

Tabela C.2. Limites de emissão para monóxido de carbono (CO) provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de derivados de madeira.

Potência Térmica Nominal (MW)	CO (mg/Nm ³)
Até 0,05	6500
Entre 0,05 e 0,15	3250
Entre 0,15 e 1,0	1700
Entre 1,0 e 10	1300

Por fim, a legislação estabelece que “o lançamento de efluentes gasosos na atmosfera deverá ser realizado através de dutos ou chaminés, cujo projeto deve levar em consideração as edificações do entorno à fonte poluidora e os padrões de qualidade do ar estabelecidos. Em função das características locais da área de influência da fonte poluidora sobre a qualidade

³⁴ Condição máxima de operação da unidade de geração de calor para o qual o equipamento foi projetado, determinado em termos de potência térmica, com base no PCI, calculado a partir da multiplicação do PCI do combustível pela quantidade máxima de combustível queimada por unidade de tempo.

³⁵ Todo e qualquer material sólido ou líquido, em mistura gasosa, que se mantém neste estado na temperatura do meio filtrante, estabelecida pelo método adotado.

³⁶ Todos os resultados das Tabelas C.1 e C.2 devem ser expressos na unidade de concentração mg/Nm³, em base seca e corrigidos a 8% de oxigênio.

³⁷ Refere-se à soma das concentrações de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂).

do ar, o órgão ambiental licenciador poderá estabelecer limites de emissão mais restritivos, inclusive considerando a alternativa de utilização de combustíveis com menor potencial poluidor” (MMA, 2006).

Nota-se que no tocante a emissões atmosféricas, existe um certo vácuo na legislação ao não abranger, especificamente, os processos de carbonização da madeira. Tal vácuo pode até ser compreensível, caso se considerar que a produção de carvão, no Brasil, está espalhada no meio rural e é dominada por pequenos produtores, onde o acesso a sistemas de medição e controle é mais dificultado, tal qual a ação fiscalizatória dos órgãos ambientais estaduais.

APÊNDICE D – TRANSPORTE DE CARVÃO A GRANEL

A classificação do carvão vegetal como produto perigoso para fins de transporte ainda constitui dúvida para transportadores de carvão no Brasil, havendo o questionamento se o transporte de carvão, afinal, deve atender à legislação específica de transporte de produtos perigosos a granel – regulamentada pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) e pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) – ou se está isento de tal normativo.

Segundo a ANTT, *“o transporte rodoviário, por via pública, de produtos que sejam perigosos, por representarem risco para a saúde de pessoas, para a segurança pública ou para o meio ambiente, é submetido às regras e aos procedimentos estabelecidos pelo Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos, Resolução ANTT nº. 3665/2011 e alterações, complementado pelas Instruções Complementares aprovadas pela Resolução ANTT nº. 420/2004 e suas alterações, sem prejuízo do disposto nas normas específicas de cada produto”* (ANTT, 2018).

“Conforme o item 2.0.0 da Resolução ANTT nº 420/2004, a classificação de um produto como perigoso para transporte é de responsabilidade do fabricante deste, ou de seu expedidor, orientado por aquele, tomando como base as características físico-químicas do produto, alocando-o em uma das classes ou subclasses de risco descritas no regulamento” (ANTT, 2018).

De acordo com a Resolução ANTT nº 420/2004 o carvão, de origem animal ou vegetal, está enquadrado na Classe de Risco 4.2 (substância sujeita à combustão espontânea), como produto perigoso para o transporte terrestre, sendo a este estabelecidas as informações do número ONU 1361 (dispostas na Relação de Produtos Perigosos, Cap. 3.2.4/5 da citada Resolução)” (ANTT, 2018).

Depois de iniciado um movimento na Assembleia Legislativa do estado do Rio Grande do Sul, com a participação da Fundação de Ciência e Tecnologia (Cientec) (ALRS, 2006), a Fepam editou a Resolução Fepam n.º 04, de 19 de julho de 2010, dispensando de licença de operação para transporte de produtos perigosos o carvão vegetal, ensacado ou a granel, produto perigoso Classe 4.2, ONU 1361, no Estado do Rio Grande do Sul. A motivação da referida Resolução estadual baseou-se em laudo técnico da Cientec, bem como em uma avaliação do Legislativo Estadual de que a retirada do carvão da lista de cargas perigosas beneficiaria mais de 30 mil famílias no Rio Grande do Sul, que trabalham com a produção e transporte de carvão vegetal no estado (ALRS, 2006).

Diante de um possível imbróglio, a ANTT esclareceu em seu *site* oficial sob que forma o carvão deve ser tratado para fins de transporte terrestre, conforme ANEXO. Ou seja, a ANTT definiu em que casos a regulamentação que rege o transporte terrestre de produtos perigosos não necessita ser aplicada em território nacional, ainda que o carvão vegetal permaneça no rol de produtos perigosos estabelecido pela ONU.

APÊNDICE E – REQUISITOS DE QUALIDADE PARA O CARVÃO

As características físico-químicas desejáveis para o carvão, seja para uso siderúrgico ou para uso doméstico, não estão estabelecidas em documentos regulamentares ou normativos. Ou seja, as características físico-químicas do carvão não devem atender, compulsoriamente, a um normativo vigente para que o carvão seja comercializado, diferentemente de outros produtos para os quais – além de exigências regulamentares – existem mecanismos compulsórios estabelecidos na legislação para a demonstração formal de conformidade (como etiquetagem, certificação, inspeção ou ensaio).

Mesmo não existindo compulsoriedade regulamentar para os parâmetros físico-químicos do carvão, os requisitos de qualidade (bem como a necessidade de demonstrá-los) acabam sendo estabelecidos pelo próprio mercado, em um esquema voluntário de conformidade.

Noumi, et al. (2014) compilaram as principais propriedades e seus limites – distinguindo o carvão vegetal em geral do coque metalúrgico e do carvão para uso siderúrgico – a fim de caracterizar um carvão com boas propriedades para uso siderúrgico, conforme mostrado na Tabela E.1.

Tabela E.1. Propriedades do carvão vegetal, coque metalúrgico e carvão vegetal para fins siderúrgico (NOUMI, BLIN, *et al.*, 2014).

