



COQUEIFICADOR PARA RESÍDUOS SÓLIDOS

Carolina Soares Marques

Gisele Santos Queiroz Huguet do Nascimento

Helen Katiane Abreu dos Santos

EQWX01 Projeto de Final de Curso/EQ – EQA3

Orientador:

Prof. Dr. Abraham Zakon

Agosto de 2010

COQUEIFICADOR PARA RESÍDUOS SÓLIDOS

CAROLINA SOARES MARQUES
GISELE SANTOS QUEIROZ HUGUET DO NASCIMENTO
HELEN KATIANE ABREU DOS SANTOS

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química,
como parte dos requisitos necessários à obtenção dos graus de
Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Prof. João Alfredo Medeiros, Dr.

Prof. Mario Sergio de Oliveira Castro

Paulo Cesar Strauch, Dr.

Orientado por:

Abraham Zakon,
Dr. Eng.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Agosto de 2010

Ficha Catalográfica

MARQUES, Carolina Soares. NASCIMENTO, Gisele Santos Queiroz Huguet. SANTOS, Helen Katiane Abreu dos.

Coqueificador para resíduos sólidos / Carolina Soares Marques, Gisele Santos Queiroz Huguet do Nascimento, Helen Katiane Abreu dos Santos. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2010. xv,240; il.

(Projeto Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2010.

Orientador: Abraham Zakon, Dr. Engenheiro

1. coco verde.
2. carvão ativado.
3. carvão vegetal.
4. resíduos sólidos.
5. Projeto Final (Graduação – UFRJ/ EQ).
6. Abraham Zakon, Dr. Eng. I. Coqueificador para resíduos sólidos.

Dedicamos esse trabalho aos que amamos

“Eu pensava ter dado um grande salto para frente e
percebo que na verdade apenas ensaiei os primeiros
tímidos passos de uma longa marcha”

Jean-Luc Godard

AGRADECIMENTOS

A Deus por nos dar força e coragem para enfrentar todas as barreiras e nos permitir alcançar mais essa vitória.

Ao Prof. Dr. Abraham Zakon, pela dedicada orientação, incentivo e apoio em cada etapa deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Alexandre Castro Leiras Gomes.

A pesquisadora Dra. Morsyleide de Freitas Rosa da Embrapa Agroindustria Tropical pelas valorosas contribuições.

A empresa AlphaCarbo Industrial Ltda pela disponibilidade dos boletins técnicos sobre especificações do carvão ativado granulado.

Ao assistente técnico Nazareno de Pina Braga da empresa ArcelorMittal BioEnergia pelo fornecimento do artigo técnico sobre a retorta vertical de carbonização.

A bibliotecária e mediadora do SBRT Etiene Gonzalez pela colaboração e fornecimento do modelo de resposta técnica sobre madeira.

As bibliotecárias Cássia de Deus e Angelina Silva da biblioteca Paulo Geyer da EQ/UFRJ pela colaboração no envio do artigo sobre processo de carbonização contínua da madeira.

Aos colegas de graduação que conviveram e participaram de mais essa etapa em nossas vidas.

Especialmente, aos nossos amados pais, Geanete, Iara, Nazaré e Raimundo e querido esposo Paulo, por toda a confiança e carinho depositados no futuro de nossas carreiras.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química da UFRJ
como parte dos requisitos necessários para a conclusão dos cursos de
Engenharia Química.

COQUEIFICADOR PARA RESÍDUOS SÓLIDOS.

Carolina Soares Marques
Gisele Santos Queiroz Huguet do Nascimento
Helen Katiane Abreu dos Santos

Agosto de 2010.

Orientador: Prof. Dr. Abraham Zakon

RESUMO

O consumo da água de coco verde, *in natura*, nas praias brasileiras gera um problema ambiental, pois o destino final das cascas (aproximadamente 85% do peso bruto da fruta) envolve lixões, margens de estradas e aterros municipais. O seu aproveitamento para produzir carvão vegetal e carbono ativado em cooperativas ou indústrias químicas específicas é viável e desejável, além de ser uma alternativa para diminuir o espaço ocupado por estes resíduos em aterros municipais e reduzir a proliferação de vetores biológicos capazes de transmitir doenças. Uma ampla revisão de fornos e retortas para pirolisar biomassa foi realizada com o intuito de conceber um equipamento termoquímico simples para coqueificar cascas de coco verde e produzir carvão ativado, que pode ser empregado no tratamento de águas, efluentes líquidos e gases de exaustão. Diversos tipos de madeira ou lenha, cascas de cocos, folhas prensadas, capins, turfas e serragens podem ser utilizados na produção de carvão vegetal e serem posteriormente convertidos em carbono ativado (expressão tecnicamente correta). Um coqueificador é o mesmo que uma retorta ou um forno destinado a converter carvão mineral em coque em altas temperaturas e na ausência de oxigênio livre na sua câmara de redução química. Qualquer forno pode ser operado em condições oxidantes (em presença de oxigênio ou ar atmosférico) ou de combustão para materiais potencialmente combustíveis. O mesmo forno, retorta ou coqueificador pode operar em condições de redução química (na ausência de oxigênio ou ar atmosférico) ou de pirólise (termodegradação química) de materiais orgânicos e biológicos, e, ainda, de gasificação (em presença de um agente oxidante como o vapor d'água, ar, oxigênio ou dióxido de carbono). Os processos termoquímicos empregados para coqueificar os carvões minerais e frações de petróleo são análogos (ou inspiradores) aos da produção de carvões vegetais e animais (de ossos) e foram considerados na memória tecnológica exposta. Um carvão vegetal (industrial ou para fins comerciais de consumo em restaurantes e domicílios) pode ser obtido em fornos aquecidos até 550°C e conterá ainda um teor de alcatrão nos poros da sua estrutura carbonosa. Um carbono ativado pode resultar do aquecimento do carvão vegetal acima de 700°C com "ativação gasosa" (ou arraste físico-químico com algum gás ou vapor d'água) ou "ativação química" (com o auxílio de algum reagente químico sólido ou líquido) para remover as frações alcatroadas e pirolenhosas remanescentes. É necessário incorporar na fabricação de carbono ativado a partir de cascas de coco verde as seguintes etapas de processamento: fragmentação ou dilaceração da fruta, pré-secagem solar, e secagem, destilação seca, carbonização, ativação e resfriamento. É possível aproveitar os excessos de energia térmica produzidos para se operar dois tipos de retortas de ativação: empregando vapor d'água e fumos da combustão (predominantemente, o dióxido de carbono) como agentes de arraste, o que possibilita maximizar o rendimento de unidades de produção. Foi proposto um processo de produção integrada de carvão vegetal e carbono ativado a partir da coqueificação dos resíduos das cascas de coco verde, que incluiu a sua pré-secagem solar e, duas rotas paralelas de ativação de carvão vegetal, em duas retortas adicionais, com os gases da combustão e do vapor produzido por uma caldeira. Para realizar a pré-secagem solar foi concebido um equipamento de construção simples denominado "túnel de secagem solar" com módulos constituídos com paredes, telhados de vidro e chaminé individuais em cada segmento tridimensional, capaz de acolher containeres móveis com carga úmida de cascas de coco verde por vários dias. A concepção do processo básico de coqueificação e ativação envolve a queima do gás da madeira ou emissões gasosas e vapores pirolenhosos e alcatroados nas retortas de carbonização e ativação, porém, pode ser flexibilizada para separar esses compostos biocarboquímicos com vistas à sua comercialização e possibilita inserir mais de uma retorta de ativação por vapor d'água ou por dióxido de carbono na instalação industrial para maximizar a produção e o aproveitamento de energia térmica.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 – O CONSUMO E A DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS DE COCO VERDE	PÁGINA
1.1 – O CENÁRIO DO CONSUMO DA ÁGUA E DO ALBUME CARNOSO DE COCO VERDE	1-1
1.2 – ASPECTOS DO CULTIVO DE COQUEIROS	1-2
1.2.1 – Variedades de coqueiro	1-2
1.2.2 – Composição estrutural de um coco	1-2
1.2.3 – Estados brasileiros que cultivam coqueiros	1-4
1.2.4 – O Brasil entre os países produtores de coco	1-6
1.2.5 – Área, produção e rendimento médio de coco-da-baia no Brasil	1-7
1.2.6 – Impactos causados pela disposição de cascas de coco	1-8
1.3 – AÇÕES PARA A VALORIZAÇÃO DAS CASCAS DE COCO VERDE	1-10
1.4 – O USO DO CARVÃO ATIVADO DESDE A ANTIGUIDADE	1-11
1.4.1 – Aplicações medicinais, purificadoras e precursoras do carvão ativado	1-11
1.4.2 – O uso do carvão ativado em máscaras contra gases venenosos	1-11
1.4.3 – Aplicações do carvão ativado nas indústrias de alimentos	1-11
1.4.4 – Emprego de carvões ativados em tratamentos de águas	1-11
1.4.5 – Utilização do carvão ativado em tratamento de efluentes industriais	1-12
1.4.6 – Consumo de carvões ativados nas indústrias químicas e farmacêuticas	1-12
1.5 – O ESTADO DA ARTE TECNOLÓGICA DA PRODUÇÃO DE CARVÕES ATIVADOS	1-13
1.6 – MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUZIR CARVÃO ATIVADO	1-15
1.7 – CARVÃO MINERAL	1-16
1.8 – CARVÃO VEGETAL	1-17
1.9 – PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE CARVÃO VEGETAL E COQUE DE CARVÃO MINERAL	1-19
1.10 – CARVÃO ANIMAL OU DE OSSOS	1-20
1.11 – OCORRÊNCIAS NATURAIS E INDUSTRIAIS DO CARBONO	1-22
1.11.1 – Parâmetros de classificação cristalquímica das ocorrências de carbono	1-22
1.11.2 – Diamante natural e sintético	1-22
1.11.3 – Grafitas natural e comercial	1-23
1.11.4 – Carbono amorfo (não-cristalino)	1-24
1.12 – CARBONO: ATIVO OU INERTE?	1-24
1.13 – CARVÃO OU CARBONO ATIVADO?	1-25
1.14 – ATIVAÇÃO DE CARVÕES	1-25
1.15 – CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 1	1-26
1.16 – CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 1	1-26
1.17 – REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 1	1-27
CAPÍTULO 2 – COQUEIFICAÇÃO E GASIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS	
2.1 – MATÉRIAS-PRIMAS, EQUIPAMENTOS E PROCESSOS PARA OBTER CARVÕES ATIVADOS	2-1
2.2 – TERMODECOMPOSIÇÃO E TERMODESTRUÇÃO DE MATERIAIS CARBONOSOS	2-1
2.3 – CARBONIZAÇÃO, COQUEIFICAÇÃO, PIRÓLISE E DESTILAÇÃO SECA E SEUS PRODUTOS	2-3
2.4 – CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE CARBONIZAÇÃO	2-4
2.5 – CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA COQUEIFICAÇÃO DE CARVÃO MINERAL	2-5
2.6 – MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO DAS RETORTAS DE CARVÃO PARA COQUE	2-5
2.7 – ROTAS TECNOLÓGICAS PARA COQUEIFICAR FRAÇÕES DE PETRÓLEO	2-7
2.8 – COQUEIFICAÇÃO RETARDADA	2-7
2.9 – CARACTERÍSTICAS DAS FRAÇÕES PESADAS DE PETRÓLEO PARA COQUEIFICAR	2-8
2.10 – REAÇÕES QUÍMICAS NA COQUEIFICAÇÃO DAS FRAÇÕES DE ÓLEO PESADO	2-8
2.11 – CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA COQUEIFICAÇÃO DAS FRAÇÕES DE ÓLEO PESADO	2-9
2.12 – SUBPRODUTOS DA COQUEIFICAÇÃO DE FRAÇÕES DE ÓLEO PESADO	2-9
2.13 – VARIEDADES DE COQUE OBTIDAS DA COQUEIFICAÇÃO DE FRAÇÕES DE ÓLEO PESADO	2-10
2.13.1 – Coque para anodos ou Coque Esponja	2-10
2.13.2 – Coque verde	2-10
2.13.3 – Coque Agulha	2-10
2.13.4 – Coque Granulado	2-11
2.13.5 – Coque Combustível	2-11
2.14 – GASIFICAÇÃO E GASIFICADORES	2-12
2.14.1 – Gasificador de Leito fixo	2-12

2.14.2 – Gasificador de leito fluidizado	2-12
2.14.3 – Gasificador de leito arrastado	2-13
2.14.4 – Outros sistemas gasificadores	2-14
2.15 - CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 2	2-14
2.16 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 2	2-15
2.17 - REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 2	2-15

CAPÍTULO 3 – CARVOEJAMENTO E PIRÓLISE DE BIOMASSA VEGETAL

3.1 – CARVOEJAMENTO OU CARBONIZAÇÃO OU PIRÓLISE DE MADEIRA	3-1
3.2 – CARBONIZAÇÃO CONTÍNUA E DESCONTÍNUA	3-1
3.3 – PIRÓLISE LENTA, ARTESANAL, RÚSTICA OU TRADICIONAL	3-2
3.4 – TEORIA DA CARBONIZAÇÃO APLICADA À PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL	3-2
3.5 – TIPOS DE MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO DE FORNOS DE CARVOEJAMENTO	3-5
3.6 – FONTES DE ENERGIA PARA OS PROCESSOS DE CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA E VEGETAIS	3-6
3.7 – PIRÓLISE RÁPIDA OU FLASH	3-8
3.8 – BIORREFINARIAS	3-10
3.9 – TECNOLOGIAS PARA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL	3-12
3.10 – CLASSIFICAÇÕES PARA FORNOS DE CARBONIZAÇÃO	3-17
3.11 – FORNOS DE CARVOEJAMENTO DE MATÉRIA VEGETAL NO BRASIL	3-20
3.12 - CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 3	3-22
3.13 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 3	3-22
3.14 - REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 3	3-23

CAPÍTULO 4 – FORNOS DE TERRA, ALVENARIA E CONCRETO NAS CARVOARIAS

4.1 – FORNOS DE TERRA OU BARRO PARA PRODUZIR CARVÃO VEGETAL	4-1
4.1.1 – Caieira ou Forno de Poço, Vala, Cova, Trincheira, Bacurau, Carvoeira ou Balão	4-1
4.1.2 – Forno meda	4-4
4.2 – FORNOS DE TIJOLOS OU ALVENARIA	4-5
4.2.1 – Forno Colméia ou Meia Laranja ou Rabo quente – Sem Chaminé	4-6
4.2.2 – Forno de Tijolos Semi-Esféricos usado na Amazônia – Colméia ou Rabo Quente	4-7
4.2.3 – Forno Mineirinho	4-10
4.2.4 – Forno Colméia ou de Superfície - com Chaminé	4-11
4.2.5 – Forno de encosta ou barranco	4-14
4.2.6 – Forno Colméia de barranco	4-15
4.2.7 – Forno Colméia de superfície e barranco com chaminés altas	4-16
4.2.8 – Forno Iwate com chaminé	4-17
4.3 – FORNOS RETANGULARES COM ESTRUTURA METÁLICA E ALVENARIA	4-18
4.4 - CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 4	4-21
4.5 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 4	4-21
4.6 – REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 4	4-22

CAPÍTULO 5 – FORNOS CARBONIZADORES METÁLICOS DESCONTÍNUOS

5.1 – TIPOS BÁSICOS DE FORNOS METÁLICOS CARBONIZADORES DE BIOMASSA	5-1
5.2 – FORNOS METÁLICOS CILÍNDRICOS HORIZONTAIS E VERTICAIS	5-2
5.3 – FORNO METÁLICO TPI COM ANÉIS DESMONTÁVEIS E CHAMINÉS ADOTADO	5-4
5.4 – O FORNO CONTAINER METÁLICO DA TESE DE MESTRADO DE BARCELLOS (2002)	5-6
5.5 – O FORNO CONTAINER METÁLICO DA TESE DE MESTRADO DE GUIMARÃES NETO (2005)	5-9
5.6 – O FORNO CONTAINER METÁLICO DA TESE DE MESTRADO DE SANTOS (2007)	5-12
5.7 – FORNOS CONTAINERS CILÍNDRICOS METÁLICOS VERTICAIS EMPREGADOS NA BRICARBRÁS	5-16
5.8 – O FORNO METÁLICO JG-SCC	5-22
5.9 – O FORNO METÁLICO RETANGULAR DA DPC	5-23
5.10 – BATERIAS DE FORNOS DPC E RECUPERAÇÃO DE PRODUTOS CONDENSADOS DA FUMAÇA	5-26
5.11 – O CONTAINER METÁLICO E O PROCESSO DESCONTÍNUO DA RIMA	5-27
5.12 – O FORNO COM CAÇAMBA METÁLICA DA TESE DE MESTRADO DE ASSIS (2007)	5-32
5.13 – CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 5	5-34
5.14 – CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 5	5-35
5.15 – REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 5	5-35

CAPÍTULO 6 - RETORTAS E PROCESSOS CONTÍNUOS PARA CARBONIZAR LENHA

6.1 – PROCESSOS DESCONTÍNUOS E CONTÍNUOS DE CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA	6-1
6.2 – CARBONIZAÇÃO E COMBUSTÃO DE MADEIRA	6-1
6.3 – SISTEMAS DE RETORTAS DE CARBONIZAÇÃO MODERNOS	6-2
6.4 – CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE RETORTAS	6-3
6.5 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE RETORTAS	6-4
6.6 – PROCESSOS CONTÍNUOS DE CARVOEJAMENTO	6-5
6.7 – O ALTO FORNO PARA CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA OU RETORTA DE LAMBIOTTE	6-6
6.8 – O PROCESSO LAMBIOTTE-SIFIC DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA	6-7
6.9 – A RECUPERAÇÃO DE SUB-PRODUTOS NO PROCESSO LAMBIOTTE-SIFIC	6-8
6.10 – O PROCESSO LAMBIOTTE- CISR DE CARBONIZAÇÃO DE BIOMASSA	6-9
6.11 – O ALTO-FORNO DA UNIDADE DE CARBONIZAÇÃO CONTINUA DA ACESITA ENERGÉTICA	6-11
6.12 – RETORTA OU FORNO CONTÍNUO DE SOLEIRAS OU CÂMARAS MÚLTIPLAS	6-13
6.13 – OPERAÇÃO DA RETORTA CONTÍNUA DE CÂMARAS MÚLTIPLAS	6-16
6.14 – A RETORTA DE VAGÕES OU ARKANSAS	6-19
6.15 – A RETORTA REICHERT-LURGI OU DEGUSSA É DESCONTÍNUA	6-21
6.16 – PROCESSO LURGI	6-22
6.17 – O FORNO TÚNEL DO PROCESSO O.E.T. CALUSCO	6-23
6.18 – RETORTAS CILÍNDRICAS HORIZONTAIS VMR – VALLOUREC-MANNESMANN	6-24
6.19 – O PROCESSO IPT-SP PARA CARBONIZAR CAVACOS, CASCAS DE COCO E PELLETS DE FOLHAS	6-25
6.20 – SISTEMAS DE LEITO FLUIDIZADO E CARBONIZADORES SIMILARES	6-26
6.21 – MEIOS DE RECUPERAÇÃO DE SUBPRODUTOS DA CARBONIZAÇÃO	6-27
6.22 - CRITÉRIOS PARA A ESCOLHA DE SISTEMAS DE CARBONIZAÇÃO DE BIOMASSA	6-30
6.23 – PROCESSOS E REATORES DE PIRÓLISE RÁPIDA OU FLASH	6-30
6.24 – PROCESSOS EM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE	6-31
6.25 - O PROCESSO ENSYN (RTP) EM REATOR LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE	6-31
6.26 – PIRÓLISE ABLATIVA EM REATOR DE PRATO ROTATÓRIO	6-32
6.27 – PIRÓLISE ABLATIVA EM REATOR DE CONE ROTATIVO	6-32
6.28 - PROCESSOS COM REATORES DO TIPO DE VÓRTICE	6-33
6.29 - PROCESSO A VÁCUO “PYROCYCLING”	6-33
6.30 – A UNIDADE PILOTO COM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE NA UNICAMP	6-33
6.31 – CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 6	6-34
6.32 – CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 6	6-34
6.33 – REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 6	6-36

CAPÍTULO 7 - EQUIPAMENTOS PARA COQUEIFICAR E ATIVAR CARVÕES

7.1 – FUNDAMENTOS DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL E CARBONOS ATIVADOS	7-1
7.2 – O CARBONO ATIVADO PODE RESULTAR DE UMA DESTILAÇÃO SECA COMPLEMENTAR	7-4
7.3 – O USO EFICIENTE DO CALOR NA CARBONIZAÇÃO	7-5
7.4 - FUNDAMENTOS DA ATIVAÇÃO DE CARVÕES	7-7
7.4.1 – Desvolatilização das matérias-primas carbonosas via pirólise	7-7
7.4.2 – Processos de ativação de coques e materiais recém-carbonizados	7-7
7.4.2.1 – Ativação com reagente químico líquido ou sólido	7-7
7.4.2.2 – Ativação gasosa ou purga oxidante – não é ativação meramente física	7-7
7.5 - TIPOS DE POROS EM PARTÍCULAS DE CARVÕES E CARBONOS ATIVADOS	7-8
7.6 – ETAPAS BÁSICAS PARA ATIVAÇÃO DOS CARVÕES	7-9
7.6.1 – Ativação química de substâncias e carvões vegetais	7-9
7.6.2 – Ativação físico-química com vapor d’água industrial	7-9
7.6.3 – Ativação físico-química gasosa com CO ₂	7-9
7.7 - PARÂMETROS PARA CLASSIFICAR CARVÕES ATIVADOS	7-10
7.8 – CONDIÇÕES OPERACIONAIS E REAÇÕES TERMOQUÍMICAS PARA ATIVAÇÃO DOS CARVÕES	7-11
7.9 – PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CARVÕES ATIVADOS	7-12
7.10 – FORNOS PARA ATIVAÇÃO INDUSTRIAL DE CARVÕES	7-15
7.10.1 - Fornos verticais a soleira múltipla - para ativar carvões	7-15
7.10.2 - Fornos horizontais rotatórios para ativar carvões	7-16
7.10.3 - Fornos verticais de leito fluidizado para ativar carvões	7-17
7.11 – CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 7	7-18
7.12 – CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 7	7-19
7.13 – REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 7	7-20

CAPÍTULO 8 - REVISÃO PATENTÁRIA DE EQUIPAMENTOS E PROCESSOS PARA OBTENÇÃO E USO DE CARVÕES ATIVADOS

8.1 – O UNIVERSO DAS PATENTES DE COQUEIFICADORES	8-1
8.2 – DESCRIÇÕES DE PATENTES SELECIONADAS DE COQUEIFICADORES	8-1
8.2.1 - Patente Nº 5.946.342 – Processo e equipamento para produção de carvão ativado	8-3
8.2.2 - Patente Nº 6.206.941 – Equipamento e processo para carbonização e ativação de materiais carbonáceos	8-4
8.2.3 - Patente Nº 3.434.932 – Método para produção de coque e calor	8-6
8.2.4 - Patente Nº 4.126.518 – Método e Forno com câmara inclinada para carbonizar material fluente que contenha carvão	8-7
8.2.5 - Patente Nº 4.242.225 – Método e equipamento para produção de carvão ativado	8-8
8.2.6 - Patente Nº 5.435.983 – Processo para produção de carvão a partir de madeira e material herbáceo	8-10
8.2.7 - Patente Nº 8.304.300 – Processo e instalação para destilação seca de biomassa	8-11
8.2.8 - Patente Nº 2.166.225 – Processo e equipamentos para produção de carvão ativado	8-14
8.2.9 - Patente Nº 4.935.099 – Processo de fabricação de carvão vegetal	8-16
8.2.10 - Patente Nº 4.123.332 – Processo e Equipamentos para tratamento de um material carbonizável sólido pulverizado	8-18
8.3 – CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 8	8-19
8.4 – CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 8	8-19
8.5 – REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 8	8-19

CAPÍTULO 9 - CUSTOS E MERCADO DA COQUEIFICAÇÃO DE CASCAS DE COCO E SUA ATIVAÇÃO

9.1 – AS FACES DE UMA EMPREITADA PARA PRODUZIR CARVÃO ATIVADO DE CASCAS DE COCO	9-1
9.2 – AS MATÉRIAS-PRIMAS RESIDUAIS PARA USO ENERGÉTICO	9-1
9.3 – O MERCADO DE CARVÃO VEGETAL	9-2
9.4 – O MERCADO DE CARVÃO OU CARBONO ATIVADO	9-5
9.5 – INDICATIVOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA PRODUZIR CARBONO ATIVADO	9-8
9.5.1 – Reator de leito fixo operando em baixas temperaturas	9-8
9.5.2 – Comparativo de custos a partir de fornos tipo rabo-quente e fornos cilíndricos verticais em uma unidade de pequeno porte	9-8
9.6 – CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 9	9-10
9.7 – CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 9	9-10
9.8 – REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 9	9-11

CAPÍTULO 10 - PROJETO DO PROCESSO INTEGRADO DE COQUEIFICAÇÃO DE CASCAS DE COCO VERDE E ATIVAÇÃO DO CARVÃO

10.1 – PREMISSAS DAS CONCEPÇÕES DO COQUEIFICADOR E DAS RETORTAS DE ATIVAÇÃO	10-2
10.2 – A IMPORTÂNCIA DA SECAGEM SOLAR DA LENHA ANTES DE ALIMENTAR A RETORTA	10-3
10.3 – SOBRE O DESPERDÍCIO DE DIÓXIDO DE CARBONO E ENERGIA TÉRMICA	10-4
10.4 – PIRÓLISE DAS CASCAS DE COCO VERDE E ATIVAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL	10-5
10.5 – O DESPOLPADOR DAS CASCAS DE COCO VERDE	10-8
10.6 – TÚNEL DE SECAGEM SOLAR DAS FIBRAS LIBERADAS DA POLPA	10-9
10.7 – CARRINHOS TRANSPORTADORES DE CASCA DE COCO NA SECAGEM SOLAR	10-10
10.8 – AS RETORTAS VERTICAIS DE CARBONIZAÇÃO E ATIVAÇÃO	10-11
10.9 – CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 10 E DO PROJETO	10-12
10.10 - REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 10	10-13

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Fluxograma do coco verde – da produção a disposição final	1-1
Figura 1.2 – Coqueiros gigantes e anões	1-2
Figura 1.3 – Partes principais de um coco	1-3
Figura 1.4 – Organização estrutural dos componentes de um coco	1-3
Figura 1.5 – Produção obtida (t)de coco-da-baía nos estados brasileiros	1-7
Figura 1.6 – Destinação urbana inadequada de resíduos de coco verde	1-8
Figura 1.7 – Processos de termodecomposição de substâncias	1-14
Figura 1.8 – Fotografias dos poros de um carvão mineral betuminoso antes e após a ativação	1-16
Figura 1.9 – Toras de madeira dentro do forno e aspecto do carvão vegetal produzido	1-17
Figura 1.10 – Comparação entre as características tecnológicas e os desempenhos do carvão vegetal e do coque mineral na produção de ferro gusa siderúrgico	1-19
Figura 1.11 – Ossos bovinos fragmentados e aspectos do carvão animal granulado e pulverizado	1-20
Figura 1.12 – Processos de obtenção de carvões animais de ossos	1-21
Figura 1.13 – Ocorrência, extração e aspecto de um tipo de grafita natural	1-23
Figura 2.1 – Processos termodestruidores de substâncias carbonosas	2-2
Figura 2.2 – Processos de conversão de biomassa	2-2
Figura 2.3 – Produtos da carbonização	2-3
Figura 2.4 – Processos industriais de pirólise ou carbonização ou coqueificação	2-4
Figura 2.5 – Coqueria da CSN	2-6
Figura 2.6 – Diagramas esquemáticos do perfil de uma retorta vertical típica (slot)	2-6
Figura 2.7 – Fluxograma simplificado de uma unidade de coqueificação retardada	2-7
Figura 2.8 – Gasificadores de leito fixo em regimes de operação (a) contracorrente (PRIMENERGY; LURGI) e (b)co-corrente (COMMUNITY POWER BIOMAX)	2-13
Figura 2.9 – Gasificadores de leito fluidizado em regime de operação (a) circulante (FERCO) e (b) borbulhante (EPI, GTI-RENUGAS, CARBONA, FOSTER-WHEELER, MTCI)	2-13
Figura 2.10 – Gasificador de leito arrastado(BRIGHTSTAR)	2-13
Figura 3.1 – Geração de produtos biocarboquímicos a partir da pirólise de biomassa	3-2
Figura 3.2 – Balanço material da conversão laboratorial (por pirólise) até 500°C da madeira em carvão vegetal e subprodutos líquidos e gasosos	3-5
Figura 3.3 – Esquema de um forno de carvoejamento com fonte interna de calor e eliminação de fumaça (voláteis e partículas de sólidos e líquidos)	3-6
Figura 3.4 – Esquema de uma retorta de carbonização com fonte externa de calor (fornalha) e uso de emissões gasosas quentes e resfriadas (em caldeira ou trocador de calor)	3-7
Figura 3.5 – Tecnologias de Conversão Biológica e Termoquímica da Madeira	3-8
Figura 3.6 – Biorrefinarias para obtenção de combustíveis e produtos químicos (PQ´s)	3-10
Figura 3.7 – Produtos da pirólise dos principais componentes de biomassa lignocelulósica	3-11
Figura 3.8 – Evolução dos tipos de fornos de terra ou barro (cava ou poço) para os modelos de alvenaria de rabo quente e colméia ainda adotados no Brasil	3-12
Figura 3.9 – Outro estágio de evolução: Forno retangular (Missouri) de alvenaria	3-12
Figura 3.10 – Primeiro forno ou retorta container metálico	3-13
Figura 3.11 – Lenha carregada no tambor metálico antes da queima e o carvão vegetal obtido	3-14
Figura 3.12 – Retirada do container de um poço após a carbonização da madeira na Nicarágua	3-14
Figura 3.13 – Forno metálico JG-SCC	3-14
Figura 3.14 – Bateria de fornos JG metálicos	3-15
Figura 3.15 – Lenha preparada para secagem (alto à esquerda) e carbonizada (alto à direita)	3-15
Figura 3.16 – Aspectos da tecnologia de fornos metálicos retangulares descontínuos	3-16
Figura 3.17 – Princípio operacional da carbonização industrial de madeira numa retorta	3-17
Figura 4.1 – Desenhos esquemáticos dos fornos de vala, trincheira ou poço com (a) seção longitudinal coberta com terra e (b) descoberta para produzir carvão vegetal	4-1
Figura 4.2 – Caieira em Gana (África) durante a queima de lenha, modificada em com chaminés e cobertura metálica, entre estacas de madeira e rejuntas de terra	4-1
Figura 4.3 – Produção de carvão vegetal em (a) caieira, (b) separação da terra, e (c) apagando o fogo do carvão com água	4-2
Figura 4.4 – Forno tipo cova - ou seria uma meda?	4-3
Figura 4.5 – Fornos Meda	4-4
Figura 4.6 – Desenho representativo e vários fornos de rabo-quente antes do carregamento	4-6
Figura 4.7 – Forno de tijolos	4-7
Figura 4.8 – Carregamento da lenha para o interior do forno	4-7

Figura 4.9 – Fechamento da porta principal antes de acender o forno	4-7
Figura 4.10 – Acendimento do forno com (a) colocação de lenha pelo topo e (b) fechamento da baiana principal com início de emissão de fumaça	4-7
Figura 4.11 – Fumaça esbranquiçada revela início da combustão da lenha	4-8
Figura 4.12 – Fumaça azul indica que a baiana pode ser fechada	4-8
Figura 4.13 – Um tatu após seu fechamento	4-8
Figura 4.14 – Forno barrelado (barreado)	4-8
Figura 4.15 – Abertura do forno de tijolos	4-9
Figura 4.16 – Catação e retirada do carvão	4-9
Figura 4.17 – Carvão em sacos de rafia	4-9
Figura 4.18 – Fechamento dos sacos	4-9
Figura 4.19 – Forno Rabo-Quente em formato semi-esférico (de enchimento difícil), com tiragem direta em grande número de tatus e baianas e seu desenho esquemático	4-10
Figura 4.20 – Forno Mineirinho cilíndrico, com uma cúpula semi-esférica (de enchimento fácil), tiragem direta em único tatu (melhorando o controle) e com 1 chaminé favorecendo a recuperação de alcatrão	4-10
Figura 4.21 – Desenhos representativo e esquemático e fotografia de um Forno Colméia com Chaminé	4-11
Figuras 4.22 – Desenhos esquemático de um Forno Colméia de Superfície Com chaminé	4-12
Figuras 4.23 – Forno Colméia de Superfície com chaminé	4-12
Figura 4.24 – Forno JG, diâm. 3,0m, capacidade 10 a 11 st e empilhamento vertical da lenha adotados pela SIDERSA e White Martins em baterias de 36 a 96 fornos	4-13
Figura 4.25 – Forno JG com duas portas, diâm. 3,80m e diâm. 5,10 m x alt 1,6 m adotados pela JB CARBON e outras empresas	4-13
Figura 4.26 – Fornos de encosta	4-14
Figura 4.27 – Forno Colméia em barranco, visto numa fotografia antiga e num desenho esquemático	4-15
Figura 4.28 – Forno Colméia de Superfície	4-16
Figura 4.29 – Vistas em perspectiva e de perfil de um forno de encosta ou de barranco	4-16
Figura 4.30 – Forno Iwate	4-17
Figura 4.31 – Desenho esquemático de forno iwate	4-17
Figura 4.32 – Fornos Missouri	4-18
Figuras 4.33 – Forno Missouri (de superfície com chaminé) e unidade de carvoejamento empregados pela Saint Gobain em Seropédica, RJ	4-18
Figura 4.34 – Fornos Retangulares da CAF-Arcelor (2005) Modelo Missouri	4-19
Figura 4.35 – Etapas da construção de um forno retangular de concreto armado	4-20
Figura 4.36 – Fornos Missouri adaptados pela Mannesman	4-20
Figura 5.1 – Enchimento do forno e início da carbonização	5-2
Figura 5.2 – Carvoejamento, esfriamento e retirada do carvão dos tambores	5-2
Figura 5.3 – Tambor de 200 litros com tampa removível e orifícios no fundo	5-3
Figura 5.4 – (a) à esquerda, um tambor metálico de 200 litros com chaminé, orifícios laterais e no fundo, mostrando a vedação do fundo com terra; (b) à direita, dois tambores superpostos, para aumentar a capacidade de produção	5-3
Figura 5.5 – Forno transportável TPI	5-4
Figura 5.6 – Montagem e desmontagem de um forno transportável TPI	5-5
Figura 5.7 – Instalação do forno container metálico construído para ensaios de carbonização	5-6
Figura 5.8 – Vista de perfil e superior do fundo do container metálico	5-6
Figura 5.9 – Vista superior da base do forno poço	5-7
Figura 5.10 – Vista de perfil do poço isolante	5-7
Figura 5.11 – Desenho esquemático do perfil do conjunto da fornalha externa	5-8
Figura 5.12 – Retirada do container de um poço isolante após a carbonização da madeira no forno instalado na V&M do Brasil em Paraopeba, MG, com volume ampliado para 4 st (estéreis) de lenha	5-8
Figura 5.13 – Cilindro metálico para carbonização e uma grelha do fundo	5-9
Figura 5.14 – Sistema de movimentação dos containeres metálicos	5-10
Figura 5.15 – Vista dos poços isolantes, câmara de ignição e sistema de injeção de ar	5-10
Figura 5.16 – Vista geral do queimador de fumaça	5-11
Figura 5.17 – Representação de uma planta de secagem e carbonização semicontínua de madeira em cilindros verticais utilizado na Bricarbrás –Grupo Hubner	5-12
Figura 5.18 – Tampa ou grelha do cilindro de um cilindro metálico, acomodados em suportes para inspeção e manutenção	5-12

Figura 5.19 – Forno câmara muflado (esq.) e ignição na base antes de carbonizar (direita)	5-13
Figura 5.20 – Cilindros metálicos na estação de pré-pirólise	5-13
Figura 5.21 – Vista lateral (a) e do interior (b) do queimador de fumaça	5-14
Figura 5.22 – Secador de lenha da Bricarbras com destaques para os sopradores de recirculação de ar e os magnetrons emissores de microondas	5-15
Figura 5.23 – Aspecto de um forno container metálico novo e das toras de madeira consumidas na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Bricarbras	5-16
Figura 5.24 – Sistema de movimentação e descarga de cada cilindro metálico (à direita) e a base de aquecimento e câmara isolante de carbonização da Bricarbras	5-16
Figura 5.25 – Vista lateral da Praça de Carbonização e os fornos com os cilindros metálicos	5-17
Figura 5.26 – Vista interna da Praça de Carbonização e a grelha metálica com a chaminé	5-17
Figura 5.27 – Cestos de acomodação da lenha e transporte das cargas numa empilhadeira	5-18
Figura 5.28 – Fechamento de um cilindro metálico	5-18
Figura 5.29 – Entrada do cilindro metálico sobre a base do forno de carbonização com ticos em combustão	5-19
Figura 5.30 – Descarga mecanizada do cilindro metálico depositando carvão vegetal num vagão apropriado	5-19
Figura 5.31 – Representação esquemática da operação do secador de lenha	5-20
Figura 5.32 – Lay-out de uma planta de secagem e carbonização semicontínua de madeira	5-21
Figura 5.33 – Outra visão dos fornos da Bricarbras	5-21
Figura 5.34 – Fornos metálicos JG-SCC	5-22
Figura 5.35 – Representação esquemática do ciclo inicial de operação do Processo DPC com 4 equipamentos térmicos: uma fornalha, uma estufa, uma retorta e um resfriador	5-23
Figura 5.36 – Ciclos operacionais do Processo DPC – Thermal Processing	5-24
Figura 5.37 – Esquema de operação do Processo DPC (2010)	5-24
Figura 5.38 – Etapas de carregamento de lenha e descarga de carvão vegetal do Processo DPC	5-25
Figura 5.39 – Etapas de carregamento de lenha e descarga de carvão vegetal do Processo DPC	5-26
Figura 5.40 – Ciclo operacional do processo descontínuo RIMA com forno cilíndrico	5-27
Figura 5.41 – Seqüência de procedimentos do processo descontínuo RIMA com forno cilíndrico	5-27
Figura 5.42 – Galpão dos equipamentos termoquímicos do processo descontínuo RIMA	5-28
Figura 5.43 – Forno container do processo descontínuo RIMA (a) visto de perfil e (b) carga de lenha no seu interior	5-28
Figura 5.44 – Demandas térmicas para a secagem da lenha	5-29
Figura 5.45 – A pré-secagem da lenha a ser implantada no processo da RIMA	5-29
Figura 5.46 – Secagem da lenha pré-seca com os gases quentes oriundos da fornalha	5-30
Figura 5.47 – Secagem da lenha pré-seca com os gases quentes oriundos da fornalha	5-30
Figura 5.48 – Processo Rima de produção de carvão vegetal com forno container sem pré-secagem	5-31
Figura 5.49 – Processo Rima de produção de carvão vegetal com forno container incluindo a pré-secagem da lenha Vicenti	5-31
Figura 5.50 – As unidades de carvoejamento (caçamba metálica com tampa) e isolante	5-32
Figura 5.51 – Detalhamento do sistema de carvoejamento em caçamba metálica	5-33
Figura 5.52 – Esquema da distribuição dos pares termoelétricos na unidade de carvoejamento	5-34
Figura 6.1 – Desenho esquemático do corte de um alto-forno com as principais reações que nele são desenvolvidas	6-5
Figura 6.2 – Retorta de gás quente ascendente ou Lambiotte-SIFIC	6-6
Figura 6.3 – Recuperação de subprodutos biocarboquímicos da retorta vertical contínua de gás quente ascendente	6-8
Figura 6.4 – Alto-forno Lambiotte CISR de carbonização – sistema belga	6-9
Figura 6.5 – Instalação fabril de carvão vegetal pelo Processo Lambiotte CISR	6-10
Figura 6.6 – Fluxograma da unidade mista das plantas de carbonização contínua e de recuperação de carboquímicos da ACESITA ENERGÉTICA S.A.	6-11
Figura 6.7 – Fluxograma da planta com a retorta carbonização contínua e o sistema de lavagem, separação e reciclagem de gases não-condensáveis (GNC) para queima na ACESITA ENERGÉTICA S.A.	6-12
Figura 6.8 – Vista da área de descarga do forno de carbonização na ACESITA ENERGÉTICA S.A.	6-12
Figura 6.9 – Forno Herreshoff contínuo de câmaras múltiplas para produzir carvão vegetal	6-13
Figura 6.10 – Forno vertical a soleiras múltiplas (com 7 câmaras)	6-14
Figura 6.11 – Unidade de processo da retorta de vagões	6-16
Figura 6.12 – Resíduos de madeira empregados na unidade de processo da retorta de vagões	6-17
Figura 6.13 – Estufa de pré-secagem de madeira da unidade de processo da retorta de vagões	6-18
Figura 6.14 – Câmara de condensação numa unidade de processo da retorta de vagões(Suécia)	6-18
Figura 6.15 – A retorta Reichert no Processo Degussa	6-19
Figura 6.16 – O Processo Degussa com uso da retorta Reichert	6-20

Figura 6.17 – Processo Reichert-Lurgi	6-21
Figura 6.18 – Processo Lurgi na Austrália para produção de carvão	6-22
Figura 6.19 – Desenho esquemático do processo de carbonização O.E.T. Calusco	6-23
Figura 6.20 – Retortas horizontais VMR – Vallourec-Mannesmann: esquema operacional, imagens e abertura de uma retorta antes do resfriamento	6-24
Figura 6.21 – Fluxograma do Processo IPT-SP para carbonizar cavacos e cascas de coco	6-25
Figura 6.22 – Planta de carvão vegetal com refinaria para recuperar subprodutos químicos	6-28
Figura 6.23 – Processo de carbonização integrado – fluxograma esquemático	6-28
Figura 6.24 – Frações do alcatrão oriundo de uma planta de carvão vegetal	6-29
Figura 6.25 – Representação esquemática de um reator de prato rotatório para pirólise rápida	6-32
Figura 6.26 – Reator de cone rotativo	6-32
Figura 6.27 – O reator de leito fluidizado e a unidade piloto de pirólise rápida experimental da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP	6-33
Figura 7.1 – Micrografia eletrônica de varredura da estrutura porosa da superfície de uma partícula de carbono ativado	7-1
Figura 7.2 – Modelo genérico de uma partícula de carvão ativado e dos tamanhos usuais	7-2
Figura 7.3 – Representação das etapas do processo de ativação gasosa de carvão vegetal	7-8
Figura 7.4 – Tipos de poros numa partícula de carvão ou carbono	7-8
Figuras 7.5 – Arranjos obtidos na ativação de carvão vegetal com vapor d'água após tempos de ativação (A) curtos - obtêm muitos microporos; (B) médios - geram muitos mesoporos; e (C) longos - produzem muitos meso e macroporos	7-9
Figura 7.6 – Processo de fabricação de carbono ativado da Carbo-Tech GmbH	7-12
Figura 7.7 – Fluxograma básico da produção de carvão vegetal ativado	7-13
Figura 7.8 – Fluxograma básico da produção de carvão vegetal ativado	7-14
Figura 7.9 – Forno vertical de ativação de carvão	7-15
Figura 7.10 - Forno horizontal rotatório para ativar carvões	7-16
Figura 7.11 - Forno vertical em leito fluidizado de ativação de carvões	7-17
Figura 8.1 – Equipamento para produção de carvão ativado	8-3
Figura 8.2 – Equipamento para carbonização e ativação de materiais carbonáceos	8-4
Figura 8.3 – Equipamento para produção de coque e calor	8-6
Figura 8.4 – Equipamento para coqueificar ou carbonizar	8-7
Figura 8.5 – Equipamento de ativação de coque	8-8
Figura 8.6 – Equipamento para produção de carvão	8-10
Figura 8.7 – Equipamento para destilação seca de biomassa	8-11
Figura 8.8 – Equipamento para produção ativado a partir da madeira	8-14
Figura 8.9 – Equipamento - retorta para fabricação de carvão vegetal	8-16
Figura 8.10 – Equipamento para tratamento de um material sólido pulverizado	8-18
Figura 9.1 – Produção mundial de carvão vegetal	9-3
Figura 9.2 – Consumo de biomassa no Brasil por fonte	9-3
Figura 9.3 – Consumo de biomassa no Brasil por setor	9-4
Figura 9.4 – Participação de florestas nativa e plantadas	9-4
Figura 10.1 – Etapas da produção de carvão ativado a partir de cascas de coco verde	10-6
Figura 10.2 – Processo de carbonização de cascas de coco verde e ativação do carvão vegetal com temperaturas sugeridas	10-7
Figura 10.3 – Fragmentadora-separadora de fibras e casquilho – Method Machine Works Sdn Bhd – modelo COM 11 ^a	10-8
Figura 10.4 – Túnel de secagem solar para cascas de coco verde fragmentadas	10-9
Figura 10.5 - Carrinhos transportadores que compõem o túnel de secagem solar	10-10

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 – Principais países produtores de coco e sua produção (1.000 t) de 2001 a 2004	1-6
Tabela 1.2 – Quantidade produzida (1.000 frutos) de coco-da-baia, por região e os dois estados com maior produção em cada região do Brasil no período de 2001 a 2006	1-6
Tabela 1.3 – Área plantada, área colhida, produção obtida e rendimento médio obtido de coco-da-baia nos principais estados produtores do Brasil no ano de 2008	1-7
Tabela 1.4 – Aplicações de elementos adsorventes inorgânicos e orgânicos	1-13
Tabela 1.5 – Análise comparativa dos adsorventes comerciais	1-13
Tabela 1.6 – Comparativo dos processos de fabricação de carvão ativado	1-13
Tabela 1.7 – Variedades de matérias primas naturais para produzir carvão ativado	1-15
Tabela 1.8 – Incentivos e limitações para adoção do biorredutor carvão vegetal na Siderurgia	1-18
Tabela 2.1 – Especificações típicas para coque de grau para anodo	2-10
Tabela 2.2 – Especificações típicas para coque agulha	2-11
Tabela 2.3 – Especificações típicas para coque combustível	2-11
Tabela 3.1 – Produtos da Carbonização	3-3
Tabela 3.2 – Etapas do fenômeno de conversão da madeira para carvão vegetal	3-3
Tabela 3.3 – Temperaturas características dos processos de termodecomposição dos componentes de materiais lignocelulósicos	3-4
Tabela 3.4 – Rendimentos dos produtos obtidos nos processos pirólise da madeira (base seca)	3-8
Tabela 3.5 – Classificação dos fornos de carbonização quanto à fonte de energia	3-18
Tabela 3.6 – Outras classificações para fornos de carbonização	3-19
Tabela 3.7 – Classificação de fornos de carvoejamento descontínuos utilizados no Brasil	3-20
Tabela 7.1 – Distribuição das Fontes Mundiais de Biomassa	7-3
Tabela 7.2 – Classificação dos Processos de Pirólise de Biomassa	7-3
Tabela 7.3 – Calor para produção de carvão vegetal	7-5
Tabela 7.4 – Etapas da formação do carvão vegetal e de sua ativação identificadas em condições Laboratoriais	7-6
Tabela 7.5 – Etapas do aquecimento lento de biomassa	7-6
Tabela 8.1 – Coqueificadores genéricos para obtenção de carvão ativado	8-2
Tabela 8.2 – Coqueificadores de carvão mineral para obter carvão ativado	8-5
Tabela 8.3 – Coqueificadores de biomassa para obter carvão ativado	8-9
Tabela 8.4 – Coqueificadores de cascas de coco para obtenção de carvão ativado	8-12
Tabela 8.5 – Coqueificadores de madeira, celulósicos, turfa e seus resíduos	8-13
Tabela 8.6 – Coqueificadores de resíduos sólidos urbanos e rurais	8-17
Tabela 9.1 - Estimativas de produção anual de alguns resíduos vegetais	9-2
Tabela 9.2 – Aplicações de carvões ativados de origem mineral	9-6
Tabela 9.3 - Aplicações de carvões ativados de origem animal	9-6
Tabela 9.4 - Aplicações de carvões ativados de origem vegetal	9-7
Tabela 9.5 - Principais países produtores de coco e a produção (1.000 t) no período de 2001 a 2004	9-9
Tabela 9.6 - Quantidade produzida (1.000 frutos) de coco-da-baia, por região e os dois estados com maior produção em cada região do Brasil no período de 2001 a 2006	9-10
Tabela 9.7 – Área plantada, área colhida, produção obtida e rendimento médio obtido de coco-da-baia nos principais estados produtores do Brasil no ano de 2008	9-10
Tabela 9.8 – Resultados econômicos para unidade de produção industrial de carvão ativo	9-12
Tabela 9.9 – Comparativo de custos envolvidos e resultados operacionais nos sistemas de produção tradicional e no sistema de produção em fornos cilíndricos verticais	9-13
Tabela 10.1 – Características dos carrinhos transportadores	10-10
Tabela 10.2 - Lista de materiais para fornos e retortas de carbonização	10-11