Propriedade	Unidade	Carvão vegetal	Coque metalúrgico	Carvão para uso siderúrgico
Carbono fixo	%	70-80	88	75-80
Matéria volátil	%	25-35	1	< 25
Umidade	%	1-6	1-2	< 4
Cinzas	%	0,5-4	10-12	< 1
Enxofre	%	0,03-0,1	0,45-0,7	< 0,03
Resistência à compressão	kgf/cm ²	10-80	130-160	> 30
Granulometria	mm	9-100	25-75	40-50
Densidade a granel	kg/m ³	180-350	550	> 250

No caso de carvão vegetal para uso doméstico, o estado de São Paulo é o único que possui uma regulamentação (JORNAL/USP, 2017). A Resolução n.º 10 SAA, de 11 de julho de 2003 (SAA, 2003), alterada pela Resolução n.º 40 SAA, de 14 de dezembro de 2015 (SAA, 2015) – emitida pela SAA/SP – define padrões mínimos de qualidade para carvão vegetal como base para certificação de produtos pelo Sistema de Qualidade de Produtos Agrícolas, Pecuários e Agroindustriais do Estado de São Paulo.

A Resolução SAA n.º 40/2015, além de estabelecer níveis para as características físico-químicas do carvão, define procedimento para amostragem e ensaio, bem como adentra em questões de boas práticas de processamento do carvão; condições de conservação, manuseio, armazenamento, embalagem e expedição; aspectos de segurança do trabalho e preservação ambiental; e expressa de vedação ao uso de mão-de-obra infantil. O teor da Resolução SAA n.º 40/2015 denota a preocupação do agente estadual em disciplinar um segmento que, notoriamente e em sua maioria, é caracterizado pela precariedade nas relações produtivas e de trabalho.

Adicionalmente às propriedades definidas na Tabela E.2, a Resolução também estabelece que o carvão: deve ter aspecto de “*cor negra brilhante, não podendo apresentar pedaços de madeira semicarbonizada (atiço) e nem resíduos de combustão da madeira cinza e, preferencialmente, isento de pó*”; deve ser “*isento de quaisquer materiais biológicos que não o próprio carvão*”, e; que “*antes ou durante a queima do carvão não é recomendável a emissão de odores desagradáveis*” (SAA, 2015). Esses critérios definidos na Resolução não

possuem métrica objetiva para quantificá-los, recaindo em consequente subjetividade ao determiná-los.

Tabela E.2. Propriedades físico-químicas do carvão vegetal segundo Resolução SAA n.º 40/2015 do estado de São Paulo.

Propriedade	Unidade	Valor
Carbono fixo	%	> 73
Umidade	%	< 5,0
Cinzas	%	< 1,5
Teor de material fino ³⁸	%	< 5
Densidade a granel	kg/m ³	> 200

³⁸ Quando embalado, apresentar teor de material fino (< 12 mm) inferior a 5% do peso líquido (SAA, 2015).

APÊNDICE F – PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DE MADEIRA EMPILHADA

Para os produtores de carvão, o insumo de maior relevância – seja para a produção de carvão de alta qualidade, seja por representar o maior custo em sua produção – é a matéria-prima, usualmente madeira na forma de lenha.

De forma a proteger o consumidor, salvaguardar transações comerciais justas, transparentes e confiáveis, o Inmetro – autoridade brasileira em matéria de metrologia legal – disciplina as unidades de medida, métodos e instrumentos de medição adotados no Brasil, estabelecendo regulamentos técnicos metrológicos de caráter obrigatório.

A comercialização de madeira roliça (na forma de toras, toretes ou lenha), utilizada para a produção de carvão, pode ocorrer basicamente de duas formas: por unidade de massa ou unidade de volume. A comercialização de madeira por unidade de massa exige a necessidade de se conhecer o teor de umidade de madeira, a fim de se ter uma relação comercial justa e uma correta precificação da madeira.

Diante das dificuldades em medir o teor de umidade da madeira no campo – seja pela heterogeneidade natural dos lotes, seja pela indisponibilidade de instrumentação confiável e barata, com resultados em tempo real – a prática mais usual é realizar a comercialização de madeira por unidade de volume.

O cálculo do volume de madeira empilhada, antigamente denominado “estéreo”, é realizado conforme o procedimento da Portaria Inmetro n.º 190, de 07 de dezembro de 1999, mostrado nas Figuras F.1, F.2 e F.3.

Figura F.1. Volume estéreo com os respectivos espaços vazios considerados normais (INMETRO, 1999).

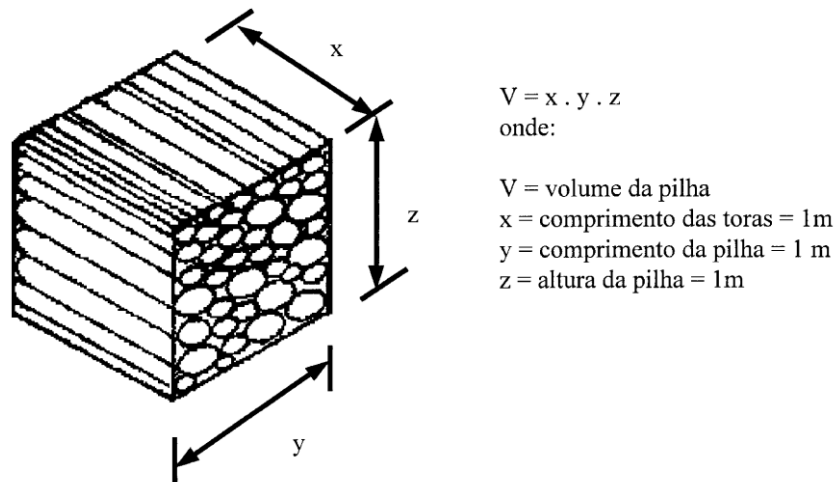


Figura F.2. Cálculo do volume de madeira empilhada em paralelepípedo retangular (INMETRO, 1999).

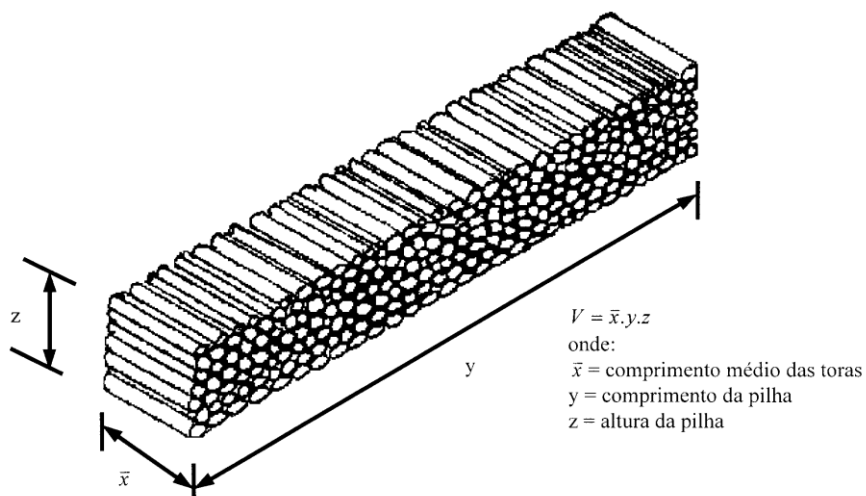
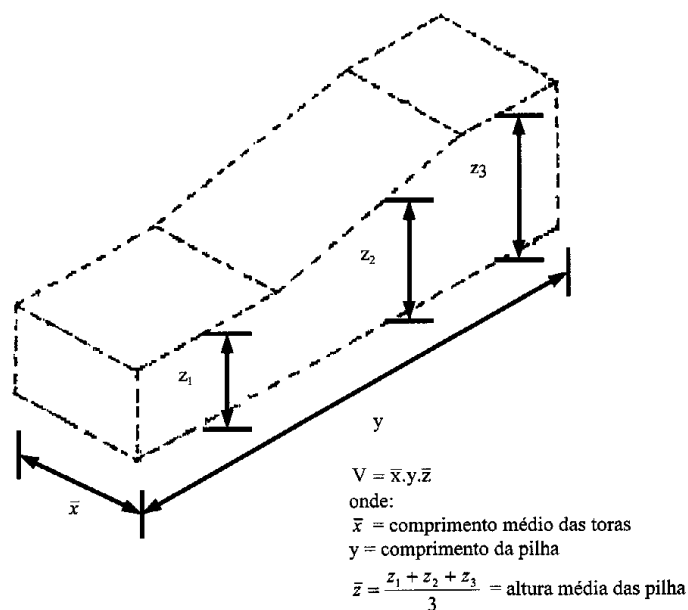


Figura F.3. Cálculo do volume de madeira empilhada em paralelepípedo com variação de altura (INMETRO, 1999).



A Portaria Inmetro n.º 190, de 07 de dezembro de 1999 prevê, em seu Art. 3.º, que “a partir de 01 de janeiro de 2010 só serão admitidas unidades do Sistema Internacional (SI) na produção, colheita, baldeio, transporte e comercialização de madeira roliça”, abolindo assim o uso do “estéreo” no Brasil.

Posteriormente, a Portaria Inmetro n.º 337, de 29 de agosto de 2011, revogou integralmente a Portaria Inmetro n.º 130/1999, motivado pela necessidade de desenvolver novas regulamentações técnicas metrológicas para medição de volume de madeira roliça empilhada (INMETRO, 2011).

Desde então, o Inmetro não editou regulamento técnico metrológico estabelecendo procedimento a ser adotado, em território nacional, para a medição de volume de madeira empilhada.

Neste vácuo normativo, o termo “estéreo” e a forma de medição bastante simplificada estabelecida na Portaria Inmetro n.º 190/1999 (revogada), na prática, permanecem presentes e sendo utilizados – sendo usual, inclusive, que a medição do volume seja realizada tomando-se as dimensões da carroceria do caminhão transportador.

Todavia, as incertezas nessas medições são inúmeras, haja vista que não se considera, por exemplo: fatores de empilhamento (duas pilhas de madeira, de mesmo volume, podem estar

conformadas e arranjadas de forma distinta³⁹, gerando diferença na quantidade real de madeira); heterogeneidade no comprimento das peças; tamanhos mínimo e máximo recomendáveis para as pilhas, a fim de se obter resultados de maior confiabilidade; heterogeneidade admissível para o diâmetro das peças que compõem a pilha, dentre outros.

³⁹ Popularmente, denomina-se uma pilha de madeira mal arranjada de “engaiolada”, uma prática que às vezes é executada de forma proposital pelo fornecedor, com o intuito de lograr vantagem indevida na comercialização.

APÊNDICE G – NORMAS BRASILEIRAS TÉCNICAS

A base nacional de normas técnicas voluntárias sobre carvão vegetal carece de modernização. As normas técnicas sobre carvão datam basicamente da década de 1980, sendo que a maior parte delas se encontra cancelada.

Todas as normas que se encontram canceladas foram canceladas sob o mesmo motivo: “esta norma não é mais utilizada pelo setor”. Os cancelamentos datam de dezembro de 2014 a abril de 2015.

A Tabela G.1 apresenta um resumo de todas as normas técnicas da ABNT sobre carvão vegetal.

Tabela G.1. Normas sobre carvão vegetal da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2018)

Norma	Título	Data da Publicação	Status
ABNT NBR 6922:1981	Carvão vegetal - Ensaio físico determinação da massa específica (densidade à granel)	30/10/1981	Cancelada
ABNT NBR 6923:1981	Carvão vegetal - Amostragem e preparação da amostra	30/10/1981	Cancelada
ABNT NBR 7402:1982	Carvão vegetal - Determinação granulométrica	30/07/1982	Em vigor
ABNT NBR 8112:1983	Carvão vegetal - Análise imediata - Método de ensaio	31/07/1983	Cancelada
ABNT NBR 8633:1984	Carvão vegetal - Determinação do poder calorífico - Método de ensaio	30/10/1984	Cancelada
ABNT NBR 7416:1984	Carvão vegetal - Determinação do índice de quebra	30/12/1984	Cancelada
ABNT NBR 8740:1985	Carvão vegetal - Determinação do índice de quebra e abrasão - Método de ensaio	28/02/1985	Em vigor

Norma	Título	Data da Publicação	Status
ABNT NBR 9165:1985	Carvão vegetal - Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade - Método de ensaio	30/12/1985	Cancelada
ABNT NBR 8112:1986	Carvão vegetal - Análise imediata - Método de ensaio	30/10/1986	Cancelada
ABNT NBR 11377:1990	Carvão vegetal - Determinação de enxofre total por combustão - Método do iodato - Método de ensaio	30/10/1990	Em vigor

APÊNDICE H – CADEIA DE CARVÃO E OS CRÉDITOS DE CARBONO

Protocolo de Quioto

“O Protocolo de Quioto constitui um tratado complementar à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), definindo metas de redução de emissões para os países desenvolvidos e os que, à época, apresentavam economia em transição para o capitalismo, considerados os responsáveis históricos pela mudança atual do clima” (MMA, 2018).