CAPÍTULO 1

O CONSUMO E A DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS DE COCO VERDE

- 1.1 – O cenário do consumo da água e do albume carnosos de coco verde**
- 1.2 – Aspectos do cultivo de coqueiros**
 - 1.2.1 – Variedades de coqueiro**
 - 1.2.2 – Composição estrutural de um coco**
 - 1.2.3 – Estados brasileiros que cultivam coqueiros**
 - 1.2.4 – O Brasil entre os países produtores de coco**
 - 1.2.5 – Área, produção e rendimento médio de coco-da-baia no Brasil**
 - 1.2.6 – Impactos causados pela disposição de cascas de coco**
- 1.3 – Ações para a valorização das cascas de coco verde**
- 1.4 – O uso do carvão ativado desde a antiguidade**
 - 1.4.1 – Aplicações medicinais, purificadoras e precursoras do carvão ativado**
 - 1.4.2 – O uso do carvão ativado em máscaras contra gases venenosos**
 - 1.4.3 – Aplicações do carvão ativado nas Indústrias de alimentos**
 - 1.4.4 – Emprego de carvões ativados em Tratamentos de águas**
 - 1.4.5 – Utilização do carvão ativado em Tratamento de efluentes industriais**
 - 1.4.6 – Consumo de carvões ativados nas indústrias químicas e farmacêuticas**
- 1.5 – O estado da arte tecnológica da produção de carvões ativados**
- 1.6 – Matérias-primas para produzir carvão ativado**
- 1.7 – Carvão mineral**
- 1.8 – Carvão vegetal**
- 1.9 – Principais diferenças entre carvão vegetal e coque de carvão mineral**
- 1.10 – Carvão animal ou de ossos**
- 1.11 – Ocorrências naturais e industriais do carbono**
 - 1.11.1 – Parâmetros de classificação cristaloquímica das ocorrências de carbono**
 - 1.11.2 – Diamante natural e sintético**
 - 1.11.3 – Grafitas natural e comercial**
 - 1.11.4 – Carbono amorfo (não-cristalino)**
- 1.12 – Carbono: ativo ou inerte?**
- 1.13 – Carvão ou carbono ativado?**
- 1.14 – Ativação de carvões**
- 1.15 – Constatações do capítulo 1**
- 1.16 – Conclusões do capítulo 1**
- 1.17 – Referências do capítulo 1**

CAPÍTULO 1

O CONSUMO E A DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS DE COCO VERDE

1.1 - O CENÁRIO DO CONSUMO DA ÁGUA E DO ALBUME CARNOSO DE COCO VERDE

O Brasil é um país tropical, onde grande parte da população consome água de coco *in natura*, ou após sua extração, processamento e envasamento industrial. Estima-se que os resíduos urbanos gerados pelas cascas do coco verde totalizem 6,7 milhões de toneladas anuais que corresponde a 70% do lixo gerado nas praias do Nordeste (EMBRAPA, 2004). O atual cenário da destinação das cascas de coco verde está representado na Figura 1.1

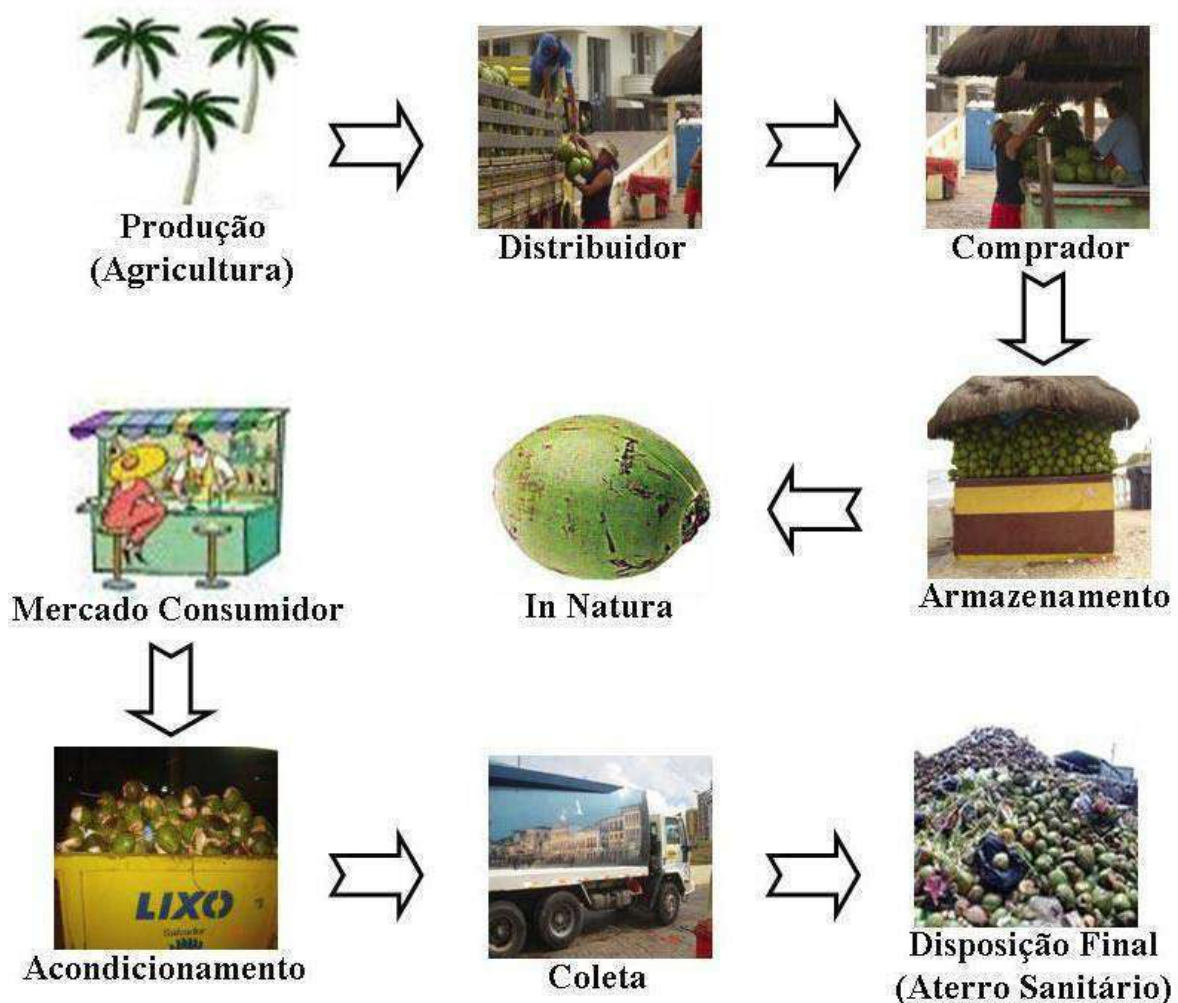


Figura 1.1 - Fluxograma do coco verde – da produção a disposição final
(Silveira, 2008)

Quando destinadas a lixões, aterros controlados ou sanitários, as cascas de coco verde podem: (1º) auxiliar a proliferação de doenças, (2º) influir na redução da vida útil de aterros sanitários, devido ao grande volume ocupado e às dificuldades de sua compactação (EMBRAPA, 2004), e (3º) se depositadas em aterros sob ação bacteriana anaeróbica, sofrem conversão a metano, um dos mais nefastos gases formadores do Efeito Estufa.

1.2 - ASPECTOS DO CULTIVO DE COQUEIROS

1.2.1 - Variedades de coqueiro

O coqueiro é uma palmeira que produz frutos destinados tanto para o consumo “in natura” na forma de água de coco verde, quanto para a industrialização na forma de coco ralado, leite de coco, etc. Nos últimos anos o consumo de água de coco verde tem aumentado, em todo o Brasil, permitindo uma maior expansão da área produtora. Três variedades de coqueiro são exploradas no país (Silveira, 2008):

1ª – Coqueiro Gigante (*Typicar Nar*) – é uma árvore de porte alto, atingindo cerca de 35 m de altura. Sua finalidade principal é o fornecimento de polpa para a indústria de derivados de coco (coco ralado e leite de coco). Inicia sua produção a partir de seis anos e meio. Tem a produção média de 70 frutos/planta/ano.



Figura 1.2 - Coqueiros gigantes e anões
(Silveira, 2008)

2ª – Coqueiro Anão (*Nana Griff*) – é uma árvore de porte baixo, atingindo cerca de 12 m de altura, utilizado para atendimento do consumo de água-de-coco (“in natura” ou envasada). Começa a produzir com 2 anos e meio, apresenta produtividade de 120 frutos/planta/ano, podendo alcançar 250 frutos em sistemas irrigados.

3ª – Coqueiro Híbrido – são árvores de porte intermediário, atingindo cerca de 20 m de altura, com dupla finalidade de fornecimento de coco para a indústria e para água. Sua produtividade alcança de 120 a 150 frutos/planta/ano, com início de produção aos quatro anos pós-plantio. Tem participação pouco expressiva na produção de cocos. (Silveira, 2008)

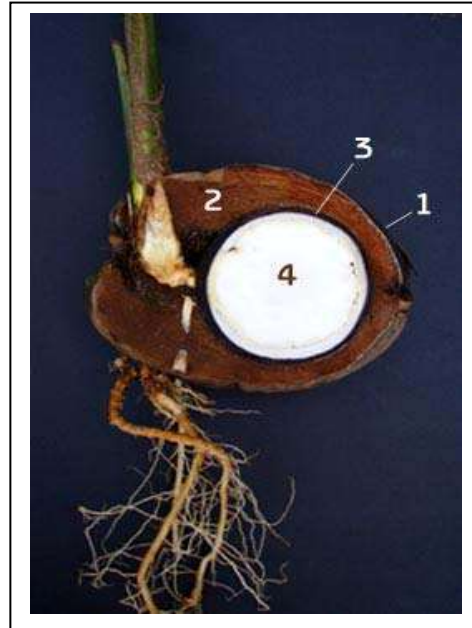
1.2.2 – Composição estrutural de um coco

Coco é o nome do fruto da palmeira conhecida como coqueiro. Existem muitos tipos de palmeiras e, portanto, diversos tipos de cocos, entre eles, os mais conhecidos, a carnaúba, o babaçu, o dendê, a tâmara e o coco-da-baía, o fruto do coqueiro.

A casca do coco é relativamente fina e lisa. Por baixo, há uma espessa capa fibrosa que envolve uma camada muito dura, dentro da qual fica a semente, uma massa suculenta e de cor branca. Quando o coco é verde, essa parte é pouco desenvolvida e mole, guardando muita água no seu interior. À medida que o coco vai amadurecendo, a parte carnosa se torna mais consistente e a água diminui “coco-portal São Francisco, 2010”.

A Figura 1.3 apresenta uma fotografia de um coco cortado, com destaque para suas partes principais:

Figura 1.3- Partes principais de um coco
(Correios Gourmand, 2010)



Nomenclatura:

- 1 - Exocarpo ou epicarpo
- 2 - Mesocarpo
- 3 - Endocarpo lenhoso (casquilho)
- 4 - Endosperma sólido (polpa)

Segundo Silveira (2008), a estrutura de um coco inclui os seguintes componentes:

- a) **Pericarpo** – é a parte do fruto que envolve a semente;
- b) **Epicarpo** (epiderme lisa) – é a camada externa do pericarpo, chamada de “casca” do fruto;
- c) **Mesocarpo** – é a camada que fica entre o epicarpo e o endocarpo (não considera a semente), em geral é a parte mais desenvolvida do fruto. No caso do coco se constitui de fibras;
- d) **Endocarpo** (camada pétrea que envolve a parte comestível) – é a camada mais interna do pericarpo. No caso do coco o endocarpo forma a casca dura em torno da semente, possui 41 três depressões circulares na base (buracos fechados, chamados carpelos) formando triângulo, por onde sai o embrião;
- e) **Semente** – é toda estrutura que serve para reproduzir um vegetal;
- f) **Tegumentos** – é qualquer estrutura que reveste e protege uma parte do vegetal. No caso do coco é uma camada fina de cor marrom.
- g) **Albúmen** (endosperma) – é um tecido contendo substâncias nutritivas na semente.

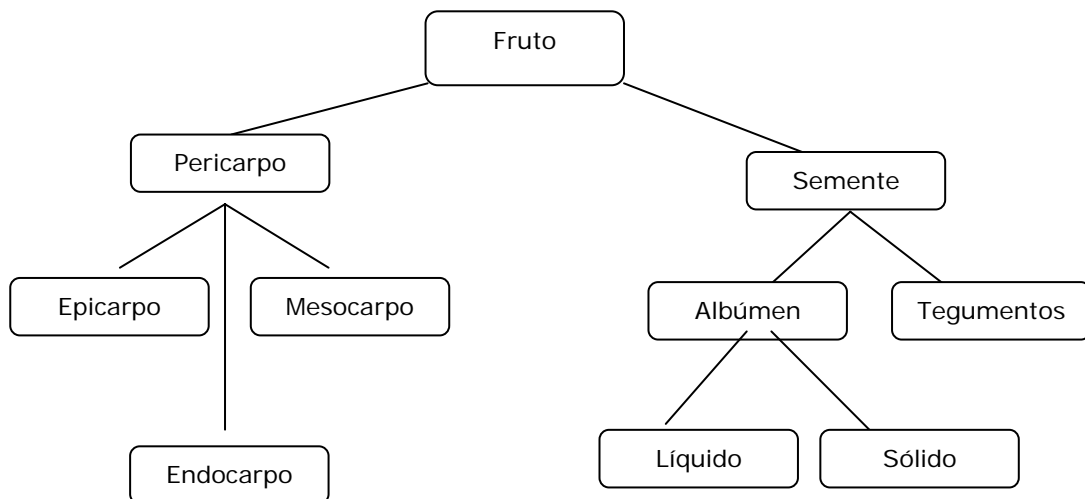


Figura 1.4 – Organização estrutural dos componentes de um coco
(Silveira, 2008)

1.2.3 – Estados brasileiros que cultivam coqueiros

A variedade de cocos cultivada no Brasil tem sido objeto de diversos estudos realizados ao nível da Embrapa e interessa às indústrias alimentícias, de turismo e químicas. Por exemplo, Fontes e Wanderley (2006) elaboraram um estudo intitulado "**Situação Atual e Perspectivas para a Cultura do Coqueiro no Brasil**" destacando as variedades genéricas intituladas "coco verde" e "coco seco" correlacionando-as com as possibilidades de produção de biodiesel no Brasil.

O foco da presente abordagem é o setor do coco verde, porque possui um volume individual interessante e compatível com a produção de coque vegetal, e o descarte de cocos consumidos em quiosques de praia, bares, restaurantes é crescente e problemático, caso deixem de ser destinados para uma finalidade industrial que agregue valor econômico aos seus resíduos.

A cultura do coqueiro no Brasil é responsável pela geração de aproximadamente 500.000 empregos diretos e indiretos, que ocupam uma área aproximada de 281.000 ha, distribuídos em cerca de 220.000 propriedades, sendo que 85% das quais com menos de 10 ha. A maior parte dessa área encontra-se ocupada com coqueiros da variedade gigante e com híbridos segregantes, distribuída ao longo do litoral do Nordeste e utilizando-se de sistemas de produção semi-extrativistas, o que explica a atual produtividade baixa, estimada em 30 frutos/planta/ano (Fontes e Wanderley, 2006).

Os coqueiros são constituídos pelas variedades anã e gigante. O coqueiro gigante caracteriza-se por produzir cocos com aptidão para obtenção de **copra (albúmem sólido)** e iniciar sua produção a partir de seis anos e meio. Sua produção média é de 70 frutos/planta/ano. A variedade anã começa a produzir com dois anos e meio, apresenta produtividade de até 120 frutos/planta/ano e aptidão para água. Um terceiro tipo é o **coqueiro híbrido**, comumente chamado de **coqueiro anão-gigante**, resultante do cruzamento entre as variedades anã e gigante. O coqueiro híbrido apresenta características tanto da variedade anã quanto da gigante, permitindo exploração para obtenção de copra e a água contida nos frutos. Todavia, filhos de coqueiros híbridos não devem ser plantados, pois ocorre uma forte segregação, isto é, resultando coqueiros bastante heterogêneos e de baixa produtividade (Moura e Leite, 2001).

O crescimento agroindustrial do setor de coco verde deve-se, principalmente, à crescente demanda da água contida no seu interior, que se tornou um hábito de consumo refrescante, alimentício e terapêutico nas grandes cidades litorâneas do sudeste e nordeste brasileiro. **O consumo de água de coco é estimulado por médicos e nutricionistas** devido ao seu alto valor nutricional, pois é considerada um isotônico natural, rica em sais minerais dissolvidos, (potássio, sódio, fósforo e cloro), vitaminas e fibras.

O desenvolvimento de novas técnicas de irrigação possibilitou que Brasil se tornasse um dos maiores produtores mundiais de coco verde. Estima-se que o plantio de coqueiros da variedade anão verde ocupe 80.000 hectares, sendo que grande parte dessa área, ainda está em fase de produção nas regiões sudeste e centro oeste, para posterior colheita e distribuição comercial (Fontes e Wanderley, 2006).

O crescimento do plantio e da comercialização de cocos verdes tornou-se um fator de desenvolvimento econômico nas regiões envolvidas, gerando novos empregos ao longo da cadeia produtiva de coco verde e coco seco, porém contribui significativamente para aumento da geração de resíduos sólidos urbanos, em particular nas praias, quiosques, bares e restaurantes, além das grandes indústrias que promovem o engarrafamento e envasamento de embalagens em forma de caixas de papelão aluminizado para exportação. (Barroso, 2004).

De acordo com os dados levantados pela Associação Brasileira de Produtores de Coco - ASBRACOCO (Brasil, 2002, citado por Silveira, 2008), a produção brasileira é comercializada como descrito a seguir. Do total produzido, 35% destinam-se às agroindústrias, que produzem, principalmente, coco ralado e leite de coco, para atender a demanda de grandes empresas produtoras de chocolate, biscoito, iogurtes, sorvetes e padarias. Deste percentual, 99% são constituídos de coco seco e o restante é destinado à indústria engarrafadoras de água de coco verde. Outros 35% destinam-se aos mercados Sudeste/Sul para atender às pequenas indústrias, a exemplo de docerias, padarias, sorveterias, e outras (em torno de 90% de frutos verdes e os outros 10% de coco seco). Os restantes 30% ficam no mercado nordestino, para atender ao consumo "in natura", tanto de coco seco como de coco verde. Em decorrência da forte tradição do consumo na culinária e o grande número de pequenas indústrias, estima-se que 80% do consumo nordestino seja de coco seco e 20% de coco verde. Desta forma, do consumo estimado de coco no mercado brasileiro, 62% é de coco seco e 38% é de coco verde.

No consumo apenas de 250 ml de água de coco, gera-se em torno de 1 kg de resíduo sólido. No verão, a casca de coco pode representar 80% do lixo coletado nas grandes cidades, ou cerca de 6,7 milhões de toneladas de cascas/ano. O mercado brasileiro de consumo de água de coco indica a possibilidade de um crescimento de 20% por ano. As cascas de coco verde são de difícil degradação e podem gerar focos de doenças e contribuir para proliferação de ratos e baratas. Embora a COMLURB-RJ (Companhia de Limpeza Urbana do Município do Rio de Janeiro) não possua dados específicos sobre o montante coletado, estima-se que em média, 450 mil cocos são consumidos diariamente, o que resulta em 630 toneladas de cascas destinadas ao Aterro Municipal de Gramacho (Agência SEBRAE, 2005)

No Brasil, os maiores cultivadores de coqueiros são os Estados da Bahia, Amazonas, Pernambuco, Maranhão e Piauí. O coqueiro desenvolve-se bem em regiões de clima quente e úmido. Sua altura pode atingir 30 metros. A questão da identificação da origem da palmeira tropical que origina o **coco-da-praia**, **coco-da-índia**, **coco-da-baía** ou, simplesmente, **coco** - é bastante controversa. Uns dizem que ele é oriundo da Índia outros afirmam que é proveniente de ilhas do Pacífico; alguns, ainda, o julgam africano; e, para completar, dizem também que já existia, em tempos pré-colombianos, na América Central. O certo é que, no Brasil, ou melhor, na Bahia, os cocos chegaram, em 1553, a bordo das embarcações portuguesas, proveniente das ilhas de Cabo Verde. Da região do Recôncavo Baiano, espalhou-se por toda a costa do Brasil levado, provavelmente por dispersão natural, através das correntes marítimas "coco-portal São Francisco, 2010".

Nas últimas décadas, vários estudos foram realizados para desenvolver tecnologias da utilização das cascas do *coco verde* como matéria prima para diversos produtos. Segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, a casca do coco pode ser aproveitada para produzir fibras vegetais usadas na fabricação de estofados de automóveis, vasos de xaxim e coberturas para a proteção do solo. A casca do coco reciclada, após sofrer processos de redução e classificação de tamanho serve para produzir um pó que ajuda no desenvolvimento de plantas cultivadas em vasos, podendo ainda substituir a terra em plantações. As fibras de cascas de coco podem servir como matéria-prima para a manufatura de vasos, tapetes e outros artefatos em empreendimentos de artesanato.

A conversão de cascas de coco em carbono ativado ou *carvão ativado* ou *ativo* é conhecida, sendo processada em indústrias brasileiras. No entanto, a destinação das cascas de coco residuais - após o consumo da água de coco, e/ou da ingestão ou extração e processamento do albume carnosos branco - nem sempre está associada com a sua conversão em carvão ativado, que é uma forma de "coque vegetal".

Borges e colaboradores (2005) destacaram que "a produção de carvão ativado a partir dos resíduos dos cocos verdes - denominados epicarpo impermeável (casca), mesocarpo (fibroso) e endocarpo (lenhoso) (Veja-Larousse, 2006) - ajuda a minimizar a um dos graves problemas gerados pelas empresas que é a sua destinação segura e não poluente sem provocar um grande impacto ambiental quando não tratado devidamente".

1.2.4 – O Brasil entre os países produtores de coco

Como não foi possível encontrar dados sobre a quantidade de resíduo sólido gerada nos principais municípios e estados do Brasil para obter-se o valor correto de cascas de coco verde descartadas pelos quiosques, bares, restaurantes e indústrias, foi necessário buscar dados sobre a produção de coco no Brasil e no mundo, expostos nas tabelas seguintes.

Tabela 1.1 - Principais países produtores de coco e sua produção (1.000 t) de 2001 a 2004
(FAO, 2006 - citado de Silveira, 2008)

PAISES	2001	2002	2003	2004
Indonésia	15.815	15.495	16.145	16.285
Índia	9.530	8.942	9.288	9.500
Brasil	2.131	2.892	2.978	2.947
Sri Lanka	2.104	1.818	1.947	1.950
México	1.100	1.065	1.015	959
Malásia	712	712	597	642
Tanzânia	370	370	370	370
China	293	276	278	270
Moçambique	265	265	265	265
C.do Marfim	240	240	240	240
Jamaica	170	170	170	170
Fiji Islands	170	170	130	140

Como pode ser observado, a Indonésia lidera como o país que mais produz coco no mundo, seguido da Índia e do Brasil. Os dados da Organização de Alimentos e de Agricultura das Nações Unidas - FAO, representados na Tabela 1.1 apontam uma produção de coco para o Brasil superior aos da Tabela 1.2 fornecidos pelo IBGE (2006). Este fato pode estar relacionado com a falta de esclarecimento dos dados, ou seja, os dados do IBGE tratam da produção de coco-da-baía e os dados da FAO podem abranger outras espécies de coco. (Silveira, 2008).

Tabela 1.2 - Quantidade produzida (1.000 frutos) de coco-da-baía, por região e os dois estados com maior produção em cada região do Brasil no período de 2001 a 2006.
(IBGE, 2006; Silveira, 2008)

BRASIL, REGIÃO E ESTADO	2001	2002	2003	2004	2005	2006
BRASIL	1.420.527	1.928.236	1.985.661	2.078.226	2.079.291	1.985.478
NORTE	211.095	248.436	257.076	265.785	272.572	280.705
Rondônia	9.443	21.817	22.645	12.819	12.373	10.578
Pará	197.383	220.361	225.388	240.664	247.627	256.378
NORDESTE	960.569	1.398.951	1.432.992	1.467.822	1.432.211	1.320.933
Bahia	424.444	731.208	684.016	705.732	713.571	628.376
Ceará	203.769	202.366	217.610	228.818	237.968	243.513
SUDESTE	225.332	251.811	251.885	300.512	324.396	336.802
Espírito Santo	152.790	155.317	135.937	165.705	175.457	180.245
Rio de Janeiro	41.038	51.084	56.523	67.966	71.206	77.738
SUL	61	172	445	691	1.326	1.503
Paraná	61	172	445	691	1.326	1.503
C. OESTE	23.490	28.792	43.337	43.416	48.786	45.535
Mato Grosso	16.462	17.778	27.955	25.933	27.365	26.323
Goiás	4.965	7.665	11.863	12.881	16.481	14.759

A Tabela 1.2 revela que a maior produção de coco no Brasil está na região nordeste, representando 66,52 % da produção nacional em 2006. A Bahia é o estado brasileiro que mais produz coco, representando 47,57 % da produção do nordeste e 31,67 % da produção nacional no ano de 2006 (Silveira, 2008).

1.2.5 – Área, produção e rendimento médio de coco-da-baia no Brasil

Tabela 1.3 – Área plantada, área colhida, produção obtida e rendimento médio obtido de coco-da-baia nos principais estados produtores do Brasil no ano de 2008.
(IBGE-2008)

	ÁREA PLANTADA(HA)	ÁREA COLHIDA(HA)	PRODUÇÃO OBTIDA(T)	RENDIMENTO MÉDIO OBTIDO(KG/HA)
Brasil	278411	269818	1832503	6792
Pará	25791	25791	253687	9836
Maranhão	2369	2283	8826	3866
Piauí	1411	1411	17492	12397
Ceará	45662	42040	254065	6043
Rio Grande do Norte	21914	21769	60794	2793
Paraíba	12317	11994	60581	5051
Pernambuco	15190	14558	141227	9701
Alagoas	12655	12655	52119	4118
Sergipe	36411	35017	86282	2454
Bahia	83773	83291	607373	7292
Minas Gerais	3078	2834	44384	15661
Espírito Santo	12418	11191	164580	14706
Rio de Janeiro	5422	4984	81093	16271

O gráfico seguinte possibilita visualizar a produção dos estados brasileiros.

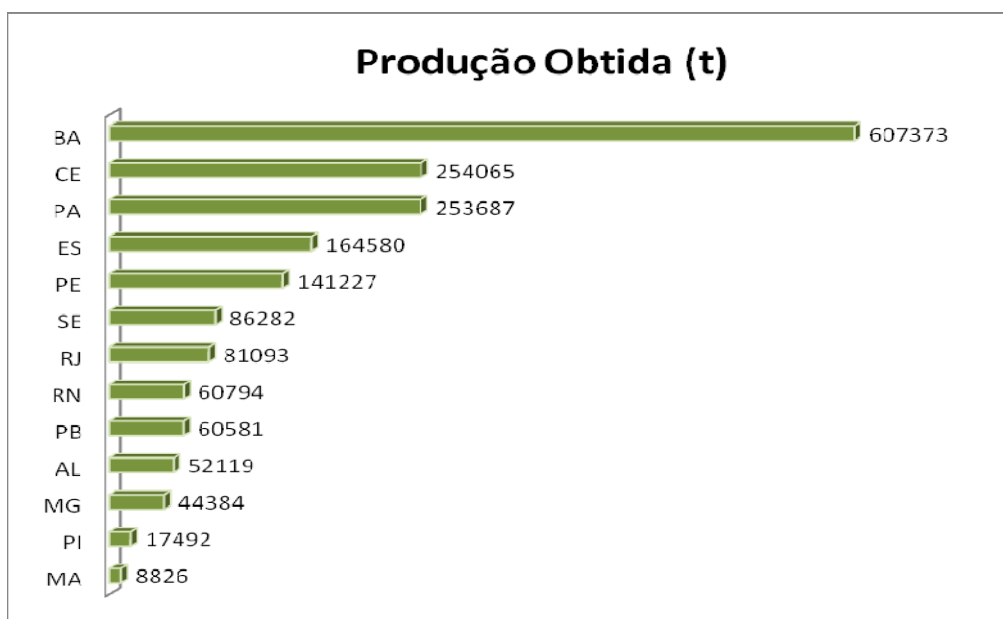


Figura 1.5 – Produção obtida (t) de coco-da-baia nos estados brasileiros
(IBGE-2008)

Segundo a COMLURB os grandes geradores, com produção de mais de 120 litros diários de resíduos - equivalentes a um container plástico de 240 litros a cada dois dias - são obrigados por lei a coletá-los e dar-lhes destinação adequada. Esses serviços são prestados por empresas privadas e, segundo dados do Projeto Coco Verde RJ, no caso das cascas de coco os custos por tonelada giram em torno de R\$ 135. (Agência SEBRAE, 2005).

1.2.6 – Impactos causados pela disposição das cascas de coco verde

1º – Demanda de áreas para lançamento

A crescente urbanização, as questões ambientais e econômicas limitam as áreas disponíveis para a disposição final dos resíduos sólidos (CETESB, 2002 – citado por Silveira, 2008).

Aterros sanitários são áreas planejadas destinadas à disposição de resíduos sólidos no solo que ao serem fundamentados em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permitem uma confinamento adequada. Essas áreas devem ser impermeabilizadas para evitar o vazamento de chorume, (com conseqüente contaminação do solo e águas superficiais e subterrâneas) o qual deve ser tratado antes de ser lançado no meio ambiente. Os gases liberados devem ser captados (para evitar a contaminação do ar) e os resíduos sólidos devem ser cobertos com material inerte a fim de impedir que fiquem expostos e atraiam animais nocivos à saúde humana como: insetos, ratos e baratas. Com isso os aterros sanitários permitem a confinamento segura dos resíduos em relação ao controle da poluição ambiental e proteção à saúde pública (CETESB apud LIMA, 1995 – citado por Silveira, 2008).

O aproveitamento do resíduo do coco verde surge como uma alternativa para o aumento da vida útil do aterro já que uma parcela considerável de resíduo deixará de ser disposta neste local. Ressalta-se também que a reciclagem, reutilização e aproveitamento de diversos tipos de resíduos farão com que não exista, ou sejam, bem menores as áreas requeridas para futuros aterros sanitários. Com isso, haverá uma disponibilidade maior de áreas para utilização de outras atividades tais como: habitação, lazer, escolas, usinas e indústrias (Silveira, 2008).

2º – Proliferação de vetores biológicos

Os resíduos sólidos destinados de forma inadequada, além de degradar a paisagem e produzir mau cheiro, colocam em risco o meio ambiente e a saúde pública. O acúmulo de resíduos sólidos contribui na transmissão de doenças por meio de vetores como: moscas, mosquitos, baratas e roedores que encontram nos resíduos os seus alimentos, abrigo e condições adequadas para proliferação.

Todo o resíduo que não é coletado fica exposto a céu aberto nas ruas, quintais das casas, terrenos baldios, encostas, praias, áreas verdes e próximos a córregos, como conseqüência os vetores se instalam nestes locais e proliferam doenças nos seres humanos.

É necessário que se faça armazenamento, coleta, transporte e se dê um destino adequado aos resíduos, além de incentivar e educar a população a reciclar, reutilizar e criar tecnologias e meios para aproveitamento dos vários tipos de resíduos que são atualmente descartados como o resíduo do coco verde. Esses devem ser recolhidos diariamente e levados para locais que tenham uma infra-estrutura adequada, para que a disposição inadequada aliada com a falta de coleta não se constitua também como um foco potencial de transmissão de doenças.



Figura 1.6 - Destinação urbana inadequada de resíduos de coco verde
(Silveira, 2008)

3º – Produção de metano (CH₄)

Os resíduos do coco verde quando dispostos em lixões, vazadouros, encostas e até mesmo em aterros sanitários passam por um processo de decomposição causado pela ação de microorganismos que empreendem processos de biodigestão da fração orgânica desses resíduos (Amaral, 2004 – citado por Silveira, 2008).

Este processo de biodigestão pode ter características aeróbias, anaeróbias ou ambas. A decomposição anaeróbia é um processo biológico, fermentativo, em que microorganismos degradam a matéria orgânica, na ausência de oxigênio, e produzem um gás que contém, principalmente, metano e dióxido de carbono. A degradação orgânica por microorganismos em presença de oxigênio é dita aeróbia e não produz o metano.

O metano oriundo da decomposição anaeróbia da matéria orgânica contribui para o aumento dos Gases do Efeito Estufa - GEE. De acordo com Lora (2002), efeito estufa é o acréscimo constante da temperatura da terra devido à absorção da radiação infravermelha terrestre pelos GEE, tais como: CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso), CFCs (clorofluorcarbonos), dentre outros.

O dióxido de carbono surge como o principal gás responsável pelo efeito estufa seguido pelo metano, que apesar da sua concentração ser menor tem potencial de aquecimento global vinte e uma vezes maior do que ele para influenciar no aquecimento global (Amaral, 2004 – citado por Silveira, 2008). O aproveitamento do resíduo de coco verde surge como uma alternativa para diminuir a emissão do gás metano.

1.3 – AÇÕES PARA A VALORIZAÇÃO DAS CASCAS DE COCO VERDE

O beneficiamento da casca de coco verde apresenta várias vantagens potenciais: geração de empregos para a comunidade local carente, decréscimo da quantidade de resíduos com conseqüente aumento da vida útil de aterros sanitários e possível diminuição dos problemas de saúde associados com a proliferação de vetores.

Em 2004, a Embrapa Agroindústria Tropical, localizada em Fortaleza – CE, implantou um projeto de beneficiamento da casca de coco que consistia na reciclagem desta casca para diversos fins e conseqüente diminuição na geração de resíduos sólidos (Projeto de Apoio ao Desenvolvimento de Tecnologias Agropecuárias para o Brasil – PRODETAB – nº 105-02/03: “Avaliação de Impactos Econômicos e Ambientais da Utilização da Casca de Coco Verde como Substrato Agrícola”). Foi implantada uma unidade piloto no aterro sanitário do Jangurussu (localizado em Fortaleza e atualmente desativado) para a transformação da casca de coco verde em vários produtos como substrato agrícola, composto orgânico, vasos e artesanato de fibra de coco verde.

Apesar de todos estes pontos positivos do projeto, surgiu outro problema a ser resolvido: o que fazer com a água residuária de elevada carga poluidora gerada durante o beneficiamento? De acordo com Pinto (2003), a casca de coco verde apresenta umidade em torno de 85%. Porém, com o desenvolvimento de tecnologia adequada de tratamento, a desvantagem da geração de efluentes líquidos pode ser atenuada. Portanto, para complementar o projeto supracitado, é de fundamental importância buscar condicionamento e tratamento adequados para os despejos líquidos gerados no processo de beneficiamento da casca de coco verde. Através de levantamento bibliográfico prévio constatou-se que não existem estações de tratamento no Brasil destinadas a tratar este tipo de água residuária; mesmo porque a reciclagem de casca de coco verde é uma inovação e tal efluente nunca fora gerado.

Análises preliminares do líquido de casca de coco verde efetuadas no Laboratório de Saneamento da Universidade Federal do Ceará indicaram valores elevados de concentração de matéria orgânica e salinidade. Contudo, o fator que pode ser o principal entrave na degradação biológica do efluente da prensagem da casca de coco é o elevado teor de taninos totais e condensados: respectivamente 8,1 e 2,7 g/L conforme Teixeira (2007). Este composto é resistente ao ataque microbiano e pode ser tóxico para vários tipos de organismos (Bhat; Singh; Shsrma, 1998).

Como vários trabalhos relacionados ao tratamento biológico de efluente contendo taninos apresentaram problemas de toxicidade (inclusive lodos ativados), o principal desafio desta pesquisa está em remover a matéria orgânica buscando interferência mínima de compostos recalcitrantes, inclusive tanino. Além disso, existem pesquisas desenvolvidas na Embrapa Agroindústria Tropical visando o aproveitamento do tanino existente no resíduo líquido da reciclagem da casca de coco para fins industriais com, por exemplo, a fabricação de adesivos e resinas.

1.4 - O USO DO CARVÃO ATIVADO DESDE A ANTIGUIDADE

A descoberta do carvão vegetal e seu uso como combustível é atribuída ao homem primitivo, que ao utilizar a madeira queimada de aspecto preto e friável nas cavernas, percebeu que esta não produzia chama nem fumaça e gerava calor de forma mais intensa que aquele produzido pela queima direta da madeira. Iniciava-se assim a produção do carvão vegetal (Colombo, Pimenta, Hatakeyama, 2006).

1.4.1 - APLICAÇÕES MEDICINAIS, PURIFICADORAS E PRECURSORAS DO CARVÃO ATIVADO

As propriedades adsorptivas do carvão ativado já eram exploradas desde a antiguidade por diversos povos: os Egípcios, em 1500 A.C., já empregavam o carvão ativado para propósitos medicinais e purificadores e os antigos Hindus também conheciam as propriedades adsorptivas do carvão ativado para a purificação da água que bebiam (Bansal, 1988 - citado por Capobianco, 2005).

O **carvão ativado** é um material carbonoso que apresenta uma estrutura de poros internos, que resulta numa elevada área superficial interna, que se obtém, geralmente, através de um processo de ativação termoquímica (Ehrburger, 1992 - citado por Bezzon, 1998). Essas características são responsáveis pelas propriedades adsorptivas reveladas pelos carvões ativados, que são aplicadas na separação de compostos indesejáveis ou na purificação de líquidos e gases (Kirk, 1992 - citado por Bezzon, 1998).

Hipócrates e seus discípulos recomendavam o uso do carvão pulverizado para remover odores desagradáveis. O uso de carvão ativado para propósitos industriais, entretanto, iniciou-se somente no final do século XVIII. O químico sueco Karl Wilhelm Scheele foi o primeiro a descobrir, em 1773, o fenômeno da adsorção de gases sobre a superfície do carvão. Doze anos após, o cientista russo Saint Petersburg descobriu que o carvão ativado quando imerso em solução de ácido tartárico descorava pela adsorção dos contaminantes orgânicos presentes. Essa descoberta conduziu à primeira aplicação industrial do carvão ativado para a indústria do açúcar na Inglaterra em 1794, quando foi empregado como agente descorante do xarope de açúcar (Jankowska, 1991 - citado por Capobianco, 2005).

1.4.2 - O USO DO CARVÃO ATIVADO EM MÁSCARAS CONTRA GASES VENENOSOS

A Primeira Guerra Mundial, em 1914, introduziu o uso das armas químicas, quando os soldados alemães utilizaram-nas contra soldados britânicos e franceses no oeste, e soldados russos ao leste. Nikolai Zelinsk, professor da universidade de Moscou, foi quem sugeriu o uso de carvão ativado em máscaras antigases. A casca de coco foi o principal material para produzir esses carvões ativados. Percebeu-se que era possível aplicar os carvões ativados em diversas áreas de interesse da indústria química e outras afins. (Jankowska, 1991 - citado por Capobianco, 2005).

1.4.3 – APLICAÇÕES DO CARVÃO ATIVADO NAS INDÚSTRIAS DE ALIMENTOS

Conforme já foi dito, uma das primeiras aplicações do carvão ativado ocorreu na indústria açucareira. O carvão ativado foi usado como adsorvente de substâncias que davam cor ao açúcar e, nas refinarias, é utilizado para adsorver e remover substâncias inorgânicas (cinzas) e orgânicas, responsáveis pela coloração do xarope de açúcar (Jankowaska, Swiatkowski e Choma, 1991 – citado por Stahl, 1996).

1.4.4 – EMPREGO DE CARVÕES ATIVADOS EM TRATAMENTOS DE ÁGUAS

O acelerado desenvolvimento industrial e o conseqüente aumento de rejeitos sólidos-líquidos produzem crescentes teores de impurezas nos mananciais utilizados para fins de abastecimento. Estes compostos, muitas vezes nocivos ao ser humano, não são removidos satisfatoriamente pelos meios convencionais de tratamento de água (sedimentação, filtração, coagulação e decantação). O carvão ativado pode ser usado como elemento de remoção de substâncias deletérias, incluindo micropoluentes, melhorando sua qualidade em termos de potabilidade. As impurezas mais comuns são pesticidas, detergentes, hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, fenóis e seus derivados, compostos carcinogênicos e metais pesados (Jankowaska, Swiatkowski e Choma, 1991 – citado por Stahl, 1996).

Em águas para abastecimento, foram identificadas mais de 700 tipos diferentes de substâncias químicas de origem orgânica, oriundas de descargas de efluentes líquidos industriais e municipais, da decomposição de vegetais e matéria animal, e do processo de coloração de água e esgoto. Teores consideráveis de halometanos, especificamente clorofórmio, podem formar-se na água devido a cloração. Grande parte destes compostos químicos de origem orgânica são carcinogênicos e podem causar doenças de intensidades e características variáveis. É de extrema importância que, antes da distribuição, a água

seja submetida a um tratamento, de modo a evitar que tais substâncias perigosas, presentes na água, sejam consumidas. A coagulação, filtração, oxidação, aeração, troca iônica e o tratamento com carvão ativado, são alguns métodos utilizados, com graus variados de sucesso, para remover substâncias químicas de origem orgânica presentes na água. Muitos estudos, incluindo ensaios laboratoriais e em escalas de bancada e piloto, tem apontado para o uso do carvão ativado como a tecnologia mais abrangente para remoção de poluentes (Bansal, Donnet e Stoeckli, 1998 - citado por Stahl, 1996).

É comum nos setores de saneamento básico a preparação de uma solução de carvão ativado pulverizado que é aplicado em dosagens que são determinadas pela qualidade da água, para remoção de compostos causadores de gosto, odor e cor na água. Grandes empresas como a Companhia de Saneamento Básico de São Paulo – SABESP, SANASA em Campinas, CORSAN no Rio Grande do Sul, utilizam este processo. Indústrias que requerem uma purificação adicional da água em seus processos utilizam um filtro de carvão ativado para remoção de cloro da água fornecida pela estação de tratamento local (Alphacarbo, 2010).

1.4.5 – UTILIZAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO EM TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

Os rejeitos industriais quando lançados em redes de coleta do esgotos de origem doméstica prejudicam o tratamento destes. Os métodos físicos, químicos e biológicos de tratamento convencional tornam-se insuficientes para garantir sua estabilização e destinação final. O carvão ativado remove impurezas como detergentes, tintas, hidrocarbonetos aromáticos, ésteres, pesticidas e metais pesados. A adsorção usando carvão ativado ocorre no tratamento terciário (químico) de esgotos misturados com efluentes líquidos de origem industrial. A presença de substâncias tóxicas torna impossível o tratamento biológico, e o carvão ativado pode ser adicionado à câmara contendo lodo ativado como um reagente auxiliar para evitar o colapso da atividade microbiana. Nestes sistemas é possível aplicar o carvão ativado na forma granular ou em pó (Jankowska, Swiatkowski e Choma, 1991 – citado por Stahl, 1996).

1.4.6 - CONSUMO DE CARVÕES ATIVADOS NAS INDÚSTRIAS QUÍMICAS E FARMACÊUTICAS

A propriedade de descolorar substâncias orgânicas possibilita remover impurezas poliméricas (resinas com alta massa molecular), que produzem cor negra e trazem sérios problemas de ordem tecnológica, particularmente durante a cristalização. Da mesma forma, a carvão ativado promove a clarificação de soluções pela adsorção e eliminação de substâncias coloidais. A eficiência no processo de descoloramento depende de alguns fatores como o tipo de solvente e o valor de pH da solução. As impurezas contidas no carvão ativado (cinzas) e sua composição química são preocupantes devido ao perigo de contaminação do produto. Em muitos casos, o carvão ativado pode causar oxidação catalítica de certos compostos, gerando a decomposição parcial do produto e a conseqüente redução de sua qualidade.

Na indústria farmacêutica, o carvão ativado é utilizado na separação de compostos de soluções diluídas e no processo de descolorização do glicerol, ácido láteo e seus sais, ácido glutamínico e ácido tartárico. Vários antibióticos, vitaminas e esteróides são recuperados, em seus processos de fabricação, através da adsorção em carvões ativados. Outras aplicações farmacêuticas incluem a purificação de água e remoção de impurezas em soluções intravenosas antes da embalagem (Jankowska, Swiatkowski e Choma, 1991 – citado por Stahl, 1996).

Carvões ativados com baixo teor de cinzas também são oferecidos no mercado para uso em indústrias específicas, como a indústria farmacêutica. Um tratamento especial é requerido para a produção deste produto. Separação e purificação de gases por adsorção são importantes operações unitárias na indústria química e petroquímica. Alguns dos objetivos do uso do carvão ativado são: remoção de impurezas traços, remoção de vapores de solvente, separação do ar, remoção de CO₂ de gases combustíveis, recuperação de solventes, remoção de substâncias tóxicas (Alphacarbo, 2010).

Outra aplicação neste sentido diz respeito ao uso do carvão como desodorizante de geladeiras e locais com forte odor, inclusive com propósitos de higiene. Em alguns filtros de cigarro sua função é diminuir a concentração da nicotina e alcatrão (Alphacarbo, 2010).

1.5 – O ESTADO DA ARTE TECNOLÓGICA DA PRODUÇÃO DE CARVÕES ATIVADOS

O **carvão ativado** é obtido, normalmente, através da decomposição térmica de materiais carbonáceos (como: madeira, endocarpo do coco, ossos de animais, turfa, etc.), seguidos pela ativação com, por exemplo, ar atmosférico, CO₂, vapor de água, etc. em elevadas temperaturas (700°C a 1100°C) (Santiago e colaboradores, 2005) e os produtos são caracterizados pelas suas grandes superfícies específicas que variam de 100 a 2000m²/g. As aplicações industriais dos carvões ativados incluem desde a purificação da água até o refino de produtos derivados do petróleo, resultantes das propriedades hidrofóbicas e organofílicas das suas diversas variedades (Santiago e colaboradores, 2005; Tabela 1.4).

Tabela 1.4 - Aplicações de elementos adsorventes inorgânicos e orgânicos
(Queiroga – citado por Santiago e colaboradores, 2005)

ADSORVENTE	APLICAÇÃO
Sílica Gel	Purificação de gases, remoção de umidade, refino de derivados do petróleo
Carvão Ativado (C.A.)	Adsorção de orgânicos, gases, purificação de H ₂ O
Polímeros	Adsorção de solutos polares em soluções aquosas
Alumina Ativada	Remoção de contaminantes, desidratação de gases e líquidos

O carvão ativado pode ser comercializado sob a forma de pelotas ou grânulos de 0,1 a 12mm, com 50-60% de porosidade e densidade média entre 0,45-0,85 t/m³ (Santiago e colaboradores, 2005. Ver Tabela 1.5).