Apesar de ter sido criado no ano de 1997, o Protocolo passou a vigorar em 2005, logo após o atendimento às condições que exigiam a ratificação por, no mínimo, 55% do total de países-membros da Convenção e que fossem responsáveis por, pelo menos, 55% do total das emissões de 1990 (MMA, 2018).

Para o primeiro período de compromisso, entre 2008-2012, 37 países industrializados e a Comunidade Europeia comprometeram-se a reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE)⁴⁰ para uma média de 5% em relação aos níveis de 1990. Para o período seguinte (2013-2020), as Partes se comprometeram a reduzir as emissões em pelo menos 18% abaixo dos níveis de 1990. Cada país negociou a sua própria meta de redução de emissões em função da sua visão sobre a capacidade de atingi-la no período considerado (MMA, 2018).

O Brasil ratificou o Protocolo em 23 de agosto de 2002, tendo sua aprovação interna por intermédio do Decreto Legislativo nº 144/2002. Entre os principais emissores de GHG, somente os Estados Unidos não ratificaram o Protocolo, apesar de continuarem com responsabilidades e obrigações definidas pela Convenção (MMA, 2018).

Na 21ª Conferência das Partes (COP-21) da UNFCCC foi aprovado um novo acordo global, o Acordo de Paris, que também possui metas de redução de emissões de GHG para

⁴⁰ Os gases de efeito estufa definidos pelo Protocolo de Quioto são: dióxido de carbono (CO₂), gás metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆).

todos os países, desenvolvidos e em desenvolvimento, definidas nacionalmente conforme as prioridades e possibilidades de cada um em alcançá-las (MMA, 2018).

Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

Para auxiliar os países desenvolvidos e em transição para o capitalismo, denominados como partes do Anexo I⁴¹ (UNFCCC, 2018), a atingirem suas metas quantitativas de redução de emissões de GHG, o Protocolo introduz três mecanismos de mercado, conhecidos como Mecanismos de Quioto, para que os países possam alcançar suas metas de redução com um melhor custo-benefício, quais sejam:

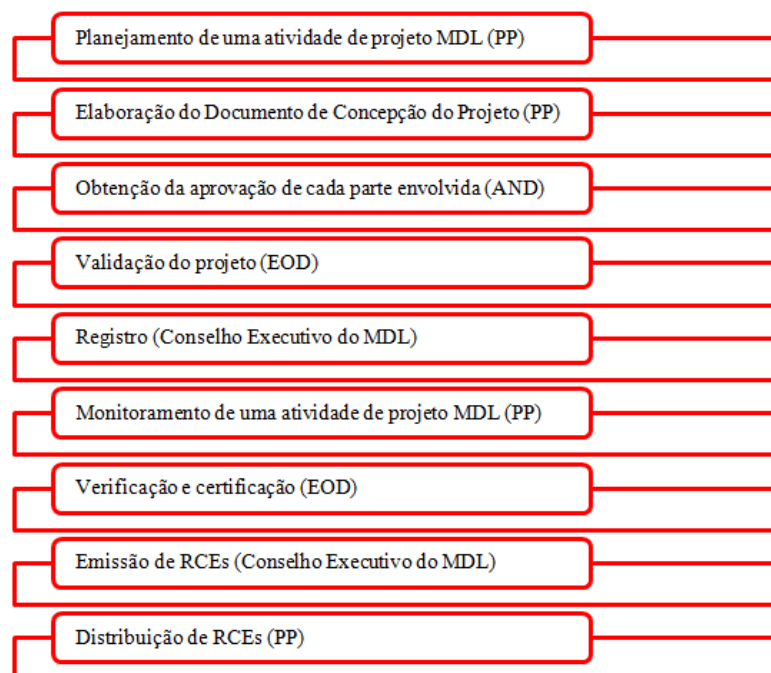
- Implementação Conjunta (IC);
- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL);
- Comércio Internacional de Emissões (CIE).

O MDL é o único mecanismo que permite a participação de países que não integram o rol do Anexo I (UNFCCC, 2018). No MDL, um país do Anexo I pode comprar créditos de carbono, denominados *reduções certificadas de emissões* (RCE), resultantes de atividades de projeto desenvolvidas em qualquer país em desenvolvimento que tenha ratificado o Protocolo. Tal possibilidade existe desde que a autoridade governamental do país onde ocorrem os projetos concorde que a atividade é voluntária e contribui para o desenvolvimento sustentável nacional (MMA, 2018).

Para elaborar um projeto MDL, o proponente do projeto deve elaborar, inicialmente, um documento de concepção do projeto, aplicando uma metodologia previamente aprovada pelo Comitê Executivo do MDL para definição de linha de base e monitoramento. As seguintes etapas que devem ser abrangidas estão mostradas na Figura H.1:

⁴¹ As partes do Anexo I são: Alemanha, Áustria, Austrália, Bélgica, Bielorrússia, Bulgária, Canadá, Chipre, Croácia, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos, Estônia, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Letônia, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Malta, Mônaco, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Polônia, Portugal, Reino Unido, República Tcheca, Romênia, Rússia, Suécia, Suíça, Turquia, Ucrânia e a União Europeia (UNFCCC, 2018).

Figura H.1: Ciclo do projeto MDL, onde: PP - Partes Participantes; AND⁴² - Autoridade Nacional Designada; EOD⁴³ - Entidade Operacional Designada.



Projetos MDL Aprovados sobre Carvão no Brasil

O Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC) disponibiliza em seu *site* a relação de projetos MDL aprovados desde 2004, inclusive disponibilizando o conteúdo integral dos projetos para consulta (MCTIC, 2018). A Tabela H.1 apresenta a distribuição temporal dos 435 projetos MDL aprovados.

Tabela H.1. Quantidade de projetos MDL aprovados por ano (MCTIC, 2018).

2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
3	67	59	55	22	30	22	21	118	22	7	3	6

⁴² No Brasil, a autoridade nacional designada é o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima (CIM), instituído pelo Decreto n.º 6.263, de 21 de novembro de 2007, composto por 16 Ministérios e pela Casa Civil, que coordena o Comitê.

⁴³ A lista atualizada das EODs credenciadas pelo Conselho Executivo pode ser obtida no endereço eletrônico <http://cdm.unfccc.int/DOE/list>.

A maioria dos projetos MDL aprovados versam sobre energia eólica, pequenas centrais hidrelétricas, mitigação de emissões de metano em aterros sanitários e cogeração de energia elétrica a partir de combustão de biomassa (MCTIC, 2018).