Tabela 1.5 - Análise comparativa dos adsorventes comerciais
(Santiago e colaboradores, 2005 e Indústrias Químicas Carbomafra S. A*)

ADSORVENTE	ÁREA SUPERFICIAL (m ² /g)	DIÂMETRO DO PORO (Å)
Carvão Ativado*	600-1200	20-5000
Sílica Gel	600-800	20-50
Alumina Ativada	200-500	20-140
Polímeros	-	

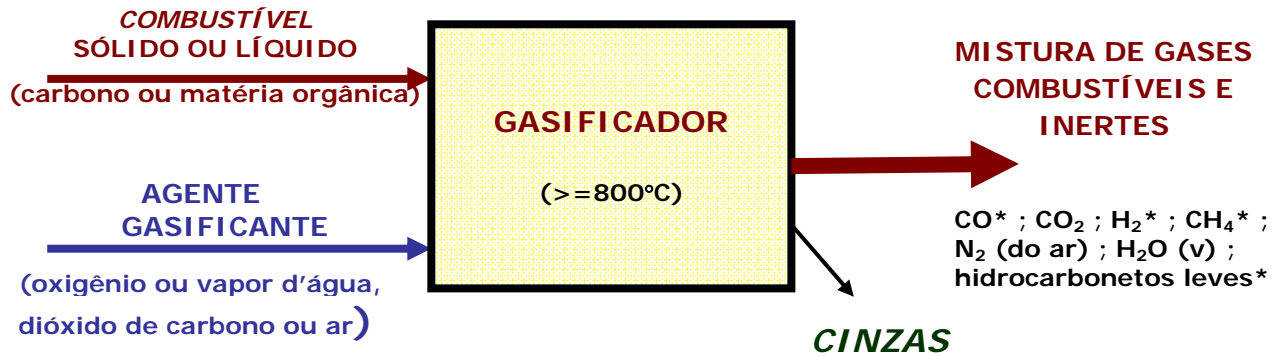
Muitos resíduos gerados, sobretudo, na agroindústria do coco, são utilizados como combustíveis alternativos em fornalhas das caldeiras ou fornos, em função do seu apreciável poder calorífico inferior (p.ex., PCI: 4454,6 Kcal/Kg). Os resíduos do coco já são utilizados no país para produção de carvão ativado, porém, os sistemas de carbonização existentes variam de fornalhas simples até fornos sofisticados, o que (aparentemente) inviabiliza o estabelecimento de uma cadeia produtiva, seja do ponto de vista energético ou econômico (adaptado de Santiago e colaboradores, 2005; ver Tabela 1.6).

Tabela 1.6 - Comparativo dos processos de fabricação de carvão ativado
(Santiago e colaboradores, 2005)

MÉTODO		RENDIMENTOS (%)	
TERMOQUÍMICO	Carvão ativado	Gases pobres	Líquido (bioóleo)
Convencional	18-25		
Pirólise Rápida ("Flash")	25-30	45	30

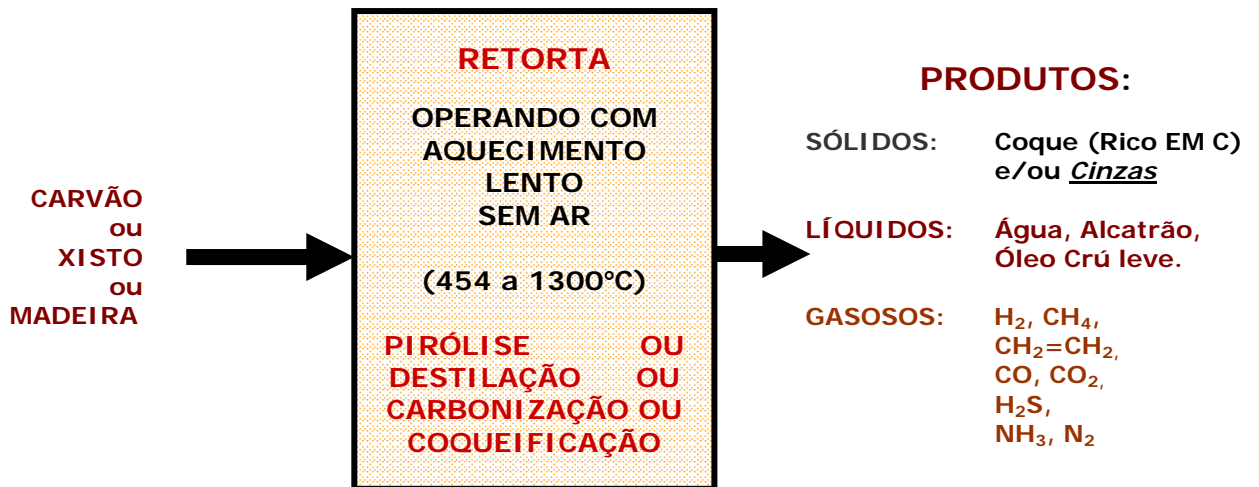
A produção de qualquer tipo e forma de carvão ativado (ou coque) inclui uma etapa de carbonificação (ou carbonização ou coqueificação) inicial, que produz a termodecomposição da matéria-prima carbonosa (ou carbonácea) através de um processo de pirólise ou de uma gasificação (Figura 1.2), a partir de recursos naturais minerais, vegetais e animais.

(A) GASIFICAÇÃO DE MATERIAIS NÃO-COQUEIFICÁVEIS



Notas: O calor necessário à gaseificação provém da combustão de parte do gás combustível gerado
* Cada composto assinalado nos produtos gasosos é uma fração combustível gerada ou liberada.

(B) PIRÓLISE OU DESTILAÇÃO DESTRUTIVA DE CARVÃO E SIMILARES (*Inclusive na incineração de lixos, se a queima for imperfeita*)



PIRÓLISE – é operada em atmosfera redutora.

GASIFICAÇÃO – ocorre em ambiente redutor ou oxidante.

Figura 1.7 – Processos de termodecomposição de substâncias
(Zakon, 2005)

A incineração é um caso limite de pirólise (e da gasificação), que gera cinzas e gases oxidados (não-combustíveis), pois não forma vapores intermediários que possam ser condensados para uso posterior. A pirólise aplica-se a carvões e materiais de origem mineral e vegetal e, também, no caso de lixos. É importante destacar que acima de 600°C os materiais biológicos são destruídos, podendo ser reduzidos a carbono elementar ou seus óxidos (CO e CO₂) e elementos oxidados (adaptado de Nascimento, Almeida Filho e Zakon, 2000).

É desnecessário efetuar no presente trabalho uma abordagem mais ampla da incineração, destacando, porém, que qualquer equipamento de pirólise ou gasificação pode empregar os mesmos recursos construtivos e operacionais dos incineradores.

1.6 - MATÉRIAS-PRIMAS PARA PRODUZIR CARVÃO ATIVADO

De um modo geral, o verbo **carbonificar*** é usado para descrever os processos naturais de formação de carvões, rochas oleígenas, betumes, petróleos e gás natural. O termo **coqueificar** aplica-se à obtenção de coque oriundo de algum carvão mineral numa coqueria instalado em complexos siderúrgicos. De modo análogo, o verbo **carbonizar** é empregado para descrever processos de conversão de substâncias orgânicas em coque ou fuligem ou pigmentos negros.

As principais propriedades do carvão ativado produzido dependem do tipo e das propriedades da matéria-prima empregada, algumas das quais são apresentadas na Tabela 1.7.

Tabela 1.7 – Variedades de matérias primas naturais para produzir carvão ativado.
(Alphacarbo, 2010)

CARBONIFICADAS* OU CARBONIZADAS	VEGETAIS	ANIMAIS
Turfa	Madeira	Ossos
Lignita ou linhita	Casca de coco verde,	
Carvão betuminoso	Casca de coco babaçu	
Resíduos de petróleo	Casca de dendê	
	Casca de noz	
	Caroço de azeitona	
	Caroço de pêssego	
	Açúcar	

Na Europa, as principais matérias-primas empregadas para se produzir carvões ativados são a madeira, a serragem, a casca de coco, o carvão vegetal, a turfa, o carvão de turfa, a lignita, a antracita e o semicoque de lignita. Nos EUA, a lignita e os derivados de petróleo são as principais matérias-primas utilizadas. Na literatura tecnológica são encontrados diversos tipos de materiais naturais e sintéticos empregados na obtenção de carvão ativado, tais como: cascas de nozes, caroço de diversas frutas, betume, liga de carbureto, entre outros (Kingle, 1984 - citado por Capobianco, 2005).

No Brasil, a produção de carvão ativado (vegetal) como matéria-prima é oriunda, principalmente, de resíduos de madeira (serragem) para a produção de carvão ativado pulverizado e coco de babaçu, coco da Bahia e coco de dendê para a produção de carvão ativado granulado (Carbomafra, 1997 - citado por Bezzon, 1998).

O coco consumido nas praias litorâneas brasileiras é da variedade coco verde dos tipos anão e gigante, e apresenta-se como promissor em termos de reciclagem de rejeitos industriais e populares.

Os sólidos com alto teor de carbono podem ser utilizados como matéria-prima para a obtenção de carvão ativado. As matérias-primas mais utilizadas são: tipos de biomassa (como a madeira, cascas de nozes, casca de coco verde, caroços e outros), carvão mineral, turfa e alguns resíduos vegetais (Jankowska, 1991; Merchant, 1992 – citado por Bezzon, 1998).

1.7 - CARVÃO MINERAL

É uma rocha combustível, sedimentar, orgânica (composta primariamente de carbono, hidrogênio e oxigênio) formado pela decomposição da vegetação, que se consolidou entre os estratos rochosos e formou filões (camadas), e que foi alterada pelos efeitos combinados de ações microbianas, pressão e calor durante um período considerável de tempo (adaptado de WCI-Coal, 2004).

O **carvão mineral** é um combustível fóssil natural extraído da terra através de um processo de mineração. É encontrado em grandes profundidades ou perto da superfície e possui aparência preta ou marrom, lisa, macia e quebradiça (ABCM, 2010). O **carvão mineral** é proveniente de depósitos de restos de animais de grande e pequeno porte, microorganismos, plantas e árvores, que formaram depósitos de matéria orgânica. No caso da vegetação pré-histórica, esta se acumulou em pântanos sob uma lâmina d'água há milhões de anos. Com o passar do tempo, estes depósitos foram cobertos por argilas e areias, ocorrendo um soterramento gradual, que provocou aumento de temperatura e pressão sobre a matéria orgânica depositada. Isto expulsou o oxigênio e o hidrogênio, concentrando o carbono (processo de carbonificação) e produziu o minério, conhecido carvão mineral (adaptado de Nordic Purosystems, 2004).

Pelo fato do carvão possuir uma alta superfície de contato em suas lamelas, durante esse processo de envelhecimento, foi possível que absorvesse do solo, em seus poros originais, vários gases e compostos orgânicos. O carvão mineral é geralmente subterrâneo, sendo extraído a céu aberto ou em minas profundas, para depois sofrer um processo químico industrial de termoprocessamento, que inclui aquecimento (*pirólise ou destilação seca*) e lavagem com gases oxidantes. À medida que os compostos de dentro do carvão vão sendo arrastados ou liberados, a matriz carbonosa capacita o carvão a absorver novamente compostos orgânicos e gases, por exemplo, dissolvidos na água, tornando-o, antes do uso posterior um produto ativado (adaptado de Nordic Purosystems, 2004).

Foram identificados **quatro estágios geoquímicos na formação do carvão mineral: turfa, linhito, carvão (sub-betuminoso, betuminoso, hulha) e antracito (semi-antracito, antracito e meta-antracito)**, os quais dependem de fatores como pressão e temperatura para sua formação (ABCM, 2010; Lenz e Ramos, 1985).

O coque siderúrgico, o coque combustível e o carvão mineral ativado são obtidos a partir da pirólise ou destilação seca de carvões minerais.

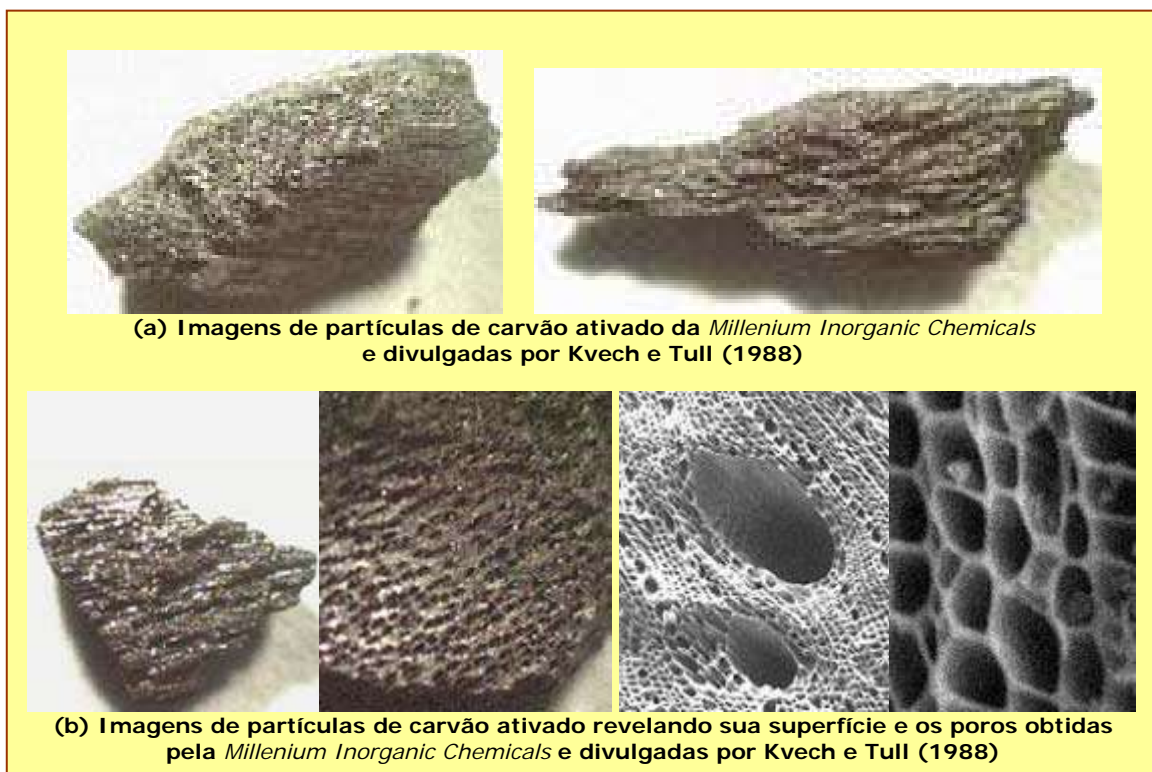


Figura 1.8 – Fotografias dos poros de um carvão mineral betuminoso antes e após a ativação

1.8 - CARVÃO VEGETAL

O produto da destilação destrutiva seca, ou pirólise ou carbonização ou coqueificação, de madeiras ou resíduos agrícolas, que é realizada em retortas ou fornos ou coqueificadores, é denominado **carvão vegetal** (*charcoal*). Nos equipamentos termoquímicos citados é possível remover matérias voláteis, que podem ser condensadas e purificadas ou tratadas posteriormente para serem comercializadas (Figura 1.9).

Meira (2002) define **carvão vegetal** como um resíduo sólido que se obtém da carbonização da madeira, em que a mesma é queimada ou aquecida numa atmosfera restrita de ar, em que vão sendo expulsos a água, os compostos voláteis, uma fração de compostos orgânicos condensáveis à temperatura ambiente, e outros, sem que ocorra a combustão total, devido a pouca quantidade de oxigênio.

A produção de carvão vegetal é o mais antigo processo de transformação química para a utilização da madeira (Gomes e Oliveira, 1982). O processamento químico da madeira se dá principalmente de duas maneiras: a **pirólise** e a **hidrólise**. Na pirólise, que sempre precede a combustão, a madeira é decomposta em subprodutos e libera calor. Com o ativamento do processo, gases inflamáveis são liberados e a ignição pode ocorrer se houver uma fonte de calor, não havendo esta fonte, a madeira precisa alcançar uma temperatura muito mais alta para que ocorra uma combustão espontânea (ABEAS, 2003).

Carvão vegetal é o resíduo sólido resultante da decomposição térmica da biomassa obtido pelo aquecimento na ausência de ar (**pirólise**) a uma temperatura superior a 300°C. Sua produção vem desde os primórdios da humanidade, e admite-se que já ocorria de 20.000 a 30.000 AC. Como as suas temperaturas de combustão são altas, permite a fusão de metais. Graças ao carvão vegetal o homem saiu da Idade da Pedra, evoluiu para a Idade do Bronze 3.000 AC. Com o advento e o uso do fole de ar em 1.200 AC, foi possível iniciar a Idade do Ferro (Sampaio, Pinheiro e Rezende, 2007).



Figura 1.9 – Toras de madeira dentro do forno e aspecto do carvão vegetal produzido
(Cirgell, 2010)

Segundo Burger e Richter (1991), a madeira de alta massa específica queima melhor, uma vez que apresenta maior quantidade de matéria lenhosa por volume. A combustibilidade e o poder calorífico são altamente influenciados pelo teor de lignina e pela presença de materiais extrativos inflamáveis como óleos, resinas, ceras, que aumentam consideravelmente essas propriedades, afetando a forma como queima a madeira.

A **carbonização da lignina** é o que mais interessa para a qualidade e produtividade do carvão e este composto é o principal responsável pela formação deste insumo energético, pois os outros praticamente se degradam totalmente na temperatura de carbonização, ao contrário da lignina. A celulose e hemicelulose carbonizam a 300 °C. Em temperaturas superiores o rendimento diminui, sendo que em temperaturas de 500 a 600 °C, o rendimento é praticamente nulo (Ferreira, 1983).

Para entender como o fogo queima, é necessário compreender o fenômeno da **combustão**. **Fogo**, de um modo geral, é o termo aplicado ao fenômeno físico resultante da combinação entre oxigênio e uma substância qualquer (madeira, por exemplo), com produção de calor, luz, e geralmente, chamas. **Fogo** ou **combustão**, portanto, é uma reação química de oxidação. A decomposição da madeira se dá lentamente à temperatura ambiente e a taxa de liberação de energia é tão lenta que o aumento de temperatura não é necessária. No entanto, há ocasiões em que uma reação de oxidação lenta pode terminar num processo de combustão de alta temperatura (ABEAS, 2003).

Segundo Netto (1980), quando se fala em carvão vegetal deve-se considerar suas propriedades e, conseqüentemente, a necessidade de controle da qualidade do produto. Os fatores que influenciam na qualidade do carvão vegetal são a espécie da madeira, dimensão das madeiras e método de carbonização.

Para Gomes e Oliveira (1982) - citado por Vale e colaboradores (2001), a espécie da madeira é muito importante porque a densidade do carvão está relacionada com a densidade da madeira que lhe deu origem, ou seja, quanto maior a densidade da madeira, maior será a densidade do carvão produzido. Quanto à dimensão da madeira, pedaços pequenos produzem carvão mais duro e mais denso que a madeira em grandes pedaços, porque tem menos tendência a estourar durante a carbonização e as fendas produzidas pela contração são menos numerosas. O método de carbonização influencia o tamanho do carvão produzido, isto é, a carbonização lenta quebra menos o carvão que os métodos rápidos, o que é um fato a favor dos fornos de tijolos.

A **resistência mecânica do carvão vegetal** é outra característica muito importante e está relacionada à **friabilidade** do carvão. O carvão vegetal é por natureza um produto bastante friável, característica que é agravada pelas numerosas operações de manuseio e transporte. Carvões menos resistentes irão mais facilmente degradar-se, resultando na diminuição do seu tamanho médio, o que não é desejável. De acordo com Oliveira (1977), a geração do pó do carvão desde a fabricação até sua utilização é da ordem de 25%, distribuídos da seguinte forma: nas carvoarias (3,7%), carregamento e transporte (5,8%), armazenamento (6,3%) e peneiramento (9,4%).

Tabela 1.8 – Incentivos e Limitações para adoção do biorredutor carvão vegetal na Siderurgia
(adaptado de Azevedo, 2008)

VANTAGENS DO CARVÃO VEGETAL	DESVANTAGENS DO BIORREDUTOR
• Resulta de cultivo auto-sustentável	• Baixa densidade energética
• É um fator de inclusão social	• Limitado a países com insolação e com áreas disponíveis para plantio
• Reduz o uso de combustíveis fósseis	• Imobilização de capital na terra
• Custo menos vinculado ao mercado de <i>commodities</i>	• 7 anos de ciclo e investimentos
• Custos futuros melhores via P&D em manejo florestal e tecnologias de carbonização	• Alto estoque de madeira no campo
• Capacidade de mitigação de boa parte das emissões de GEE [*] da Siderurgia	• Ameaça de incêndios, pragas, secas prolongadas e movimentos agrários
• Subprodutos da carbonização podem ser absorvidos no mercado	• Tecnologia de carbonização ainda deficitária do nível do resto do processo siderúrgico
• O ferro primário dispensa De-S ^{**}	• Limitação do tamanho do reator de carbonização

* GEE = Gases de Efeito Estufa

** De-S = Dessulfurização

Admite-se que a obtenção de carvão ativado a partir da carbonização das cascas de coco verde permita atender grande parte das aplicações válidas dos similares de origem mineral, vegetal e animal. E qualquer empresa estabelecida pode, a princípio, ampliar seus horizontes industriais. E as políticas de gestão pública podem vislumbrar a criação de novas oportunidades de emprego para a população crescente das grandes cidades.

1.9 – PRINCIPAIS DIFERENÇAS ENTRE CARVÃO VEGETAL E COQUE DE CARVÃO MINERAL

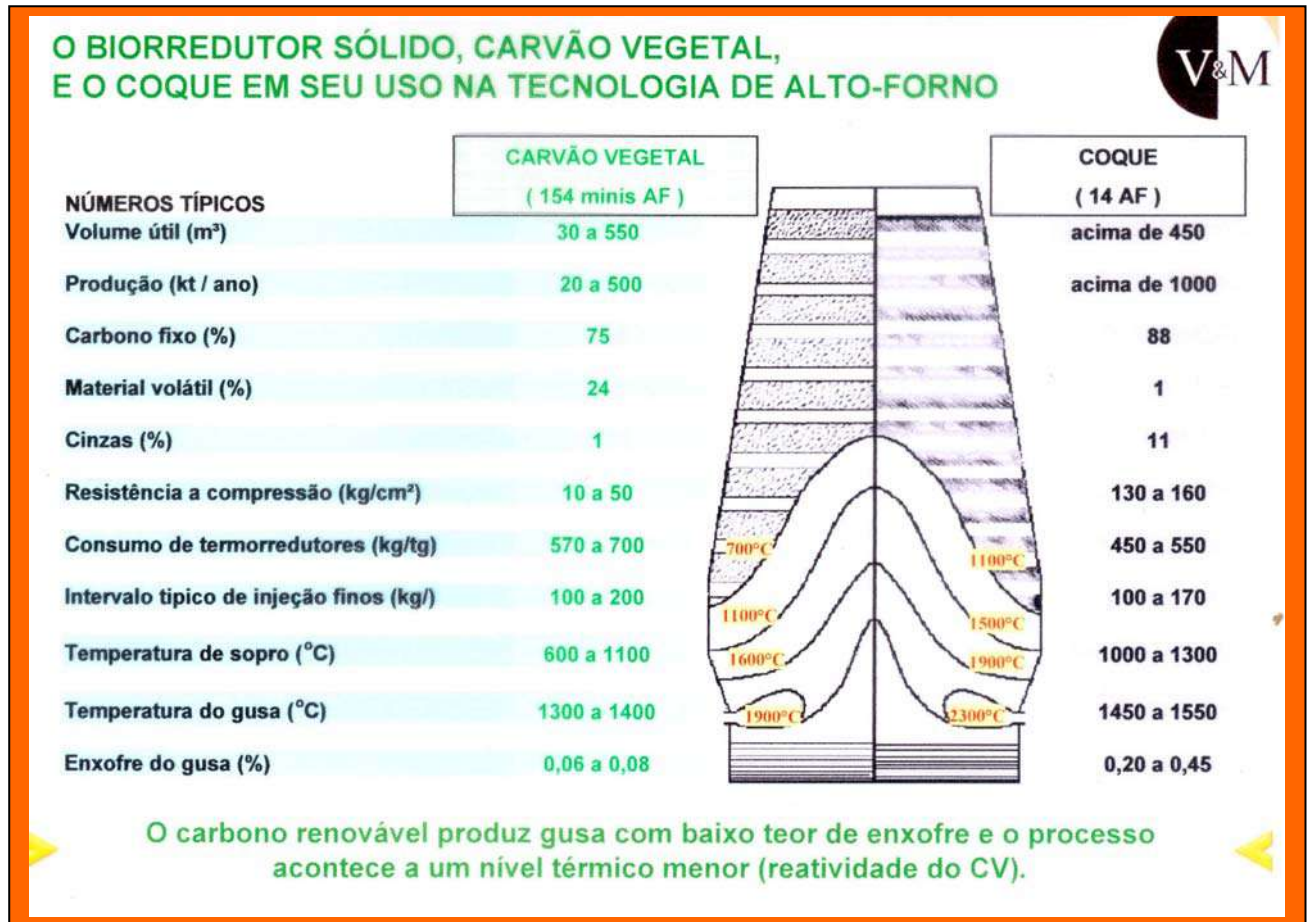


Figura 1.10 – Comparação entre as características tecnológicas e os desempenhos do carvão vegetal e do coque mineral na produção de ferro gusa siderúrgico (Azevedo, 2008)

O fato do carvão vegetal possuir teores bem menores de enxofre do que o carvão mineral, além de menor resistência à compressão explica o fato das coquearias siderúrgicas serem de maior porte, aliás, construídas sob a forma de baterias de dezenas de retortas, conforme será exposto no capítulo 2.

Ou seja:

1º - Coque é o produto da pirólise ou gasificação de carvões minerais;

2º - Carvão vegetal não é rigorosamente um coque, embora seja similar, mas pode ser denominado "biorredutor".

3º - Carvão ativado pode ser de origem mineral, desde que o processo de coqueificação seja também ativador, ou que o coque produzido numa coquearia seja posteriormente ativado, dependendo das temperaturas de operação da pirólise na retorta.

O carvão vegetal não é equivalente ao coque. Por ter sido apenas carbonizado e não coqueificado, como o carvão mineral o é para virar coque, continua sendo um produto desconhecido. É errado considerar o carvão vegetal como sendo similar ao coque. Esse paralelo está ainda presente na academia e na cultura do setor e só será dissipado com a melhor compreensão, por estudos e medições, do que é o carvão vegetal e quais são as formas mais eficazes de sua utilização nos altos-fornos (Sampaio, 2008).

1.10 – CARVÃO ANIMAL OU DE OSSOS

Geralmente, o *carvão animal ou de ossos* é o produto resultante da pirólise de ossos bovinos e da extração prévia a quente das gorduras, graxas e substâncias presentes nos esqueletos animais.

Também denominado *carvão negro animal* ou, simplesmente, *negro animal*, obtém-se pela carbonização de ossos e cartilagens num recipiente fechado. Caracteriza-se pela sua extraordinária capacidade descorante. Os líquidos nos quais se encontram matérias corantes dissolvidas, se descoram por filtração através do carvão animal. Esse poder adsorvente do carvão animal é possível graças ao estado de divisão granulométrica (ou fragmentação) em que se encontra (Argentièrè, 1986).

Os ossos são coletados de frigoríficos, posteriormente desengordurados e transportados ao campo para curar, isto é, para que o ossos possam tomar chuva e sol, durante no mínimo 90 dias, de forma que o osso fique 100% seco (Bonechar, 2010).

Os ossos são adquiridos pela BONECHAR em seu tamanho original, *in natura*, em sua forma não processada e não embalada, sendo possível classificá-los, removendo as suas partes moles, de forma que fiquem somente as partes duras. Os ossos de outros animais, tais como porcos, cabritos, cavalos, etc., não são adequados para a produção de Carvão de Ossos, pois são muito frágeis e não possuem a mesma porosidade de ossos bovinos (Bonechar, 2010).

Esse tipo de controle é necessário para obter um carvão de ossos de alta qualidade e elevada resistência mecânica, mantendo propriedades máximas de porosidade e adsorção, e o privilégio de receber o “Kosher Certificate”, por se tratar de um produto 100% orgânico (Bonechar, 2010).



Figura 1.11 – Ossos bovinos fragmentados e aspectos do carvão animal granulado e pulverizado (Bonechar, 2010)

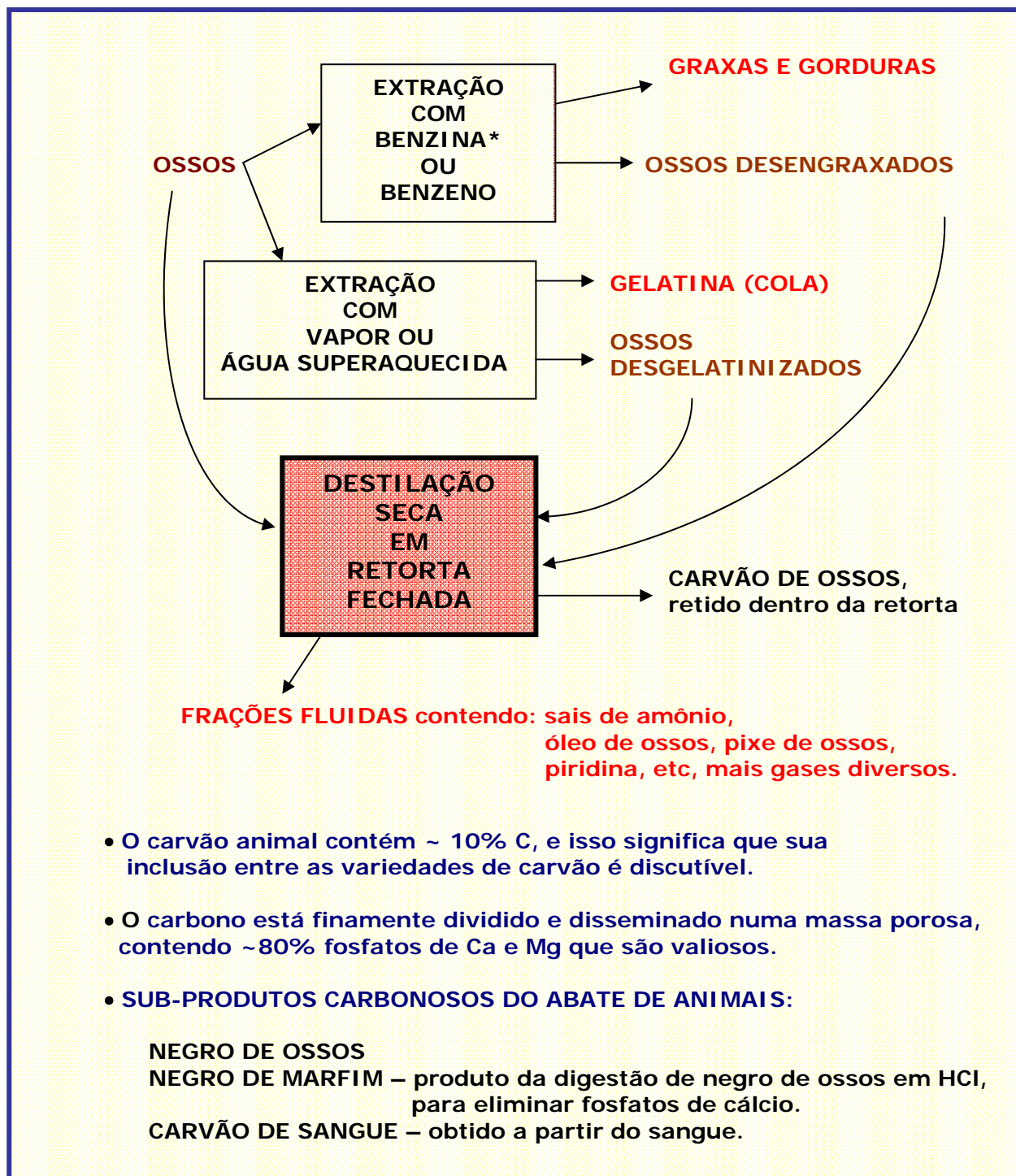


Figura 1.12 - Processos de obtenção de carvões animais de ossos
(adaptado de Mellor, 1952)

1.11 – OCORRÊNCIAS NATURAIS E INDUSTRIAIS DO CARBONO

O carbono ocorre em diferentes formas, todas idênticas na composição química e comportamento, mesmo que apresentem valores diferentes de densidades, condutividades elétricas e térmicas e assim por diante. Esse fenômeno é conhecido pelo termo “alotropia” e o carbono assemelha-se nessa propriedade de possuir formas alotrópicas diversas com os elementos químicos enxofre, fósforo, silício, oxigênio e vários outros (Cooper, 1963).

1.11.1 - Parâmetros de classificação cristaloquímica das ocorrências de carbono

Segundo Cooper (1963) os compostos naturais de carbono podem ser classificados pela

- (a) **pureza da composição** – puros ou impuros;
- (b) **arranjo espacial da estrutura molecular** - cristalinos e não-cristalinos.

O **carbono puro ou impuro** é um constituinte de numerosas substâncias naturais, tais como carvão, carbonatos, óleos minerais, madeira, asfalto, matéria betuminosa e orgânica de vários tipos, e ocorre no ar atmosférico como dióxido de carbono. O carbono também é constituinte de vários produtos industriais (manufaturados ou sintéticos) tais como o carvão vegetal (*charcoal*), pigmento negro de fumo (*lampblack*), coque (*coke*), fuligem (*soot*) e outros pigmentos, produtos químicos e fármacos, explosivos e plásticos (Cooper, 1963).

O **carbono puro mineral** é encontrado na forma de diamante em várias partes do mundo, tais como Brasil, África e Índia. O **carbono impuro mineral** é encontrado em alguns depósitos de grafita - também conhecida como *plumbagina* (*plumbago*) ou *chumbo negro* (*blacklead*) - em lugares como Sibéria e Ceilão (adaptado de Cooper, 1963) e no Brasil.

O **carbono impuro vegetal ou animal** é encontrado toda vez que ocorrem incêndios em matas e florestas ou se queimam, incineram ou cremam corpos animais, ou, simplesmente, quando alguém faz um churrasco de carne.

O **carbono (impuro)** é freqüentemente produzido nos cilindros dos motores a combustíveis derivados do petróleo, e pelo fato de não ser solúvel em qualquer solvente comum, é necessário desmontar os seus blocos contendo os pistões para remover mecanicamente a fuligem ou carvão produzido (Cooper, 1963).

As diferentes formas estruturais moleculares do carbono podem ser **cristalinas** (diamante e grafite) e **não-cristalinas** (erroneamente denominadas “amorfas”), que incluem carvões minerais e vegetais, negro de fumo, coque e fuligem (Cooper, 1963).

1.11.2 - Diamante natural e sintético

A forma mais densa do carbono é a do diamante, que **é a substância mais dura conhecida**, um fato indubitável relacionado com sua estrutura cristalina molecular gigante, **sendo quimicamente inativa nas temperaturas e pressões ambientais da atmosfera terrestre**. *Queima ao ar a 900 °C se aquecido externamente para formar dióxido de carbono (e a 700 °C em oxigênio puro) e combina-se com o elemento químico flúor para formar tetrafluoreto de carbono*. O diamante não é atacado por ácidos, álcalis ou por clorato de potássio fundido (Durrant, 1956).

Os diamantes são encontrados na Natureza na forma de cristais octaédricos – com densidade 3,5 - e são freqüentemente cortados e polidos para o mercado de jóias e pedras preciosas. Sua dureza é útil nas atividades de perfuração geológica e indústrias de brocas e polidores. **Diamantes pequenos** foram produzidos artificialmente por cristalização de carbono em fornos de ferro fundido sob grande pressão, porém, sua qualidade é inferior à dos diamantes naturais e possuem pouco valor (Cooper, 1963).

O diamante é muito resistente à ação química (mas, não é inerte). Os ácidos e álcalis não atacam o diamante, mas se for submetido aos banhos de carbonato de sódio e potássio fundidos em altas temperaturas, irá converter-se lentamente em monóxido de carbono. Quando aquecido a aproximadamente 800°C ao ar, irá inflamar-se e queimar com chama luminosa e formará dióxido de carbono, produzindo uma quantidade desprezível de cinzas de matéria mineral (Cooper, 1963).

O diamante converte-se em grafite se aquecido sob pressões comuns (Cooper, 1963).

1.11.3 - Grafitas natural e comercial

A grafita é a forma estável do carbono abaixo de aproximadamente 1.100°C e de pressões de 8.000 atmosferas. Teoricamente, se os diamantes fossem submetidos durante muito tempo, milhões de anos, iriam converter-se em grafite (Cooper, 1963).

O carbono em solventes do tipo ferro fundido, e sob pressões comuns, pode formar grafite. Quando fundido, o carbono solidifica-se até grafita pura ao invés de diamante. Sob temperaturas elevadas, freqüentemente sublima-se abaixo do seu ponto de fusão (Cooper, 1963).

A **grafita natural** é um sólido cristalino, opaco, escamoso, macio e escorregadio ao toque, quebradiço, que possui um brilho cinza quase metálico. Cristaliza-se em placas hexagonais lamelares. A grafita é menos densa que o diamante, e ao contrário deste é um bom condutor térmico e de eletricidade. A condutividade elétrica da grafita aumenta com a temperatura (Durrant, 1956).

A grafita é levemente mais reativa que o diamante. Combina-se com o oxigênio a 700°C no ar e com o flúor a 500 °C, sendo lentamente oxidada pelo ácido crômico para formar dióxido de carbono. A grafita forma monóxido de carbono sob ação de carbonato de sódio (barrilha) fundida. Não é atacada por ácidos diluídos, hidróxidos alcalinos fundidos ou cloro (Durrant, 1956).

A **grafita natural** é classificada em três classes (Morais,1991): **1ª – “flake” disseminada** (lamelas ou palhetas) com brilho preto metálico quando bem cristalizado, com 25% a 60% de carbono; **2ª – veio cristalino** (foliado, fibroso ou colunar) e; **3ª - não-cristalina** (denominada erroneamente de “amorfa”), preta e com aspecto terroso, e contendo microcristais, com 80% a 85% de carbono grafítico.

Comercialmente, a grafita é dividida em duas grandes categorias: a cristalina e a amorfa, tendo por base apenas a granulometria. Nas aplicações industriais, a grafita é usada com granulometria variando desde o tamanho coloidal até a forma peletizada, com partículas de 4mm e teores de carbono variando de 40% a 100% de concentração (Morais, 1991).

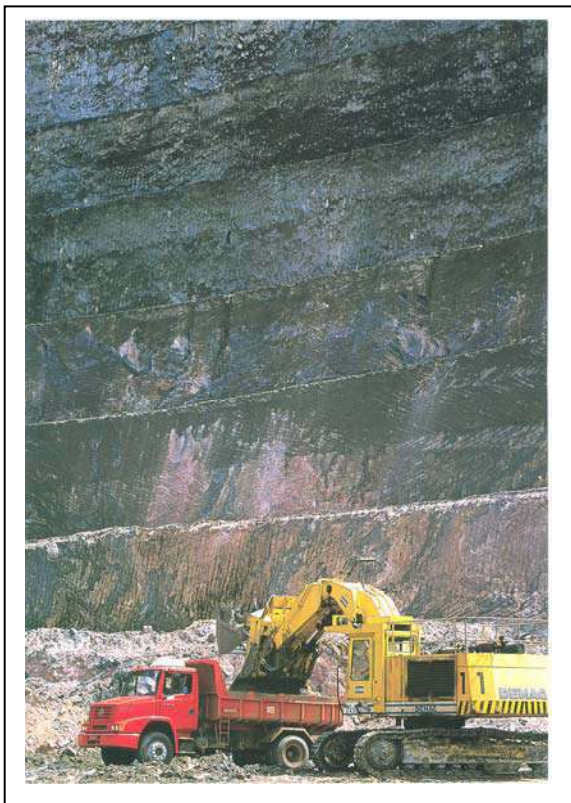


Figura 1.13 - Ocorrência, extração e aspecto de um tipo de grafita natural
(Nacional de Grafite, 2010)

A grafita amorfa (não-cristalina) é classificada, principalmente, pelo seu conteúdo de carbono grafítico. Os minérios comerciais de grafita contém de 50% a 93% de carbono, dependendo de sua fonte (Morais, 1991)

A grafita pode ser produzida submetendo-se carbono amorfo a calor intenso. É quimicamente muito estável (mas, não é inerte!), porém, apresenta menor estabilidade que o diamante (Cooper, 1963).

A **grafita** é uma substância cinza escura, com densidade de 2.1 a 2.3, tato, maciez e brilho característicos, e forma um excelente lubrificante quando misturada com diversas graxas. Apresenta boa condutividade térmica e elétrica, sendo útil para fabricar eletrodos laboratoriais e industriais.

A grafita é estratégica do ponto de vista de geração de energia elétrica, porque é usada em reatores nucleares, porque absorve nêutrons e, assim, modera a desintegração artificial do urânio, possibilitando que a energia atômica livre seja controlada para fins de aquecimento (Cooper, 2003).

Por ação prolongada de uma mistura de ácido nítrico, ácido sulfúrico e clorato de potássio a temperaturas inferiores a 100 °C, a grafita é convertida para um sólido amarelo instável conhecido como *ácido grafítico* ou *óxido grafítico*. Nas mesmas condições, o diamante não é atacado e o "carbono amorfo" é convertido numa massa marrom solúvel em água. Foi comprovado que os reagentes atacam a grafita separando os planos dos átomos de carbono. Quando a grafita é oxidada até óxido grafítico, uma camada de átomos de oxigênio é inserida entre dois planos adjacentes de átomos de carbono. Flúor e bromo também provocam efeitos semelhantes, inserindo camadas de seus átomos entre as camadas adjacentes dos átomos de carbono (Durrant, 1956).

1.11.4 – Carbono amorfo (não-cristalino)

O vapor de carbono condensa-se na forma de carbono amorfo, ao invés de grafite ou diamante (Cooper, 1963). O **carbono amorfo** é também produzido pela condensação de vapor de carbono, e pela decomposição ou pela oxidação parcial de compostos de carbono (Durrant, 1956).

O **carvão vegetal** (carbono amorfo ou não-cristalino) flutua sobre a água devido ao ar contido em seus poros. Porém, se for lançado em água à ebulição por algum tempo, o ar irá expandir-se e emigrar dos poros e o pedaço de carvão afundará (Cooper, 1963).

Uma forma muito pura de carbono amorfo, conhecida como **carvão vegetal de açúcar** é obtida pelo aquecimento de açúcar num cadinho coberto ou fechado, onde liberam-se ou desprendem-se vapor d'água e diversas substâncias alcatroadas, permanecendo uma massa carbonífera, que é lavada com água para remover impurezas (Cooper, 1963).

1.12 - CARBONO: ATIVO OU INERTE?

O carbono elementar existe em três modificações alotrópicas – carbono amorfo (não-cristalino), grafita e diamante (cristalinos) - que são empregados industrialmente (Durrant, 1956).

O diamante e a grafita resistem à oxidação mesmo em temperaturas elevadas, porém, são ativos em condições de temperaturas ou pressões elevadas ou quando submetidos ao ataque de alguns reagentes químicos.

Algumas aplicações industriais dependem da "inércia" (termo incorreto, pois deveria ser substituído por "estabilidade") química do carbono.

Por outro lado, o carbono amorfo pode ser ativado, com o que adquire uma grande capacidade de adsorção seletiva, seja no estado gasoso ou no estado líquido ao choque térmico (Durrant, 1956).

1.13 - CARVÃO OU CARBONO ATIVADO?

O carvão ativado é um material carbonáceo que apresenta área superficial e porosidade altamente desenvolvidas, que permite a adsorção de moléculas de substâncias diversas tanto em fase líquida como gasosa em processos de purificação ou despoluição de fluidos, sejam águas potáveis ou emissões gasosas (adaptado de Bansal, 1988 – citado por Borges e colaboradores, 2005).

O **carvão vegetal** é oriundo da formação de cristalitos grafiticos, elementares, com disposição irregular, bloqueado estruturalmente pelos carvões amorfos e alcatrões, durante um processo de pirólise convencional. A ativação do carvão consiste em eliminar estes bloqueios pelo tratamento físico-químico. A capacidade de adsorção do carvão ativo é determinada pela estrutura porosa e pela composição química (Quirino, 1991).

O **carbono ativado** (denominação americana) **é uma forma não-grafítica de carbono, microcristalina**, que sofreu algum processamento para aumentar sua porosidade interna. As classes ou variedades comerciais de carvão ativado são projetadas para atuar como adsorventes em fase gasosa ou em fase líquida. Os **carbonos ativados** para uso em fases líquidas são geralmente pulverizados ou granulados. Os carbonos ativados para uso em fases gasosas ou como adsorventes de vapores são grânulos duros ou pelotas duras relativamente livres de pó. Os **carbonos ativados** são usados amplamente para remover impurezas de líquidos e gases e para separar e recuperar substâncias valiosas em correntes gasosas por adsorção (Softel, 1985).

O **carvão ativo** é um adsorvente universal, bastante difundido, com usos destacados no refino de açúcar, tratamento de água, envelhecimento de bebidas, recuperação de solventes, purificação de ar, tratamentos medicinais, produção de resinas sintéticas, purificação de resíduos industriais, além de aplicações analíticas de laboratório como análises cromatográficas, etc. (Quirino, 1991)

A área superficial é a propriedade física mais importante dos **carbonos ativados**. Para aplicações específicas, a área superficial depende do tamanho molecular do adsorbato e do diâmetro de poro do carbono ativado. Geralmente, os **carbonos ativados** para uso em fase líquida são caracterizados por possuir a maioria dos poros com diâmetro de 3 nm ou maiores, sendo que a maioria dos poros para os adsorventes em fases gasosas apresentam diâmetros de 3 nm ou menores. As propriedades químicas mais importantes do **carbono ativado** são: teor e composição das cinzas e pH do carbono (ou de uma suspensão do carbono em pó em água) (Softel, 1985; Medeiros, 2010).

1.14 - ATIVAÇÃO DE CARVÕES

Um processo de ativação do carvão vegetal consiste em aumentar o diâmetro dos poros iniciais e criar outros, porque a distribuição dos tamanhos dos poros é uma das propriedades mais importantes que influenciam o processo de adsorção.

Depois da execução do processo de carbonização da matéria-prima, a ativação é realizada por uma das duas rotas tecnológicas ou processos básicos seguintes, dependendo da sua origem e se é desejável uma baixa ou elevada densidade e, ainda, se deverá apresentar-se granulada ou pulverizada ou mesmo peletizada (adaptado de SOFTEL, 1985):

1ª – com reagentes de ativação química – é dependente da ação de compostos inorgânicos, naturalmente presentes ou adicionados à matéria-prima, para degradar ou desidratar as moléculas orgânicas durante a sua carbonização ou calcinação (ambos, sendo processos termoquímicos, isto é, de aquecimento e queima a temperaturas altas ou elevadas).

2ª – por ativação gasosa ou purga oxidante – depende da oxidação seletiva da matéria carbonácea com ar sob temperatura baixa, ou vapor d'água industrial, ou dióxido de carbono, ou gás de exaustão em alta temperatura. A purga por oxidação é geralmente precedida por uma carbonização primária da matéria-prima.

Vários autores consideram, erroneamente, que a ativação de um carvão natural ou vegetal pode ser física ou química. No entanto, os processos de ativação industrial encontrados na literatura são de natureza química ou físico-química, envolvendo etapas termoquímicas e de operações unitárias de extração por ação de gases ou vapores.

No caso da coqueificação ou carbonização de um resíduo vegetal, ocorre a decomposição térmica do material carbonáceo, na qual são eliminadas as espécies não carbônicas e produz-se uma massa de carbono fixo com uma estrutura porosa.

1.15 - CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 1

1ª - **Carvão ativado ou ativo** é a denominação usual brasileira adotada por seus produtores regionais, e que é denominada por especialistas estrangeiros como **carbono ativado**.

2ª - Alguns fabricantes brasileiros afirmam nas descrições técnicas de seus produtos que o carvão ativado é "**inerte**", porém, entende-se que são **estáveis** em condições de uso nas temperaturas e pressões atmosféricas.

3ª - Há quem afirme que o carvão ativado seja inflamável, mas não foi possível localizar ou definir, nas buscas efetuadas, a temperatura limite suportável para a não-incandescência e acima da qual ocorra oxidação invisível ou visível (combustão com chama).

4ª - A ativação de carvão mineral, vegetal ou animal consiste, geralmente, numa ação termoquímica, com a participação facultativa de algum agente químico.

5ª - **Coque** é ainda citado como o produto da pirólise ou gasificação de carvões minerais.

6ª - **Carvão vegetal** difere do coque de carvão mineral porque a pirólise de matérias-primas de origem vegetal pode ser processada em temperaturas inferiores e produz poros menores.

7ª - **Carvão ativado** pode ser de origem mineral, desde que o processo de coqueificação seja também ativador ou que o coque produzido numa coqueria seja posteriormente ativado.

1.16 – CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 1

1ª - O presente projeto visou conceber um **coqueificador de resíduos urbanos**, voltado inicialmente para processar as cascas de coco verde com o intuito de obter **carvão vegetal ativado e descortinar novas oportunidades de mercado de trabalho**.

2ª – No entanto, a revisão bibliográfica revelou as diferenças entre os **coques** oriundos de carvões minerais naturais ou de frações pesadas de petróleo e os **carvões ativados de origem vegetal e animal (de ossos)**.

3ª – Apesar das diferenças práticas e tecnológicas reveladas, existem autores brasileiros que adotam a expressão **coque vegetal** para os carvões produzidos pela destilação seca de matérias-primas vegetais.

4ª - Existe a possibilidade de conceber-se e desenvolver uma **retorta** ou **coqueificador** de pequeno ou médio porte para produzir carvão ativado a partir das cascas de coco da baía verde, para aproveitamento em empreendimentos industriais, cooperativados ou empresariais, que visem evitar o desperdício dos resíduos sólidos dos cocos consumidos nas grandes cidades brasileiras.

1.17- REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 1

ABCM – **Sobre o carvão** – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CARVÃO MINERAL – dados extraídos de <http://www.satc.edu.br/abcm/conteudo.asp?d1=38&d2=&d3=7> em 07 de abril de 2010.

ABEAS - **Combustão da biomassa e propagação dos incêndios** - in: **Curso de especialização por tutoria a distância: Módulo 2**. Brasília: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior, 2003.

ACTIVBRAS – **Carvão Ativado** – ActivBras Industrial Ltda., Guarapava, PR, em www.activbras.com.br; dados extraídos em 07 de abril de 2010.

Agência SEBRAE de Notícias – **O lixo que preserva a natureza** - Extraído do Jornal do Comércio, Janeiro 2005, em: <http://asn.interjornal.com.br/noticia.kmf?canal=36&cod=2730052&indice=70>

AGENCIA BRASIL.Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. **Aproveitamento agroindustrial da casca de coco verde ainda é reduzido**, 2002. Disponível em: < <http://www.radiobras.gov.br>

ALPHACARBO – **Carvão Ativado** – Alphacarbo Industrial Ltda, Guarapuava, PR, em www.alphacarbo.com.br; dados extraídos em 06 de abril de 2010.

AMARAL, F. L. M. - **Biodigestão Anaeróbia dos Resíduos Sólidos: Um Panorama Tecnológico Atual** - 2004.107f. Dissertação. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. São Paulo.

ARGENTIÈRE, - **Novíssimo Receituário Industrial**, 2ª Edição – Ícone Editora Ltda., São Paulo, SP, 1986.

AZEVEDO, F.R.S. - **A Siderurgia e o Termorreduzidor Renovável** – 1º Encontro Nacional de Siderurgia, Instituto Brasileiro de Siderurgia, Rio de Janeiro, 02-03 de junho de 2008.

BAHIA CARBON – **Carvão Ativado de Casca do Coco** – Bahiacarbon Agro Industrial Ltda., Valença, BA, em www.bahiacarbon.com.br; dados extraídos em 07 de abril de 2010.

BACABAL – **Carvão Ativado** – Empresa Industrial de Bacabal, Bacabal, MA, em http://www.eib-ma.com.br/quem_somos.html; dados extraídos em 08 de abril de 2010.

BANSAL, R.C.; DONNET, J.B. e STOECKLI, F. – **Active Carbon** – New York, Marcel Dekker, Inc., 482p. 1988

BARROSO, T - **Usina de beneficiamento de casca de coco verde será implantada** - <http://www.embrapa.br/imprensa/noticias/2004/julho/bn.2004-11-25.1644228224/?searchterm=coco%20verde%20como%20matéria%20prima%20para%20diversos%20produtos>

Barroso, T. –**Tecnologia para o aproveitamento da casca de coco verde é mostrada na amazontech 2004**, Extraído da Jornal informativo EMBRAPA- novembro de 2004, disponível em: <http://www.embrapa.br/imprensa/noticias/2004/agosto/bn.2004-11-25.2909531514/>

BEZZON, G., **Avaliação de possíveis impactos energéticos e ambientais derivados da introdução de novas tecnologias para obtenção eficiente de carvão vegetal e carvão ativado** Tese de Doutorado, 1998, Universidade Estadual de Campinas, SP.

BHAT, T.K.; SINGH, B.; SHARMA, O.P. – **Microbial degradation of tannins** – a current perspective. Biodegradation, Vetterbands, v.9, p. 343 – 357, 1998.

BONECHAR- **Carvão Ativado de Ossos Bovinos** - Bonechar - Carvão Ativado do Brasil Ltda.,Maringá, PR, em www.bonechar.com.br; dados extraídos em 07 de abril de 2010.

BORGES, F. M.; SILVA, F. P.; CARVALHO, M. C. e GUALBERTO FILHO, A. - **Desenvolvimento e criação de uma unidade produtiva de carvão ativado** - XII SIMPEP - Bauru, SP, 7 a 9 de novembro de 2005.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. **Anatomia da Madeira**. São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

CAPOBIANCO, G.- **Desenvolvimento de peneiras moleculares de carbono a partir de recursos de biomassa renováveis** - Tese de Doutorado, 2005, Universidade Estadual de Campinas, SP.

CARBOMAFRA S.A. – **Catálogo de produtos** – Curitiba, 1997.

CETESB - Ministério da Ciência e Tecnologia. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatório de Referência. **Emissões de Metano no Tratamento e na Disposição Final de Resíduos**. 2002.

CIRGELL – **Carvão Vegetal Oro Negro** - Cirkell Company S.A., dados extraídos de www.cirkell.com em 22 de abril de 2010.

COLOMBO, S.F.O.; PIMENTA, A.S.; HATAKEYAMA, K. – **Produção de Carvão Vegetal em Fornos Cilíndricos Verticais: Um Modelo Sustentável** – XIII SIMPEP, Bauru, SP, 6 a 8 de Novembro de 2006.

COCO, Portal São Francisco, Disponível em <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/coco/coco-1.php>, Acessado em 11 de abr. 2010.

COOPER, T – **An Introduction to Mining Chemistry** – Leonard Hill Books Limited, London, 1963.

CORREIOS GOURMAND - **Frutas-coco** – dados extraídos em 15 de abril de 2010 a partir de <http://correiogourmand.com.br/produtos_alimentos_frutas_frutos_coco.htm > acesso 15 Abr 2010.

DURRANT, P.J. – **General and Inorganic Chemistry** – Longmans, Green and Co., London, 1956
EHRBURGER, P.; PUSSET, N.; DZIEDZINIL, P. – **Active area of microporous carbons** – v.30 n.7, p. 1105-1109, 1992

EMBRAPA – **Tecnologia para o aproveitamento da casca de coco verde é mostrada na Amazontech 2004** – <http://www.embrapa.br/imprensa/noticias/2004/agosto/bn.2004-11-25.2909531514/>- acessado em 15 dez 2009

FERREIRA, J. M. - **O carvão vegetal no Brasil e suas perspectivas a curto, médio e longo prazo** -. Monografia (Conclusão do curso em Tecnologia Florestal) – Instituto de Tecnologia da Amazônia, Manaus, 1983.

FONTES, R.H, WANDERLEY, M. - **Situação Atual e Perspectivas para a Cultura do Coqueiro no Brasil** – Embrapa, Documento 94 – ISSN 1678-1953, Novembro 2006, disponível em http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2006/doc-94.pdf

GOMES, P.A. ; OLIVEIRA, J. B. - **Teoria da carbonização da madeira – Uso da madeira para fins energéticos**, p.10-27, Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC, 1982.

GUARAMEX – **Carvão ativado** – em www.guaramex.com.br – Guarapava, PR; dados extraídos em 07 de abril de 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICAS – IBGE. Banco de Dados Agregados. Brasília, DF: PAM – **Produção Agrícola dos Municípios**. Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?c=1613&z=p&o=20>

JANKOWSKA H., SWIATKOWSKIA and CHOMA, J. – **Active carbon** – 1991, Ellis Horwood Limited.

KINGLE (VON), H., BADER, E. – **Active carbons and their commercial application**, Khimiya, Leningrad, 1984.

KIRK, R.E. ENCYCLOPEDIA OF CHEMICAL TECHNOLOGY – **Activated carbon** – v.4, p.1015-1036, 1992.

KVECH, S. e TULL, E. – **Activated Carbon** – in: **Water Treatment Primer CE 4124: Environmental Information Management, Civil Engineering Dept., Virginia Tech**, divulgado em 24 de fevereiro de 1988, acessado de <http://www.cee.vt.edu/ewr/environmental/teach/wtprimer/carbon/sketcarb.html> em 01 de maio de 2010

- LENZ, G.R. e RAMOS, B.W. – **Combustíveis Fósseis Sólidos no Brasil: Carvão, Linhito, Turfa e Rochas Oleígenas** – in: Schobbenhaus, C. (Coordenador) – Principais Depósitos Minerais do Brasil, Volume I, Recursos Minerais Energéticos, Departamento Nacional da Produção Mineral e Companhia Vale do Rio Doce, Brasília, 1985.
- LIMA, L. M.Q. - **Lixo: Tratamento e Biorremediação** - Editora Hemus.3 ed. São Paulo, 1995.265p.
- LIMA, L. S. – **Comunicações pessoais** – Alphacarbo Industrial Ltda. em 08 e 09 de abril de 2010.
- LORA, E. E. S. - **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte** - Editora Interciência. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2002. cap 5, 63-94p.
- MEDEIROS, J. A. – **pH do carbono** – Comunicação pessoal em 08 de abril de 2010.
- MEIRA, A. M. - **Diagnóstico sócio-ambiental e tecnológico da produção de carvão vegetal no município de Pedra Bela, estado de São Paulo** - Tese de Doutorado – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP, Piracicaba - SP, 2002.
- MELLOR, J.W. – **Química Inorgânica Moderna** – Tradutor: Alcides Caldas, Editora Globo, Porto Alegre, 1952.
- MERCHANT, A.; PETRICH, M. – **Preparation and characterization of activated carbons from serap tires, almond shells and illinois coal** – Chemical Engineering communications, v.118, p.251-163, 1992
- MORAIS, E.N. – **Capítulo 14, Geologia da Grafita** – in: SCHOBHENHAUS, C.; QUEIROZ, E.T.; COELHO, C.E.S. (Coordenação Geral) – **Principais Depósitos Minerais do Brasil- Volume IV – Parte C – Rochas e Minerais Industriais** - Departamento Nacional da Produção Mineral, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Brasília, 1991.
- MOURA, J. I. L; LEITE, J. B. V.- **Extraído do jornal CEPLAC Notícias**, março 2001. Disponível em: <http://www.ceplac.gov.br/radar/coco.htm>
- NACIONAL DE GRAFITE - fotografias reproduzidas de www.grafite.com em 23 de abril de 2010.
- NETTO, F. F. - **Estágio atual das pesquisas sobre o carvão vegetal** - in: SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE CARVÃO VEGETAL. **Anais**. Belo Horizonte: CETEC, 1980. p. 1-23.
- NORDIC PUROSYSTEMS – **Filtros de Carvão Ativado** – in: **Tecnologia de Águas**, Nordic Purosystems, (atual Techron Purosystems) extraído de www.purosystems.com.br em 28 de outubro de 2004.
- OLIVEIRA, J. V. - **Análise econômica do carvão vegetal** - in: SEMINÁRIO SOBRE CARVÃO VEGETAL. Belo Horizonte, IBS/ABM/BDMG, 1977.
- ORGANIZAÇÃO DE ALIMENTO E DE AGRICULTURADAS NAÇÕES UNIDAS – FAO - **Produção de coco por países**, 2006. Disponível em: <http://www.fao.org/statistics>.
- QUIRINO, W. F. - **Características de briquetes de carvão vegetal a seu comportamento na combustão** – Dissertação - Escola Superior Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.80f.
- SAMPAIO, R.; PINHEIRO, P. C. C.; REZENDE, M.E. -**Carvoejamento - aumentando a produtividade dos fornos: possibilidades a curto e longo prazos** - Palestra feita por *Paulo Cesar da Costa Pinheiro*. no Workshop "Madeira Energética" no BNDES. Rio de Janeiro, 29 de maio de 2007.
- SANTIAGO, B.H.S.; FRANÇA, G.H.C.; FERNANDES, R.; SELVAM; P.V. – **Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica Preliminar para Produção de Carvão Ativado a partir dos Resíduos do Coco: estudo comparativo de cenários de produção** – Revista Analytica (17) p. 52-55 – junho/julho 2005
- SHREVE, R.N. e BRINK Jr., J.A. - **Indústrias de Processos Químicos** - 4ª Edição, p. 106, Tradução de Horácio Macedo, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.

SILVEIRA, M. S., **Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquetes em Salvador-BA** Tese de Mestrado, 2008, Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica.

SOFTTEL, R.W. – **Activated Carbon** – in: Kirk-Othmer Concise Encyclopedia of Chemical Technology - A Wiley-Interscience Publication - p.204-205, John Wiley & Sons, NY, 1985.

STAHL, N.S.P. - **Influência do uso de carvão ativado em pó no pré-tratamento de águas de abastecimento** - Dissertação de Mestrado, 1996, Universidade Estadual de Campinas, SP.

TOUREN, R. – **Metalóides da Quarta Família** – Tradução e adaptação de Durval Curty, in: KOOGAN, A. (Editor) – Enciclopédia Delta Laoursse, Tomo XI – Editora Delta S.A., Rio de Janeiro, 1963.

VALE, A T.; COSTA, A. F. ; GONÇALEZ, J. C.; NOGUEIRA, M. - **Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do cerrado - Revista Árvore**. Viçosa, v.25, (89): 89-95 (2001).

VEJA LAROUSSE – **Coqueiro** - Dicionário Enciclopédico Ilustrado Veja Larousse, Volume 7 - p. 727, Editora Abril, São Paulo, 2006.

WCI- Coal – **Coal** - www.wci-coal.com, conceito extraído em 30 de novembro de 2004

ZAKON, A – **Aspectos positivos da termodestruição de descartes, detritos, despejos e emissões via incineração, co-processamento e ceramização**, 1º Simpósio Brasileiro de Incineração, UPAN, Porto Alegre (2005).

CAPÍTULO 2

COQUEIFICAÇÃO E GASIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

- 2.1 - Matérias-primas, equipamentos e processos para obter carvões ativados**
- 2.2 –Termodecomposição e termodestruição de materiais carbonosos**
- 2.3 - Carbonização, coqueificação, pirólise e destilação seca e seus produtos**
- 2.4 - Classificação dos processos de carbonização**
- 2.5 - Condições operacionais para coqueificação de carvão mineral**
- 2.6 - Materiais de construção das retortas de carvão para coque**
- 2.7 - Rotas tecnológicas para coqueificar frações de petróleo**
- 2.8 - Coqueificação retardada**
- 2.9 - Características das frações pesadas de petróleo para coqueificar**
- 2.10- Reações químicas na coqueificação das frações de óleo pesado**
- 2.11 - Condições operacionais da coqueificação das frações de óleo pesado**
- 2.12 - Subprodutos da coqueificação de frações de óleo pesado**
- 2.13 - Variedades de coque obtidas da coqueificação de frações de óleo pesado**
 - 2.13.1 - Coque para anodos ou Coque Esponja**
 - 2.13.2 - Coque verde**
 - 2.13.3 - Coque Agulha**
 - 2.13.4 - Coque Granulado**
 - 2.13.5 - Coque Combustível**
- 2.14 – Gasificação e gasificadores**
 - 2.14.1 - Gasificador de Leito fixo**
 - 2.14.2 – Gasificador de leito fluidizado**
 - 2.14.3 – Gasificador de leito arrastado**
 - 2.14.4 – Outros sistemas gasificadores**
- 2.15 - Constatações do Capítulo 2**
- 2.16 - Conclusões do Capítulo 2**
- 2.17 - Referências do Capítulo 2**

CAPÍTULO 2

COQUEIFICAÇÃO E GASIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

2.1 – MATÉRIAS-PRIMAS, EQUIPAMENTOS E PROCESSOS PARA OBTER CARVÕES ATIVADOS

Uma tecnologia química incorpora a definição das matérias-primas, tipos e modos operacionais dos equipamentos de beneficiamento físico, de reações ou conversões químicas, purificação dos produtos, conformação e envasamento que satisfaçam as especificações demandadas pelos consumidores industriais, comerciais, individuais ou dos poderes públicos.

Quando matérias-primas diferentes, que guardam alguma semelhança física ou química, destinam-se a sofrer etapas de transformação física e química, é possível empregar um (ou vários) equipamento(s) das rotas tecnológicas conhecidas como ponto de partida para o desenvolvimento de um novo processo químico industrial e produtos desejáveis.

Os processos termoquímicos mais conhecidos para converter matéria carbonosa natural em sólidos carboníferos porosos e ativos são os das coquearias de carvão mineral e da coqueificação de frações pesadas resultantes do refino de petróleo. A abordagem descritiva desses processos consagrados é indispensável para fundamentar a concepção operacional e construtiva *de um coqueificador de resíduos urbanos*, em especial, as cascas de coco verde, tendo em vista a operação de unidades de pequeno porte de modo semi-automatizado.

2.2 – TERMODECOMPOSIÇÃO E TERMODESTRUÇÃO DE MATERIAIS CARBONOSOS

A obtenção de carvões ativados é precedida por algum processo natural ou industrial de carbonização de materiais carbonosos, de origem mineral, vegetal ou animal. As rotas tecnológicas para obter carvões ativados envolvem, pelo menos, uma etapa de termod decomposição, cujas diferenças conceituais básicas são apresentadas na Figura 2.1 seguinte.

Os processos termoquímicos industriais mais conhecidos para obter carvões ativados ou coques incluem a carbonização ou coqueificação de matérias-primas minerais, que são os carvões minerais, petróleo, madeiras, biomassas e os ossos animais.

Para fundamentar a concepção e o projeto de um coqueificador para resíduos urbanos é imprescindível conhecer as bases científicas e as tecnologias aplicadas a carvão mineral e petróleo, através dos seguintes conceitos e definições:

1º - Carvão é a substância combustível, sólida, negra, resultante da decomposição térmica ou combustão incompleta de materiais orgânicos. Quando extraído da crosta terrestre costuma ser denominado de *carvão mineral, carvão-de-pedra, hulha*, sem que as pessoas conheçam as variedades encontradas no solo ou a definição mais precisa (adaptado de Ferreira, 1999 e Mellor, 1952).

2º - Carvão animal é o que se obtém pela queima de substâncias animais, especialmente ossos, dos quais pode ser extraída matéria orgânica (graxas, gorduras, óleos, piridina, colas, gelatinas), além da inorgânica (sais de amônio). **Carvão vegetal** é o que se obtém pela carbonização de madeiras e cascas de cocos (adaptado de Ferreira, 1999 e Mellor, 1952).

3º - Alcatrão é a mistura de diversos componentes, na forma líquida, negra, viscosa, obtida na destilação de várias substâncias orgânicas, como, por exemplo, petróleo, madeira ou carvão. **Piche** é a substância negra, resinosa, muito pegajosa, obtida da destilação do alcatrão ou da terebintina; é o mesmo que pez. Assim, **pez** é a designação comum a substâncias betuminosas, sólidas ou semi-sólidas, naturais ou artificiais, resíduo da destilação de líquidos densos, de alcatrões, etc. (Ferreira, 1999).

4º - Asfalto é a designação comum aos pirobetumes asfálticos, naturais ou artificiais, mais duros e de pontos de fusão mais altos, usados para pavimentação de estradas e impermeabilização (Ferreira, 1999).

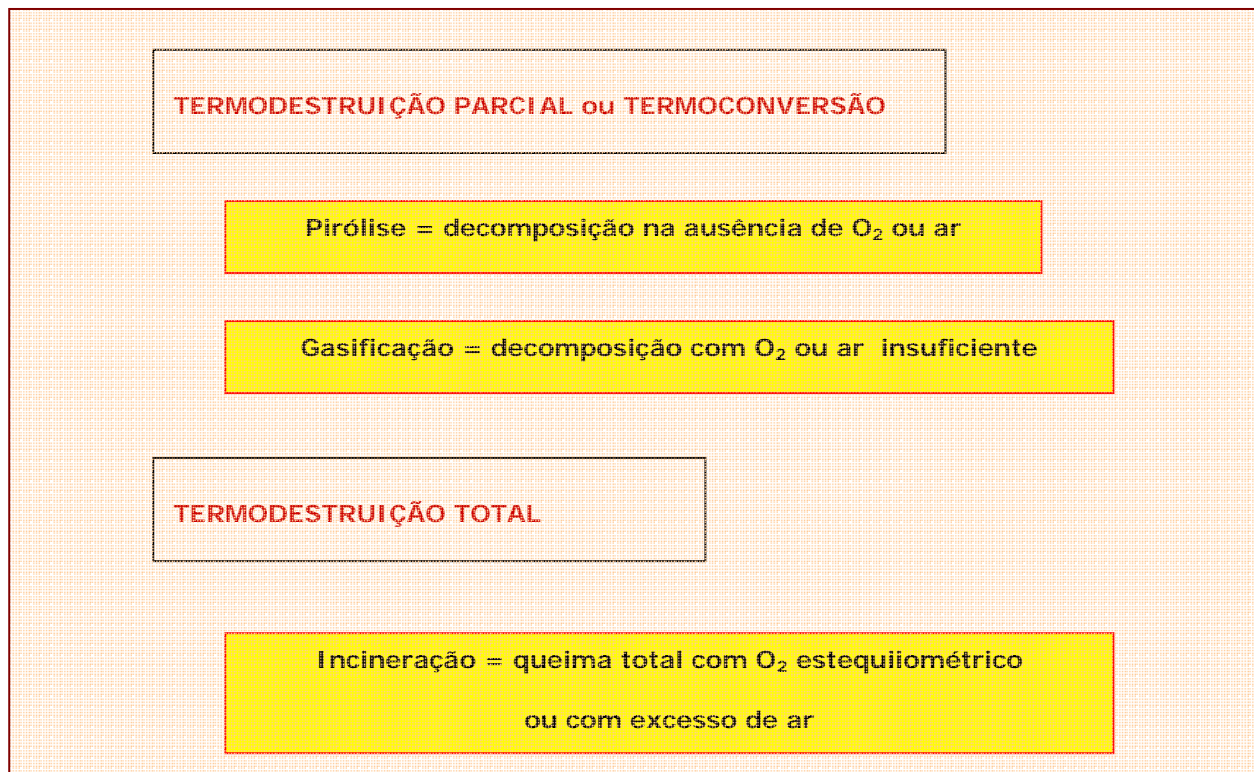


Figura 2.1 – Processos termodestruidores de substâncias carbonosas (Zakon, 2005)

Por outro lado, **carvoejamento, carbonização, pirólise e termólise (craqueamento térmico)** referem-se a processos de conversão termoquímica sem a presença de oxigênio. Existem várias tecnologias associadas a esses processos de degradação térmica, cada um com características operacionais, rendimentos e produtos diferenciados (Rocha, 2008).

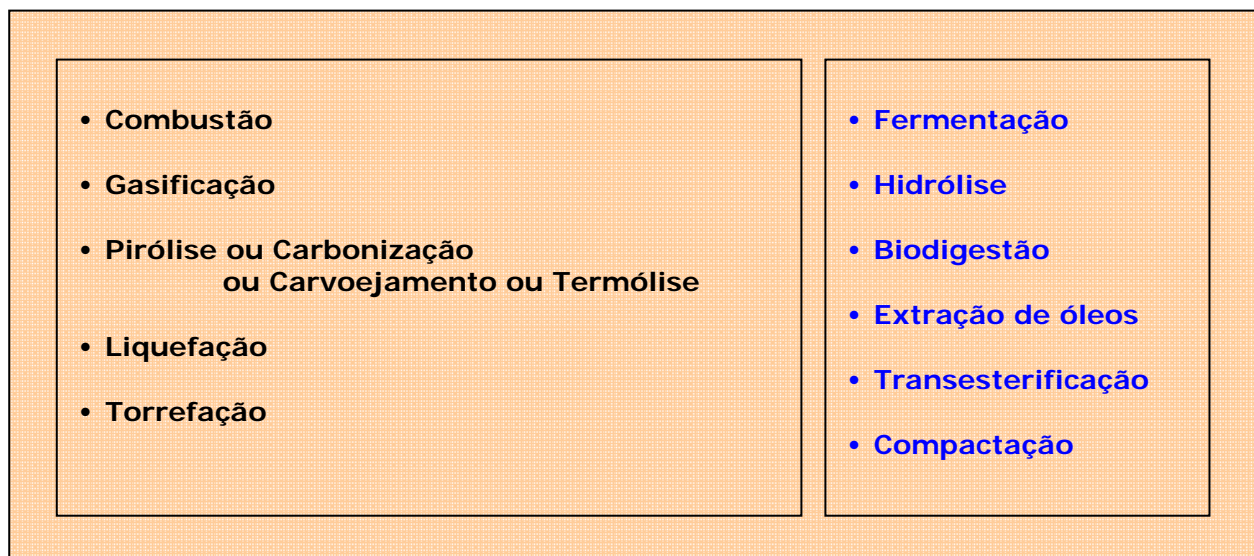


Figura 2.2 - Processos de conversão de biomassa (Rocha, 2008)

2.3 - CARBONIZAÇÃO, COQUEIFICAÇÃO, PIRÓLISE E DESTILAÇÃO SECA DE CARVÃO MINERAL

A **carbonização do carvão mineral**, por aquecimento, para produzir coque, gás de coqueria e outros produtos carboquímicos é denominada de **coqueificação**. Para a carbonização de outros materiais (sólidos) como a turfa e a madeira, é habitual denominar esse processo termoquímico como uma **destilação seca** ou **pirólise**. Os produtos carboquímicos da termodestruição de materiais carbonosos naturais extraídos da crosta terrestre (como o carvão) e biomassas (como a turfa) podem incluir, também, alcatrão, piche (asfalto), amônia e produtos benzênicos (adaptado de Keeling e Jung, 1949).

A **pirólise** é o processo de decomposição termoquímica do material por aquecimento com níveis de temperatura controlados em ambiente fechado, em ausência de agente oxidante (ar ou oxigênio). Gases, vapores d'água, líquidos orgânicos, alcatrão e carvão são os produtos resultantes do processo. A reação de pirólise visa à degradação térmica de substâncias orgânicas de cadeia carbônica longa, para formação de compostos de cadeia curta e de baixo peso molecular.

A **pirólise** ou **destilação seca** promove uma degradação térmica da biomassa, separando-a em vários componentes. Esses componentes e suas quantidades dependem basicamente de quatro fatores: taxa de aquecimento, temperatura final, tempo de residência à temperatura final e das dimensões da biomassa pirolisada, que sendo modificados, possibilitam obter produtos diferentes (Molle, 1987).



Figura 2.3 – Produtos da carbonização
(Sampaio, Pinheiro e Rezende, 2007)

Os **principais produtos da pirólise do carvão mineral** incluem (Natali, 2001 – citado por Santos, Shilling, Carvalho, Polido, 2006):

- 1ª - **gases** - compostos por hidrogênio, metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono e vários outros gases dependendo do tipo de material que foi pirolisado, como, p. ex., óxidos de enxofre;
- 2ª - **fração combustível líquida** - composta por hidrocarbonetos, alcoóis e ácidos orgânicos de elevada densidade e baixo teor de enxofre;
- 3ª - **resíduo sólido** – composto de cinzas, escórias e fuligem (carvão sintético ou carbono quase puro).

Uma das grandes dificuldades da pirólise, tanto na escala de laboratório quanto na escala piloto, consiste na variação dos produtos gerados, que resultam de variações das condições de operação, como aumento da temperatura, fluxo de gás, tempo de residência, materiais alimentados e outros parâmetros.

A pirólise de biomassa é uma importante fonte renovável de energia, combustíveis e materiais. Os gases resultantes da pirólise de biomassa têm alto poder calorífico e podem ser aproveitados de diversas formas. O Brasil como grande produtor de biomassa, seja lenha de eucalipto reflorestada, bagaço de cana, casca de café, galhos de árvores, óleos vegetais extrativos e demais espécies plantadas como dendê, soja, mamona, amendoim, etc., além do lixo urbano e esterco de animais, apresenta-se como um potencial absorvedor da tecnologia da pirólise de biomassa (Bezzon, 1998).

2.4 - CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE COQUEIFICAÇÃO DE CARVÃO MINERAL

Até os primeiros anos do Século XX, os processos de carbonização do carvão eram divididos em duas classificações genéricas (adaptado de Keeling e Jung, 1949):

- 1^a - Sem recuperação de subprodutos;
- 2^a - Com recuperação de subprodutos.

Durante a Segunda Guerra Mundial, os processos de carbonização do carvão foram divididos de acordo com a temperatura de operação em três categorias (adaptado de Keeling e Jung, 1949):

1^a - Coqueificação em temperaturas elevadas: o coque atingia valores entre 1500°F e 2000°F para uma temperatura média operacional de quase 1900 °F quando a carbonização estava completa.

2^a - Coqueificação em temperaturas baixas: a temperatura final do coque era inferior a 1000 °F.

3^a - Coqueificação em temperaturas medianas: a temperatura final do coque atingia 1200 a 1300°F.

Não obstante a classificação anterior, Shreve e Brink, Jr. (1980) oferecem uma visão simplificada do cenário dos processos de pirólise, exposta na Figura 2.4.

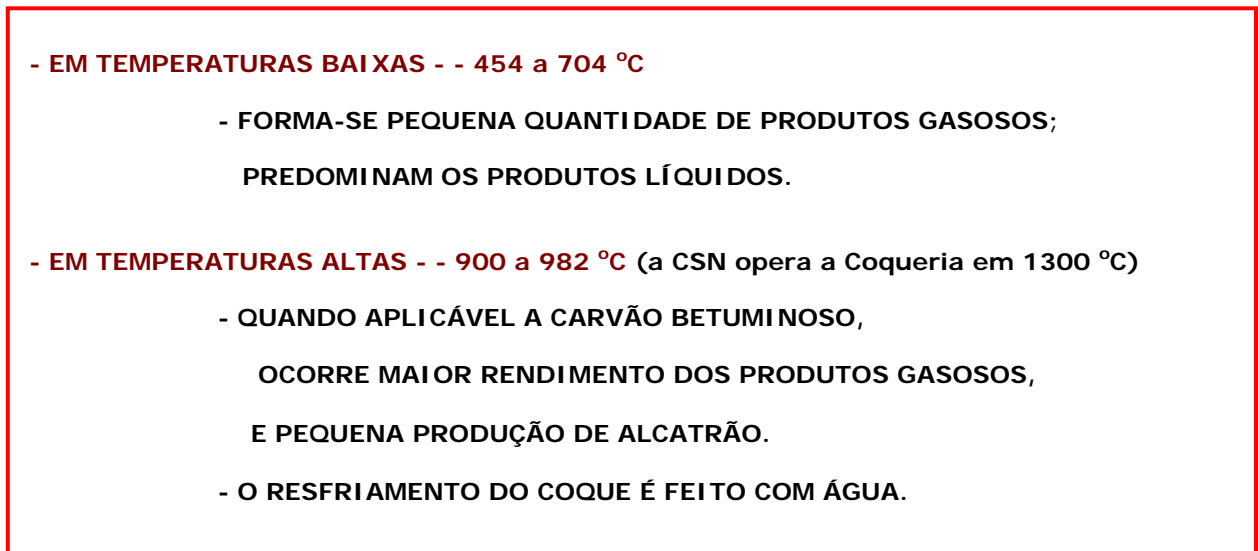


Figura 2.4 - Processos industriais de pirólise ou carbonização ou coqueificação (adaptado de Shreve e Brink, Jr., 1980)

2.5 – CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA COQUEIFICAÇÃO DE CARVÃO MINERAL

Em geral, o tipo de construção, montagem e a seleção dos materiais para a retorta ou forno de pirólise têm sido definidos pelos intervalos de temperatura operacional e o método de aquecimento do equipamento.

Para **coqueificar em temperaturas elevadas**, as temperaturas devem ser superiores a 2000 °F e os únicos materiais capazes de suportar tais níveis térmicos por períodos longos ou campanhas operacionais prolongadas são os refratários cerâmicos, cuja diversidade é grande. Além disso, os refratários deverão estar sujeitos a flutuações contínuas de centenas de graus térmicos, o que vai exigir uma boa resistência ao desgaste ou descamação. Por outro lado, o calor deverá ser transferido através da parede refratária que deverá possuir uma boa condutividade. Por essas e outras razões, a maioria dos equipamentos de coqueificação do carvão deve ser revestido internamente com tijolos de sílica, contendo 92% ou mais de SiO₂ (adaptado de Keeling e Jung, 1949).

Para **coqueificar em temperaturas baixas**, o equipamento utilizado difere radicalmente dos usados com as temperaturas elevadas. Sendo o carvão um mau condutor de calor (e eletricidade), é impraticável coqueificar camadas grossas em fornos aquecidos externamente, pois as temperaturas operacionais são baixas e é impossível transferir energia térmica com rapidez pelas paredes refratárias. Essas limitações impedem obter e garantir a estabilidade de velocidades de carbonização satisfatórias (adaptado de Keeling e Jung, 1949).

Onde a produção de gás combustível não é importante e quando um carvão não coqueificável deverá ser convertido em coque, deve-se britá-lo em pedaços pequenos para ser carregado no topo de um alto-forno (retorta vertical). Concomitantemente, um gás quente, tal como o vapor superaquecido ou fumos (gases de combustão) entre 800 °F a 1000 °F, é forçado pela base e fundo do equipamento, para escoar em contracorrente ao carvão descendente e ser retirado através de um condensador de topo, no qual as frações extraídas de alcatrão serão condensadas. Controlando-se a temperatura de operação e as vazões dos gases quentes transportadores, qualquer grau de carbonização ou coqueificação pode ser obtido (adaptado de Keeling e Jung, 1949).

Os **processos de coqueificação em temperaturas baixas com aquecimento externo** à retorta aquecem camadas finas de carvão em vasos metálicos ou, também, carvão britado sobre superfícies metálicas com agitação constante, tais como num alto-forno (vertical), ou por rolagem dentro de um forno rotatório (horizontal) (adaptado de Keeling e Jung, 1949).

Para **coqueificação em temperaturas medianas**, os equipamentos mais modernos (dos anos 40 do Século XX) usavam o mesmo tipo de construção que os das temperaturas elevadas, exceto que as câmaras de carbonização eram "narrower" (com largura média entre 10 a 12 polegadas), com temperaturas de combustão inferiores oriundas dos fumos. E os equipamentos de recuperação dos subprodutos eram menos elaborados, porque seu número era menor.

2.6 - MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO DAS RETORTAS DE CARVÃO PARA COQUE

As **retortas ou fornos de coqueificação, ou coqueificadores para temperaturas elevadas e medianas** são construídos com centenas de milhares de tijolos refratários individualizados para atender a diversas formas, os quais se expandem durante o aquecimento e se contraem durante o resfriamento, o que recomenda sua operação contínua. O resfriamento dos tijolos refratários operados em temperaturas elevadas favorece a formação de fissuras e rachaduras que poderão favorecer a saída das substâncias voláteis (líquidos e gases) liberadas com o posterior aquecimento progressivo, se a operação for descontínua. A operação contínua de uma bateria de fornos favorece a sua durabilidade por muito tempo, como 30 anos, sem a necessidade de manutenção.

As **retortas ou fornos para coqueificação, ou coqueificadores sob temperaturas baixas**, especificamente metálicos, podem ser aquecidos e resfriados repetidamente sem distorções sérias, porém, sua vida útil é relativamente curta (adaptado de Keeling e Jung, 1949).

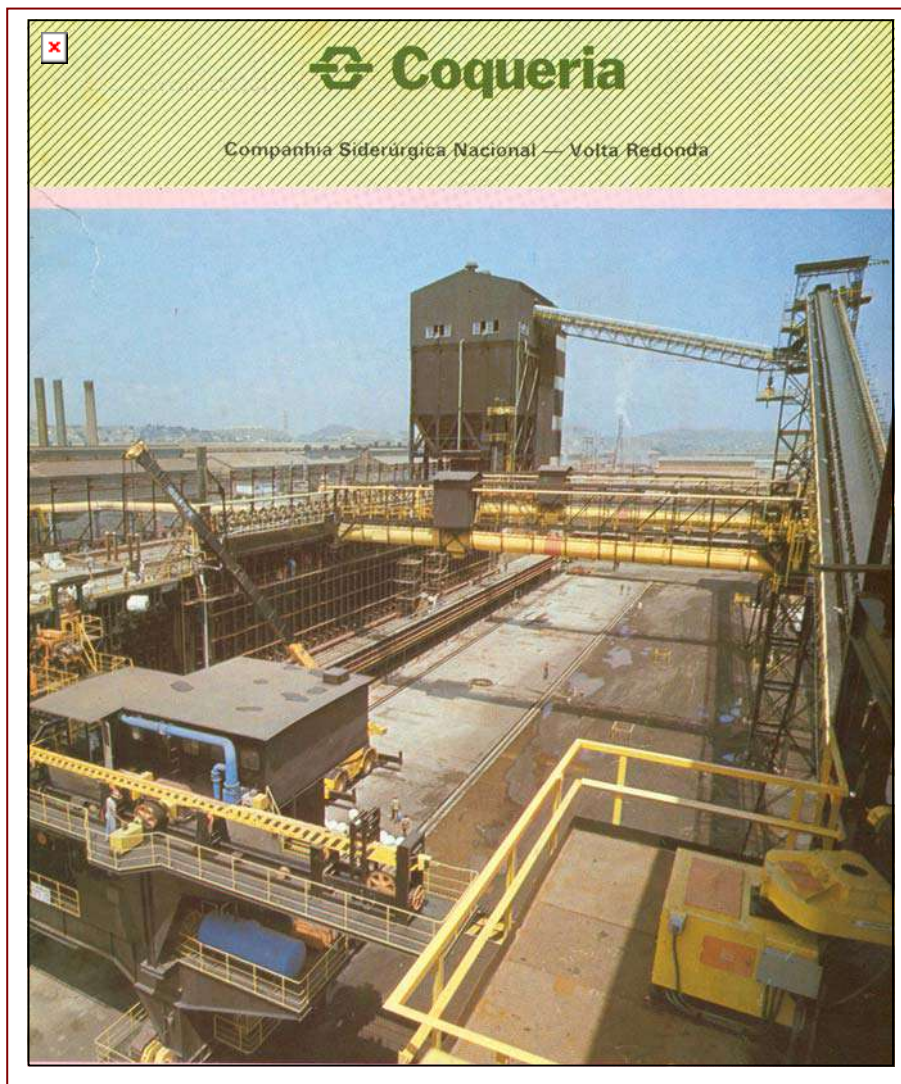


Figura 2.5
Coqueria da CSN:

à direita:
correias transportadoras
que levam o carvão
para o silo principal;

à esquerda,
bateria de fornos verticais
e a
máquina desenformadora;

no centro,
dutos de transporte
dos voláteis para a
unidade de carboquímica

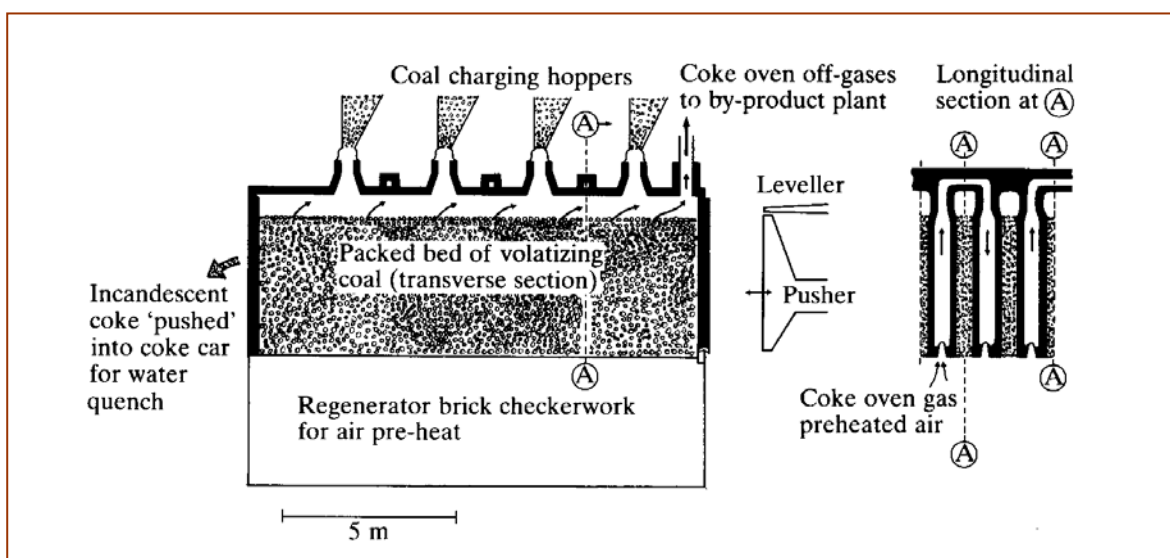


Figura 2.6 – Diagramas esquemáticos do perfil de uma retorta vertical típica (*slot*) de uma coqueria para produção de coque grau metalúrgico e da seção longitudinal da bateria de unidades coqueificadoras mostrando a passagem dos gases aquecedores nas paredes ocas entre as retortas adjacentes (Guthrie, 1989).

2.7 - ROTAS TECNOLÓGICAS PARA COQUEIFICAR FRAÇÕES DE PETRÓLEO

A conversão termoquímica de frações de óleo pesado tem sido desenvolvida através de duas diferentes rotas tecnológicas (Swindell, 2001):

1ª - coqueificação retardada: consiste na decomposição térmica de hidrocarbonetos num tambor vazio onde o coque produzido nas reações se deposita. Ao mesmo tempo, os hidrocarbonetos leves saem do tambor e são enviados para uma unidade de tratamento. O processo era considerado em 2001 uma arte em aberto, sendo que várias empresas como a Foster Wheeler, Conoco e a Lumus possuíam os conhecimentos para construir e operar esse tipo de tecnologia.

2ª - coqueificação em leito fluidizado: neste caso, a decomposição ocorre sobre partículas de coque, parte das quais é removida continuamente. Sua versão mais recente em 2001 era denominada de *Flexicoking* pela Exxon Research and Engineering.

2.8 - COQUEIFICAÇÃO RETARDADA

O processo da coqueificação retardada é uma tecnologia altamente flexível de decomposição termoquímica mais empregada nas indústrias de refino de petróleo, que pode ser adaptada para vários tipos de frações pesadas de modo a produzir coques dos mais variados tipos para atender às demandas de mercado. É mais difundida nos E.U.A., com o objetivo principal de converter resíduos pesados em produtos leves (baixo peso molecular), sendo o coque empregado como combustível. Na Europa e nos países membros do CIS, o objetivo principal consiste em produzir um coque específico para a produção de anodos para a indústria de alumínio (Swindell, 2001).

As retortas de coqueificação retardada são alimentadas com os seguintes resíduos pesados:

- *resíduo de vácuo;*
- *óleo decantado ou lama do craqueamento catalítico;*
- *resíduo do "visbreaker" ou alcatrão do craqueamento térmico;*
- *asfalto ou extratos de óleo lubrificante ("lube oil extracts").*

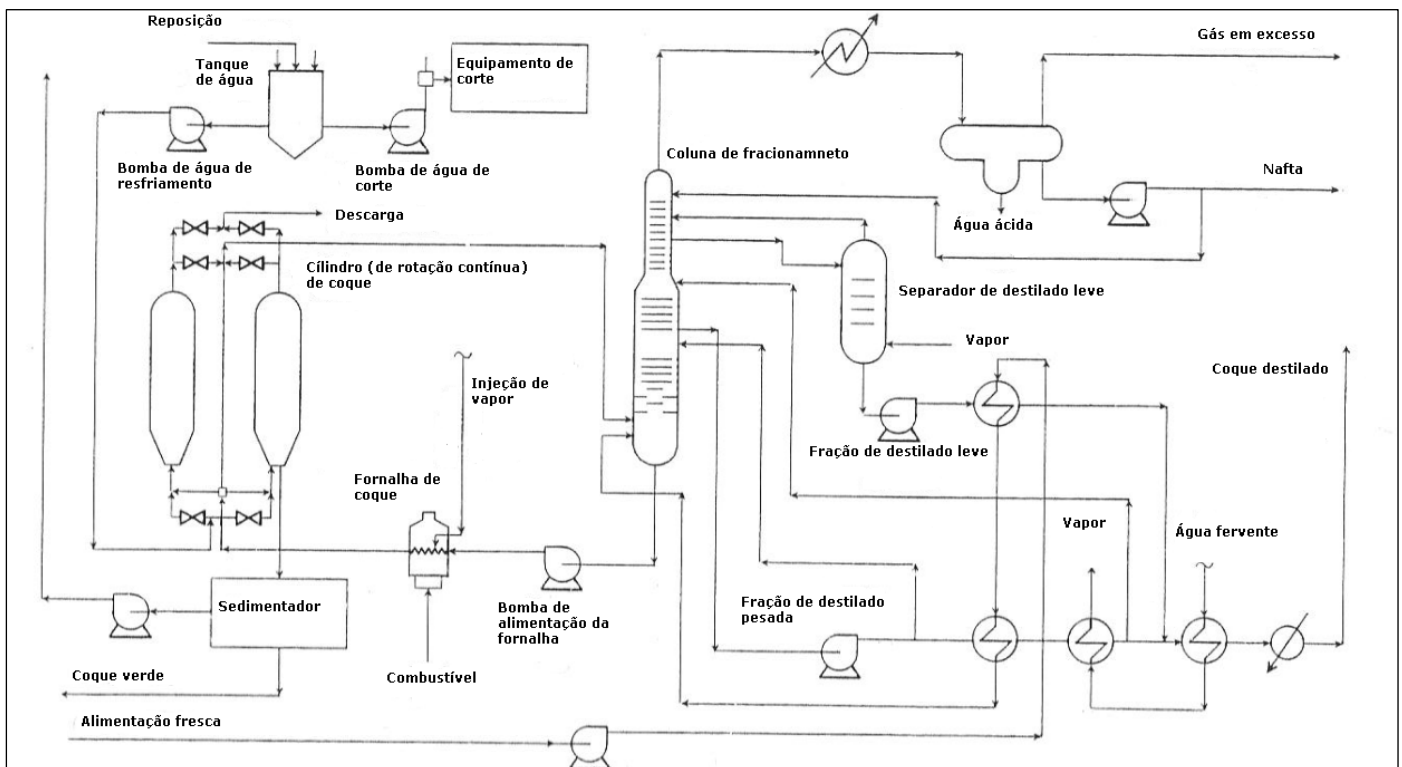


Figura 2.7 – Fluxograma simplificado de uma unidade de coqueificação retardada (Swindell, 2001)

2.9 - CARACTERÍSTICAS DAS FRAÇÕES PESADAS DE PETRÓLEO PARA COQUEIFICAR

Os rendimentos e a qualidade dos produtos da coqueificação de frações de óleo pesado dependem de quatro características: o resíduo de carbono, o teor de enxofre, o teor de metais e o ponto de corte do ponto de ebulição verdadeiro (TBP, *true boiling point*) (Swindell, 2001).

- **Resíduo de Carbono:** é medido por dois métodos: 1º de Conradson e 2º de Ramsbottom. O método de Conradson é mais usado de modo que as referências serão relacionadas a esse valor, isto é, o CCR (*Conrad Carbon Residue*). Quanto maior o CCR, maior será o rendimento de coque nas condições operacionais consideradas. Considerando-se que o objetivo costumeiro é o de maximizar os produtos destilados, isto é, minimizar a produção de coque, entende-se que quanto maior o valor de CCR, mais difícil será alcançar tal objetivo. No passado, os valores habituais de CCR eram menores que 10% p/p para resíduos atmosféricos usados como alimentação do processo. Atualmente (em 2001), com o uso de resíduos mais pesados freqüentemente oriundos de óleos crus mais pesados, os valores de CCR atingem valores de 20% ou 30% p/p.

- **Teor de Enxofre:** tende a tornar-se concentrado no coque e no destilado pesado. Do mesmo modo que para o CCR, as variações no tipo e origens da alimentação tem resultado no aumento do seu teor de enxofre. Conseqüentemente, o teor de enxofre no coque tende a aumentar.