Dentre os 435 projetos MDL aprovados, somente 4 projetos MDL estão associados à redução de emissões na produção de carvão vegetal, os quais possibilitam a distribuição e comercialização de RCE, conforme Tabela H.2. Naturalmente, esses projetos foram concebidos por empresas de grande porte que atuam no ramo siderúrgico, e possuem suas próprias praças de carbonização.

Tabela H.2. Projetos MDL aprovados associados à produção de carvão (MCTIC, 2018).

N.º/Ano	Empresa	Localização ⁴⁴	Escopo	Período do Crédito	Total estimado de reduções ⁴⁵ (t CO ₂ e)
163/2007	Plantar	Minas Gerais	Mitigação de metano	2004-2025 (21 anos)	425 830
286/2010	Queiroz Galvão	Maranhão	Mitigação de metano	2010-2020 (10 anos)	2 268 452
325/2012	V&M	Minas Gerais	Mitigação de metano	2012-2022 (10 anos)	3 939 288
389/2012	Arcelor Mittal	Minas Gerais e Bahia	Mitigação de metano ⁴⁶	2013-2019 (7 anos)	3 223 321

Para entender melhor o porquê da drástica redução dos projetos MDL no Brasil, bem como a escassez de projetos sobre carvão, é essencial analisar o preço das RCE. Os gráficos das Figuras H.2 e H.3 apresentam a evolução do preço das RCE no mercado futuro internacional nos últimos 10 anos e últimos 5 anos, respectivamente. O último preço dos gráficos é de 0,19 € (19 de março de 2018).

⁴⁴ Não foram citadas as localidades das unidades de carbonização pois, em alguns projetos, elas estão distribuídas em mais de uma dezena de municípios.

⁴⁵ 1 RCE é equivalente a 1,0 t CO₂ e.

⁴⁶ Neste projeto em específico, além da mitigação de metano na produção de carvão, foram inclusas as reduções de emissões através da substituição do coque metalúrgico pelo carvão na produção do ferro-gusa; e a criação de estoques de carbono adicionais nos reflorestamentos da empresa.

Figura H.2. Histórico do preço (em euros €) das RCE no mercado futuro, para contratos contínuos, nos últimos 10 anos (QUANDL, 2018).

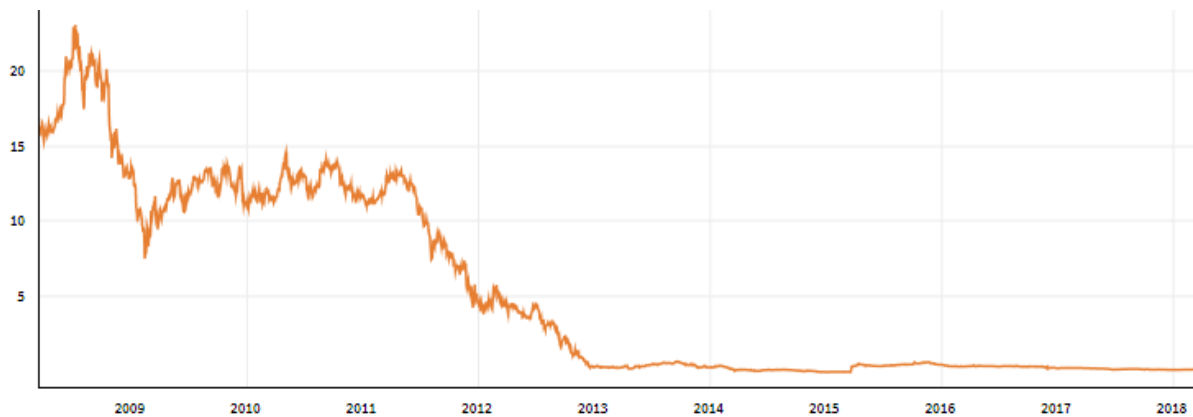


Figura H.3. Histórico do preço (em euros €) das RCE no mercado futuro, para contratos contínuos, nos últimos 5 anos (QUANDL, 2018).



Analisando-se os dados da Tabela H.1, nota-se que o ano de 2012 caracterizou-se por um *boom* no número de projetos MDL aprovados no Brasil, número esse que caiu vertiginosamente nos anos subsequentes. Dada a complexidade da concepção de um projeto MDL e de seu criterioso trâmite para aprovação, é provável que a grande quantidade de projetos MDL aprovada em 2012 teve início nos anos de 2010 e 2011, quando o preço das RCE no mercado internacional oscilava na faixa de 10 € a 15 €.

Porém, a partir do primeiro trimestre de 2011, o preço das RCE sofreu sucessivas quedas em sua cotação, atingindo – pela primeira vez – o valor de 1 € em novembro de 2012. Desta maneira, os projetos MDL passaram a ter sua viabilidade econômica profundamente afetada,

fazendo com que o comércio de RCE deixasse de ser um negócio lucrativo e motivador para realizar investimentos em projetos MDL.

Neste cenário macroeconômico, é improvável – ainda que viável tecnicamente – que a cadeia produtiva de carvão volte a investir em projetos MDL – inclusive para projetos de grande porte.

APÊNDICE I – MICRO E MINIGERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Em 17 de abril de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) criou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, possibilitando que consumidores brasileiros possam gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis, inclusive fornecendo o excedente gerado para a rede de distribuição de sua localidade.

A geração distribuída de energia elétrica é caracterizada quando se instalam geradores de pequeno porte, normalmente a partir de fontes renováveis de energia (mas aceitam-se geradores com base em combustíveis fósseis), com o objetivo de suprir a demanda energética de uma determinada unidade consumidora e ampliar a capacidade de geração de energia de um sistema regional ou nacional⁴⁷ (ANEEL, 2016).

Os benefícios para o sistema elétrico são diversos no sistema de geração distribuída: a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão; o baixo impacto ambiental; a melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada e a diversificação da matriz energética. Em contrapartida, há desvantagens com o surgimento de diversos geradores de energia de pequeno porte espalhados no território nacional: o aumento de complexidade de operação da rede; a dificuldade na cobrança pelo uso do sistema elétrico e cobrança de tributos; e alteração de procedimentos das distribuidoras para operar, controlar e proteger suas redes (ANEEL, 2016).