- **Teor de Metais:** alguns elementos metálicos, principalmente níquel e vanádio, também tendem a serem maiores nas alimentações do coqueificador e serem arrastados para então permanecer exclusivamente no coque. É freqüente a presença de um teor maior que 1000 ppm (partes por milhão) p/p nas alimentações das unidades de coqueificação.

- **Ponto de corte do ponto de ebulição verdadeiro TBP:** para um resíduo de vácuo típico o ponto de corte TBP é de aproximadamente 550°C, o qual pode variar dependendo da origem do óleo cru e da operação da unidade de destilação a vácuo na refinaria de petróleo. O ponto de corte TBP está relacionado ao CCR e aos teores de enxofre e metais e influencia os rendimentos dos produtos da coqueificação e sua qualidade.

2.10- REAÇÕES QUÍMICAS NA COQUEIFICAÇÃO DAS FRAÇÕES DE ÓLEO PESADO

O mecanismo exato das reações de coqueificação é relativamente complexo e torna difícil obter uma descrição precisa das mesmas e das variações que ocorrem num reator. Dois mecanismos principais de reações podem ser identificados, que coexistem na maioria das alimentações processadas associados com três estágios separados e sucessivos (Swindell, 2001):

1º mecanismo: envolve reações químicas de alquilação e precipitação de asfaltenos de alto peso molecular e resinas.

2º mecanismo: consiste de reações de condensação de poliaromáticos.

Os três estágios identificáveis da coqueificação de óleo pesado são:

1º - vaporização parcial e craqueamento preliminar - enquanto a temperatura aumenta através do forno até atingir a temperatura operacional de reação;

2º - craqueamento da fase vapor à medida que passa através do tambor de coque;

3º - craqueamento sucessivo e polimerização da fase líquida retida no reator até que seja convertido para coque.

Essas reações químicas são todas endotérmicas e promovem uma redução de temperatura da ordem de 50°C no reator (tambor de coque) (Swindell, 2001).

2.11 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA COQUEIFICAÇÃO DAS FRAÇÕES DE ÓLEO PESADO

As variáveis operacionais que determinam os rendimentos dos produtos e sua qualidade são: temperatura, pressão e razão de reciclo das frações pesadas no efluente do reator, descritas abaixo (Swindell, 2001).

- **Temperatura de coqueificação** - (temperatura na saída do forno, 485°C a 505°C) - gera um impacto direto no teor de matéria volátil combustível (*volatile combustible mater*, VCM) do coque produzido. Nas temperaturas superiores, uma proporção maior da alimentação é vaporizada na entrada do reator, provocando menor formação de coque. Pode-se considerar que o rendimento de coque diminui à medida que a temperatura aumenta se a pressão e a razão de reciclo forem mantidas constantes. Entretanto, em temperaturas bem elevadas, o coque produzido será muito duro e difícil de remover por sistemas de corte hidráulicos. Nas temperaturas baixas, produz-se um coque macio com um elevado teor de matéria volátil (CM) (Swindell, 2001).
- **Pressão** - sob temperatura e razão de reciclo constantes, um aumento na pressão resulta em manter os hidrocarbonetos na fase líquida no tambor de coque, ao passo que aumento os rendimentos de coque e gás. Quando o principal objetivo da unidade de coqueificação é o de aumentar a capacidade de conversão da refinaria, o rendimento de coque deve ser mantido num patamar mínimo e o rendimento da destilação deve ser maximizado. Nesse caso, demanda-se a menor pressão de operação possível.
- **Razão de reciclo** - essa variável adimensional exerce o mesmo efeito que a pressão sobre a distribuição de produto: quanto maior a razão de reciclo, maiores são os rendimentos de coque e gás, porque promove o controle do ponto final do destilado pesado. Quanto maior a razão de reciclo, maior quantidade de produto pesado é reciclada para o coqueificador.

Quando o intuito é o de promover a maximização do rendimento de produto líquido, deve-se reduzir a razão de reciclo, do mesmo modo que ocorre para a pressão. Esse é o tipo de operação mais comum, numa extensão tal que existem unidades operando numa razão de reciclo da ordem de 5% enquanto que outras nem adotam tal procedimento. Entretanto, a qualidade do destilado pesado é inversamente proporcional ao rendimento.

2.12 - SUBPRODUTOS DA COQUEIFICAÇÃO DE FRAÇÕES DE ÓLEO PESADO

- **Gás de Coqueria:** inclui gás combustível usado na unidade de coqueificação ou enviado para trabalhos da rede de aquecimento da refinaria após desulfurização com lavagem com aminas. Outra fração feita de C3-C4 pode ser usada, após desulfurização (por lavagem com aminas e eliminação de mercaptanas - processo *Merox*), como alimentação para uma unidade de alquilação ou polimerização devido a sua natureza altamente olefínica (Swindell, 2001).

- **Nafta:** após a eliminação química de mercaptanas ou pelo hidrotreatamento, a nafta leve é enviada para o circuito da gasolina. Após o hidrotreatamento, a nafta pesada torna-se uma alimentação da reforma catalítica ou é redirecionada para o reservatório da gasolina para que se possa usufruir a vantagem do seu elevado teor de olefinas (Swindell, 2001).

- **Destilados:** O destilado leve ou gasóleo da coqueria (*light coker gas oil*) requer hidrotreatamento para estabilizar sua cor antes de ser enviado para o reservatório de gasóleo para refino. O destilado pesado (*heavy coker gas oil*) é frequentemente usado como alimentação para a unidade FCC (craqueamento catalítico em leito fluidizado), e é misturada com o destilado à vácuo *straight-run*. Também pode ser remetida como alimentação da unidade de hidrocraqueamento para aumentar a produção de gasolina, querosene e gasóleo a partir do óleo cru (Swindell, 2001).

2.13 - VARIEDADES DE COQUE OBTIDAS DA COQUEIFICAÇÃO DE FRAÇÕES DE ÓLEO PESADO

2.13.1 - Coque para anodos (*Coke for Anodes*)

Também é denominado de **coque esponja** devido à sua aparência esponjosa. Entretanto, nem todos os coques desse tipo são necessariamente do grau anodo. Para atender às especificações que governam o coque para anodos, o teor de metais deve ser baixo (menor que 200 a 500 ppm em peso) e o mesmo é válido para o teor de enxofre (geralmente menor que 2 a 2,5% em peso). Essas duas características estão diretamente relacionadas com a qualidade da alimentação, de modo que os crus originais apresentem baixos teores de metais e enxofre. Entretanto, esse tipo alimentação é frequentemente parafínico e tende a produzir coque de baixa densidade (Swindell, 2001).

O coque do grau anodo deve ser calcinado antes de seu uso. Isso frequentemente ocorre na refinaria. A característica mais importante desse tipo de coque é sua densidade após a calcinação, medida pela densidade aparente após vibração (VBD, *vibrated bulk density*).

2.13.2 - Coque verde (isto é, antes da calcinação) é caracterizado pela seu teor de matéria volátil combustível e sua dureza. Essas duas propriedades têm influência direta sobre a densidade aparente após vibração (VBD) do coque calcinado. A dureza do coque é normalmente expressa pelo Índice de Moabilidade Hardgrove (HGI, *Hardgrove grindability index*). As características típicas de um coque para anodos são dados na tabela seguinte (Swindell, 2001).

Tabela 2.1 - Especificações típicas para coque de grau para anodo.
(Swindell, 2001)

Parâmetro Analítico	Coque Verde	Coque Calcinado
VCM (% em peso seco)	8 a 10	0,3
Enxofre (% em peso)	< 2,5	< 2,5
Cinzas (% em peso)	< 0,2	< 0,2
Ni + V (ppm)	< 200	< 200
HGI	80	
VBD	-	> 780
Densidade real (g/cm ³)	-	> 2,06

A escolha da alimentação para uma unidade destinada a produzir coque para anodos é crucial, porque as propriedades da matéria-prima determinam as características do coque produzido. As alimentações consistem usualmente de resíduos da destilação atmosférica ou a vácuo, ou o destilado pesado do craqueamento catalítico. Uma unidade de coque para anodos é caracterizada em geral pelas razões de reciclo de mais de 35% e pressões de operação de 2 a 4 bar, necessários em particular para obter a densidade desejada. As temperaturas maiores também melhoram o HGI e o VCM, e produzem coque calcinado com um melhor VBD (Swindell, 2001).

2.13.3 - Coque Agulha (*Needle Coke*)

A qualidade superior do coque agulha resulta da coqueificação de alcatrões aromáticos especiais tais como o óleo decantado do craqueador catalítico de leito fluidizado FCC, alcatrão do craqueamento térmico, resíduo do craqueamento a vapor e alcatrão do carvão.

O coque agulha é usado para fabricar eletrodos de grafite para usinas siderúrgicas com fornos de arco elétrico. Deve sofrer calcinação e outros tratamentos antes de atingir suas características finais. Sua estrutura cristalina apresenta a forma de pequenas agulhas que também lhe conferem elevada condutividade elétrica. A elevada densidade e uma distribuição de tamanho de partículas exibindo um baixo teor de finos, assim como um baixo coeficiente de expansão térmica (CTE, coefficient of thermal expansion) são propriedades importantes na obtenção de um coque calcinado de alta qualidade. As suas especificações típicas são apresentadas na tabela seguinte (Swindell, 2001).

Tabela 2.2 - Especificações típicas para coque agulha
(Swindell, 2001)

Parâmetro Analítico	Coque Verde	Coque Calcinado
VCM (% em peso seco)	5 a 7	
Enxofre (% em peso)	< 0,5	< 0,5
Cinzas (% em peso)	< 0,1	< 0,1
Densidade real (g/cm ³)	-	2,1 a 2,14
CTE (10 ⁻⁷ /°C)	-	2,5
Resistividade (ohm-cm x 10 ⁻⁶)	-	125
Tamanho de partícula 1 mm (% max)	-	25

A alimentação para uma unidade de coque agulha deve possuir baixo teor de enxofre e de cinzas. Os valores máximos geralmente permitidos são, respectivamente, 0,5% em peso e 0,1% em peso. Considerando-se que os alcatrões que servem como alimentação para esse tipo de unidade são freqüentemente oriundos dos destilados, esses valores máximos não provocam nenhuma dificuldade maior. Tais valores limitam seriamente a escolha de matérias-primas potenciais para as alimentações, que devem possuir elevados teores de aromáticos, dos quais o coque agulha obtém sua estrutura cristalina (Swindell, 2001).

As condições de operação para as unidades de coque agulha incluem pressões superiores a 4 bar e razões de reciclo entre 60 e 100% a fim de maximizar o rendimento desse produto de alto valor. Temperaturas elevadas também são usadas para reduzir o teor da matéria volátil combustível (VCM) e o índice de moabilidade Hardgrove (HGI). Devido à diferença nas condições de operação, as unidades de coque agulha diferem de outras plantas para coqueificação. As temperaturas e pressões maiores resultam em coques mais duros e menor produção de finos (Swindell, 2001).

2.13.4 - Coque Granulado (*Shot Coke*)

Bolinhas parecidas com esferas de coque com diâmetros variando entre 0,5 a 1,5 cm formam o coque granulado, cuja designação em inglês lembra as munições antigas de mosquetões (primeiras espingardas ou rifles) e revólveres. Essas esferas não existem no estado livre no leito de coque, porém, ocorrem confinadas numa massa amorfa. Apresentam, comumente, um baixo valor de índice de moabilidade Hardgrove (HGI) e alto teor de enxofre, sendo mais consumidas como combustíveis para fornos de cimento e usinas termoelétricas (Swindell, 2001).

2.13.5 - Coque Combustível (*Fuel Coke*)

O coque para aquecimento é de longe o grau técnico mais comum produzido no mundo inteiro. Constitui um subproduto das operações de coqueificação retardada, usada como ferramenta para converter resíduos pesados em destilados. Esse tipo de unidade foi projetada para prover flexibilidade operacional a fim de se processar um intervalo amplo de resíduos. A ênfase reside no processamento de resíduos crescentemente pesados, maiores tempos de campanha operacional totalmente segura, econômica e de acordo com a legislação ambiental (Swindell, 2001).

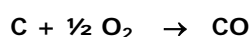
O coque combustível possui um teor elevado de enxofre e metais. Fisicamente ou visualmente, parece-se um pouco com o coque esponja e o coque granulado. As unidades de coque combustível operam em pressões e razões de reciclo muito baixas em numerosos tambores de coqueificação com até 8,5 m de diâmetro (adaptado de (Swindell, 2001).

Tabela 2.3 - Especificações típicas para coque combustível
(Swindell, 2001)

Parâmetro Analítico	Valores aceitos
VCM (% em peso seco)	Máximo 2
Umidade (% em peso)	8 a 12
HGI	35 a 70
Enxofre (% em peso)	3 a 7,0

2.14 – GASIFICAÇÃO E GASIFICADORES

A termodecomposição por **pirólise** opera em ausência de ar e acima de 200 °C (vide Brito, 1990), e, na prática, acima de 400 °C, eliminando voláteis (gases e vapores) alguns dos quais podem ser recuperados por condensação e destilação complementar. Se for operada acima de 900 °C pode atuar como um processo gasificador, embora em ambiente redutor. A **gasificação** é um processo de decomposição química em temperatura elevada tendo como meio oxidante oxigênio (ou ar) e vapor d'água. A gasificação ocorre com apoio de **agentes gasificadores**, e serve para produzir gás combustível, contendo CO, H₂, CH₄, como produtos mais importantes. O carbono queima com o oxigênio de forma completa ou incompleta, segundo as reações:



O CO₂ produzido na combustão completa, ao passar através do leito de carvão incandescente, é reduzido a CO (monóxido de carbono), segundo a reação endotérmica:



Assim, a técnica não é obter o CO diretamente pela combustão incompleta, e sim a de combinar as duas últimas reações. O ar injetado à base do leito espesso de combustível forma, através do oxigênio e carbono, o CO₂ com grande desprendimento calorífico, o qual, passando através das camadas superiores e incandescentes do leito, transforma-se em CO, ocorrendo, então, uma absorção de calor nessa reação endotérmica (De Paula, 1984).

Os processos de gasificação industrial realizam-se no **gasogênio** ou **gasificador**. Podem ser classificados pela origem da fonte de energia do processo como *autotérmicos* (calor utilizado para as reações e provido do próprio material a ser gasificado) e *alotérmico* (calor provém de uma fonte externa) ou pelo tipo de leito interno que caracteriza o material a processar (Assumpção, 1980).

2.14.1 - Gasificador de Leito fixo

Os regimes de operação dos gasificadores de leito fixo são: 1º - em contracorrente, e, 2º - em regime co-corrente. Em ambos os casos, o deslocamento do combustível ocorre por ação da gravidade, fazendo com que o seu tempo de residência seja longo, e a velocidade do gás baixa. Dessa forma, o seu uso fica restrito a biomassas de alta densidade aparente, já que existe a necessidade de se garantir o fluxo do combustível (KNOEF, 2003; OPET, 2002 – citado por Seabra, 2008).

No *gasificador de leito fixo operado em contracorrente*, o combustível desloca-se lentamente pelas zonas de pirólise, gasificação e combustão, e as cinzas são removidas no fundo do reator, onde há a injeção de ar ou vapor. Neste caso, o gás produzido se caracteriza pelas grandes quantidades de óleos e alcatrão e por sua baixa temperatura. No *gasificador de leito fixo em co-corrente*, o agente oxidante também é injetado no topo do reator, fazendo com que os produtos da pirólise tenham um fluxo concorrente através das zonas de combustão e gasificação. Isto, em uma situação ideal, permite que o gás produzido já seja usado em um motor de combustão interna após uma simples filtração e resfriamento. No entanto, esta condição está limitada a biomassas extremamente bem dimensionadas, o que não pode ser obtido na prática com um custo razoável (OPET, 2002 – citado por Seabra, 2008).

2.14.2 – Gasificador de leito fluidizado

Utiliza a biomassa em partículas de pequenas dimensões, mantidas em suspensão pela injeção do agente gasificador (ar ou oxigênio e vapor) que passa pelo leito a uma velocidade suficiente para fluidizá-lo produzindo um bom contato sólido gás que garante um aumento de eficiência no processo. Dois tipos de gasificadores merecem destaque: o de leito fluidizado borbulhante e o de leito fluidizado circulante. Em ambos, o leito é mantido em suspensão pela injeção do agente oxidante no fundo do gasificador, fazendo com que haja uma rápida secagem e pirólise. A diferença básica entre os dois é que, para este último, os sólidos que são separados do gás retornam ao gasificador através de uma conexão entre o ciclone e o fundo do reator, onde ocorre sua queima com o ar insuflado. Apesar de ter um esquema de funcionamento aparentemente simples, os gasificadores de leito fluidizado circulante são mais adequados para o sistema de larga escala, enquanto que a tecnologia dos gasificadores de leito fluidizado borbulhante parece ser adequada para média escala (OPET, 2002 – citado por Seabra, 2008).

2.14.3 – Gasificador de leito arrastado

O leito de biomassa é pulverizado, com oxigênio e vapor, no interior do reator, onde a biomassa e as cinzas são fundidas por conta das altas temperaturas. Parte do material escorre para o tanque de água localizado na base do gasificador, formando-se, a escória. O gás sai pelo topo arrastando certa quantidade de material particulado, que pode retornar ao reator por meio de um sistema de reciclo.

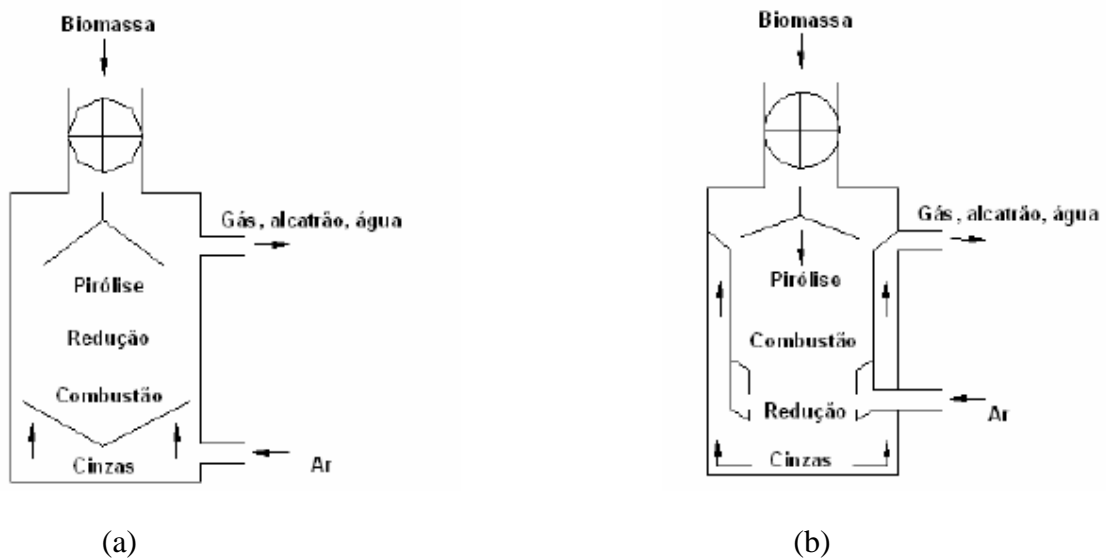


Figura 2.8 - Gasificadores de leito fixo em regimes de operação (a) contracorrente (PRIMENERGY; LURGI) e (b) co-corrente (COMMUNITY POWER BIOMAX). (adaptado de Grabowski, 2004)

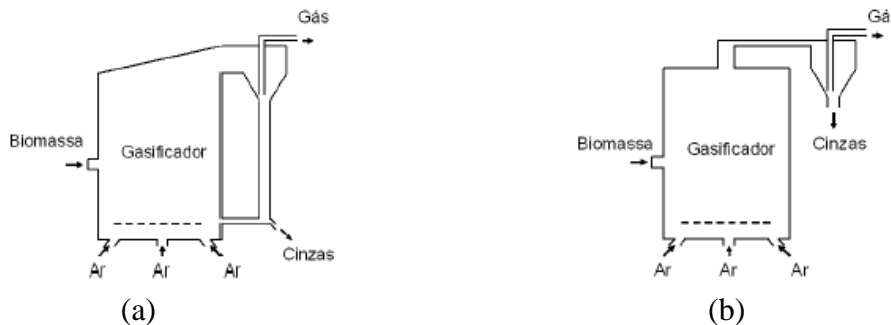


Figura 2.9 - Gasificadores de leito fluidizado em regime de operação (a) circulante (FERCO) e (b) borbulhante (EPI, GTI-RENUGAS, CARBONA, FOSTER-WHEELER, MTCI). (Consonni e Larson, 1996)

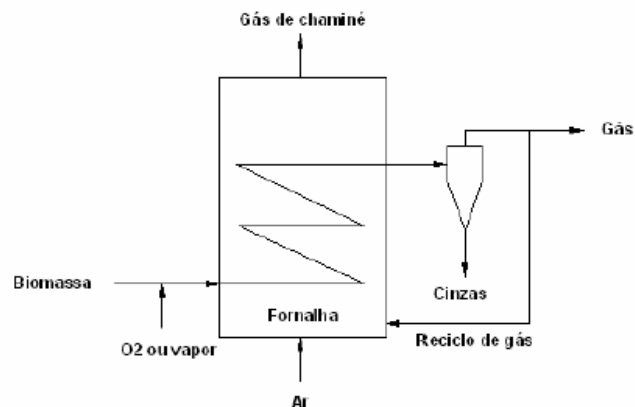


Figura 2.10 - Gasificador de leito arrastado (BRIGHTSTAR) (Grabowski, 2004)

2.14.4 – Outros sistemas gasificadores

Diversos sistemas de gasificação têm sido desenvolvidos para o carvão (porque é mais fácil e econômico transportar um gás do que o minério), cada um visando maximizar as propriedades químicas e termodinâmicas do processo, de modo a obter-se o maior rendimento possível em termos recuperar as calorias no gás, e, ao mesmo tempo, obter um gás combustível de maior poder calorífico. Por outro lado, além da produção de gás combustível, também é possível gerar gás de síntese (Zilberman e colaboradores, 1980).

Um dos processos da gasificação de resíduos sólidos urbanos baseia-se num forno de leito fluidizado operando a pressão atmosférica. O gás produzido na gasificação é resfriado e limpo em equipamentos convencionais, e por possuir poder calorífico elevado é queimado numa caldeira, sem necessitar de uma limpeza adicional (ou externa) como ocorre em incineradores convencionais de resíduos urbanos. O gás produzido possibilita atingir uma eficiência de conversão termoelétrica de até 30%. A eficiência termoelétrica das plantas de incineração é limitada por restrições técnicas, como a temperatura no superaquecedor (e também a temperatura do vapor) associada com a necessidade de evitar a corrosão causada pelos traços de HCl em temperaturas muito elevadas (adaptado de Morris,1999- citado por Henriques, 2004).

O gás proveniente da gasificação é limpo antes de ser queimado, e possibilita atingir temperaturas maiores sem comprometer os materiais envolvidos sem que se tenha também o risco de corrosão e sua eficiência pode aumentar em até 30% em relação a incineração (adaptado de Morris,1999- citado por Henriques, 2004).

A produção máxima de calor para um determinado combustível depende da eficiência de mistura com oxigênio ou ar durante a alimentação. Isto é perfeitamente concretizado com os combustíveis gasosos, daí a conversão de resíduos sólidos em gás combustível ser considerada um das melhores opções. Os resíduos sólidos urbanos depois que sofrem o pré-tratamento (coleta ou separação de metais, vidros, cerâmicos e plásticos) são alimentados ao gasificador (adaptado de Morris,1999- citado por Henriques, 2004).

Um processo de gasificação com leito fluidizado possibilita purificar o gás combustível gerado dentro do gasificador e fora, ainda quente num filtro adequado (adaptado de Morris,1999- citado por Henriques, 2004).

Para ser gasificada, a parte orgânica remanescente é triturada e é classificada segundo o tamanho, que deve ser menor que 5 cm. A umidade máxima de 20% deve ser mantida para otimizar a recuperação do calor. O adensamento da carga orgânica é desnecessário, gerando uma significativa economia de capital e de custos operacionais. A fração orgânica é introduzida no reator e misturada com um agitador e guiada hidraulicamente. A carga passa então pela câmara principal onde a temperatura varia entre 900°C e 1200°C e promove a conversão da parte orgânica em gás. As cinzas resultantes deste processo são removidas na base do reator. Não há emissão fugitiva de gases do sistema de cinzas (adaptado de Morris,1999- citado por Henriques, 2004).

2.15 - CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 2

1ª - **Carvão mineral, carvão de pedra e hulha** são denominações para o carvão quando extraído da crosta terrestre.

2ª - O carvão que se obtém pela queima de substâncias animais, em especial, ossos, é denominado **carvão animal**.

3ª - O **carvão vegetal** é obtido pela carbonização de madeiras.

4ª - **Pirólise, carbonização, carvoejamento ou termólise** são denominações para um processo de conversão termoquímica na ausência de oxigênio.

5ª - **Coqueificação** é o termo utilizado **para a carbonização de carvão mineral e para a carbonização de outros materiais (sólidos) como madeira, turfa**; esse processo termoquímico é denominado **“destilação seca” ou “pirólise”**.

6ª - **Os fornos de coqueificação** são também **denominados de coqueificadores ou retortas**, que deverão possuir revestimento interno constituído de material refratário quando forem operados em altas temperaturas e podem ser simplesmente metálicos sob temperaturas baixas.

7ª - O **processo de gasificação** é um processo de decomposição química em **temperaturas elevadas na presença de oxigênio ou ar e vapor d'água, que serve para produzir gás combustível, contendo CO, H₂ e CH₄ como produtos mais importantes.**

2.16 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 2

1ª - A abordagem descritiva processos consagrados para obtenção de carvão ativado é indispensável para fundamentar a concepção operacional e construtiva *de um coqueificador de resíduos urbanos*, em especial, as cascas de coco verde, tendo em vista a operação de unidades de pequeno porte de modo semi-automatizado.

2ª - As condições operacionais para coqueificação de carvão mineral, por exemplo, os intervalos de temperatura operacional e o método de aquecimento do equipamento são fundamentais para a determinação do tipo de construção, montagem e a seleção dos materiais para a retorta ou forno de pirólise.

3ª - Os rendimentos e a qualidade dos produtos da coqueificação de frações de óleo pesado dependem de quatro características: o resíduo de carbono, o teor de enxofre, o teor de metais e o ponto de corte do ponto de ebulição verdadeiro.

4ª - O conhecimento dos subprodutos formados durante os processos termoquímicos permite que estes sejam reaproveitados ou tratados de forma mais conveniente e segura.

5ª - Existem diversas variedades de coque obtidas a partir da coqueificação de frações de óleo pesado, a composição da matéria prima e a rota tecnológica irão definir as características físico- químicas do coque processado.

2.17 - REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 2

ASSUMPÇÃO, R.M.V. - **Gaseificação Direta de Madeiras** - Revista Brasileira de Engenharia Química, 4, (3/4):41, set/dez (1980).

BEZZON, G., - **Avaliação de possíveis impactos energéticos e ambientais derivados da introdução de novas tecnologias para obtenção eficiente de carvão vegetal e carvão ativado** - Tese de Doutorado, 1998, Universidade Estadual de Campinas, SP.

BRITO, J.O. - **Princípios de Produção e Utilização de Carvão Vegetal de Madeira**- Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura "Luiz De Queiroz", Universidade de São Paulo – 1990, **Documentos Florestais**, Piracicaba (9): 19, mai, 1990.

CONSONNI, S.; LARSON, E. D. – **Biomass-Gasifier/Aeroderivative Gas Turbine Combined Cycles: Part A – Technologies and Performance Modeling** - Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v.118, pp. 507-515, July 1996a.

CONSONNI, S.; LARSON, E. D. – **Biomass-Gasifier/Aeroderivative Gas Turbine Combined Cycles: Part B – Performance Calculations and Economic** - Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v.118, pp. 516-525, July 1996b.

DE PAULA, A.M. - **Combustíveis sólidos, gasosos e conceitos básicos de combustão** - p. 212, in: MACHADO, A.C. e OLIVEIRA, G.F. (Coordenação) - **Sistema de Energia na Siderurgia** - Associação Brasileira de Metais, São Paulo, 1984.

FERREIRA, A.B.H. - **Dicionário Eletrônico Aurélio - Século XXI** – Lexikon Informática e Editora Nova ronteira, Rio de Janeiro, Novembro de 1999.

- GRABOWSKI, P. – **Biomass Thermochemical Conversion: OBP Efforts Office of Biomass Program** - Washington DC, 2004
- GUTHRIE, R.I.L. – **Engineering in Process Metallurgy** – Clarendon Press Oxford, New York, 1989
- HENRIQUES, R. M. – **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica** - Tese de Mestrado, 2004, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- KEELING, W.O. e JUNG, F.W. - **Carbonization** – in: KIRK, R.E. e OTHMER, D.F. (Editors) – **Encyclopedia of Chemical Technology, Vol. 3** – p. 156-178, The Interscience Encyclopedia, Inc., New York, 1949.
- KNOEF, H. – **Technology brief: Fixed-bed gasification. IEA – Task 33: Thermal Gasification of Biomass**, October 2003.
- MELLOR, J. W. - **Química Inorgânica Moderna** - Tradutor: Alcides Caldas, Editora Globo, Porto Alegre, 1952.
- MOLLE, J.F. - **Pyrolysis Technology and Products** – in: **Anais do Workshop on Pyrolysis as a Basic Technology for Large Agro-Energy Projects** - Publicação Commission of the European Communities, vol I., pp.65-68, La'quila, Itália, outubro 1987.
- MORRIS, M. W., L. - **Energy Recovery from solid waste fuel using advanced gasification technology** - International Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies, Orlando, Florida/EUA, University of California. (1999).
- NATALI, J.R. – **Ética Ambiental** – Editora Millenium Ltda, 2001.
- OPET. **Review of Finnish Biomass Gasification Technologies**. OPET Report 4, VTT, Espoo, Finland, 2002.
- ROCHA, J.D. – **Carvoejamento, Carbonização e Pirólise** – I Seminário Madeira Energética – MADEM 2008, ABC – RJ, 2 e 3 de setembro de 2008.
- SAMPAIO, R., PINHEIRO, P.C.C. E REZENDE, M.E. – **Carvoejamento - aumentando o rendimento dos fornos: possibilidades a curto e longo prazos** – Workshop "Madeira Energética", BNDES, Rio de Janeiro, 27 de maio de 2007; disponibilizado pelo Instituto Nacional de Eficiência Energética-INEE, acessado e extraído de http://www.inee.org.br/forum_downloads.asp?Cat=forum
- SANTOS, F.A.D.; SHILLING, P.F.; CARVALHO, S.B. e POLIDO, W.R. - **Obtenção, tratamento e destinação de dióxido de carbono (CO₂) a partir de emissões gasosas de incineradores** - Projeto Final de Curso, Orientador: Prof. Dr. Abraham Zakon, Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- SEABRA, J.E.A., **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana do Brasil** Tese de Doutorado, 2008, Universidade Estadual de Campinas, SP.
- SHREVE, R.N. e BRINK Jr., J.A. **Indústrias de Processos Químicos - 4a Edição**, Trad. Horácio Macedo, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.
- SWINDELL, R. - **Coking** – in: LEPRINCE, P. (Editor) – **3 Conversion Processes** - Petroleum Refining – Institute Français du Pétrole Publications, t Editions TECHNIP, Paris, 2001.
- ZAKON, A – **Aspectos positivos da termodestruição de descartes, detritos, despejos e emissões via incineração, co-processamento e ceramização**, 1º Simpósio Brasileiro de Incineração, UPAN, Porto Alegre (2005).

CAPÍTULO 3

CARVOEJAMENTO E PIRÓLISE DE BIOMASSA VEGETAL

- 3.1 – Carvoejamento ou carbonização ou pirólise de madeira**
- 3.2 – Carbonização contínua e descontínua**
- 3.3 – Pirólise lenta, artesanal, rústica ou tradicional**
- 3.4 – Teoria da carbonização aplicada à produção de carvão vegetal**
- 3.5 – Tipos de materiais para construção de fornos de carvoejamento**
- 3.6 – Fontes de energia para os processos de carbonização de madeira e vegetais**
- 3.7 – Pirólise Rápida ou Flash**
- 3.8 – Biorrefinarias**
- 3.9 – A evolução tecnológica dos fornos de carbonização de lenha no Brasil**
- 3.10 – Métodos de produção industrial de carvão de madeira**
- 3.11 – Fornos de carvoejamento de matéria vegetal No Brasil**
- 3.12 – Constatações do capítulo 3**
- 3.13 – Conclusões do capítulo 3**
- 3.14 – Referências do capítulo 3**

CAPÍTULO 3

CARVOEJAMENTO E PIRÓLISE DE BIOMASSA VEGETAL

3.1 – CARVOEJAMENTO OU CARBONIZAÇÃO OU PIRÓLISE DE MADEIRA

Carvoejamento é o processo de transformação (lenta) da madeira em carvão. Existem diferentes tecnologias para a produção de carvão vegetal, as quais se apóiam na queima da madeira para desumidificação e concentração dos teores de carbono no produto final, o carvão vegetal. Comparando-se a siderurgia a carvão mineral com a indústria a carvão vegetal, não fosse a última baseada no extrativismo, seria ecológica e ambientalmente mais correta, ou seja, menos poluente. Entretanto, as fabricas integradas com escala mínima de eficiência elevadas são preparadas para operar apenas com o carvão mineral (Vital e Pinto, 2009).

Carvoaria é o local onde estão localizados os fornos de carbonização, e onde são realizadas todas as atividades de carbonização, desde o recebimento de madeira até o despacho do carvão produzido.

Bateria de carvoejamento é um conjunto de fornos da carvoaria, conduzidos por uma equipe específica de mão-de-obra. Raramente a planta de carbonização consta de um único forno; em geral os fornos estão construídos em grupos (Pinheiro, Sampaio e Bastos Filho, 2005).

É possível encontrar-se ainda vários processos de carbonização rudimentares ou primitivos para produzir carvão vegetal, desenvolvidos há mais de 10.000 anos. Os fornos são construídos no local das carvoarias, com custos muito baixos (Pinheiro, 2006 – citado por Santos, 2007).

Guimarães Neto (2005) destaca, citando o INFOENER (2004), que a carbonização da lenha é praticada de forma tradicional em fornos de alvenaria com **ciclos de aquecimento e resfriamento que duram dias**. Os fornos com pequena capacidade de produção continuam sendo os mais usados nas carvoarias, com temperatura máxima de 500 °C na sua operação.

Para Guimarães Neto (2005) o **controle da carbonização tradicional depende, unicamente, da experiência do carvoeiro. As operações nesses fornos são realizadas de forma empírica, sem fundamentos científicos, baseados apenas no conhecimento obtido pelo operador por meio de tentativas e erros.**

No entanto, Guimarães Neto (2005) destaca ainda - citando Pinheiro e Sampaio (2005) – que para padronizar a rotina de carbonização em fornos de alvenaria, faz-se necessário conhecer um grande número de variáveis envolvidas, como temperatura média final de carbonização, taxa (velocidade) de aquecimento médio, e tempo médio de carbonização.

3.2 – CARBONIZAÇÃO CONTÍNUA E DESCONTÍNUA

Guimarães Neto, 2005 (citando Osse (1972) relata que **existem dois tipos de processos de carbonização: contínuo e descontínuo.**

No **processo de carbonização contínua**, o aquecimento da carga é externo, e os gases quentes circulam num recipiente metálico, contendo a madeira, o que resulta em baixos rendimentos térmicos e rápido desgaste do equipamento.

O **processo descontínuo** *“surgiu da necessidade de se aumentar a eficiência da carbonização, facilitar a sua operação, melhorar a qualidade de vida dos carvoeiros e de fixar frentes de carbonização com a formação de baterias”*, e esta é uma afirmação contraditória e errônea do ponto de vista histórico e prático, porque os processos em batelada precederam todos os processos químicos industriais contínuos, que são mais eficientes e rentáveis.

3.3 – PIRÓLISE LENTA, ARTESANAL, RÚSTICA OU TRADICIONAL

A produção de carvão vegetal na **pirólise lenta, artesanal ou rústica**, é feita inicialmente com o fogo entrando em contato direto com a lenha enquanto houver suprimento de ar (Vital e Pinto, 2009). *Após cessar a emissão de fumaça esbranquiçada, interrompe-se a injeção de ar, fechando-se ou vedando-se as suas entradas, para que a pirólise realmente ocorra em ausência de ar. A cura do forno é feita para que sua secagem seja lenta. Deve-se queimar a lenha em seu interior por longos períodos, lentamente, evitando-se o aumento brusco da temperatura. A cura reduz a ocorrência de trincas na copa do forno, facilitando a manutenção e aumentando sua vida útil* (Emprego e Renda, 2010)

Na **pirólise artesanal**, o rendimento é muito baixo, cerca de 200 kg a 250 kg de carvão por tonelada de madeira com 20% a 30% de umidade. No Brasil, a maioria dos fornos é dessa natureza (ao redor de 60% da produção nacional), sendo que os avanços tecnológicos são melhoramentos dessa tecnologia rudimentar. O produto final do processo de pirólise artesanal é somente o carvão com quantidade fixada de carbono ao redor de 60% a 80%, não sendo reaproveitados os gases liberados no processo (CO₂, H₂O, CH₄, entre outros). Nesse modo de produção, o trabalhador entra em contato direto com o gás carbônico emitido como dejetos. Em média, são lançados 640 kg de CO₂ por tonelada de carvão produzida. Quando comparado a outros processos, o processo artesanal emite maior quantidade de gases de efeito estufa – CO₂ (Vital e Pinto, 2009).

3.4 – TEORIA DA CARBONIZAÇÃO APLICADA À PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL

A carbonização da madeira permite a transformação dos resíduos vegetais ou da biomassa em produtos de maior valor agregado (em base de fontes de energia ou de importância química). Possibilita separar a produção de um sólido concentrado de carbono – o carvão - de um líquido complexo – o alcatrão. A carbonização converte a madeira em três frações: 1^a - sólida – carvão (25 a 30%); 2^a - líquida – alcatrão e pirolenhoso; 3^a - gases não condensáveis. Ou seja, 1000 kg de resíduos de madeira produzem 300 kg de carvão (30%) mais 500 kg de líquidos (50%) e 200 kg de gás “não condensável” (nas temperaturas ambientais ou do ciclo de pirólise (20%) (Quirino, 2006).

Os processos de carbonização de vegetais como a madeira e seus resíduos, ou das cascas de coco tornam possível obter produtos biocarboquímicos, como é descrito por Rezende (2008) e Cavazza (2007) através da figura seguinte, na qual são indicadas outras proporções ponderais de produtos sólidos, líquidos e gasosos.

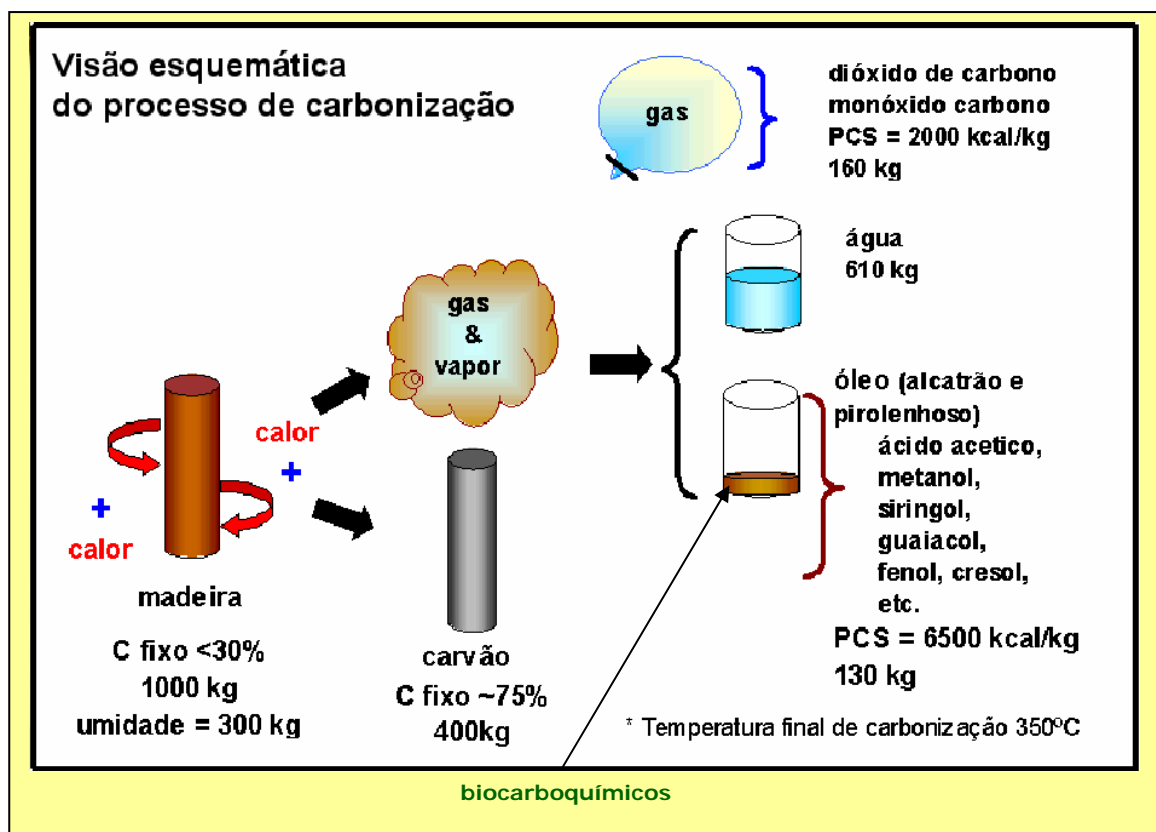


Figura 3.1 – Geração de produtos biocarboquímicos a partir da pirólise de biomassa
(Rezende, 2007)

Tabela 3.1 – Produtos da Carbonização
(Pimenta, 2002)

PRODUTOS DA CARBONIZAÇÃO OU CARVOEJAMENTO	% BASE SECA
Carvão (80% Carbono Fixo)	33,0
Ácido Pirolenhoso	35,5
(Ácido Acético)	(5,0)
(Metanol)	(2,0)
(Alcatrão Solúvel)	(5,0)
(Água e outros)	(23,5)
Alcatrão Insolúvel	6,5
Gases Não-Condensáveis	25,0
TOTAL	100

Segundo Brito (1990), durante a conversão da madeira para carvão vegetal ocorre uma série de outros fenômenos além da concentração de carbono. Evidentemente, o nível de ocorrência de tais fenômenos está associado ao nível de temperatura que se alcança durante a conversão. De um modo geral são observados a diminuição de volume e o escurecimento da madeira, abertura e fechamento de poros, fissuração, diminuição a densidade, etc. É usual dar-se ao processo de carbonização da madeira o nome de *carvoejamento*.

A Tabela 3.2 seguinte apresentada por Brito (1990) expõe alguns detalhes básicos adicionais relativos às fases da transformação da madeira para carvão vegetal. Após o carvão ter sido produzido na Fase III, a passagem para as fases seguintes, onde ocorrem temperaturas mais elevadas, fatalmente reduzirá o rendimento do produto. Além disso, haverá redução de sua resistência físico-mecânica, em que pese o aumento no seu teor de carbono fixo.

Tabela 3.2 – Etapas do fenômeno de conversão da madeira para carvão vegetal
(adaptado de Doat e Petrof, 1975 – citado por Brito, 1990).

ETAPAS	TEMPERATURAS	FENÔMENOS E PRODUTOS
I	Até 200 °C	<ul style="list-style-type: none"> - ocorrem poucas reações importantes; - há perda de umidade; - é uma fase endotérmica.
II	200 até 280 °C	<ul style="list-style-type: none"> - aumentam as reações - ocorre a eliminação de gases e vapores (ou voláteis); - a cor da madeira muda para marrom arroxeadas; - é uma fase endotérmica.
III	280 até 380 °C	<ul style="list-style-type: none"> - ocorrem várias reações e grande eliminação de voláteis; - a composição dos voláteis inclui centenas de componentes orgânicos (alguns dos quais recuperáveis); - exemplos de voláteis: ácido acético, metanol, acetona, fenóis, aldeídos, hidrocarbonetos, alcatrões, etc. - o resíduo final dessa fase é o carvão vegetal, contendo, ainda, compostos volatilizáveis em sua estrutura; - é uma fase endotérmica;
IV	380 até 500 °C	<ul style="list-style-type: none"> - reduz-se a emissão de voláteis; - o carvão vegetal passa a sofrer uma purificação na sua composição ao eliminar o restante dos voláteis contendo H e O; - a estrutura microscópica do carvão torna-se mais rica em C (que é denominado de fixo ou não volatilizável);

V	Acima de 500 °C	- ocorre a degradação do carvão; - termina a carbonização da biomassa e inicia-se a gasificação; - ocorrem etapas exotérmicas.
---	-----------------	--

Lúcio (2008) descreveu a **pirólise** ou **carbonização da madeira** como um processo complexo no qual os componentes da madeira, quando aquecidos acima de 280°C em ausência do ar, são decompostos em vapores de produtos voláteis, gases não condensáveis e um produto sólido – carvão vegetal – é formado. E destacou que três termos são usados para descrever esse processo, dependendo do produto final desejado:

- **Carbonização** – produto final: carvão vegetal.
- **Destilação** – produto final: licor pirolenhoso.
- **Gaseificação** – produto final: gás combustível.

Lúcio (2008) considerou que a **carbonização industrial da madeira** ocorre em três etapas.

1ª - Secagem - antes que a madeira possa ser carbonizada, a umidade que ela contém deve ser eliminada. A secagem é o principal período endotérmico da carbonização.

2ª - Pirólise – Nessa etapa a estrutura química da madeira é destruída sob temperatura elevada na ausência do ar. Depois de iniciada a etapa da pirólise é exotérmica, e a temperatura se eleva até 350-380 °C, com a emissão de hidrocarbonetos gasosos, o produto sólido residual sendo o carvão vegetal. As espécies gasosas são: CO, CO₂, H₂, CH₄, vapor d'água, hidrocarbonetos gasosos e vapores de alcatrão, de metanol, de ácido acético e do licorpirolenhoso. Quando liberados para a atmosfera, a condensação desses vapores produz líquidos altamente nocivos ao meioambiente.

3ª - Resfriamento - O carvão vegetal produzido deve ser resfriado, devendo o forno ou retorta permanecer completamente selado para evitar a queima do carvão vegetal pelo ar atmosférico eventualmente infiltrado.

Rocha, Pérez e Cortez (2004) em suas abordagens de pirólise de biomassa, consideraram os seguintes níveis térmicos operacionais de uma carbonização.

Tabela 3.3 – Temperaturas características dos processos de termodecomposição dos componentes de materiais lignocelulósicos
(Connor e Piskorz, 1994 – citados por Rocha, Pérez e Cortez, 2004)

ETAPAS	TEMPERATURAS, °C	FENÔMENOS DE TERMODECOMPOSIÇÃO
I	< 100	Evolução, principalmente, de umidade
II	100-250	Início da decomposição dos extrativos
III	250-350	Predomínio da decomposição da hemicelulose
IV	350-500	Decomposição, principalmente, da celulose e parte da lignina
V	>500	Decomposição, fundamentalmente, da lignina

Outra relação de balanço material conversão de madeira em carvão vegetal é apresentada na Figura 3.2 de autoria de pesquisadores franceses citada por Brito (1990).

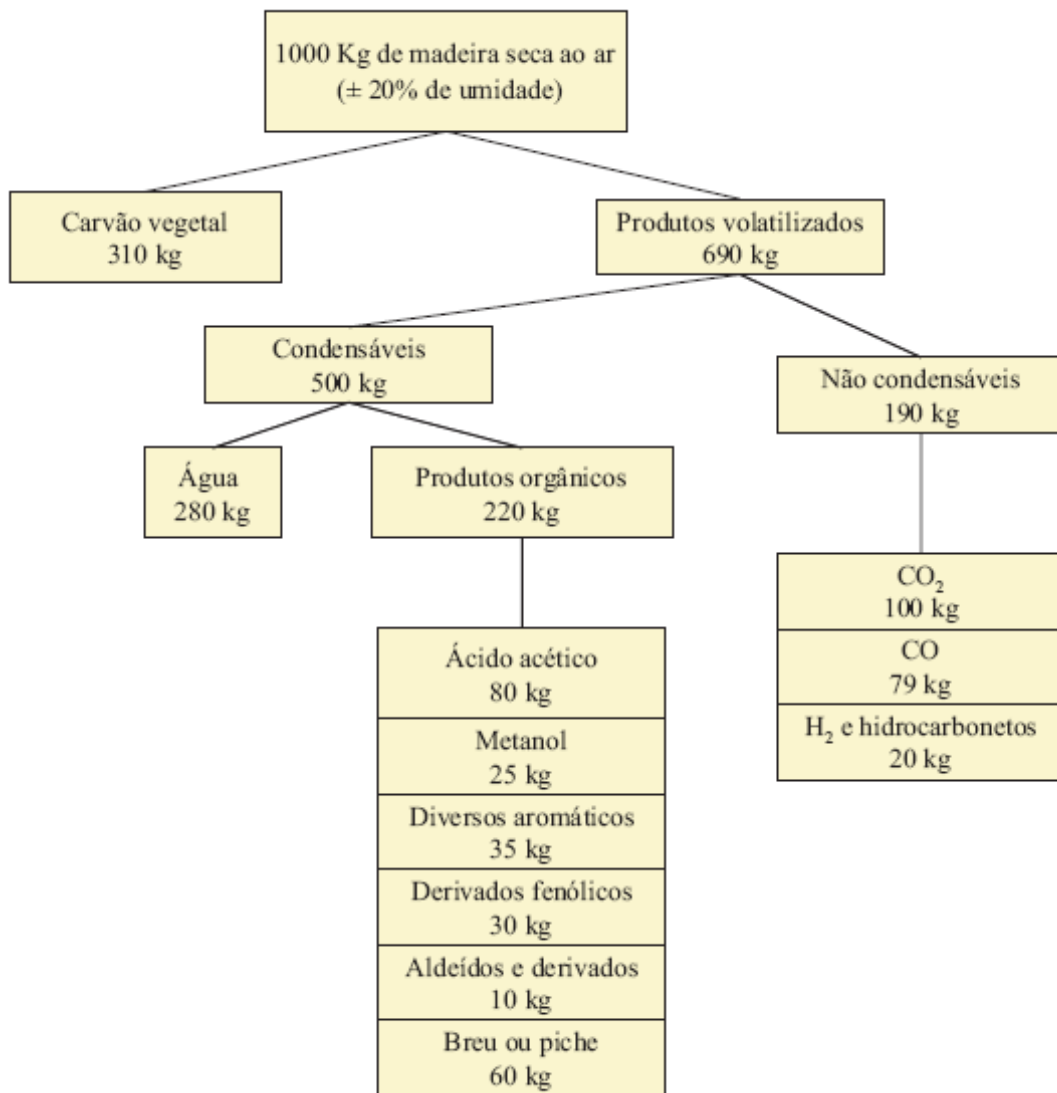


Figura 3.2 – Balanço material da conversão laboratorial (por pirólise) até 500 °C da madeira em carvão vegetal e subprodutos líquidos e gasosos
(Briane e Doat, 1985 – citado por Brito, 1990)

3.5 – TIPOS DE MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO DE FORNOS DE CARVOEJAMENTO

Quatro tipos de materiais de construção de fornos artesanais e engenhados possibilitam produzir carvão vegetal:

- 1° - a terra ou solo;
- 2° - a própria madeira empilhada;
- 3° - alvenaria e argila;
- 4° - metálicos.

3.6 – FONTES DE ENERGIA PARA OS PROCESSOS DE CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA E VEGETAIS

Segundo Brito (1990) – citado por Colombo, Pimenta e Hatakeyama (2006), o processo de produção do carvão vegetal consiste na degradação termoquímica parcial da madeira, em que se aplica calor suficientemente controlado para que isto ocorra, o qual pode ser oriundo de:

a) **sistema de combustão parcial ou fonte interna de energia** – onde 10% a 20% do peso da carga de madeira são sacrificados para tal consumo;

b) **sistema que utiliza fonte externa de energia** – emprega-se aquecimento elétrico ou a queima de outros combustíveis, introduzindo-se o calor na carga de modo convectivo ou radiante, produzindo um rendimento de processo maior, visto que teoricamente não há sacrifício de parte da madeira por combustão total.

Em qualquer dos dois sistemas **a carbonização é resultante da destilação da madeira que a transforma em dois tipos de produtos: uma fração rica em carbono** – o carvão vegetal, **e outra fração composta por vapores e gases** (alcatrão, pirolenhosos e gases não-condensáveis) (adaptado de Sampaio, 2001- citado por Colombo, Pimenta e Hatakeyama, 2006).

A Figura 3.3 apresenta a visão esquemática de uma carbonização num forno genérico de carvoejamento com fonte interna de calor, onde a existência de chaminé lateral é opcional.

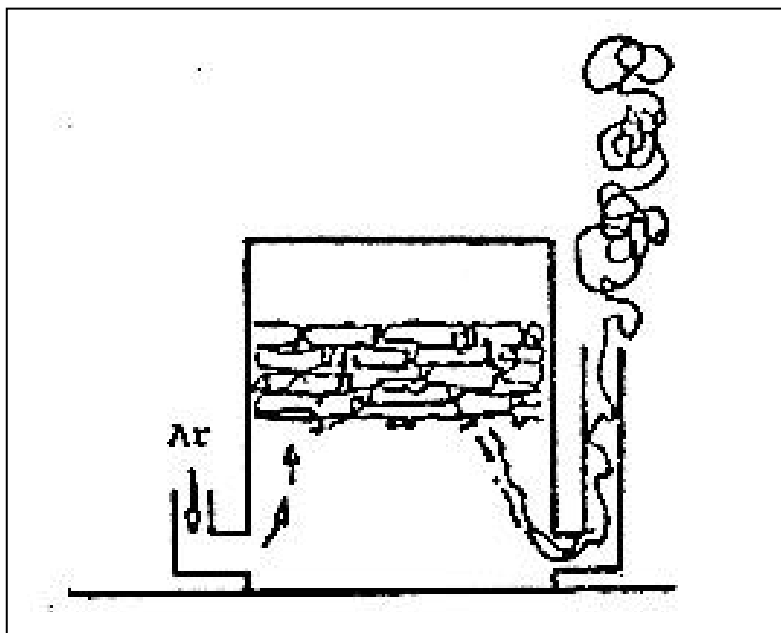


Figura 3.3 – Esquema de um forno de carvoejamento com fonte interna de calor e eliminação de fumaça (voláteis e partículas de sólidos e líquidos)
(Brito, 1990)

O princípio básico de tais processos é a colocação da carga no interior de um invólucro denominado de “forno”, (geralmente construído em alvenaria, chapa metálica ou com a mistura de ambos), a colocação de fogo e queima controlada de parte da carga de madeira (Brito, 1990).

A queima é realizada mediante a admissão controlada de ar no interior da carga, o qual fornece o oxigênio necessário ao recesso. Os gases resultantes normalmente são removidos através de urna ou varias chaminés. Os rendimentos gravimétricos desses processos para a obtenção de um bom carvão, em geral, não ultrapassam 40%. Como conseqüência 60% do peso de uma carga de madeira a ser processada transforma-se em gases ou fumaça que polui o ambiente (adaptado de Brito, 1990).

As **retortas com fonte externa de calor** para produção de carvão vegetal desenvolveram-se, mais acentuadamente, queimando os gases recuperados do próprio processo para gerar calor, melhorando assim a eficiência de conversão (Brito, 1990).

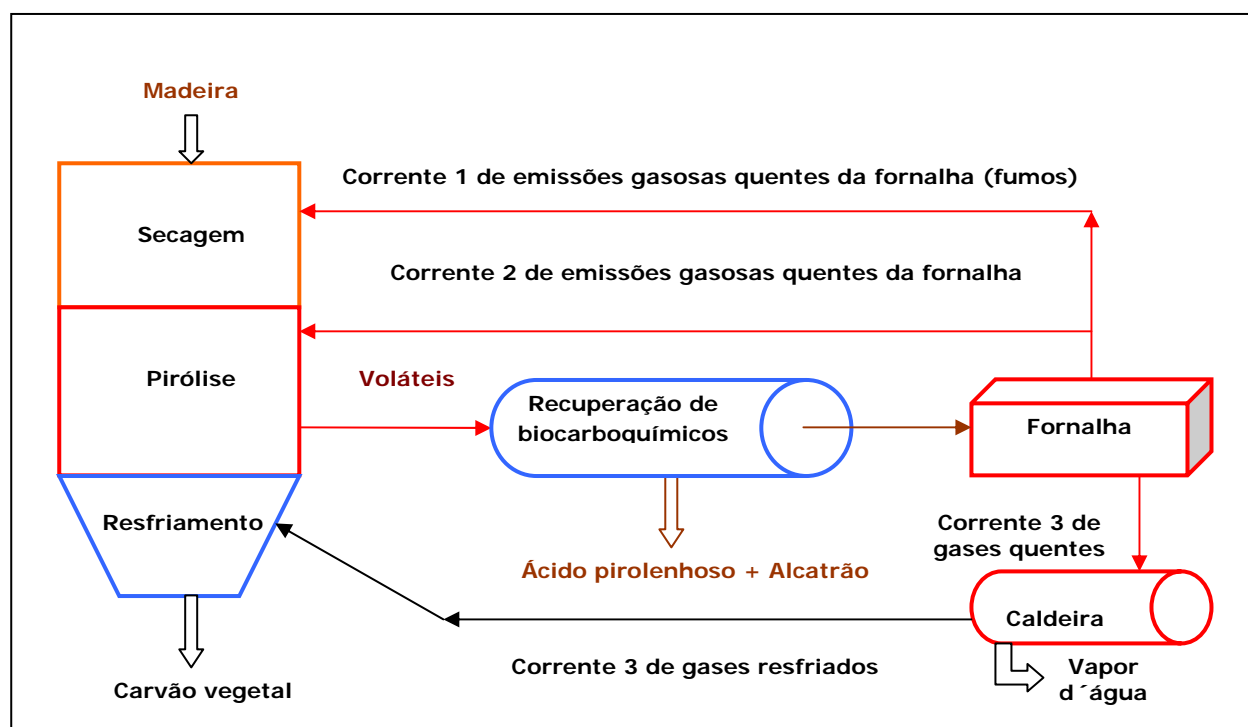


Figura 3.4 – Esquema de uma retorta de carbonização com fonte externa de calor (fornalha) e uso de emissões gasosas quentes e resfriadas (em caldeira ou trocador de calor)
(adaptado de Brito, 1990)

As atuais concepções de retortas são projetadas para serem construídas, verticalmente ou horizontalmente, em material metálico, e com dimensões que permitem grandes produções num único equipamento. Além disso, pode-se obter carvão de melhor e mais homogênea qualidade em função das condições que vão de 10 até 70 kg cv/m³ lenha.hora (Brito, 1990).

Há exemplos de retortas que, individualmente, podem produzir por ano o equivalente a 350 fornos de alvenaria do tipo colméia, com capacidade para 35 m³ de madeira (Brito, 1990).

Na maioria das retortas, além da recuperação e queima de gases do próprio processo para a geração de calor, prevê-se também a obtenção de gases, que são utilizados no resfriamento do carvão produzido. Em muitas concepções de retortas, com a recuperação de gases, pode-se prever também a obtenção de produtos químicos contidos nos mesmos. Qualitativamente, a gama de produtos que podem ser obtidos desses gases é bastante grande (Brito, 1990).

Segundo GOLDSTEIN (1979 – citado por Brito 1990), menciona a identificação de cerca de 230 compostos químicos nos gases do processo de carbonização de madeiras. Na prática os compostos químicos são recuperados na massa de dois produtos líquidos básicos condensáveis, quais sejam o alcatrão e o licor pirolenhoso, conforme a descrição efetuada anteriormente na Figura 3.10.

Brito (1990) destacou que industrialmente, há referências de sistemas de retortas onde, para cada 1 tonelada de madeira, são obtidos 308kg de carvão vegetal, 100kg de alcatrão, 65kg de ácido acético, 25kg de metanol.

Esse cenário fundamentou a adoção e o desenvolvimento do conceito e das tecnologias denominadas de **Biorrefinarias**, descritas por Martins (2008), que serão abordados adiante.

3.7 – PIRÓLISE RÁPIDA OU FLASH

Existem basicamente quatro métodos de conversão termoquímica da biomassa: três de termodecomposição parcial (pirólise, a liquefação e gasificação - que é o caso limite da pirólise) e um de termodestruição total, que é a combustão. Cada um desses processos conduz a um conjunto de produtos, pois utilizam diferentes configurações de equipamentos, operando de modo particular. Os processos de pirólise e liquefação da biomassa são os que proporcionam produtos em forma líquida diretamente (adaptado de Rocha, Pérez e Cortez, 2004).

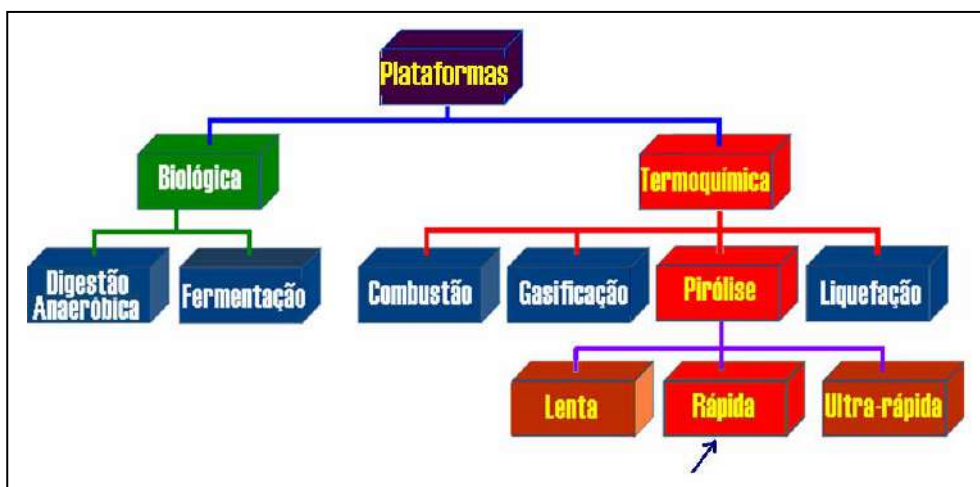


Figura 3.5 - Tecnologias de Conversão Biológica e Termoquímica da Madeira (Martins, 2008)

A gasificação, a pirólise e a carbonização (ou pirólise lenta) podem ser consideradas variações de um mesmo processo (vide Tabela 3.4) (Rocha, Pérez e Cortez, 2004).

Tabela 3.4 – Rendimentos dos produtos obtidos nos processos pirólise da madeira (base seca) (adaptado Rocha, Pérez e Cortez, 2004 e Quirino, 2006)

TIPO DE PIRÓLISE	CONDIÇÕES OPERACIONAIS E RESULTADOS PRÁTICOS	LÍQUIDO	CARVÃO	GÁS
Rápida	<ul style="list-style-type: none"> - temperaturas moderadas: 450 -550 °C; - tempos curtos de residência (<2 s) dos vapores e da da biomassa fina (granulometria reduzida); - forma substâncias com menor peso molecular. - temperaturas baixas (< 600°C) favorecem obter líquidos, - temperaturas alta (> 1000°C) produzem gás (gasificam). 	75%	12%	13%
Lenta ou Carbonização	<ul style="list-style-type: none"> - temperaturas menores que 500 °C (de 400 a 450 °C); - tempos de residência; - produz maior teor de substâncias de grande peso molecular; - favorece formar frações sólida (carvão) e líquida (alcatrão); - ocorre nos fornos antigos e artesanais, - ainda é adotada em processos industriais ou semi-industriais. 	30%	35%	35%
Gasificação	<ul style="list-style-type: none"> - opera em altas temperaturas (~ ou > 900oC), - demanda longos tempos de residência; - forma substâncias com menor peso molecular. 	5%	10%	85%

Rocha, Pérez e Cortez (2004) consideraram que o maior interesse dos países desenvolvidos em relação a pirólise estava direcionado para a obtenção de produtos líquidos, devido à elevada densidade energética e potencial para substituir combustíveis líquidos derivados do petróleo. Esta prática começou a ganhar destaque com a implementação comercial de produtos químicos e combustíveis líquidos, obtidos a partir da pirólise de diversos resíduos agroindustriais, nos Estados Unidos e Canadá, e de combustíveis líquidos e gás para a produção de potência na Europa.

Segundo Rocha, Pérez e Cortez (2004), as pesquisas têm demonstrado que as máximas quantidades de líquido pirolítico (bio-óleo) são obtidas operando o reator com elevadas taxas de aquecimento, moderadas temperaturas finais de pirólise e curtos tempos de residência, tanto da partícula de biomassa quanto dos produtos voláteis formados (fase vapor), visando minimizar as reações secundárias. **Os processos pirolíticos que cumprem com estas condições são a pirólise rápida (*flash ou fast pyrolysis*) e ultra-rápida.**

Para a realização destes processos o aquecimento pode ser direto ou interno (com queima de parte do combustível no próprio reator), e indireto ou externo, quando a energia é suprida desde fora do reator mediante gases quentes, aquecimento indireto da areia num reator de leito fluidizado circulante, etc. Os mecanismos predominantes de transferência de calor durante a de pirólise rápida são a condução e a convecção (Bridgwater e Peacocke, 1995 – citados por Rocha, Perez e Cortez, 2004).

Dependendo da configuração do reator de pirólise a contribuição de um ou outro modo pode ser maximizado. A partir da pirólise rápida, em todas as suas formas, podem ser obtidas quantidades de alcatrão primário (alcatrão que não sofre reações secundárias) de alta viscosidade e grande afinidade pela água (até 50%) em quantidades que variam entre 55% e 80% em peso referido à biomassa alimentada (base seca). BRIDGWATER (1996) – citado por Rocha, Pérez e Cortez (2004) afirma que esse bio-óleo primário pode ser utilizado como:

- 1º - combustível direto em substituição de óleo combustível;
- 2º - fonte de matéria-prima para a obtenção de produtos químicos específicos;
- 3º - fonte de matéria-prima para a obtenção de hidrocarbonetos tipo diesel ou gasolina, mediante o seu melhoramento através de processos de hidrogenação catalítica ou desoxigenação por tratamento com zeólitas.

Rocha, Perez e Cortez (2004) abordaram os seguintes tipos de reatores para pirólise rápida:

- 1º - Leito fluidizado (borbulhante e circulante)
- 2º - Reator de prato rotativo (Pirólise ablativa)
- 3º - Reator de cone rotativo (Pirólise ablativa)
- 4º - Reator de vórtice (Pirólise ablativa)
- 5º - Reator de pirólise a vácuo.

A separação e coleta dos líquidos pirolíticos é uma tarefa difícil, devido à natureza dos aerossóis contidos nos produtos voláteis. São vários os tipos de recuperadores utilizados para este propósito. Geralmente, todas as novas tecnologias combinam um sistema de resfriamento, que pode ser um condensador ou um “quencher” (resfriadores estequiométricos instantâneos) e um sistema de recuperação de aerossóis (entre os mais eficientes encontram-se os precipitadores eletrostático). Existem, também, outras possíveis configurações.

3.8 – BIORREFINARIAS

Quando a obtenção de produtos químicos é destacada nos processos de conversão biológica ou termoquímica, a *madeira* é entendida como *biomassa lignocelulósica*, e surge o conceito de *Biorrefinarias* descrito por Martins (2008) na Figura 3.6.

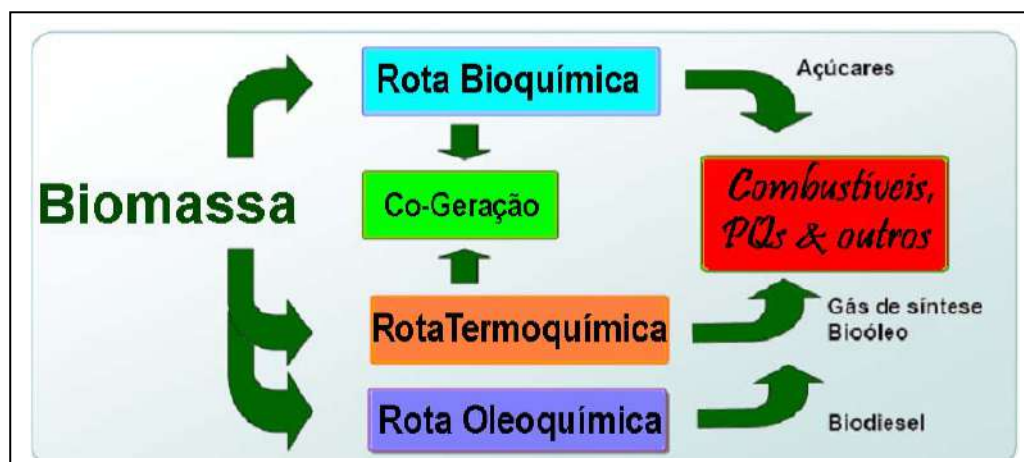


Figura 3.6 – Biorrefinarias para obtenção de combustíveis e produtos químicos (PQ's)
(Martins, 2008)

A **biomassa lignocelulósica** é uma mistura complexa de polímeros naturais de carboidratos conhecidos como celulose, hemicelulose, além de lignina e pequenas quantidades de outras substâncias, como extrativos e cinzas. A composição da biomassa apresenta um papel importante na distribuição dos produtos de pirólise. Cada material exibe uma característica particular quando é pirolizado devido à proporção dos componentes que o constituem (Rocha, Pérez e Cortez, 2004).

O **líquido pirolítico** é referenciado na literatura técnica com vários nomes, tais como: **óleo de pirólise, bio-óleo bruto, bio-combustível, líquidos de madeira, óleo de madeira, líquido condensado da fumaça, destilado da madeira, alcatrão pirolenhoso, ácido pirolenhoso**, etc. A composição e rendimento dos líquidos condensados variam segundo a tecnologia utilizada, ou seja, os líquidos condensados a partir da fase gasosa do processo de carbonização apresentam composição e rendimento diferente quando comparado com aqueles obtidos pelo processo de pirólise rápida, a vácuo, etc. **O tipo e características físicoquímicas de biomassa são também variáveis que influenciam as características e rendimentos dos líquidos condensados** (Rocha, Pérez e Cortez, 2004).

O **bio-óleo** obtido pelo processo de pirólise rápida de biomassa é uma mistura complexa de compostos orgânicos, o qual, embora tenha natureza química diferente do petróleo, pode ser considerado como um petróleo de origem vegetal. O bio-óleo apresenta uma cor marrom e a sua composição elementar é aproximada a da biomassa. Como fonte de materiais, provavelmente a mais promissora das aplicações do bio-óleo é como substituinte do fenol petroquímico na formulação de resinas fenólicas. A fração fenólica do alcatrão pode substituir o fenol petroquímico na formulação de resinas fenólicas em até 50% em massa (Rocha, Pérez e Cortez, 2004).

As moléculas grandes geram **bio-óleo** com grande viscosidade, que dificulta seu uso como combustível e como matéria-prima para a formulação de resinas fenol-formaldeído embora essa característica possa ser útil para outros fins (por ex., para substâncias com atividade superficial).

Os óleos leves da pirólise rápida encontram muitas oportunidades de aplicação, sendo este processo muito atrativo na atualidade. O bio-óleo pode ser separando em frações prontas para a obtenção de diversos produtos de interesse comercial). O reator é o elemento principal nos processos químicos aplicados. Por isso, é importante o conhecimento de aspectos relativos a: cinética química, termodinâmica, mecânica dos fluidos, transferência de calor e massa. A escolha da tecnologia de leito fluidizado para pirólise rápida é devida à sua versatilidade e custos atrativos de implantação (BRIDGWATER, 2001 – citado por Rocha, Pérez e Cortez, 2004).

A Figura 3.7 resume os tipos de produtos formados na pirólise dos principais componentes da biomassa. Esta mistura de compostos, com diferentes graus de polaridade e solubilidade não apresenta produto principal nenhum, e por isso, **só é possível seu aproveitamento na forma de famílias de compostos** (ex. ácidos carboxílicos, fenóis, compostos neutrais, etc.) (Rocha, Pérez e Cortez, 2004).

A pirólise é um processo de conversão térmica que implica na ruptura de ligações carbono-carbono e na formação de ligações carbono-oxigênio. Mais apropriadamente a pirólise é um processo de oxidação-redução na qual uma parte da biomassa é reduzida a carbono, entretanto, a outra parte, é oxidada e hidrolisada dando origem a fenóis, carboidratos, álcoois, aldeídos, cetonas e ácidos carboxílicos. Esses produtos primários combinam-se entre si para gerar moléculas mais complexas tais como ésteres, produtos poliméricos, etc. (Rocha, Pérez e Cortez, 2004).

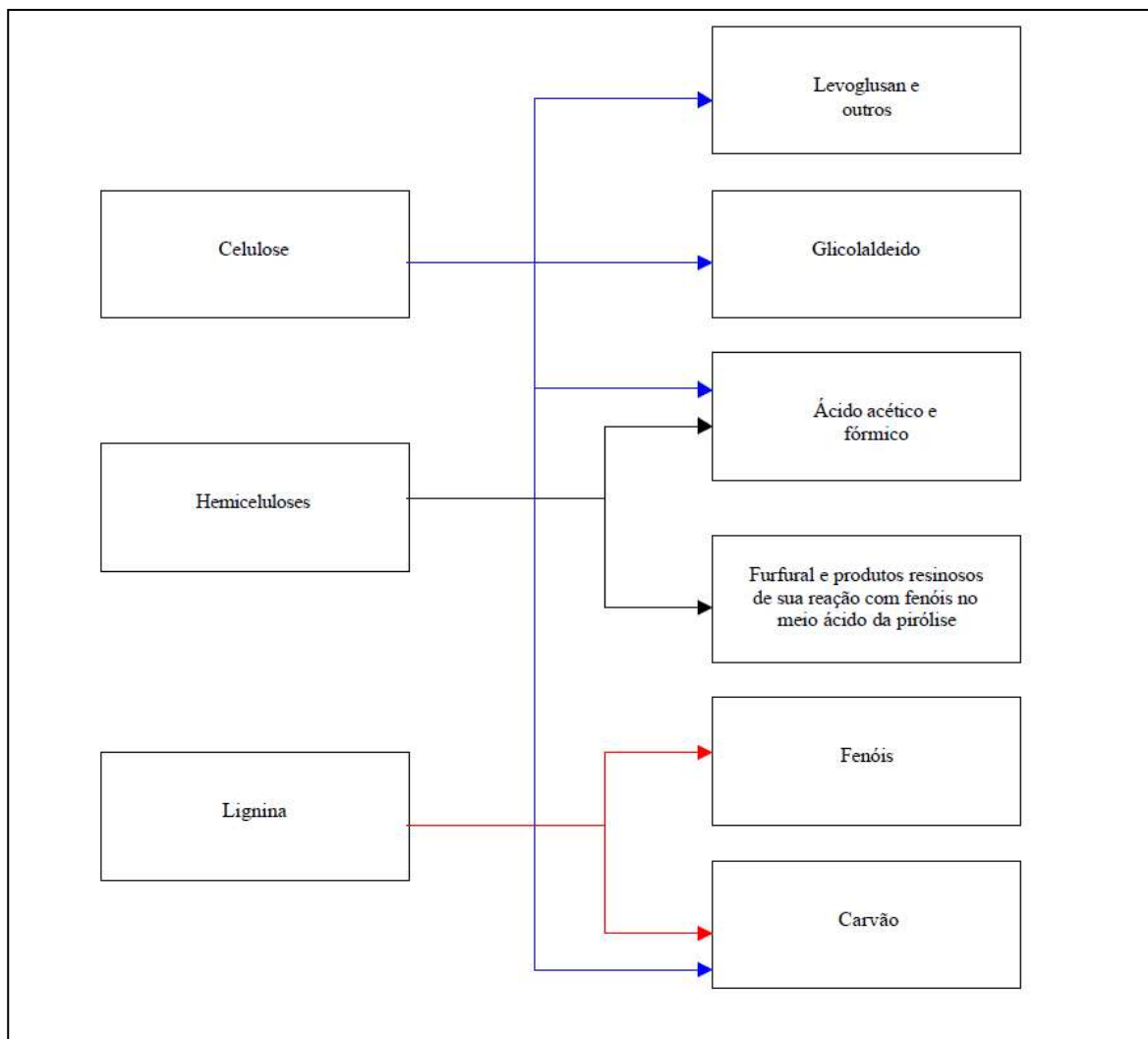


Figura 3.7 – Produtos da pirólise dos principais componentes da biomassa lignocelulósica (Rocha, Pérez e Cortez, 2004 e Quirino, 2006)

3.9 – A EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DOS FORNOS DE CARBONIZAÇÃO DE LENHA NNO BRASIL

Santos (2007) considerou que os fornos metálicos resultaram da tentativa de melhorar os métodos tradicionais de produção do carvão vegetal, para reduzir o tempo de carbonização, aumentar os rendimentos volumétricos (MDC/st), aproveitar os subprodutos do processo, diminuir custos logísticos e a emissão de poluentes.

Segundo Barcellos (2010), as tecnologias tradicionais de construção de fornos de argila e tijolos fundamentaram todo o desenvolvimento da produção de carvão vegetal no Brasil. Os fornos circulares de alvenaria constituem, ainda, a base da produção de carvão - vide a seqüência de figuras apresentadas no evento “Bases Bioenergéticas para uma Indústria Verde”.

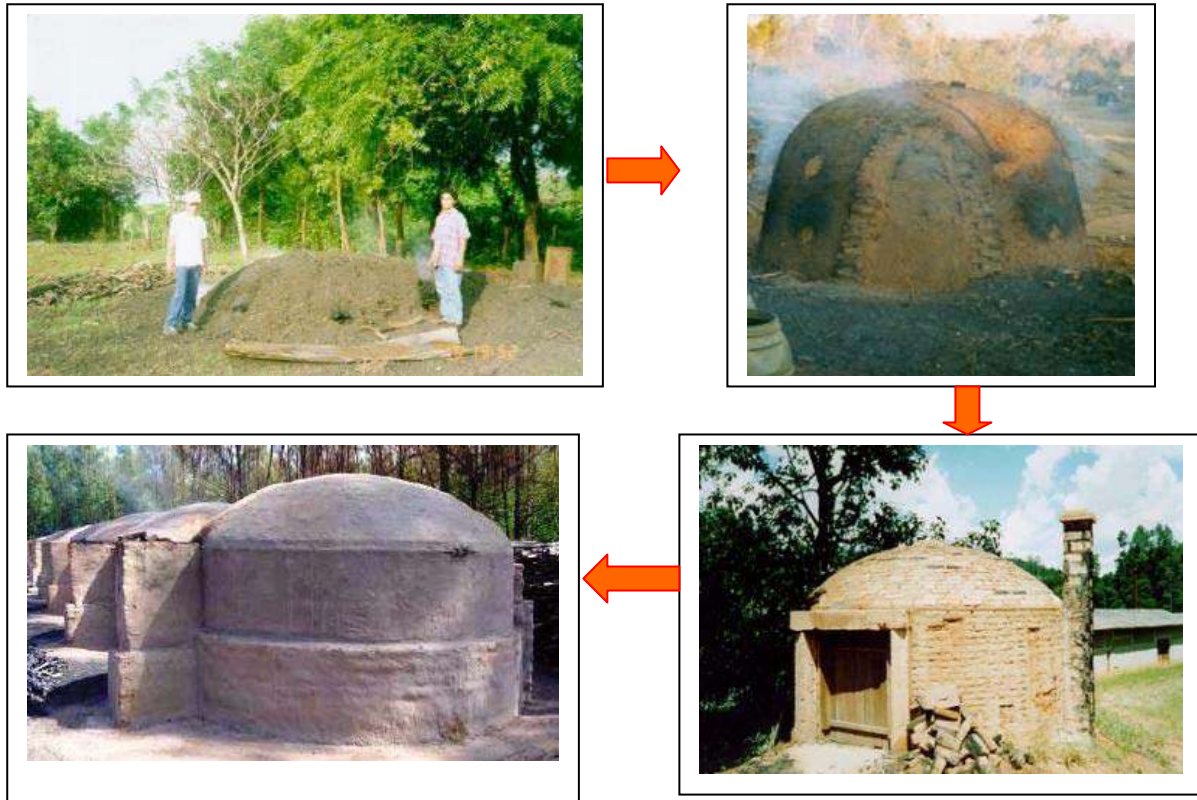


Figura 3.8 – Evolução dos tipos de fornos de terra ou barro (cava ou poço) para os modelos de alvenaria de rabo quente e colméia ainda adotados no Brasil
(Barcellos, 2010)



Figura 3.9 – Outro estágio de evolução: forno retangular (Missouri) de alvenaria
(Pimenta, 2007 – citado por Santos, 2007)

Conforme descrito por Morello (2009) o **forno JG ou PP** é uma versão melhorada de um forno de superfície de alvenaria com formato circular e com chaminés, que é o **forno colméia** (Brito, 1990). Pinheiro (2009) apresentou a denominação "**Mineirinho**" para o Forno PP, que também foi denominado por Assis (2007) de "**Biscoiteiro**" e corresponde ao **forno colméia** (Brito, 1990). Segundo Morello (2009), as evidências revelam que, após a década de 1950, o estado geral de estagnação em técnicas de carbonização de baixo aproveitamento de biomassa foi rompido, ao menos pelas siderúrgicas que se comprometeram a substituir, ainda que parcialmente, as florestas em sua função de provedoras de biomassa. Ele acessou documentação que relata que a Companhia Agroflorestal Santa Bárbara (CAF) teria adotado fornos metálicos na década de 1980.

Segundo Barcellos (2010), o primeiro forno metálico brasileiro, denominado **container**, foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira no Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa no final dos anos 80, resultando na tese de mestrado de Ferreira (1988).

A primeira unidade de forno **container**, concebida e adotada no Brasil, consistia de um cilindro metálico de 1,0 m de altura por 64 cm de diâmetro, isto é, era um tambor de 200 litros. Possuía um "poço (ou cilindro) isolante" construído em tijolos, um sistema com talha para içamento e retirada do tambor e permitir o seu tombamento até a posição horizontal, na qual era carregado por lenha. O mesmo sistema de movimentação possibilitou também a descarga do carvão vegetal com o cilindro na posição horizontal. O tempo de carbonização médio foi de 9 horas e 20 minutos com rendimento gravimétrico de 35%. Não apresentava exaustão forçada e nem queima de fumaça. O cilindro metálico ficava dentro de uma câmara refratária (de modo análogo a um forno mufla), aquecido por combustão num queimador instalado na base da parede de tijolos. E adotou-se como etapa seguinte o resfriamento fora do conjunto, além da exaustão ou tiragem forçada dos gases resultantes da pirólise. Esse primeiro forno container encontrava-se até 2002 em funcionamento (vide Figura 3.10).

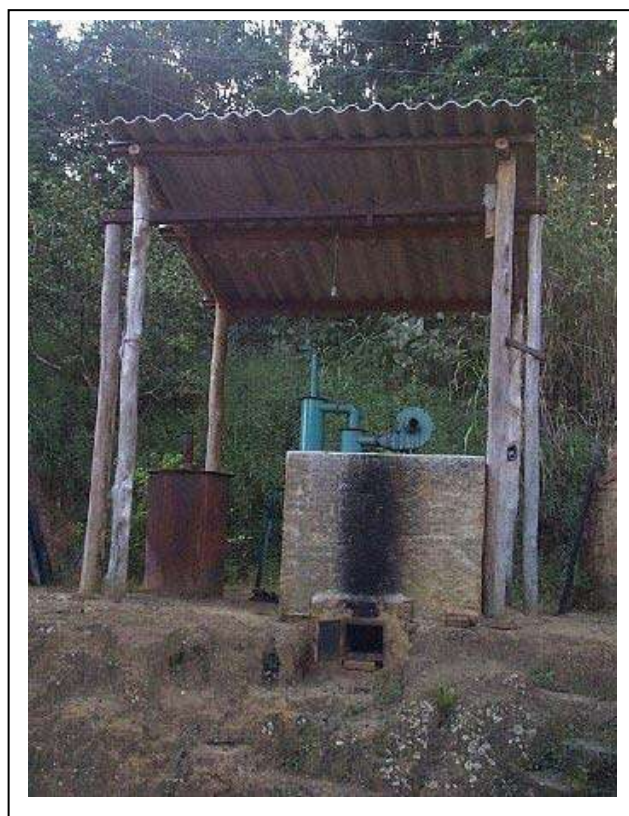


Figura 3.10 – Primeiro forno ou retorta container metálico, incluindo o tambor cilíndrico (à esquerda), uma fornalha ou "poço isolante" (à direita), a porta de alimentação inferior do queimador de lenha ou tiços, e o exaustor das emissões gasosas acima da câmara Laboratório de Painéis e Energia da Madeira, montado na Universidade Federal de Viçosa (Barcellos, 2002 e 2010)



Figura 3.11– Lenha carregada no tambor metálico antes da queima e o carvão vegetal obtido.
(Barcellos, 2010)

Durante os anos 90, pouco se estudou o forno container. No início dos anos 2000, foi construída uma outra unidade de forno container na Nicarágua, e outras se sucederam. O forno container UFV serviu de base para o desenvolvimento de um sistema aprimorado em uso na Bricarbrás, para o Forno Isomóvel e outros análogos (Barcellos, 2010).



Figura 3.12 – Retirada do container de um poço após a carbonização da madeira na Nicarágua
(Barcellos, 2002)

O **forno JG-SCC**, um aperfeiçoamento do forno metálico de batelada, apresenta-se como uma alternativa para aumento do volume de produção em função da possibilidade de uso de vários cilindros (enquanto um esfria, outro é carregado com lenha), o que lhe confere característica de semicontínuo.



Figura 3.13 - Forno metálico JG-SCC
(Pimenta, 2007)



Figura 3.14 – Bateria de fornos JG metálicos
(Barcellos, 2010)

Segundo Santos (2007) os **fornos metálicos podem ser construídos para operar em regime batelada, semicontínuo e contínuo (retorta)**. O **forno metálico batelada** pode ser fixo ou móvel e essa escolha depende da localização da área de extração de matéria-prima, do custo de transporte e da mão-de-obra disponível (Pinheiro, 2006). **Os fornos metálicos descontínuos** são empregados em duas tecnologias de carbonização industrial de madeira e resíduos vegetais adotadas no Brasil:

- 1ª - utiliza **cilindros metálicos verticais em fornos câmara muflados e queimadores de fumaça**;
- 2ª - adota **caixões metálicos horizontais com fonte externa de gases quentes**.

Os fornos containers cilíndricos da UFV e adotados na CIAFAL e BRICARBRAS são os caixões que podem receber cilindros metálicos contendo a lenha que não entra em contato direto com a chama dos queimadores; sendo, portanto, fornos câmara muflados. Os **fornos containers retangulares da DPC** (outro grupo de pesquisadores) são os caixões metálicos que recebem as cargas em cestos metálicos transportados em caminhões.

Barcellos (2010) destacou que em 2001 foi patenteado o forno container. Também, surgiu a idéia de incinerar a fumaça emitida no queimador de lenha e tiços do forno e pelo container metálico da carbonização de madeira. E foi construída uma fornalha para queimar tais emissões gasosas, que passou a ser denominada de “**queimador de fumaça**”. No período de 2004 a 2005 surgiu o conceito de “**isolamento removível**” e as idéias de aproveitar as energias liberadas nas etapas de pirólise e resfriamento para secar a lenha. Foi possível adotar-se grandes cestos de estrutura metálica e telas de arame para conter a lenha e reter o carvão convertido (Barcellos, 2010).



Figura 3.15 – Lenha preparada para secagem (alto à esquerda) e carbonizada (alto à direita)
(Barcellos, 2010)

Os fornos metálicos retangulares foram desenvolvidos por outro grupo de pesquisadores e empreendedores através da empresa DPC e são apresentados na próxima figura.



Figura 3.16 – Aspectos da tecnologia de fornos metálicos retangulares descontínuos
(DPC, 2010)

Apenas um forno metálico contínuo (retorta) operou no Brasil, especificamente na ACESITA, entre 1986 e março de 1993 (LATORRE e CUNHA, 2006 – citado por SANTOS, 2007). Segundo Pinheiro (2006), com capacidade produtiva de 3.000 MDC por mês num tempo total de carbonização e resfriamento de cerca de 10 horas, apresentava rendimentos em carvão entre 30 e 38% e custo de quase US\$500 mil.

3.10 – MÉTODOS DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL DO CARVÃO DE MADEIRA

O principal elemento do sistema produtivo de carvão vegetal é o forno ou a retorta de carbonização. Segundo Domac, Trossero e Siemons (2008) em seu estudo elaborado para a FAO, dois grandes grupos de equipamentos estão associados aos métodos de produção de carvão vegetal:

1º - Fornos (de terra, alvenaria e concreto)

Parte da alimentação de lenha serve para iniciar e controlar o processo termoquímico, ocorrendo um contato direto entre os vapores da pirólise (que sofrem queima) com a alimentação de biomassa, caracterizando o aquecimento interno.

Tradicionalmente, ou primitivamente, o carvão vegetal é produzido feito em covas ou debaixo de montes de terra, sendo ainda muito encontrados nos países em desenvolvimento e industrializados! Os fornos colméia são ainda usados no Brasil, porém, foram substituídos nos EUA ainda na primeira metade do Século XX pelo modelo Missouri. **Os métodos dos fornos para fabricar carvão vegetal constituem fortes emissores de gases poluentes (principalmente o metano não queimado e outros compostos de carbono)** (Domac, Trossero e Siemons, 2008) .

2º - Retortas.

A maioria dos produtores industriais de carvão vegetal emprega retortas **para separar os vapores da pirólise da lenha carbonizada e da lenha natural que está sendo alimentada ao equipamento, os quais constituem a única fonte de energia para queimar e sustentar o processo termoquímico** (vide Figura 3.17).

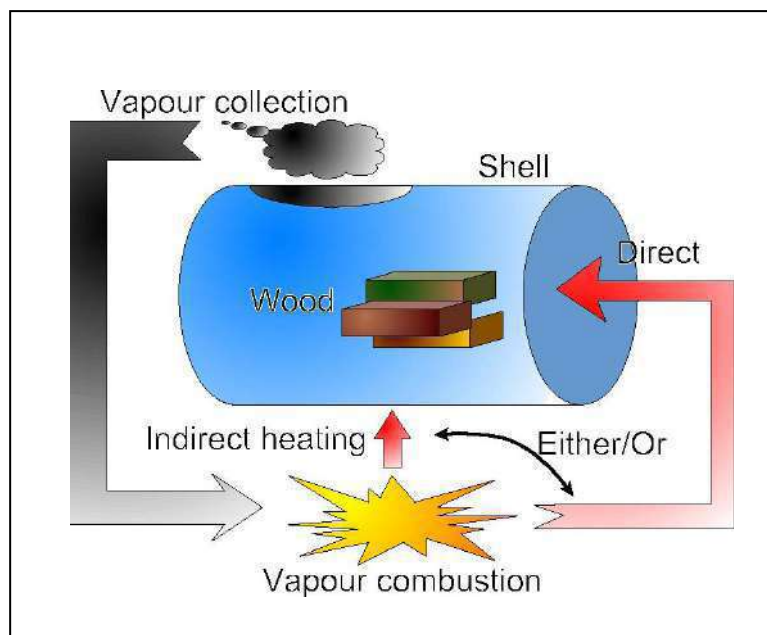


Figura 3.17 - Princípio operacional da carbonização industrial de madeira numa retorta
(Domac, Trossero e Siemons, 2008)

Excepcionalmente, são usados combustíveis adicionais, para o caso de dar a partida ao equipamento, ou quando a lenha está úmida. Evita-se, também, o contato direto entre a lenha alimentada e oxigênio atmosférico para garantir que toda a biomassa seja convertida a carvão vegetal (carbono fixo) ao invés de produzir os gases dióxido e monóxido de carbono. No passado, as retortas também possibilitavam separar e produzir outros reagentes químicos, como ácido acético, álcool de madeira (*wood vinegar*) e metanol, hoje obtidos por processos mais rentáveis (Domac, Trossero e Siemons, 2008).

A produção de carvão vegetal é uma atividade que depende da matéria-prima, mão-de-obra e sistema produtivo. A matéria-prima necessita possuir algumas características, como, p. ex., alto teor de lignina e densidade básica elevada, para garantir maior produção de carvão vegetal. O sistema produtivo deve proporcionar adequada condição de trabalho, procurando estabelecer estratégias para obter menor tempo do ciclo da carbonização, sem alterar o rendimento e a qualidade do carvão vegetal produzido (adaptado de Assis, 2007).

Existe uma grande variedade de equipamentos termoquímicos operando no campo da produção de carvão vegetal, cuja classificação pode amparar-se em diversos fatores, descritos por Assis (2007):

Tabela 3.5 – Classificação dos fornos de carbonização quanto à fonte de energia.
(adaptado de Pinheiro, 2006- citado por Assis, 2007)

FONTE DE ENERGIA	DESCRIÇÃO SUCINTA	FORNO(S)
Queima Interna	<p>É feita a combustão controlada de parte do material;</p> <p>Inicia-se a carbonização com a introdução controlada de ar no forno, de modo a queimar parte da lenha empilhada e aquecer o interior até atingir a temperatura de carbonização.</p>	Meda, Alvenaria, Encosta e Metálicos
Queima em Fornalha Externa	<p>Os gases quentes dos produtos da combustão são introduzidos no forno para secar a lenha e realizar a carbonização.</p> <p>Esse sistema é mais caro, consome menor quantidade de madeira para iniciar o processo de carbonização e produz um carvão de melhor qualidade e com maior rendimento.</p>	Colméia, Container
Recirculação de Gases ou Aquecimento Indireto	<p>Emprega-se uma fonte externa de calor para aquecer a biomassa contida numa câmara fechada;</p> <p>A operação pode ser contínua ou em batelada.</p> <p>Devido ao elevado custo de investimento da planta em escala industrial, não são economicamente viáveis, se o objetivo único for a produção de carvão vegetal.</p>	

Tabela 3.6 – Outras classificações para fornos de carbonização
(Assis, 2007)

CRITÉRIO	FORNO(S)	DESCRIÇÃO SUCINTA
Mobilidade	Fixos	O forno ou a câmara de carbonização não são transportáveis
	Móveis	A câmara de carbonização pode ser movida do local de carregamento para dentro de um ambiente de queima, e depois, para fora visando a descarga da lenha convertida em carvão.
Regime de Operação*	Contínuos	São mais eficientes, porém mais sofisticados e caros e ainda não aplicados comercialmente, constituindo temas de pesquisas e desenvolvimento, sobretudo de grandes empresas consumidoras de carvão vegetal, como algumas siderúrgicas brasileiras.
	Descontínuos	são os mais empregados, constituindo a maioria dos fornos brasileiros, os quais trabalham por cargas ou bateladas . A maioria é de modelos fixos, embora existam fornos metálicos descontínuos móveis, que são considerados semi-contínuos .
Evolução Cultural e Tecnológica	Primitivos	São do tipo medas ou caieiras.
	Convencionais	- incluem os de alvenaria ou superfície, rabo quente e encosta

* (Nogueira e colaboradores, 2003 – citados por Assis, 2007)

3.11– FORNOS DE CARVOEJAMENTO DE MATÉRIA VEGETAL NO BRASIL

Considerando-se as distintas geometrias encontradas e que maioria dos fornos de carvoejamento opera em regime descontínuo ou batelada, Guimarães Neto (2005) destacou a seguinte tabela elaborada por Valente e Lelles (1983).