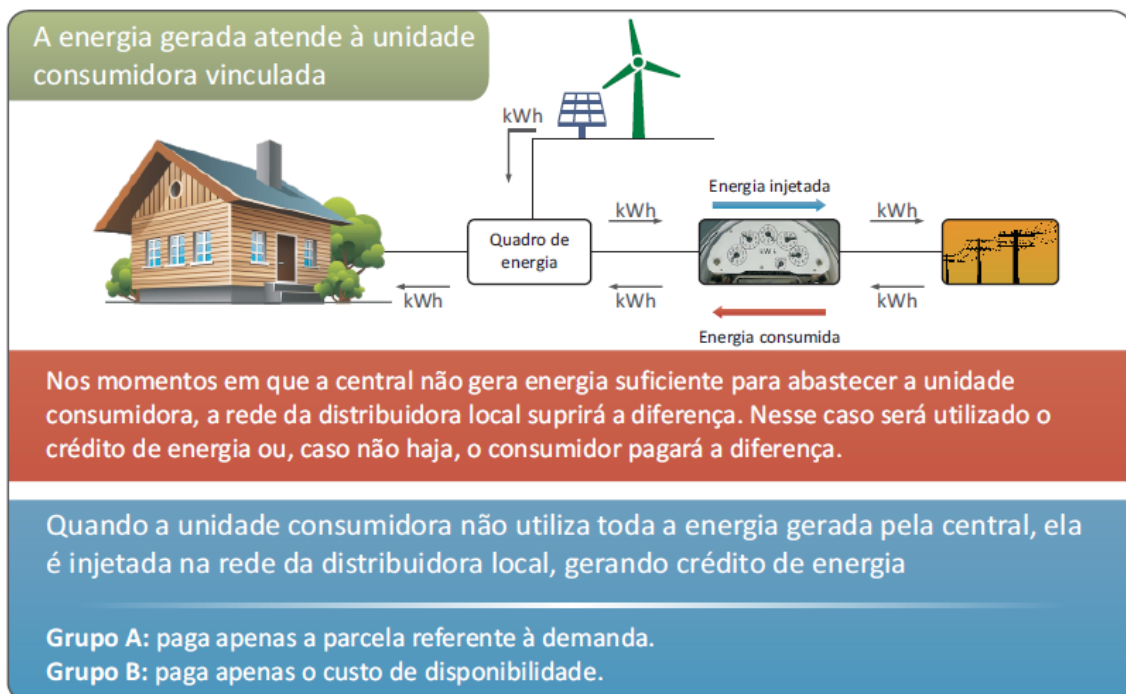
A Resolução Normativa Aneel n.º 482/2012, com alterações posteriores, estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como estabelece o sistema de compensação de energia

⁴⁷ Para efeitos de diferenciação, a microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 quilowatts (kW), enquanto que a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 megawatt (MW), para a fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes” (ANEEL, 2016).

elétrica⁴⁸. O sistema de compensação permite que “a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração seja injetada na rede da distribuidora, a qual funcionará como uma bateria, armazenando esse excedente. Quando a energia injetada na rede for maior que a consumida, o consumidor receberá um crédito em energia (kWh) a ser utilizado para abater o consumo em outro posto tarifário (para consumidores com tarifa horária) ou na fatura dos meses subsequentes. Os créditos de energia gerados continuam válidos por 60 meses. Há ainda a possibilidade de o consumidor utilizar esses créditos em outras unidades previamente cadastradas dentro da mesma área de concessão e caracterizada como autoconsumo remoto, geração compartilhada ou integrante de empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras (condomínios), em local diferente do ponto de consumo” (ANEEL, 2016).

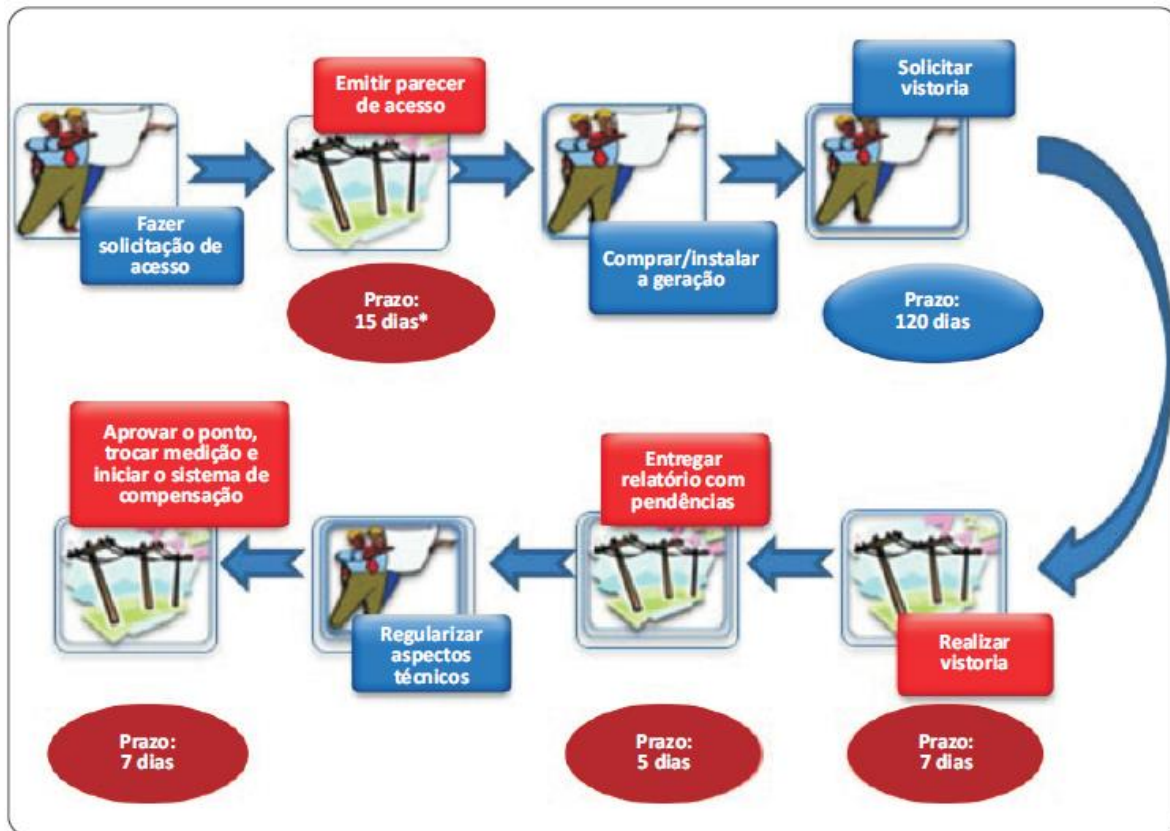
De uma forma simplificada, a Figura I.1 ilustra o sistema de compensação de energia elétrica e a Figura I.2 apresenta as etapas do processo de acesso à micro e minigeração distribuída.