Tabela 3.7 – Classificação de fornos de carvoejamento descontínuos utilizados no Brasil
(Valente e Lelles (1983) – citado por Guimarães Neto (2005) e Barcelos (2002))

TIPOS DE FORNOS	DIÂMETRO, E CAPACIDADE	TIPO DE CHAMINÉ
<p>ALVENARIA DE SUPERFÍCIE COM FORNALHA INTERNA</p> <p>Cilíndricos com teto ou cúpula hemiesférica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Padrão, - Pequeno, - Grande <p>Não-cilíndricos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rabo quente ou biscoiteiros - Retangulares 	<p>5 m 4 m até 10 m</p> <p>2 a 4 m</p>	<p>Chaminé lateral ou tiragem central</p> <p>Chaminé lateral ou tiragem central</p>
<p>ENCOSTA ou BARRANCO</p>	<p>3 a 4m 10 a 14 estéreos*</p>	<p>Chaminé lateral com ou sem tiragem central</p>
<p>METÁLICOS</p> <p>Cilíndricos - <i>container</i></p> <p>Retangulares</p>	<p>2 a 3 m</p> <p>2 a 3 m</p>	<p>Chaminé lateral ou tiragem central</p>
<p>ALVENARIA COM FORNALHA EXTERNA</p>	<p>Variável</p>	<p>Chaminé lateral ou tiragem central</p>

* 1 (um) estéreo corresponde a 1 (um) metro cúbico de lenha

Segundo Quirino (2006), **praticamente todo o carvão no Brasil é produzido por fornos de alvenaria, dos seguintes tipos:**

- Forno Rabo Quente
- Forno de Encosta
- Forno de Superfície
- Forno de Superfície com Câmara Externa
- Forno tipo Missouri (USA)

Pinheiro, Sampaio e Bastos Filho (2005) destacaram que cerca de 80% da produção de carvão vegetal no Brasil é realizada em fornos de alvenaria do tipo rabo-quente ou JG. Assis (2007) considera que a quase totalidade do carvão vegetal produzido é obtida em fornos de alvenaria.

No Brasil, o sistema predominante de produção de carvão vegetal é constituído de fornos meia-laranja ou rabo quente. São fornos de superfície adotados quando o terreno é plano. Os fornos de encosta são usados em regiões de relevo acidentado e que podem carbonizar diferentes volumes de lenha variando normalmente na faixa de 6 a 20 estéreos (*quantidade de lenha que pode ser empilhada ordenadamente em um metro cúbico*) (Brito, 1990 – citado por Colombo, Pimenta e Hatakeyama, 2006).

Apesar de serem mais baratos e fáceis de construir, os fornos rudimentares, ou tradicionais, do tipo rabo quente, de encostas ou barrancos e de alvenaria, apresentam baixos rendimentos gravimétricos

rendimento em função do peso de lenha enornado – em carvão vegetal com perdas em forma de fumaça poluente que podem chegar a 50% do carbono inicialmente contido na lenha enornada e 75% em peso dessa mesma lenha. Rendimentos gravimétricos em carvão vegetal na faixa de 25% obtidos nos fornos tradicionais representam uma perda econômica expressiva e subutilização da lenha carbonizada (Pimenta, 2002 – citado por Colombo, Pimenta e Hatakeyama, 2006).

O **forno rabo-quente** é feito de alvenaria (argamassa de barro e areia), sendo o mais utilizado por pequenos produtores por ser de simples construção e baixo custo. O barro não deve ser retirado da superfície do solo, pois esse material deve estar livre de matéria orgânica, como restos vegetais (Emprego e Renda, 2010). Possuem a em forma de “colméia”, com orifícios de entrada de ar denominados “tatus”, “filas” e “baianas”. No final da carbonização, o forno deve ser barrelado para impedir a entrada de ar no seu interior e possibilitar o esfriamento a seco (Guimarães Neto, 2005).

O **forno de encosta** é próprio para terrenos acidentados. A encosta é aproveitada como parede do forno, economizando material para construção. Para encostas não muito íngremes constrói-se o forno de meia encosta. Metade é cavada ali e outra metade é feita com tijolo. O processo de construção de um forno de encosta é muito parecido com o do rabo-quente. A diferença fica mesmo por conta do fato de ser necessário escavar as paredes (Emprego e Renda, 2010) no solo para formar uma “camisa cilíndrica e podem ter uma cúpula de alvenaria e chaminés com ou sem tiragem central (Guimarães Neto, 2005).

O **forno container** pode ser feito de **alvenaria ou com um material metálico**. O *container de alvenaria* possui uma estrutura cilíndrica construída de tijolos, com 60 cm de sua altura total, localizado abaixo do solo sobre um poço onde é alocado. O **container metálico** é um cilindro de chapa metálica, com capacidade para 3 m³ de lenha. O local onde é colocada a madeira deve ser reforçado e o manuseio do *container metálico* é facilitado por um sistema de trilhos (Emprego e renda, 2010).

Barcellos (2002) considerava que eram objetos de estudos, os seguintes tipos de fornos:

a) fornos de alvenaria retangulares da Vallourec & Mannesmann – possuem grande capacidade volumétrica, sendo construídos para permitir carga e descarga mecanizada. São fornos de superfície, porém, devido ao seu grande tamanho, a cinética de carbonização é bastante irregular dentro do forno. O controle da carbonização é efetuado através da determinação das temperaturas em vários pontos por meio de um medidor de emissões de radiação infravermelha. São equipados com sistemas de recuperação de alcatrão. E o tempo de residência da madeira no forno é da ordem de 12 a 15 dias.

b) fornos de alvenaria para carbonização contínua em módulos horizontais – são interligados por dutos e válvulas que permitem escoar os gases através dos reatores para secar, carbonizar e resfriar o carvão vegetal, empregando madeira com tamanhos variados.

c) fornos de alvenaria para carbonização contínua em módulos verticais – utilizam um deles em aço inoxidável, com capacidade para 1250 ton mensais. O primeiro reator seca a madeira em comprimento máximo de 30 cm, e a carbonização ocorre no segundo. O carvão vegetal resultante possui as seguintes características tecnológicas (Análise Imediata): carbono fixo: 85% a 93%; poder calorífico: 8.100 kcal/kg a 8.300 kcal/kg; voláteis: 8 a 9%; cinzas: até 2%; umidade: 1 a 5%.

d) fornos de alvenaria “container” – podem ser considerados como sistemas conjugados que reúnem as vantagens do bom isolamento térmico dos fornos de alvenaria e o rápido resfriamento dos fornos metálicos.

Assis (2007) destacou que (no Brasil) sabe-se que algumas empresas tem investido em sistemas de carbonização voltados para o aumento da produção e na queima dos gases gerados, o que reduz drasticamente o problema de poluição do ar. Assis (2007) considerou ainda que existe uma carência de alternativas viáveis economicamente para o desenvolvimento de protótipos de sistemas de carbonização que incorpore ação, tanto em relação ao aumento da produtividade como na melhoria das condições de vida do carvoeiro. Por isso, a maioria do carvão vegetal é ainda produzida em sistema de carbonização rudimentar que, além de ser menos eficiente, expõe o trabalhador a condições fortemente insalubres. É de notório conhecimento que, no Brasil, utilizam-se fornos de carbonização de madeira, em alvenaria, os quais levam a perdas consideráveis dessa matéria-prima, devido à baixa taxa de conversão madeira/carvão vegetal.

3.12 - CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 3

1ª - **Carvoejamento** é o processo de **transformação lenta da madeira em carvão**. **Carvoaria** é onde **localizam-se os fornos de carbonização** e onde ocorre o recebimento da madeira até o despacho do produto-final.

2ª - A carbonização da lenha de **forma tradicional é lenta e dura vários dias**.

3ª - O controle da carbonização tradicional depende apenas da experiência do carvoeiro, baseada em tentativas e erros, sem fundamentos científicos.

4ª – O processo de carbonização pode ser **contínuo ou descontínuo**.

5ª – **A pirólise lenta** é também denominada de **artesanal, rústica ou tradicional**. Ocorre em fornos antigos e artesanais. É realizada com fogo em contato direto com a lenha enquanto houver ar e só depois de cessado o suprimento as entradas são vedadas.

6ª – **A pirólise rápida** é também denominada **Flash**.

7ª – **No processo de carbonização de vegetais** (madeira ou resíduos) **obtem-se como produtos o carvão, ácido pirolenhoso** (ácido acético, metanol, alcatrão solúvel, água e outros), **alcatrão insolúvel e gases não condensáveis**.

8ª – A carbonização visa produzir carvão vegetal, e a destilação refere-se à produção de ácido pirolenhoso, enquanto que o produto principal de gasificação é uma mistura de gases combustível.

9ª – **Líquido pirolítico** é referenciado na literatura **como óleo de pirólise, bio-óleo bruto, bio-combustíveis, líquidos de madeira, óleo de madeira, líquido condensado da fumaça, destilado da madeira, alcatrão pirolenhoso, ácido pirolenhoso**.

13ª – **Forno JG ou PP é uma versão melhorada do forno colméia**. Alguns autores já apresentaram a denominação de **“Mineirinho”** e de **“Biscoiteiro”** para este forno batizado de JG que foi desenvolvido pelo Eng. M.Sc. José Gonçalves Bastos Filho.

14ª – Os fornos **containers cilíndricos são do tipo câmara muflada** e surgiram do desenvolvimento da tecnologia empregada na produção de carvão vegetal, em que a lenha não entra em contato direto com a chama dos queimadores.

16ª – Os **fornos containers retangulares** empregam caixões metálicos que recebem as cargas em cestos metálicos transportados em caminhões.

3.13 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 3

1ª - Existem basicamente quatro métodos de conversão termoquímica da biomassa: três de termodestrução parcial (pirólise, a liquefação e gasificação - que é o caso limite da pirólise) e um de termodestrução total, que é a combustão. Cada um desses processos conduz a um conjunto de produtos, pois utilizam diferentes configurações de equipamentos, operando de modo particular. Os processos de pirólise e liquefação da biomassa são os que proporcionam produtos em forma líquida diretamente. (adaptado de Rocha, Pérez e Cortez, 2004).

2ª - O conhecimento das condições operacionais dos sistemas de carbonização é determinante para a escolha correta da rota tecnológica que se deve utilizar para otimizar o processo e o rendimento de acordo com a matéria prima empregada e o produto final de interesse. É possível dividir em 5 etapas (faixas de temperatura) os fenômenos de conversão da madeira ou biomassa para carvão vegetal.

3ª - Destacam-se três termos usados para descrever o processo de carbonização, dependendo do produto final desejado:

Carbonização – produto final: carvão vegetal.

Destilação – produto final: licor pirolenhoso.

Gaseificação – produto final gás combustível.

4ª - As características do produto final e o balanço material de conversão nos processos de carbonização são dependentes da composição da matéria prima e das condições operacionais. A matéria-prima necessita possuir algumas características, como, p. ex., alto teor de lignina e densidade básica elevada, para garantir maior produção de carvão vegetal.

5ª - Fornos de carvão que empregam recirculação de gases ou aquecimento indireto como fonte de aquecimento para o processo de carbonização não são alternativas viáveis para obtenção de carvão como produto final devido ao elevado custo de investimento da planta em escala industrial.

6ª - **No Brasil, o sistema predominante de produção de carvão vegetal é constituído de fornos meia-laranja ou rabo quente.** Existe uma carência de alternativas viáveis economicamente para o desenvolvimento de protótipos de sistemas de carbonização que incorpore ação, tanto em relação ao aumento da produtividade como na melhoria das condições de vida do carvoeiro. Por isso, a maioria do carvão vegetal é ainda produzida em sistema de carbonização rudimentar que, além de ser menos eficiente, expõe o trabalhador a condições insalubres e contribui significativamente na emissão de gases poluentes ao meio ambiente.

3.14 - REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 3

ASSIS, C.O. – **Sistema Alternativo para Carbonização de Madeira** - Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia da Madeiras, Universidade Federal de Viçosa, Orientador: Dr. Paulo Fernando Trugilho, Minas Gerais, 2007.

ASSIS, C.O.; TRUGILHO, P.F.; MENDES, L.M.; SILVA; J.R.M. da e LIMA, J.T. – **Sistema Alternativo para Carbonização de Madeira – *Scientia Forestalis***, Piracicaba, v. 36, n. 78, p.133-140.

BARCELLOS, D.C. – **Forno Container para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e controle da poluição** – Tese de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Orientador: Dr. Alexandre Santos Pimenta, Minas Gerais, 2002.

BARCELLOS, D.C. – **Avanços tecnológicos nos processos de produção de carvão vegetal de florestas plantadas** – Seminário *Bases Energéticas para uma Indústria Verde – UNIFEMM*, 5 a 7 de abril de 2010 – extraído de www.fiemg.org.br/admin/BibliotecaDeArquivos/Image.aspx?ImgId... em 08 de junho de 2010.

BRIANE, D., DOAT, J. - **Guide Technique de la Carbonization** - Aix-en-Provence, EDISUD, 1985. 180 p. – citado por Brito (1990)

BRIDGWATER, A.V. - **Production of high grade fuels and chemicals from catalytic pyrolysis of biomass** - Catalysis Today, no29, Elsevier, pp.285-295, 1996;

BRIDGWATER, A.V. & PEACOCKE, C. - **Biomass Fast Pyrolysis** - Presented at: Second Biomass Conference of the Americas, Portland, USA, august 1995, pp. 1037-1047 –citados por Rocha, Pérez e Cortez (2004).

BRITO, J.O. - **Princípios de Produção e Utilização de Carvão Vegetal de Madeira**- Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura “Luiz De Queiroz”, Universidade de São Paulo – 1990, **Documentos Florestais**, Piracicaba (9): 19, maio, 1990.

COLOMBO, S.F.O.; PIMENTA, A.S.; HATAKEYAMA, K. – **Produção de Carvão Vegetal em Fornos Cilíndricos Verticais: Um Modelo Sustentável** – XIII SIMPEP, Bauru, SP, 6 a 8 de Novembro de 2006.

CONNOR, M.A. e PISKORZ, J.- **Advances in thermochemical biomass conversion**, p. 1502, 1994 – citados por Rocha, Pérez e Cortez (2004).

DOAT, J. & PETROF, G. - **La Carbonization des Bois Tropicaux - Bois et Forêts des Tropique - Nogent sur Marne**,(159): 55-64, 1975 – citado por Brito (1990).

DOMAC, J. e TROSSERO, M. (Editors) e SIEMONS, R. (Colaborador) – **Industrial Charcoal Production** – FAO TCP/CRO/3101 (A) Development of a sustainable charcoal industry – North-West Croatia Regional Energy Agency, Zagreb, Croatia, June 2008.

DPC – **Processo Drying-Pyrolysis-Cooling** – DPC=Thermal Processing, acessado e extraído de www.dpcbiomassa.com.br em 05 de junho de 2010.

EMPREGO E RENDA – **Carvão para churrasco** - - Extraído em 16 de maio de 2010 da EDIÇÃO 26 <http://www.empregoerenda.com.br/paginas/359>

EMPREGO E RENDA – **Carvão para churrasco** - - Extraído em 16 de maio de 2010 da EDIÇÃO 26 <http://www.empregoerenda.com.br/paginas/359>

FERREIRA, L.H.C. – **Desenvolvimento de uma retorta metálica para carbonização da madeira** – Tese de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 1988.

GUIMARÃES NETO – **Avaliação técnica e econômica de um forno container em escala industrial** – Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Orientador: Prof. Dr. Alexandre Santos Pimenta, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2005.

INFOENER - Carvão vegetal no Brasil - Sistema de Informações Energéticas – disponível em [HTTP://infoner.iee.usp.br/scripts/biomassa/BR_carvao.asp](http://infoner.iee.usp.br/scripts/biomassa/BR_carvao.asp) (acessado originalmente em maio de 2004).

LÚCIO, A. – **Utilização da Biomassa na Indústria Siderúrgica** – I Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, Belo Horizonte, Minas Gerais, em 21 de outubro de 2008, extraído em 11 de agosto de 2009 de <http://painelflorestal.com.br/upload/dpc.pdf>

MARTINS, A.F. – **Biorrefinarias** – I Seminário de Madeira Energética- MADEN 2008, em 03 de setembro de 2008, Instituto Nacional de Eficiência Energética INEE, extraído e acessado em 21 de abril de 2009.

MORELLO, T.F. – **Carvão Vegetal e Siderurgia: de elo perdido a solução para um mundo pós-Kioto** – Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, Orientador: Dr. Ricardo Abramovay, São Paulo, 2009.

NOGUEIRA, L.A.h., LORA, E.E.S. – **Dendroenergia; Fundamentos e Aplicações**, 2ª Edição - Rio de Janeiro, 2003.

OSSE, L. – **Estudo Comparativo entre Fornos de Superfície e Encostas para Fabricação de Carvão Vegetal** – Rev. Brasil Florestal. 3(12)29-32, 1972.

PIMENTA, Alexandre Santos - **Curso de atualização em carvão vegetal** - Apostila, documento interno, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2002.

PIMENTA, A.S. - **Comunicação privada** – citada por Sueli de Fátima de Oliveira Miranda Santos - setembro, 2007

PINHEIRO, P.C.C. - **A produção de carvão vegetal: teoria e prática** - Elmo Viana, Maria Emília Antunes de Rezende, Paulo César da Costa Pinheiro, Ronaldo Santos Sampaio. 1ª. Edição, Belo Horizonte: Edição do autor, 2006.

PINHEIRO, P.C.C.; SAMPAIO, R.S.; BASTOS FILHO, J.G. – **Organização da Produção de Carvão Vegetal em Fornos de Alvenaria** - *Biomassa & Energia*, v. 2, n. 3, p. 253-258, 2005, acessado em 13 de junho de 2010 e extraído de <http://www.renabio.org.br/publicacoes.php?l=revista>

PINHEIRO, P.C.C. - **Produção de carvão vegetal no Brasil** – Seminário “Encuentro Regional sobre Biocombustiblesy Energias Renovables”, UDELAR, Montevideo, Uruguay, 23 de abril de 2009.

QUIRINO, W.F. - **Possibilidades de valorização energética dos resíduos da cadeia produtiva madeira e móveis** - Congresso Paraense de Soluções Tecnológicas e Ambientais como Fator De Competitividade da Cadeia Produtiva Madeira e Móveis (2006), acessado e extraído de <http://www.pa.sebrae.com.br/madmoveis/pdfs/Appossibvalenergetica.pdf> em 07 de junho de 2010.

REZENDE, M.E. – **Pirólise e Biocarboquímica no Brasil** - Workshop “Madeira Energética”, BNDES, Rio de Janeiro, 27 de maio de 2007; disponibilizado pelo Instituto Nacional de Eficiência Energética-INEE, acessado e extraído de http://www.inee.org.br/forum_downloads.asp?Cat=forum

REZENDE, M.E. e CARAZZA, F. – **Pirólise e Biocarboquímica no Brasil - Bases para desenvolver uma nova indústria** – Forum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2008, acessado e extraído de <http://painelflorestal.com.br/upload/biocarbo.pdf> em 08 de junho de 2010.

ROCHA, J. D.; PÉREZ, J. M.; CORTEZ, L. A. B. – **Aspectos Teóricos e Práticos do Processo de Pirólise de Biomassa** – Curso “ Energia na Indústria de Açúcar e Alcool”, UNIFEI, Itajubá, 12 a 16 de julho de 2004.

SAMPAIO, R. S. - **Produção de metais com biomassa plantada** – in: MELLO, M. G. (org.) - **Biomassa - Energia dos Trópicos em Minas Gerais** – pg.163-178 - LabMídia/FAFICH, Belo Horizonte, 2001.

SANTOS, S.F.O.M. - **Produção de carvão vegetal em cilindros metálicos verticais: alguns aspectos referentes à sustentabilidade** – Dissertação de Mestrado, Orientador: Kazuo Hatakeyama, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2007.

VALENTE, O.F. e LELLES, J.G. de – **Carbonização da madeira** – in: MASUDA, H. (Editor) – **Carvão e coque aplicados à Metalurgia** – p. 85-151, Associação Brasileira de Metalurgia-ABM, São Paulo, 1983.

VITAL, M.H.F. e PINTO, M.A.C. – **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil** – Siderurgia, BNDES Setorial 30, p. 237- 297, setembro de 2009.

CAPÍTULO 4

FORNOS DE TERRA, ALVENARIA E CONCRETO NAS CARVOARIAS

4.1 - Fornos de terra ou barro para produzir carvão vegetal

4.1.1 – Caieira ou Forno de Poço, Vala, Cova, Trincheira, Bacurau, Carvoeira ou Balão

4.1.2 – Forno meda

4.2 – Fornos de Tijolos ou Alvenaria

4.2.1 – Forno Colméia ou Meia Laranja ou Rabo quente – Sem Chaminé

4.2.2 – Forno de Tijolos Semi-Esféricos usado na Amazônia – Colméia ou Rabo Quente

4.2.3 – Forno Mineirinho

4.2.4 – Forno Colméia ou de Superfície - com Chaminé

4.2.5 – Forno de encosta ou barranco

4.2.6 – Forno Colméia de barranco

4.2.7 – Forno Colméia de superfície e barranco com chaminés altas

4.2.8 – Forno Iwate com chaminé

4.3 – Fornos retangulares com estrutura metálica e alvenaria

4.4 – Constatações do capítulo 4

4.5 – Conclusões do capítulo 4

4.6 – Referências do capítulo 4

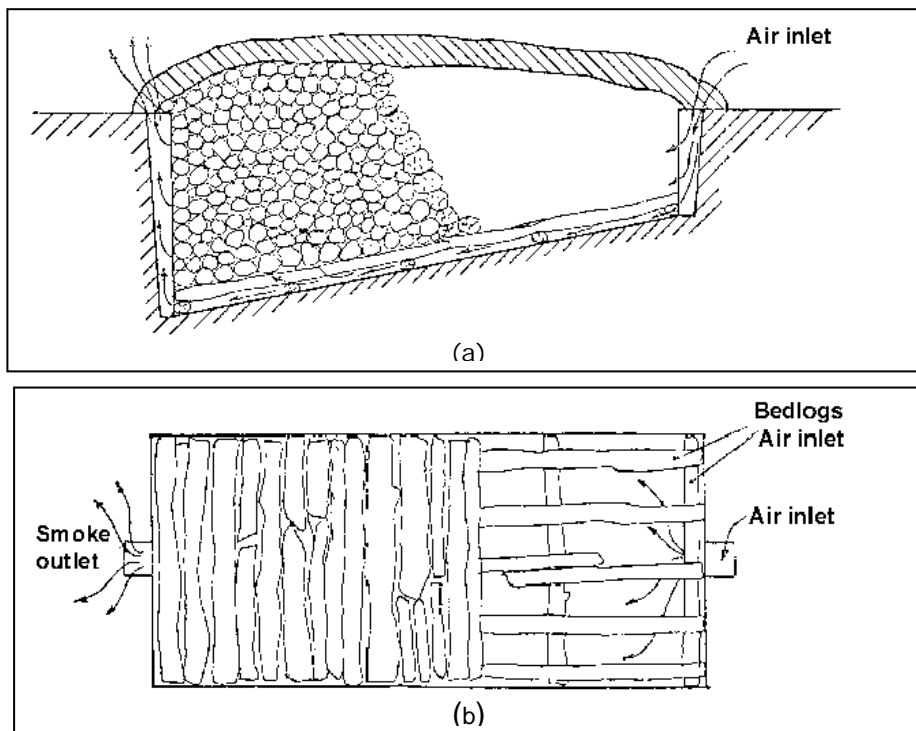
CAPÍTULO 4

FORNOS DE TERRA, ALVENARIA E CONCRETO NAS CARVOARIAS

4.1 – FORNOS DE TERRA OU BARRO PARA PRODUZIR CARVÃO VEGETAL

4.1.1 - Caieira ou Forno de Poço, Vala, Cova, Trincheira, Bacurau, Carvoeira ou Balão

É um forno primitivo para fazer carvão, situado geralmente no próprio local onde se corta a madeira. Consiste de uma vala aberta no chão onde é colocada a lenha e esta recoberta com terra e queimada de forma lenta. A ignição geralmente é feita por um dos vários orifícios para entrada de ar, normalmente no topo do monte e estrategicamente preparado para tal (Santos, 2007; Houaiss, 2009).



Figuras 4.1 - Desenhos esquemáticos dos fornos de vala, trincheira ou poço com (a) seção longitudinal coberta com terra e (b) descoberta para produzir carvão vegetal (FAO, 1983, reimpresso em 1987),



Figura 4.2– Caieira em Gana (África) durante a queima de lenha, modificada em com chaminés e cobertura metálica, entre estacas de madeira e rejantes de terra (FAO, 1987 – Fotografia de Lejeune)

Se o solo for argiloso ou friável, é possível escavar canais de passagem dos vapores e gases ao redor da vala ou trincheira de uma caieira (FAO, 1987).

A produção do carvão vegetal em caieiras é um método antigo baseado em experiências vividas pelas populações tradicionais da região Norte do Brasil. A sua medição é feita em palmos de mão. Para construir uma caieira são medidos 25 palmos de comprimento e oito palmos de largura. Para cortar a madeira para lenha, são necessários 2 dias quando se usar o machado e 2 horas usando a motosserra. A lenha tem o comprimento de 2m de largura e 1m de altura, toda a lenha é empilhada e são necessários 2 dias para arrumar a caieira e 1 dia para cobrir com a terra (Silva, 2006).



Figuras 4.3 - Produção de carvão vegetal em (a) caieira, (b) separação da terra, e (c) apagando o fogo do carvão com água (Silva, 2006)



Ao invés de "*baianas*" (furos laterais no revestimento argiloso ou terroso da pilha de madeira ou forno) a caieira é formada por "*suspiros*", que são orifícios por onde entra o ar. Atrás da pilha são feitos 2 suspiros, rentes ao chão, e, também, 3 suspiros de cada lado. Ao centro fica uma cavidade, por onde é lançado o fogo para queimar a lenha. O fogo é iniciado na frente da caieira, e, quando a fumaça atingir o final da caieira, significa que a queima está no fim. A lenha fica queimando durante 3 dias. Essa duração de dias depende muito do conhecimento e da experiência do produtor. Às vezes, para evitar o escorregamento da terra, são dispostas lenhas verticais que sustentam as horizontais (Silva, 2006).

Para realizar o beneficiamento do carvão vegetal produzido, uma pessoa demora 3 dias para retirá-lo da caieira e 3 pessoas trabalham 1 dia. Através de um ancinho de madeira, separa-se todo o carvão vegetal da terra. Quando se retira o carvão tem-se que jogar um pouco d'água para apagar o fogo. Logo em seguida o carvão é ensacado em sacos de rafia. Uma caieira produz em média quarenta e cinco sacos de carvão (Silva, 2006).

No Século XIX, o **método das covas** consistia em carbonizar a lenha extraída de matas nativas em cavidades de 0,8 metros de profundidade (Sena, 1881), abertas nas proximidades do local em que as árvores eram derrubadas. Introduzia-se a lenha na abertura, cobrindo-a com terra, folhas e outros vestígios de biomassa, deixando-se uma abertura para a ignição (introdução de uma mecha em brasas, de modo a queimar parte da lenha para transferir calor ao resto, dando início à carbonização). O processo de carbonização era controlado pela abertura e fechamento de orifícios na parte superior da cova (Sena, 1881; Bovet, 1883 e Oliveira, 1902 e 1903 – citados por Morello, 2009).

Tal **método das covas** era condenado pelos professores da Escola de Minas de Ouro Preto como irracional, bárbaro e destruidor de florestas (Sena, 1881; Bovet, 1883 e Oliveira, 1902 e 1903– citados por Morello, 2009). Três eram os motivos para isso:

1º - Consumia-se, para cada tonelada de carvão produzido, um grande volume de lenha, porque (a) parte da lenha não era carbonizada, ou, então, sofria queima parcial, (b) além de outra fração considerável ser queimada para dar início à carbonização, e, ainda, (c) parte do carvão obtido era acidentalmente queimado.

2º - Gerava-se um carvão de baixa qualidade, quebradiço (friável) ou com baixo teor de carbono, o que tornava necessário o consumo de grande volume do mesmo para colocar o processo de redução do minério de ferro em marcha nas indústrias siderúrgicas do Século XIX. Com isso, o consumo específico de carvão vegetal ficava em um alto patamar.

3º - Causavam-se danos à floresta remanescente após a extração de lenha, dado que o calor emitido pela ignição e desenvolvimento do processo de carbonização, no interior da Cova, queimava as raízes das árvores circundantes.

Morello (2009) reproduziu um forno que pode ser confundido com um modelo colméia ou um forno meda, apresentado abaixo.

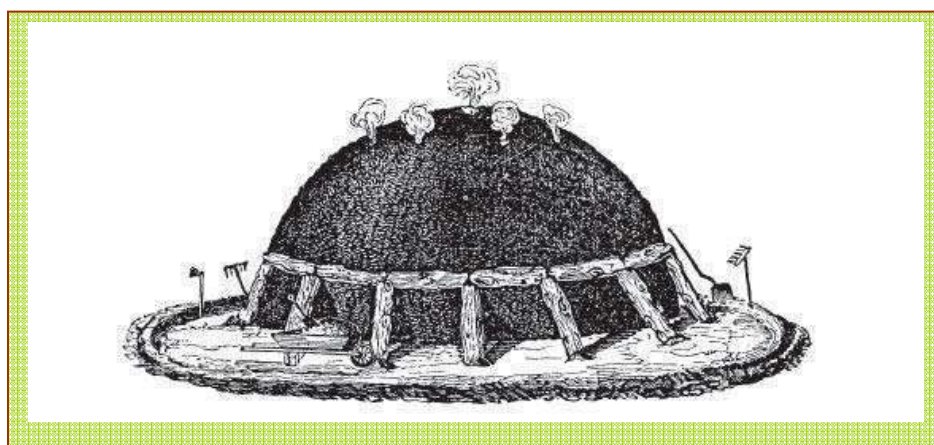


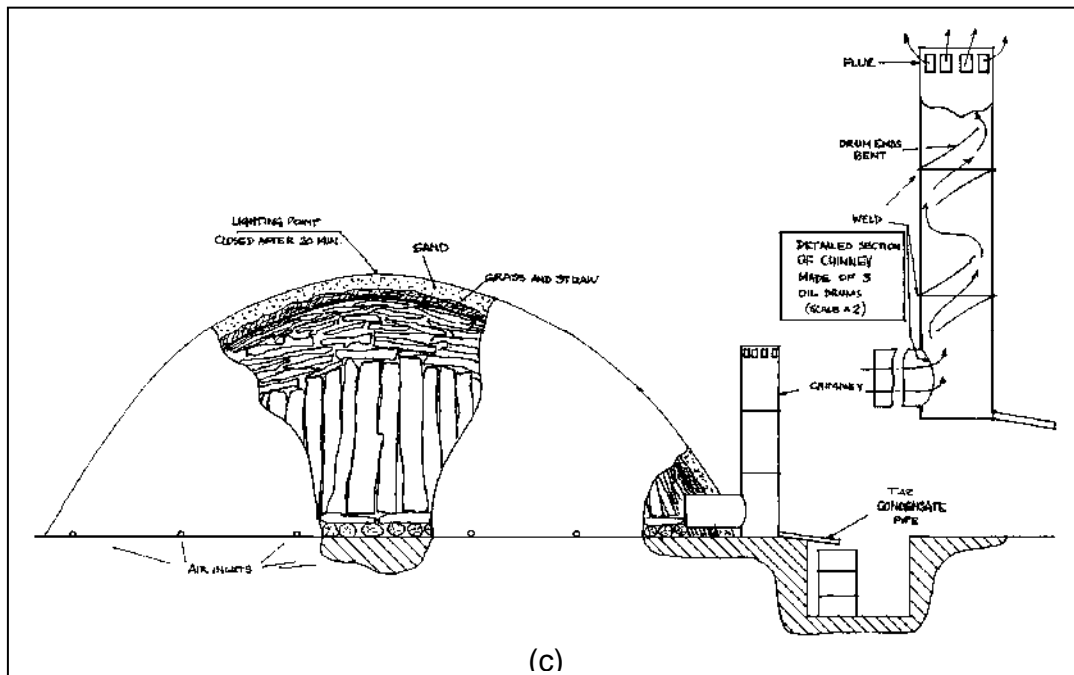
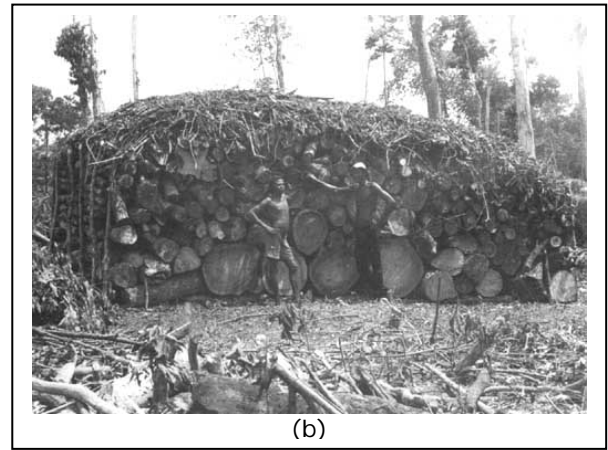
Figura 4.4 – Forno tipo cova (Svedelius, 1875 – citado por Morello, 2009)

4.1.2 - Forno meda

Segundo Morello (2009), o **método de medas** era a alternativa defendida pela Escola de Minas, em que a carbonização dava-se a partir da disposição das toras de madeira em uma pilha, sobre o solo, a qual era coberta por terra, folhas e outros materiais florestais. Tal método não queimava as raízes das árvores remanescentes na floresta, e permitia um menor consumo de madeira por tonelada de carvão produzido. Gerava um carvão de melhor qualidade com menor consumo específico de lenha do que no método de covas. A **meda** – uma vez coberta de ramos e de terra - queima-se vagarosamente sem ressequeir nem matar os troncos vizinhos. Possibilitando empilhar uma quantidade considerável de madeira, são montadas de tempos em tempos, pois o calor por elas produzido pouco mal faz às florestas ao seu redor (Sena, 1881 – citado por Morello, 2009).

As medas foram predominantemente adotadas, em Minas Gerais, até meados de 1950 para produzir carvão vegetal destinada à produção de ferro-gusa. **Os fornos meda são descartáveis, pois assim que o processo de carbonização é concluído, tem de ser desmontados para que o carvão possa ser extraído. Duram, pois, apenas um ciclo de produção** (Morello, 2009).

Uma **meda modificada** (“*casamance kiln*”) de 100 estéreos foi sugerida pela FAO (1987) contendo uma base de duas camadas de toras de lenha de tamanhos pequenos e médios e uma chaminé metálica feita de 3 tambores de óleo (sem tampas) sobrepostos, que é acoplada à base da pilha.



Figuras 4.5 - Fornos Meda usuais e modificado
(a - Napoli, 2009; b - FAO, 1987, c - FAO, 1987)

4.2 - FORNOS DE TIJOLOS OU ALVENARIA

Muitos fornos de alvenaria são construídos com tijolos de barro (e argamassa) no próprio local das carvoarias, o que torna seu custo muito baixo (Pinheiro e colaboradores, 2006). Segundo Brito (1990), dependendo do tipo de terreno, os fornos de alvenaria classificam-se:

- 1º - **fornos de superfície** - construídos em terrenos planos;
- 2º - **fornos de encosta ou barranco** - construídos em regiões de relevo acidentado.

Os fornos de alvenaria podem ser classificados pelo tamanho e pela capacidade efetiva de madeira enforcada. Em geral, os vários fornos de encosta ou de superfície são considerados pequenos e estão muito disseminados no Brasil, conforme os diversos autores citados na presente revisão. Vários *hemi-esfera* ou *meia-laranja*. Outros modelos de fornos possuem *geometria cilíndrica e prismática*.

O regime predominante de produção dos fornos de produção de carvão vegetal é o de batelada. Nos fornos rudimentares é necessário empregar pessoas para carregar manualmente o forno, aquecê-lo para realizar a queima, interrompê-la, resfriar o conjunto do forno e carga, e descarregá-lo. Nos fornos industriais, empregam-se máquinas e operadores especializados, e a produtividade é maior, além do que já se pratica a coleta de emissões gasosas para sua recuperação e aproveitamento econômico.

O cuidado e a qualidade na construção dos fornos é um fator crucial em termos da durabilidade e sucesso operacional dos mesmos. Sempre que possível deve ser dada preferência pela escolha de pessoal com experiência comprovada para a escolha de local, material e a construção do forno propriamente dita. Deve-se evitar ao máximo o emprego de pessoal inexperiente (Brito, 1990).

Segundo Ferreira (2000 – citado por Barcellos, 2002), **o forno de alvenaria mais simples é o tipo *rabo quente***, em forma de hemi-esfera, com orifícios de entrada de ar (na base e na superfície arredondada). O carregamento é feito por batelada, sendo a madeira cortada em toras de 1,0 a 2,0 m de comprimento, de acordo com as dimensões do forno. A madeira sofre secagem prévia ao ar livre até atingir umidade inferior a 30%. O controle da entrada de ar é feito pela obturação ou fechamento progressivo dos orifícios inferiores, laterais e superiores. O avanço da carbonização é avaliado e controlado pela coloração da fumaça que escapa pelos orifícios. O processo de carbonização completo, do carregamento do forno à retirada do carvão, dura cerca de 8 (oito) dias.

Moreira (1964) descreveu em sua tese de doutorado os seguintes fornos:

1º - Forno colméia com chaminé ou ***forno elevado de alvenaria*** ou de ***superfície*** - Era construído com tijolos comuns e argamassa, constituída de argila (ou saibro), areia de grânulos com tamanho médio e melão de cana-de-açúcar, na proporção (ou traço) de 500:20:1. A essa mistura acrescentava-se água necessária para dar-lhe a consistência específica (para tornar-lhe plástica ou moldável).

2º - Forno de barranco - escava-se uma encosta de modo a obter uma seção reta horizontal na forma circular. O forno abre-se para fora do barranco através de um corredor curto e estreito e na parte oposta constrói-se uma chaminé encostada à face externa da parede do forno, cuja seção horizontal é quadrada.

3º - Forno Iwate ou *japonês de barranco* – foi, provavelmente, introduzido por imigrantes japoneses no Brasil (pois também são conhecidos seus similares no Japão para queima de peças cerâmicas ou de porcelana por artesões). A seção horizontal do forno assemelha-se a uma elipse afunilada, em que a porta fica na parte mais estreita e a chaminé fica diametralmente oposta, fora da câmara de carbonização, mas dentro do barranco. Para construir esse forno, o terreno deve ser argiloso e emprega-se a mesma argamassa empregada no forno colméia.

4º - Forno colméia em barranco - é cilíndrico encimado por uma calota semi-esférica. Na parede e na cúpula há diversos orifícios ligados a canais de exaustão das emissões gasosas.

Outros fornos de alvenaria, como os fornos de encosta e os de superfície, com e sem câmara de combustão, são similares ao forno de rabo-quente e possuem o mesmo ciclo de produção (Marri e colaboradores, 1982 – citados por Barcellos, 2002). Alguns foram desenvolvidos no Brasil por professores-pesquisadores universitários das áreas de Agricultura, Engenharia Florestal e áreas afins para uso industrial vinculado ao Setor de Siderurgia. Há modelos de fornos de alvenaria que receberam denominações “**JG**”, “**PP**” e “**Mineirinho**” associados com seus construtores ou região de maior ocorrência, conforme será descrito nas próximas páginas.

4.2.1 – Forno Colméia ou Meia Laranja ou Rabo quente – Sem Chaminé

É um tipo de forno de tijolos, geralmente sem chaminé e com uma porta. A sua capacidade volumétrica efetiva pode variar desde 9 m³ (mais usual no Brasil), até 50 m³ de madeira. O diâmetro de sua base pode ser de 3 a 7 m e sua altura total de 3.50 a 3.70 m. Devido a sua forma semi-esférica, em geral, a madeira é cortada com comprimento máximo entre 1.20 e 1.30 m para melhor ocupar o volume interno do forno (Brito, 1990).

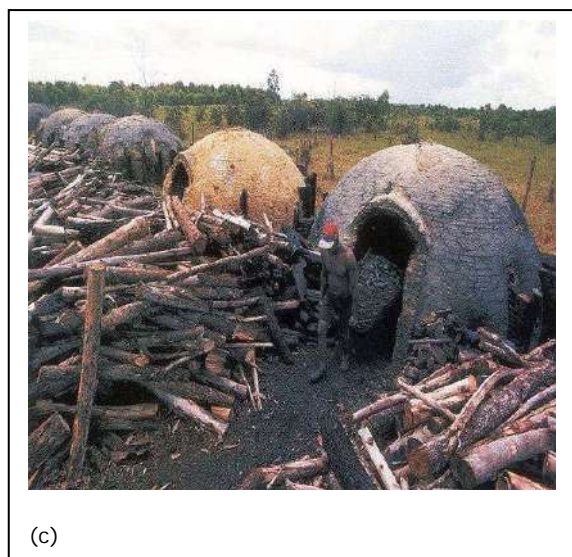
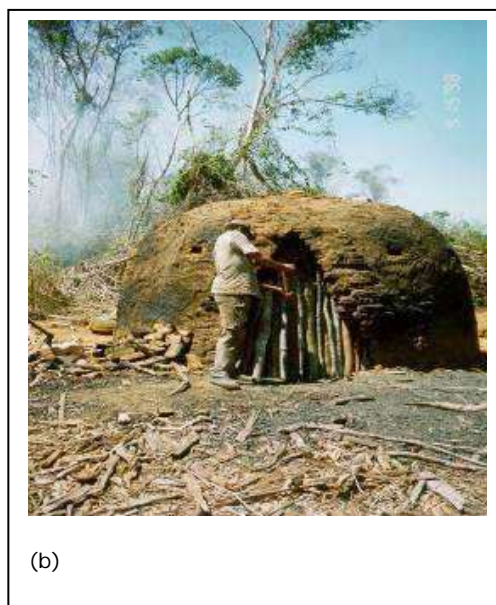
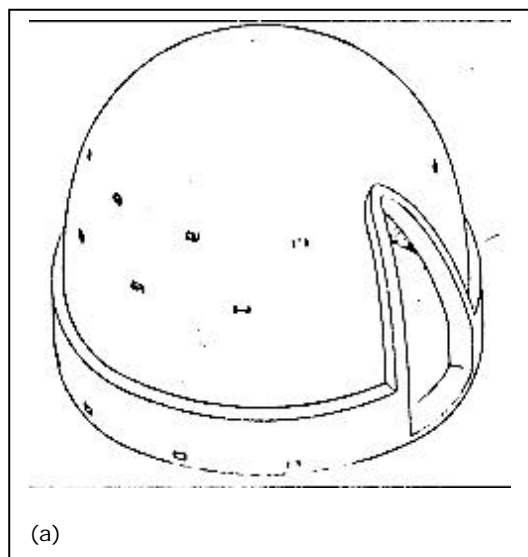


Figura 4.6 - Desenho representativo e vários fornos de rabo-quente antes do carregamento

((a) Brito (1990); (b,d) Colombo, Pimenta e Hatakeyama (2006);
(c) Pimenta (2007)– citado por Santos (2007))

Apesar de serem mais baratos e fáceis de construir, os fornos rabo-quente apresentam baixos rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, e perdas em forma de fumaça poluente que podem atingir a 50% do carbono inicialmente contido na lenha enforada e 75% em peso dessa mesma lenha. (Pinheiro e colaboradores (2006); Marri e colaboradores (1982) – citado por Santos, 2007).

Os fornos rabo-quente permitem maior poder de controle sobre o processo de carbonização relativamente aos fornos Meda, porém o resultado final continua a depender consideravelmente da habilidade e do esforço do operador. Isso pois, tal como nos fornos Meda, o exercício do controle é feito de maneira sensorial, pela observação da cor e cheiro da fumaça exalada, e da temperatura das paredes do forno. O trabalho não exige, portanto, formação específica do trabalhador (Morello, 2009).

Os fornos meia-laranja ou rabo-quente podem ter orifícios laterais e superiores para entrada de ar e saída de emissões gasosas ou fumos, que podem ser denominados **baianas** e **tatus**.

4.2.2 – Forno de Tijolos Semi-Esféricos usado na Amazônia – Colméia ou Rabo-Quente

Para construir um forno de tijolos são necessários aproximadamente 1000 tijolos para uma produção de 80 a 100 sacos por batelada. O forno é constituído por *baianas* e *tatus*, e os tijolos são assentados, através do uso de barro, preparado com uma mistura de água e terra argilosa (Santos, 2007), que atua como um cimento argiloso (à semelhança dos cimentos aluminosos em fornos industriais).

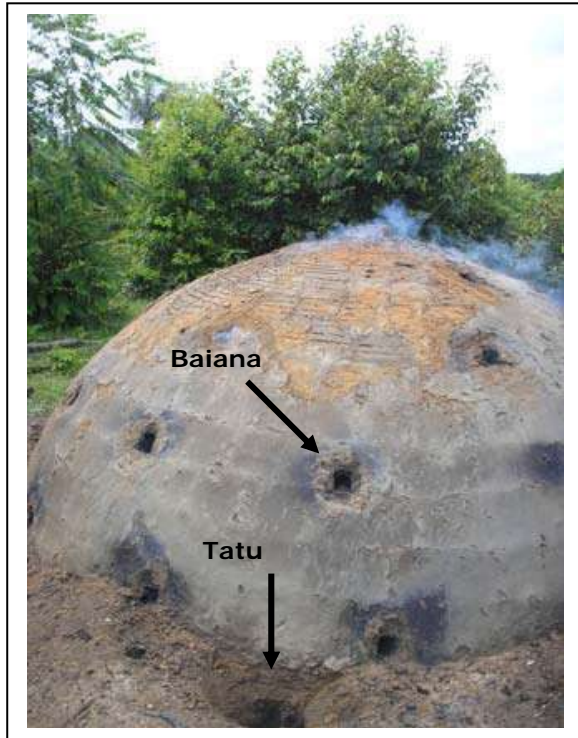


Figura 4.7 - Forno de tijolos (Silva, 2006)



Figura 4.8 - Carregamento da lenha para o interior do forno (Silva, 2006)



Figura 4.9 - Fechamento da porta principal antes de acender o forno (Silva, 2006)

As *baianas* e *tatus* dos fornos de tijolos são orifícios laterais e inferiores de entrada de ar ou lenha que são fechados após o início da queima e da pirólise subsequente.



(a)



(b)

Figura 4.10 – Acendimento do forno com (a) colocação de lenha pelo topo e (b) fechamento da baiana principal com início de emissão de fumaça (Silva, 2006)

O processo de **acendimento do forno** inicia-se colocando-se pedaços de lenha na baiana superior. No início da combustão a fumaça que sai é de cor esbranquiçada, ao tornar-se escura significa que o forno está aceso, então a baiana é fechada. A fumaça começará a sair pelas outras baianas e quando se tornar azulada indicará que a carbonização atingiu aquela fileira de baianas que deverão ser fechadas logo em seguida. O mesmo procedimento será repetido quando a carbonização atingir a região dos tatus. Depois de fechados todos os tatus, o forno deverá ser **barrelado** (ou barreado) para impedir a entrada de ar durante o período de resfriamento (Silva, 2006).



Figura 4.11 – Fumaça esbranquiçada revela início da combustão da lenha
(Silva, 2006)



Figura 4.12 – Fumaça azul indica que a baiana pode ser fechada
(Silva, 2006)



Figura 4.13 – Um tatu após seu fechamento
(Silva, 2006)



Figura 4.14 – Forno barrelado (barreado)
(Silva, 2006)

Depois de fechado, o forno fica aproximadamente de 3 a 4 dias sob **abafamento**. Ou seja, durante esse tempo a lenha estará “terminando de ser queimada” e, é feito o que eles chamam de “**banho no forno**”, para evitar o vazamento da fumaça. Esse procedimento é realizado de 2 a 3 vezes durante os 4 dias de resfriamento (Silva, 2006).

Quando o forno estiver totalmente esfriado, abre-se o forno então se retira toda a lenha queimada para o **beneficiamento** (seleção e catação manual dos pedaços), feito no próprio local da produção (Silva, 2006).



Figura 4.15 – Abertura do forno de tijolos
(Silva, 2006)



Figura 4.16 – Catação e retirada do carvão
(Silva, 2006)



Figura 4.17 – Carvão em sacos de rafia
(Silva, 2006)



Figura 4.18 – Fechamento dos sacos
(Silva, 2006)

Alguns produtores utilizam folhas de palmeiras ou de marmeleiro para fechar os sacos e evitar desperdício de carvão durante o transporte até o local de comercialização. Em média, de cada forno sai uma produção de 60 a 80 sacos de carvão. Essa produção gera aproximadamente 684 kg de carvão. Em outras carvoarias, a produção varia de 80 a 120 sacos, porque os produtores selecionam o carvão com peneiras, para acondicioná-lo em sacos de aproximadamente 3 kg para comercialização (Silva, 2006).