Figura I.1. Sistema de Compensação de Energia (ANEEL, 2016). Grupo A: consumidores em alta tensão. Grupo B: consumidores em baixa tensão.



⁴⁸ O procedimento para viabilização do acesso e inserção do consumidor no esquema de micro e minigeração distribuída não será detalhado neste trabalho.

Figura I.2. Etapas e prazos do acesso à micro e minigeração distribuída. Em azul, são etapas de responsabilidade do consumidor; em vermelho, da distribuidora de energia elétrica (ANEEL, 2016).



A carbonização da madeira, conforme já discutido, produz gases combustíveis (principalmente, metano) os quais podem ser queimados em turbinas para produção de energia elétrica. E, no contexto da geração distribuída, até mesmo pequenos produtores localizados na zona rural podem participar do sistema de compensação de energia (ANEEL, 2016).

Todavia, apesar de ser um cenário aparentemente promissor, a viabilidade em se instalar um sistema de cogeração de energia – a partir da combustão dos gases da carbonização – merece ser brevemente analisada.

Sob o ponto de vista técnico, a principal dificuldade recai em manter a vazão de gases da carbonização em teor de riqueza⁴⁹ dentro de um intervalo aceitável para operação das turbinas. Como os fornos de carbonização são majoritariamente do tipo batelada, é necessário planejar minuciosamente a operação de um determinado número de fornos de forma que,

⁴⁹ Termo usual para designar o poder calorífico do gás da carbonização. Diz-se que o gás da carbonização está “rico” quando maior é o teor de metano e hidrogênio; diz-se que o gás está “pobre”, quando o teor de alcatrão e gases condensáveis é elevado. A riqueza do gás é uma função do estágio da carbonização, conforme já discutido.

conjuntamente, esses fornos consigam assegurar o fornecimento contínuo de gás rico, para operação do sistema de combustão.

Isso faz com que projetos de cogeração, em pequena escala, sejam praticamente inviáveis, por conta da inerente intermitência da riqueza do gás de carbonização.

Não obstante, os poucos empreendimentos existentes que aproveitam o gás da carbonização para a geração de energia elétrica estão restritos às grandes praças de carbonização que operam com fornos retangulares.

ANEXO A – COMUNICADO SUCAR – TRANSPORTE DE CARVÃO VEGETAL

COMUNICADO SUCAR/ANTT 2010

A Superintendência de Serviços de Transporte de Cargas da Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT, no uso de suas atribuições, fundamentada na Nota Técnica nº 013 GEROC/2010, de 12 de março de 2010, e no que consta do Processo nº 50520011041/2009-77;

CONSIDERANDO as prescrições contidas na Resolução ANTT nº. 420/04, que aprova as Instruções Complementares ao Transporte Terrestre de Produtos Perigosos;

CONSIDERANDO o produto carvão, de origem animal ou vegetal, considerado perigoso para transporte, alocado ao número ONU 1361, Grupo de Embalagem III, ao qual se aplica a Provisão Especial 223, que estatui:

“Se as propriedades físicas ou químicas de uma substância abrangida por esta descrição forem tais que, quando ensaiada, esta não se enquadrar nos critérios de definição da classe ou subclasse indicada na coluna 3, ou de qualquer outra classe ou subclasse, tal substância não está sujeita a este Regulamento”.

CONSIDERANDO a necessidade de esclarecimentos quanto à aplicabilidade da Provisão Especial 223 para o produto carvão vegetal;

CONSIDERANDO as características de produção do carvão vegetal em território nacional, e

tendo em vista a homogeneidade do processo de obtenção do produto por cada região, pela utilização de variedades semelhantes de matéria prima;

CONSIDERANDO a obrigatoriedade de porte de uma declaração do expedidor de que a substância foi ensaiada de acordo com os critérios da classe ou subclasse dispostos na referida Resolução e classificada como não perigosa para o transporte, nos termos da Provisão mencionada (vide item 5.4.1.1.11.5 da Resolução ANTT 420/04);

CONSIDERANDO as dificuldades enfrentadas pelo setor, formado em grande parte por pequenos produtores de carvão vegetal, em realizar individualmente os testes acima mencionados;

ESCLARECE:

1 – Admitem-se válidos e abrangentes a todas as expedições de transportes os testes realizados para classificação do carvão vegetal que utilizem variedades semelhantes de matéria-prima e mesmo processo de obtenção, sendo de total responsabilidade do expedidor emitir declaração de que o produto não é considerado perigoso para o transporte;

2 – Os testes a serem realizados devem ser, obrigatoriamente, os dispostos no Manual de Ensaio e Critério publicado pelas Nações Unidas (ST/SG/AC.10/11 Ver.3);

3 – A declaração emitida pelo expedidor deve ser clara e objetiva, explicitando o responsável pelas informações prestadas, além de ser única para cada expedição do produto, devendo estar referida no documento fiscal ou de transporte.

NOBORU OFUGI

Superintendente

ANEXO B – PROCEDIMENTO PARA TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARVÃO VEGETAL (ANTT)

O transporte rodoviário, por via pública, de produtos que sejam perigosos, por representarem risco para a saúde de pessoas, para a segurança pública ou para o meio ambiente, é submetido às regras e aos procedimentos estabelecidos pelo Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos, Resolução ANTT nº. 3665/11 e alterações, complementado pelas Instruções Complementares aprovadas pela Resolução ANTT nº. 420/04 e suas alterações, sem prejuízo do disposto nas normas específicas de cada produto.

Conforme o item 2.0.0 da Resolução ANTT nº 420/04, a classificação de um produto como perigoso para transporte é de responsabilidade do fabricante deste, ou de seu expedidor, orientado por aquele, tomando como base as características físico-químicas do produto, alocando-o em umas das classes ou subclasses de risco descritas no regulamento.

De acordo com a Resolução ANTT nº 420/04 o CARVÃO, de origem animal ou vegetal, está enquadrado na Classe de Risco 4.2 (substância sujeita à combustão espontânea), como produto perigoso para o transporte terrestre, sendo a este estabelecidas as informações do número ONU 1361 (dispostas na Relação de Produtos Perigosos, Cap. 3.2.4/5 da citada Resolução).

Quando tal produto for transportado atendendo-se aos parâmetros do Grupo de Embalagem III, aplica-se a Provisão Especial nº 223, que assim dispõe: 223 - Se as propriedades físicas ou químicas de uma substância abrangida por esta descrição forem tais que, quando ensaiada, esta não se enquadrar nos critérios de definição da classe ou subclasse indicada na coluna 3, ou de qualquer outra classe ou subclasse, tal substância não está sujeita a este regulamento.

Assim, sendo o produto CARVÃO, de origem animal ou vegetal, transportado de acordo com o Grupo de Embalagem III, após a realização dos ensaios exigidos, não apresentar

características que o enquadrem na subclasse de risco indicada na Coluna 3 da Relação de Produtos Perigosos (no caso, a subclasse de risco 4.2) ou em qualquer outra classe ou subclasse, a regulamentação que rege o transporte terrestre de produtos perigosos não necessita ser aplicada. Ou seja, a expedição não estará submetida às exigências estabelecidas no Decreto 96.044/88 e na Resolução ANTT nº. 420/04.

Uma vez configurada tal situação, a Resolução citada determina que o expedidor declare que seu produto foi ensaiado e não foi considerado perigoso para fins de transporte, nos termos do item 5.4.1.1.11.5:

5.4.1.1.11.5 O documento fiscal para substâncias sujeitas à Provisão Especial 223 (ver Capítulo 3.3) classificadas pelo expedidor como não-perigosas, deve conter ou ser acompanhado de uma declaração do expedidor de que tal substância foi ensaiada conforme os critérios da classe ou subclasse dispostos nesta Resolução e considerada não-perigosa para o transporte.

Tal declaração deverá acompanhar cada expedição do produto, podendo estar inserida no documento fiscal ou de transporte.

Informamos que não houve exclusão do produto CARVÃO VEGETAL da lista de produtos perigosos. Entretanto, tendo em vista as dificuldades enfrentadas pelo setor produtivo (formado em grande parte por pequenos produtores de carvão vegetal) em realizar individualmente os testes acima mencionados e também devido as características de produção em território nacional (homogeneidade do processo de obtenção por região frente a utilização de variedades semelhantes de matéria prima), a Superintendência de Serviços de Transporte de Cargas – SUCAR publicou um Comunicado a respeito da aplicabilidade da Provisão Especial 223 para o produto CARVÃO VEGETAL.

De acordo com o Comunicado citado, admitem-se válidos e abrangentes a todas as expedições de transportes os testes realizados para classificação do carvão vegetal que utilizem variedades semelhantes de matéria-prima e mesmo processo de obtenção. Os testes a serem realizados devem ser, obrigatoriamente, os dispostos no Manual de Ensaio e Critério publicado pelas Nações Unidas (ST/SG/AC.10/11 Ver.3).

Permanece a necessidade de emissão, por parte do expedidor, da Declaração de que trata o item 5.4.1.1.11.5 da Resolução ANTT n.º 420/04, devendo a mesma ser clara e objetiva, explicitando o responsável pelas informações prestadas, além de ser única para cada expedição do produto.

Salienta-se que todas as prescrições citadas se aplicam em âmbito federal, a todos os produtores e envolvidos na cadeia de transporte, não existindo diferenças de exigências em função dos estados da Federação.

“Quando tal produto [carvão] for transportado atendendo-se aos parâmetros do Grupo de Embalagem III, aplica-se a Provisão Especial n.º 223, que assim dispõe: ‘223 - Se as propriedades físicas ou químicas de uma substância abrangida por esta descrição forem tais que, quando ensaiada, esta não se enquadrar nos critérios de definição da classe ou subclasse indicada na coluna 3, ou de qualquer outra classe ou subclasse, tal substância não está sujeita a este regulamento’. Assim, sendo o produto carvão, de origem animal ou vegetal, transportado de acordo com o Grupo de Embalagem III, após a realização dos ensaios exigidos, não apresentar características que o enquadrem na subclasse de risco indicada na Coluna 3 da Relação de Produtos Perigosos (no caso, a subclasse de risco 4.2) ou em qualquer outra classe ou subclasse, a regulamentação que rege o transporte terrestre de produtos perigosos não necessita ser aplicada. Ou seja, a expedição não estará submetida às exigências estabelecidas no Decreto n.º 96.044/1988 e na Resolução ANTT n.º 420/2004.

Uma vez configurada tal situação, a Resolução citada determina que o expedidor declare que seu produto foi ensaiado e não foi considerado perigoso para fins de transporte, nos termos do item 5.4.1.1.11.5: 5.4.1.1.11.5 O documento fiscal para substâncias sujeitas à Provisão Especial 223 (ver Capítulo 3.3) classificadas pelo expedidor como não-perigosas, deve conter ou ser acompanhado de uma declaração do expedidor de que tal substância foi ensaiada conforme os critérios da classe ou subclasse dispostos nesta Resolução e considerada não-perigosa para o transporte.

Tal declaração deverá acompanhar cada expedição do produto, podendo estar inserida no documento fiscal ou de transporte. Informamos [ANTT] que não houve exclusão do produto carvão vegetal da lista de produtos perigosos. Entretanto, tendo em vista as dificuldades enfrentadas pelo setor produtivo (formado em grande parte por pequenos produtores de carvão vegetal) em realizar individualmente os testes acima mencionados e também devido às características de produção em território nacional (homogeneidade do processo de obtenção

por região frente a utilização de variedades semelhantes de matéria prima), a Superintendência de Serviços de Transporte de Cargas (Sucar) publicou um Comunicado a respeito da aplicabilidade da Provisão Especial n.º 223 para o produto carvão vegetal.

De acordo com o Comunicado citado, admitem-se válidos e abrangentes a todas as expedições de transportes os testes realizados para classificação do carvão vegetal que utilizem variedades semelhantes de matéria-prima e mesmo processo de obtenção. Os testes a serem realizados devem ser, obrigatoriamente, os dispostos no Manual de Ensaio e Critério publicado pelas Nações Unidas (ST/SG/AC.10/11 Ver.3). Permanece a necessidade de emissão, por parte do expedidor, da Declaração de que trata o item 5.4.1.1.11.5 da Resolução ANTT n.º. 420/2004, devendo a mesma ser clara e objetiva, explicitando o responsável pelas informações prestadas, além de ser única para cada expedição do produto. Salienta-se que todas as prescrições citadas se aplicam em âmbito federal, a todos os produtores e envolvidos na cadeia de transporte, não existindo diferenças de exigências em função dos estados da Federação.