O peso do carvão é influenciado pela espécie vegetal usada na produção. A espécie mais utilizada é conhecida como “**folha fina**”, facilmente encontrada em **capoeiras** (terreno em que o mato foi roçado e/ou queimado para cultivo da terra ou para outro fim). As espécies vegetais de mata fechada produzem carvão mais pesado. Os produtores relataram que espécies de capoeira não são muito indicadas para produzir carvão, pois ocorre muita perda da lenha durante a carbonização, ou seja, produz-se e sobra muito pó (Silva, 2006).

4.2.3 – Forno Mineirinho

Também é denominado **forno de superfície JG**. por Santos (2007 –citando uma comunicação privada do Prof. Alexandre Santos Pimenta, em setembro de 2007).

Pinheiro (2009) descreveu o **forno mineirinho** comparando-o com o forno rabo-quente através das fotografias seguintes, aqui e do desenho exposto por Ferreira (2000). **O que parece intuitivo ao leitor iniciante nos estudos sobre a carbonização é que os fornos rabo-quente são similares geometricamente às colméias construídas por abelhas.** E Ferreira (2000) parece ser o único autor que reconheceu essa característica construtiva e adotou essa denominação. **No entanto, o nome colméia tem sido atribuído aos fornos de alvenaria de corpo cilíndrico e cúpula semi-esférica.**

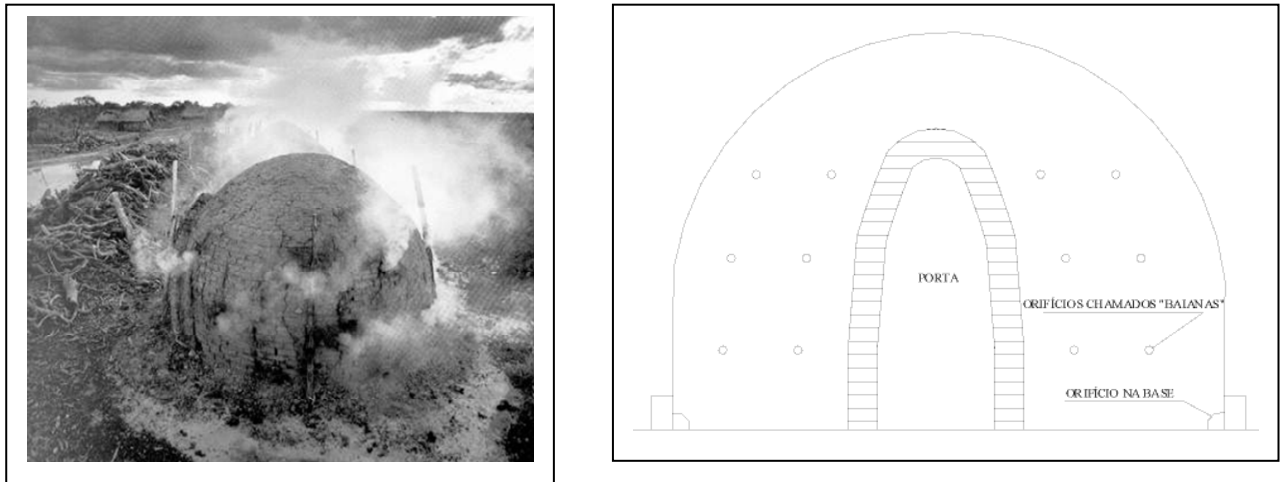


Figura 4.19 – Forno Rabo-Quente em formato semi-esférico (de enchimento difícil), com tiragem direta em grande número de tatus e baianas (Pinheiro, 2009) e seu desenho esquemático (Ferreira,2000)

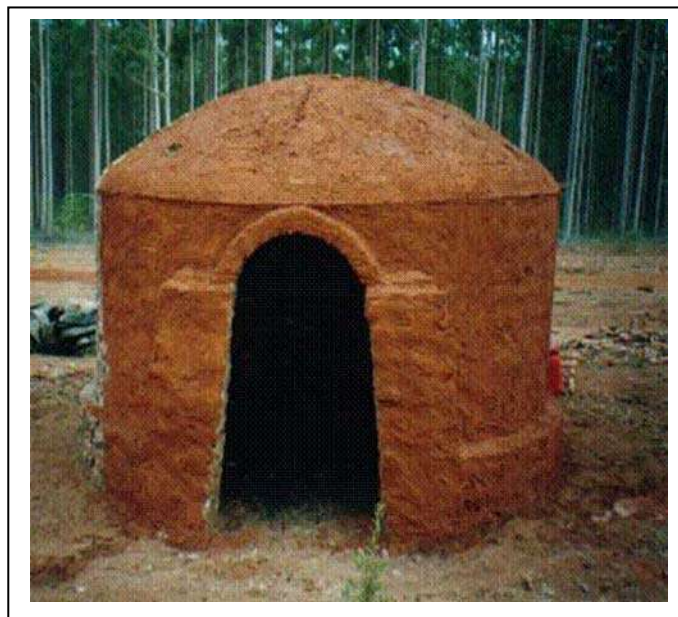
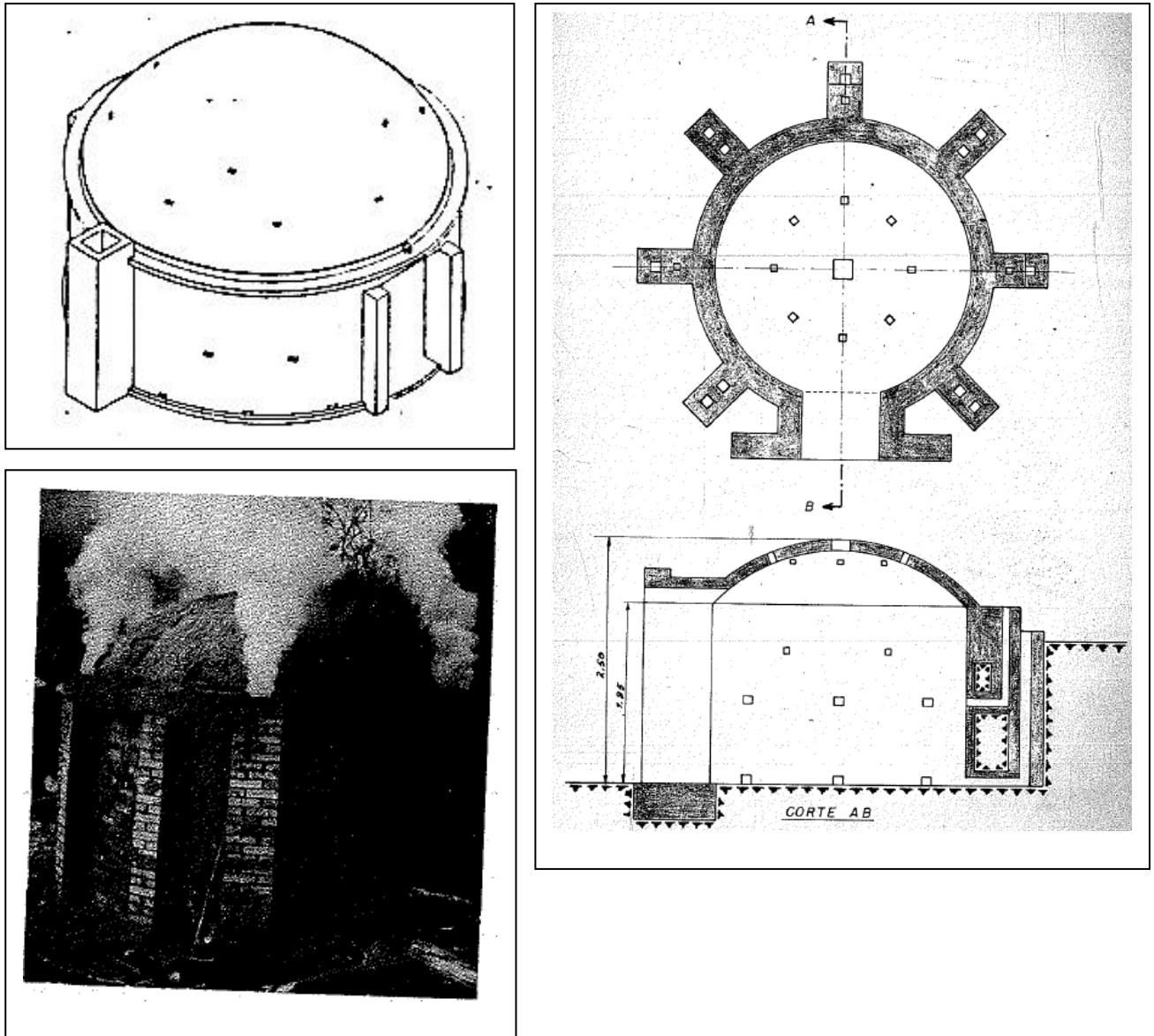


Figura 4.20 – Forno Mineirinho cilíndrico, com uma cúpula semi-esférica (de enchimento fácil), tiragem direta em único tatu (melhorando o controle) e com 1 chaminé favorecendo a recuperação de alcatrão (Pinheiro, 2009)

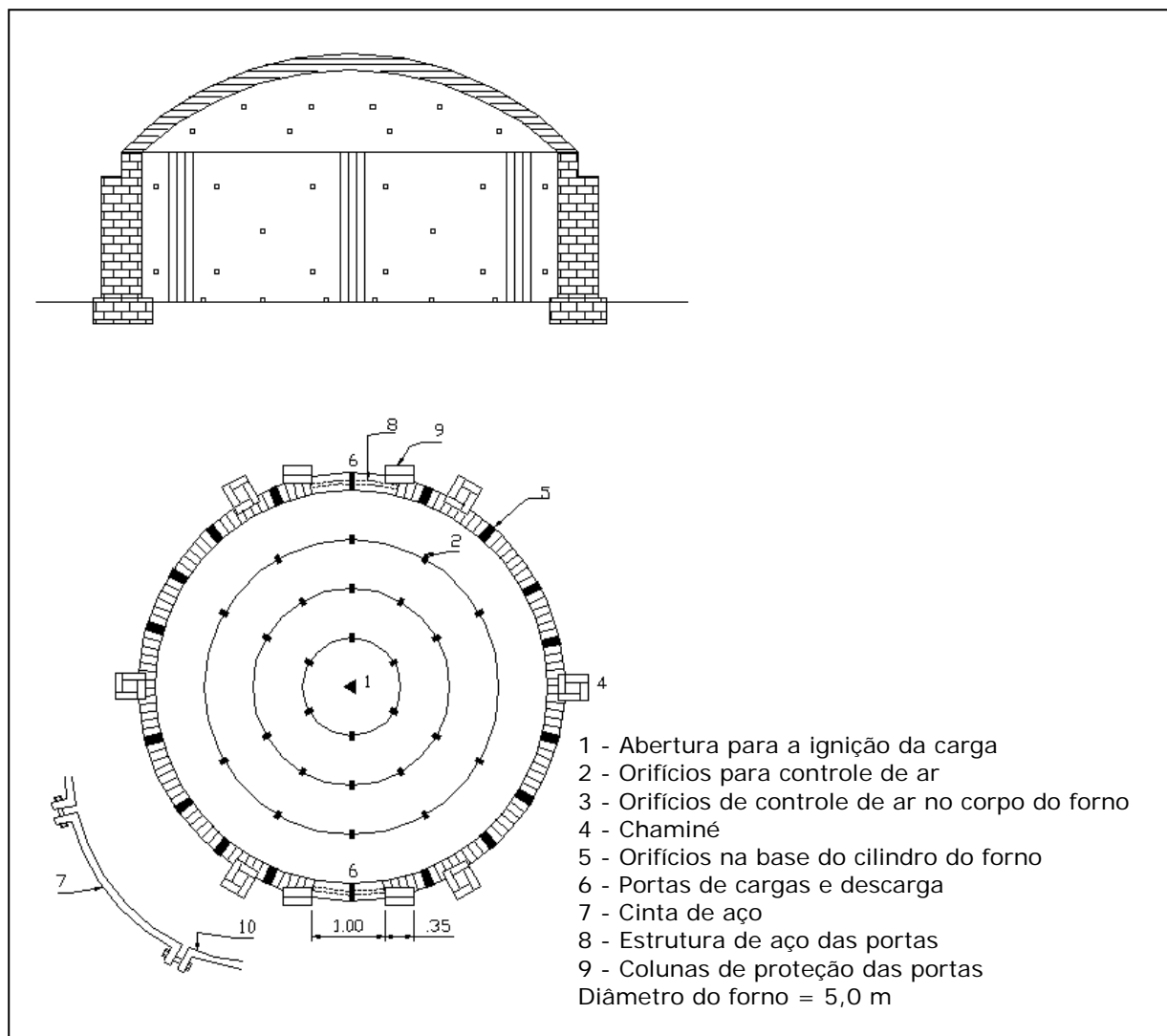
4.2.4 – Forno Colméia de Superfície com Chaminé

É um tipo de forno construído com tijolos, com geometria mista, isto é, corpo cilíndrico mais cúpula semiesférica, que possui, geralmente, 1 a 6 chaminés e 1 ou 2 portas. A sua capacidade efetiva varia entre 35 (mais comum no Brasil) e 150 m³ de madeira, possui diâmetro da base entre 5 e 8 m e altura total entre 3.20 e 5.00 m. Pode também aceitar madeira com até 4.00 m de comprimento (Brito, 1990).

Ferreira (2000) destacou com bastante clareza que os modelos hoje conhecidos como fornos colméia de superfície e barranco são maiores em dimensões, volume e capacidade que os de rabo quente, favorecidos pela construção projetada com critérios de engenharia civil, o que resulta num avanço tecnológico que foi adotado por indústrias siderúrgicas diversas para o uso de carvão vegetal em seus alto-fornos.



Figuras 4.21 – Desenhos representativo (Brito, 1990) e esquemático e fotografia de um Forno Colméia com Chaminé (Moreira, 1964)



Figuras 4.22 – Desenhos esquemático de um Forno Colméia de Superfície Com chaminé
 (Ferreira, 2000)



Figura 4.23 – Forno Colméia de Superfície com chaminé
 (Bastos Filho, 2008)

Moreira (1964) descreveu o seguinte **procedimento de construção de um forno colméia de superfície em alvenaria com corpo cilíndrico e cúpula semi-esférica**:

1º - sobre um alicerce circular de 0,25m de largura, com profundidade de 0,40m, em sua parte mais alta ao nível do solo, constrói-se a parede do forno, de forma cilíndrica, com diâmetro interno de 2,70m e altura de 1,80m.

2º - Encimando o forno, levanta-se uma cúpula, em forma de calota esférica, apoiada sobre o topo da parede cilíndrica. A base da calota é circundada por uma cinta de ferro, que equilibra a pressão lateral dos tijolos, assentados em fiadas concêntricas.

3º - Na parede há uma abertura de 1,60m de altura por 0,60m de largura, utilizada para os serviços de carga de lenha e descarga de carvão.

4º - Circundando o forno, abrem-se diversos orifícios de secção quadrada, com 0,07m de lado, à distância de 0,60m um do outro, em 4 planos, em diferentes alturas. Na parte central da calota, abre-se um orifício quadrado com 0,20m de lado, por onde é iniciada a queima da lenha para sua carbonização.

5º - Colados ao lado de fora da parede, diametralmente opostos, dois a dois, levantam-se quatro chaminés que se abrem para dentro do forno, junto ao chão do mesmo, e para o exterior, à altura da parede do forno. O fechamento do forno é feito com tijolos rejuntados com argamassa.

6º - Na construção desse tipo de forno por Moreira (1964), cujo volume é de 13,59m³ foram gastos 5.200 tijolos comuns, 6m³ de argamassa, uma cinta de ferro de 2 ½" formada de quatro partes, unidas por 4 parafusos de 5/8" x 2", 180 horas de mão de obra de pedreiro e outras 180 horas com o ajudante.

O engenheiro José Gonçalves Bastos Filho (2008) projetou e construiu uma série de fornos de alvenaria do tipo colméia denominados "JG" (com uma ou duas portas) para várias indústrias, como descrito a seguir:



Figura 4.24 – Forno JG, diâm. 3,0m, capacidade 10 a 11 st e empilhamento vertical da lenha adotados pela SIDERSA e White Martins em baterias de 36 a 96 fornos
(Bastos Filho, 2008)



Figura 4.25 – Forno JG com duas portas, diâm. 3,80m e diâm. 5,10 m x alt 1,6 m adotados pela JB CARBON e outras empresas
(Bastos Filho, 2008)

4.2.5 - Forno de Encosta ou Barranco

Dentre os equipamentos pequenos para carbonização de lenha, os fornos de encosta ou barranco podem ter 1,40 m e 1,60m de altura, e as alturas das chaminés iguais às das suas paredes. Segundo Moreira (1964) os fornos incrustados em barrancos esfriam com maior lentidão do que os de superfície e produzem carvões de menor higroscopicidade. O SINCAL (2000) relatou que existia um amplo predomínio dos fornos tipo “encosta” na produção de carvão vegetal no Estado de São Paulo, pois, sendo pequenos, possuem pequena capacidade volumétrica, sendo preferidos pelos pequenos produtores.

Moreira (1964) descreveu um **procedimento da construção de um forno de barranco**:

1º - o forno de barranco, com 1,40 m de altura, resulta de uma escavação num barranco argiloso e sua parede é constituída por tijolos comuns (maciços) revestindo a superfície escavada que tem o formato horizontal circular. O forno abre-se para fora do barranco, através de um corredor curto e estreito. Na outra extremidade fica a chaminé, construída junto à parte externa da parede do forno, cuja seção horizontal é um quadrado de 0,20 m de lado.

2º - Uma cúpula construída com tijolos cobre o forno, sendo apoiada sobre a parede abaixo e contra o barranco que equilibra a pressão lateral dos mesmos. Na construção da cúpula, os tijolos são assentados sem nenhum apoio, em ½ tijolo, rejuntados com argamassa, formando fiadas concêntricas. Deixam-se nessa cúpula dois orifícios quadrados com 0,15m de lado, localizados diametralmente opostos, segundo uma direção perpendicular ao eixo porta-chaminé.

3º - O corredor que liga o forno ao exterior tem duas paredes revestidas de tijolos, em prolongamento à parede do forno, e é encimado por um arco construído de tijolos em continuação à cúpula. Durante a operação do forno, esse corredor torna-se uma antecâmara de carbonização. Para isso, é fechado na parte externa por uma parede (porta do forno), e, parcialmente separado da câmara de carbonização por outra. Na parte superior dessa separação, deixa-se uma comunicação em forma de arco.

4º - Para a construção desse forno, cujo volume era de 11,875 m³, foram necessárias 54 horas de serviços de pedreiro e igual número de serviços de servente, consumindo-se 1.800 tijolos comuns, 2 m³ de argamassa, igual à empregada para o forno colméia.



Figuras 4.26 – Fornos de encosta
(Sincal, 2000)

4.2.6 – Forno Colméia de Barranco

Moreira (1964) operou, também, outro tipo de forno colméia construído por meio da escavação num barranco, de seção horizontal circular com 2,60m de diâmetro interno, revestido por uma parede de tijolos e encimada por uma cúpula semi-esférica, semelhante ao modelo anterior.

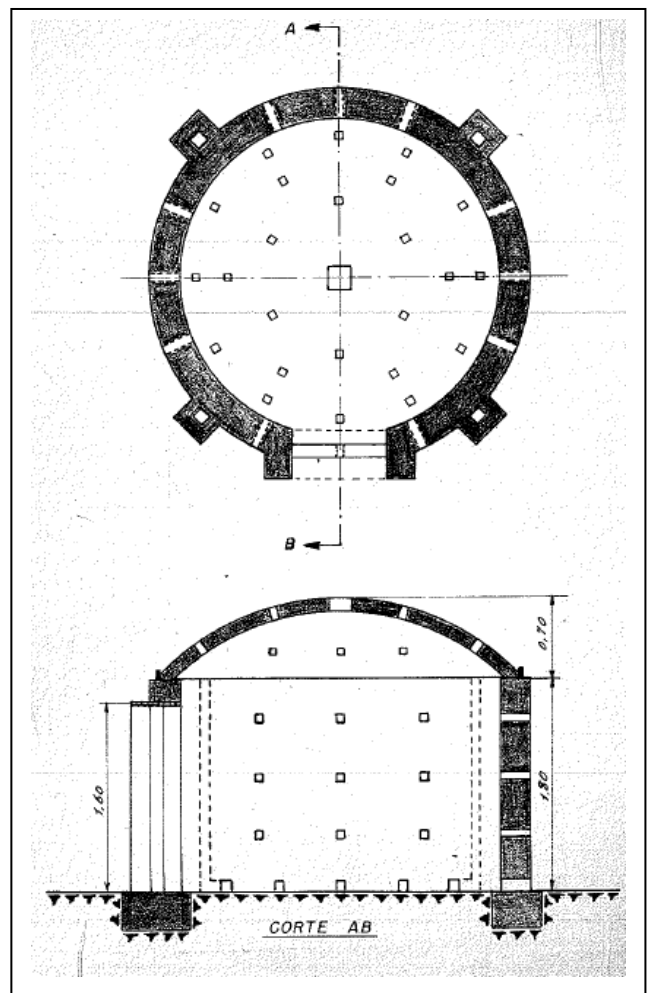
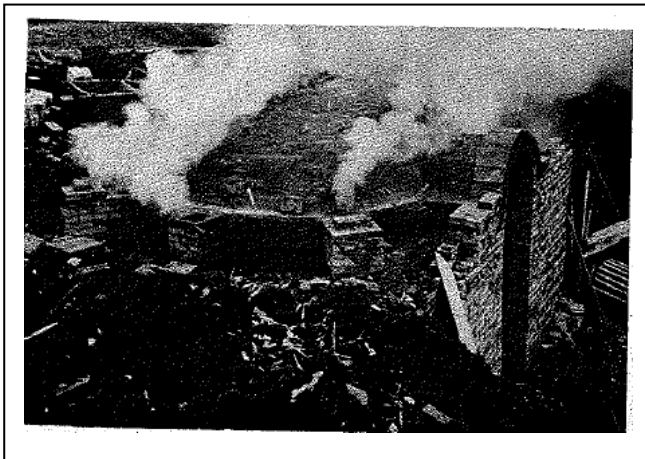
Os **procedimentos para construção de um forno colméia de barranco**, descritos por Moreira (1964), envolvem os seguintes critérios e etapas:

1º - Na parede e na cúpula há diversos círculos de orifícios situados em planos de diferentes alturas. Canais construídos de tijolos ligam os orifícios da parede ao exterior. Na parte central da cúpula há um orifício de seção quadrada com 0,20m de lado.

2º - A porta do forno tem 0,60 m de largura e 1,60m de altura, sendo construída de tijolos em espelho, apresentando três orifícios nas alturas correspondentes aos orifícios da parede. Para cada operação de carvoejamento, constrói-se e desmancha-se a porta.

3º - Do mesmo modo que no forno colméia de superfície, há 4 chaminés no forno colméia de barranco.

4º - Para a construção desse forno com 12,69 m³, foram gastas 80 horas de serviço de pedreiro e igual número para o ajudante. Consumiram-se 2.500 tijolos comuns e 4 m³ de argamassa igual à usada nos fornos anteriores.



Figuras 4.27 – Forno Colméia em barranco, Visto numa fotografia antiga e num desenho esquemático

(Moreira, 1964)

Ferreira (2000) destacou que **existem fornos colméia de barranco construídos com diâmetros de 4m e volumes maiores.**

4.2.7 – Forno Colméia de Superfície e Barranco com Chaminés Altas

Os fornos colméia de superfície são maiores do que os de rabo-quente e os similares colméia de barranco, conforme indica a figura seguinte.

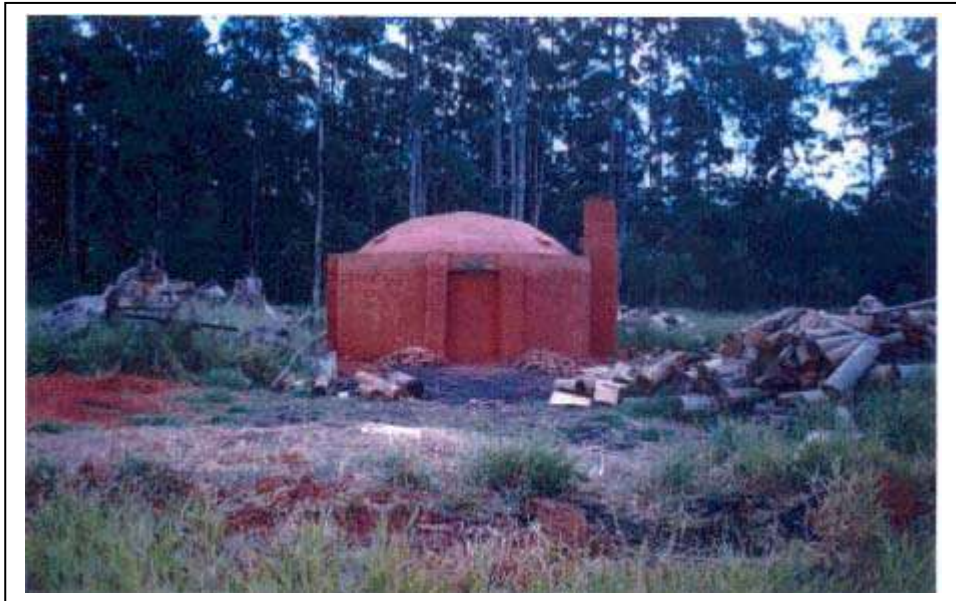
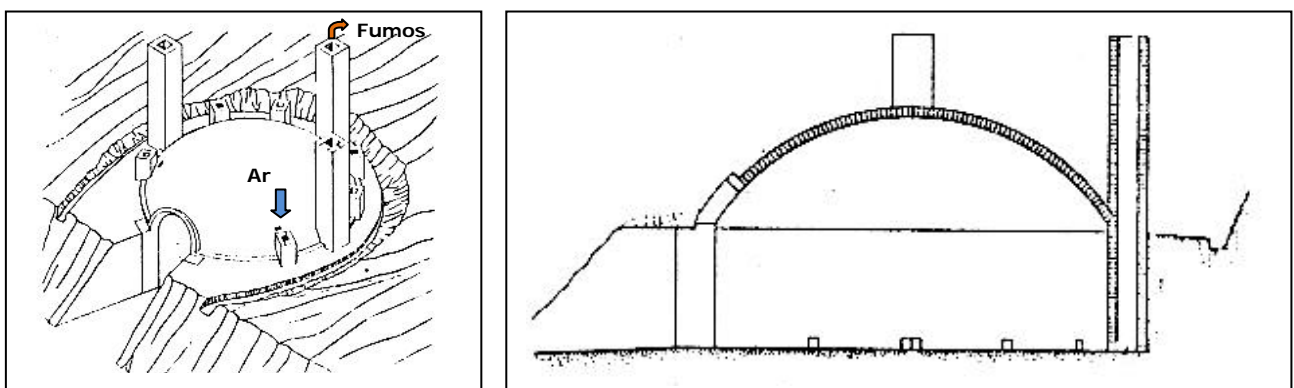


Figura 4.28 – Forno Colméia de Superfície
(SINCAL, 2000)

Os fornos colméia de barranco são pequenos, sendo construídos com tijolos, possuindo, geralmente, 1 a 3 chaminés e uma porta. A sua capacidade efetiva varia entre 18 e 25 m³ de madeira. Possuem diâmetro da base entre 4m e 6m e altura total entre 2,50m e 2,80m. Pelo fato de possuírem formato cilíndrico na maior parte de sua construção, podem aceitar madeira com tamanhos maiores que 2,0m de comprimento (Brito, 1990).

O resfriamento desses fornos é mais lento do que os fornos de superfície, conferindo aos mesmos um perfil térmico mais homogêneo que o observado naqueles (Pinheiro e colaboradores, 2006 – citados por Santos, 2007).

A tecnologia da construção dos fornos colméia pode ser aplicada e suas alturas podem ser de 2,50m a 2,80m e as chaminés são mais altas que suas cúpulas, porém o rendimento não necessariamente é superior de acordo com Moreira (1964).



Figuras 4.29 – Vistas em perspectiva e de perfil de um forno de encosta ou de barranco
(Brito, 1990; Quirino, 2006)

4.2.8 – Forno Iwate com chaminé

Moreira (1964) descreveu a **construção do forno Iwate** da seguinte forma:

1º - A seção horizontal da escavação assemelha-se a uma elipse, cujas extremidades correspondentes ao diâmetro maior tenham sido deformadas, apresentando-se um pouco afunilada e a outra um tanto dilatada.

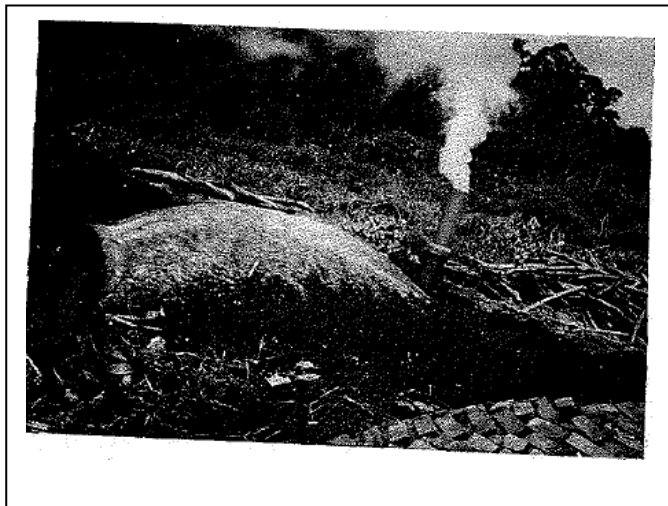
2º - A parte afunilada abre-se para fora do barranco, localizando-se aí a porta do forno. Na parte dilatada, diametralmente oposta à porta, está a chaminé, construída ao lado externo da parede em um canal cortado no barranco para essa finalidade.

3º - A escavação para este tipo de forno requer a existência de barranco com suficiente altura e que o terreno tenha uma constituição argilosa. O volume escavado é revestido de tijolos assentados em espelho, constituindo a sua parede com 1 m metro de altura, sobre a qual se constrói uma cúpula com espessura de meio tijolo.

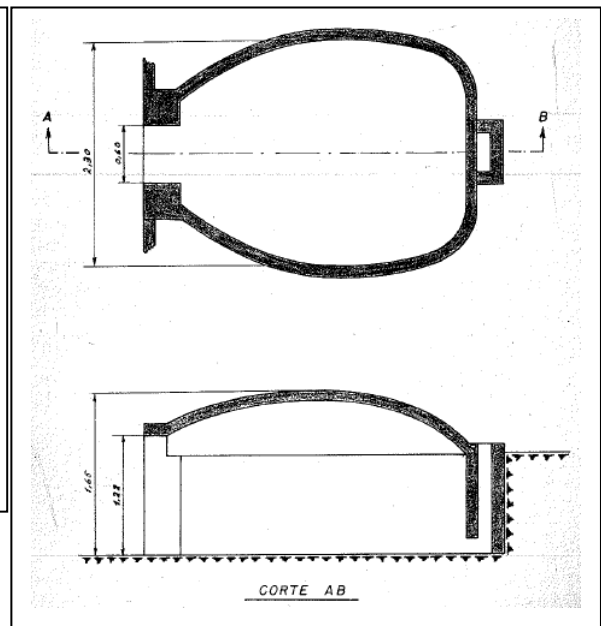
4º - Os tijolos são firmados por pequenas cunhas de pedra, que garantem a estabilidade da abóboda. Durante a primeira carbonização, é feita a obturação das fendas que ficam entre os tijolos, usando-se para isso a argamassa diluída, quase líquida.

5º - A porta é construída de tijolos em espelho, assentados com argamassa com o mesmo traço ou proporções já descrito.

6º - O volume desse forno de 8,51 m³ consumiu em sua construção as 70 horas de serviços de pedreiro e outras 70 horas do ajudante. Foram empregados 1.300 tijolos comuns.



Figuras 4.30 – Forno Iwate
(Moreira, 1964)



4.31 – Desenho esquemático de forno iwate
(Moreira, 1964)

4.3 – Fornos retangulares com estrutura metálica e alvenaria

Ao contrário dos fornos de câmara muflada que abrigam os containers metálicos, existem fornos grandes, alguns do tipo Missouri, que permitem a mecanização total do processo de carregamento de lenha e descarga de carvão. Sua capacidade de produção pode equivaler a, pelo menos, 20 fornos rabo-quente (Morello, 2009).

O forno Missouri originalmente possui a seguinte concepção:

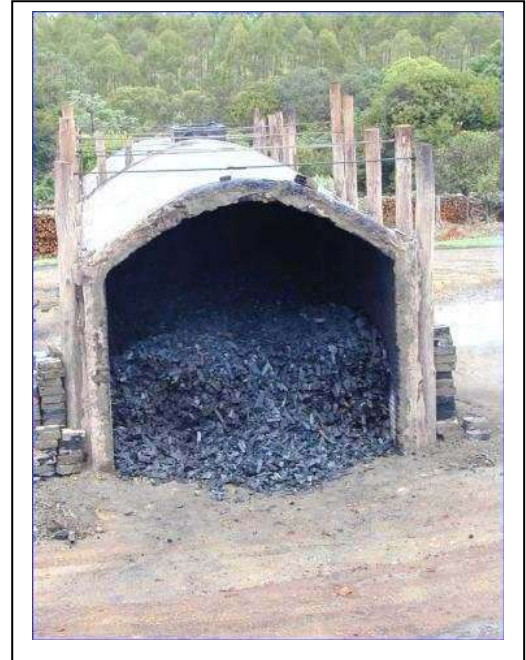
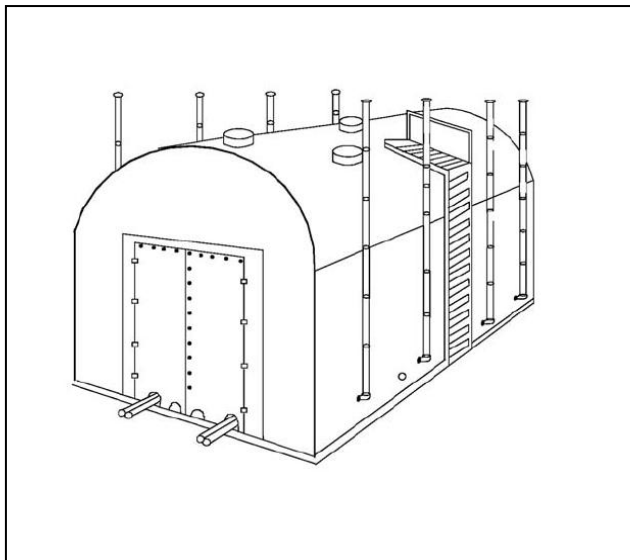
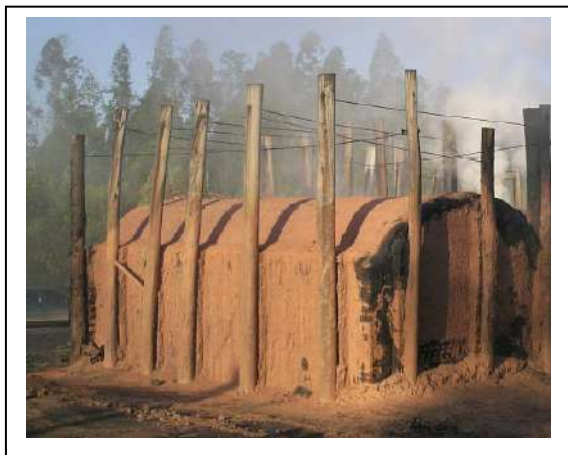


Figura 4.32 - Fornos Missouri
(FAO, 2008 - citado por Morello, 2009; Quirino, 2006)

Segundo Amodei (2008) a Saint Gobain Ltda. produz carvão vegetal em sua unidade de carvoejamento de Seropédica, RJ, consumindo 35 t de lenha em cada carga e produzindo 17,5 st para consumo em altos fornos destinados a produzir tubos, conexões e acessórios em ferro dúctil, válvulas e equipamentos hidráulicos, tampões, tubos e conexões para esgoto predial (Amodei, 2008)



Figuras 4.33 – Forno Missouri (de superfície com chaminé) e unidade de carvoejamento empregados pela Saint Gobain em Seropédica, RJ
(Amodei, 2008)

Os fornos retangulares são utilizados em florestas energéticas de propriedade das empresas produtoras de aço a carvão vegetal. O isolamento térmico desses fornos é considerado funcional, seu rendimento em carvão vegetal está entre 30 e 33%. Suas medidas permitem o trânsito de máquinas no seu interior para carga de lenha e descarga de carvão, possibilita a instrumentação para controle da operação, além da recuperação do alcatrão (Santos, 2007).

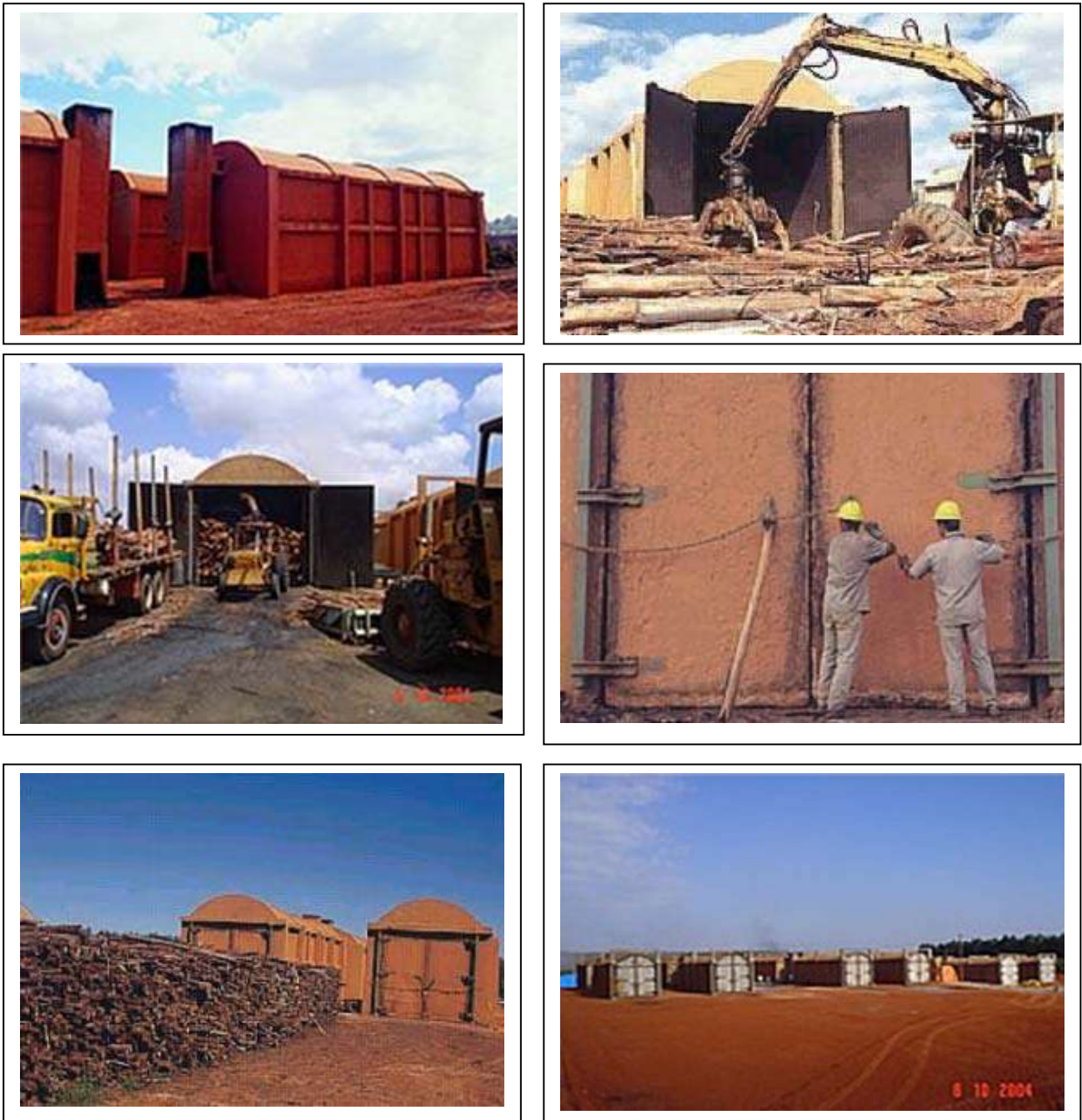


Figura 4.34 - Fornos Retangulares da CAF-Arcelor (2005) Modelo Missouri

A construção dos fornos retangulares de concreto pode ser compreendida através dos registros fotográficos divulgados pelo Prof. José Otávio Brito (2008)



Figura 4.35 – Etapas da construção de um forno retangular de concreto armado
(Brito, 2008)

Segundo Ferreira (2000) a Mannesmann S.A. adotou uma instalação moderna de carbonização, vendo-se os fornos tipo Missouri, equipados com pórticos para a descarga dos caminhões de madeira. Cerca de 50% desses fornos estão dotados de sistema de recuperação de alcatrão.



Figura 4.36 - Fornos Missouri adaptados pela Mannesmam
(Ferreira, 2000)

4.4 - CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 4

1ª - O método de medas foi um método para substituir os fornos de poço e cova. O Forno meda causava menos danos à floresta, além de produzir um carvão de melhor qualidade.

2ª - Fornos medas são descartáveis, durando apenas um ciclo de produção.

3ª – O forno de alvenaria mais simples é o forno rabo quente.

4ª – Em terrenos planos são construídos os fornos de superfície, e em regiões de relevo acidentado os fornos de encosta ou barranco.

5ª – Preocupação em contratar trabalhadores com experiência comprovada para a escolha de local, material e construção, que são fatores cruciais para durabilidade e sucesso operacional dos fornos de alvenaria.

6ª – Forno **Meia Laranja** é o mesmo que **Rabo Quente**.

7ª – **Baianas e tatus** são denominações para **orifícios laterais e superiores** para entrada de ar e saída de emissões gasosas ou fumos.

8ª – **Forno Colméia** é o mesmo que **Forno de Superfície**. Esse tipo de forno possui chaminé.

9ª - O Eng. M.Sc. José Gonçalves Bastos Filho projetou e construiu uma série de fornos de alvenaria do **tipo colméia**, que foram batizados de “**JG**”.

10ª – **Forno Missouri** é um tipo de forno que permite a mecanização total do processo de carregamento da matéria-prima e descarga de carvão. São **fornos retangulares com estrutura metálica e alvenaria**.

4.5 - CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 4

1ª – Ao longo da história existiam registros do uso de fornos terra ou barro para produção de carvão vegetal por empregar tecnologia simples, ser de fácil construção e manuseio além de não necessitar de grandes áreas e altos investimentos. São encontrados até hoje em grande quantidade em pequenas propriedades.

2ª – O desenvolvimento de diferentes técnicas proporcionou uma vasta variedade de fornos de terra, barro e alvenaria. A busca por maiores rendimentos de conversão de madeira em carvão vegetal, a preocupação com o meio ambiente e o desejo de obter fornos que produziram carvões com melhores características físico-químicas são razões que justificam essa variedade.

3ª – Fornos de tijolos, barro ou metálicos são capazes de produzir carvão vegetal por diversos ciclos, diferentemente dos fornos tipo meda, cova e caieira que para serem descarregados ao fim do processo de carbonização precisam ser destruídos, podendo haver produção em apenas um ciclo.

4.6 - REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 4

AMODEI, J.B. – **Avaliação do processo de carbonização da empresa Saint Gobain Ltda.** – Monografia, Curso de Engenharia Florestal, Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Julho 2008.

BARCELLOS, D.C. – **Forno Container para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e controle da poluição** – Tese de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Orientador: Dr. Alexandre Santos Pimenta, Minas Gerais, 2002.

BASTOS FILHO, J.G. – **Sistemas de produção de carvão vegetal em pequenas, médias e grandes unidades** – Fórum Nacional de Carvão Vegetal, 22 de outubro de 2008 - extraído de <http://painelflorestal.com.br/upload/jg.pdf> em 25 de junho de 2010.

BOVET, A. (1883) – **A indústria mineral na Província de Minas Geraes** - Annaes da Escola de Minas de Ouro Preto, 1883.

BRITO, J.O. - **Princípios de Produção e Utilização de Carvão Vegetal de Madeira**- Departamento de Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura “Luiz De Queiroz”, Universidade de São Paulo – 1990, *Documentos Florestais*, Piracicaba (9): 19, mai, 1990.

BRITO, J.O. – **Como evoluir a produtividade da cadeia de madeira energética** – 1º MADEN 2008, Instituto Nacional de Eficiência Energética - INEE.

COLOMBO, S.F.O.; PIMENTA, A.S.; HATAKEYAMA, K. – **Produção de Carvão Vegetal em Fornos Cilíndricos Verticais: Um Modelo Sustentável** – XIII SIMPEP, Bauru, SP, 6 a 8 de Novembro de 2006.

FAO– **Simple technologies for charcoal making** - FAO forestry paper 41, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, Rome, First printing 1983 - Reprinted 1987 – Disponível em <http://www.fao.org/docrep/X5328e/x5328e00.HTM>.

FERREIRA, O. C. – **Emissão de gases de efeito estufa na produção e consumo de carvão vegetal** – in: Economia e Energia, Ano III, Setembro/Outubro 2000, <HTTP://ecen.com/eee21/emiscar.htm>

FERREIRA, O.C. – **Emissão de gases de efeito estufa na produção e no uso do carvão vegetal** – in: Economia e Energia, No 20 – Maio-Junho 2000, <http://ecen.com/eee20/emiscarv.htm>

HOUAISS, A, - **Houaiss Eletrônico da Língua Portuguesa** – Versão Monusuário 1.0 – Instituto Antonio Houaiss e Editora Objetiva Ltda., Rio de Janeiro, RJ, 2009.

MARRI, A.; OLIVEIRA, J.B.; MENDES, M.G.; GOMES, P.A. – **Manual de construção e operação de fornos de carbonização** – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, Belo Horizonte, 1982).

MORELLO, T.F. – **Carvão Vegetal e Siderurgia: de elo perdido a solução para um mundo pós-Kioto** – Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo, Orientador: Dr. Ricardo Abramovay, São Paulo, 2009.

MOREIRA, C.S. – **Contribuição ao estudo da eficiência de pequenos fornos na produção de carvão vegetal desinado a alto forno** – Tese de Doutorado apresentada à escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo – Piracicaba, SP, 1964.

NAPOLI, A.- **Melhorias no processo de pirólise da biomassa para produção de carvão vegetal - Seminário Franco-Brasileiro sobre Tratamento Térmico da Biomassa**, 2009

OLIVEIRA, C. – **A Metallurgia do Ferro em Minas: Estudo sobre a Estado Atual e a Viabilidade dessa Indústria, primeira Parte** – Annaes da Escola de Minas de Ouro Preto, 1902.

PIMENTA, A.S. - **Comunicação privada** – citada por Sueli de Fátima de Oliveira Miranda Santos - setembro, 2007

PINHEIRO, P.C.C.; SAMPAIO, R.S.; BASTOS FILHO, J.G. – **Organização da Produção de Carvão Vegetal em Fornos de Alvenaria** - *Biomassa & Energia*, v. 2, n. 3, p. 253-258, 2005, acessado em 13 de junho de 2010 e extraído de <http://www.renabio.org.br/publicacoes.php?l=revista>

PINHEIRO, P.C.C. - **Produção de carvão vegetal no Brasil** – Seminário “Encuentro Regional sobre Biocombustiblesy Energias Renovables”, UDELAR, Montevideo, Uruguay, 23 de abril de 2009.

QUIRINO, W.F. - **Possibilidades de valorização energética dos resíduos da cadeia produtiva madeira e móveis** - Congresso Paraense de Soluções Tecnológicas e Ambientais como Fator De Competitividade da Cadeia Produtiva Madeira e Móveis, acessado e extraído de <http://www.pa.sebrae.com.br/madmoveis/pdfs/Apossibvalenergetica.pdf> em 07 de junho de 2010.

SANTOS, S.F.O.M. - **Produção de carvão vegetal em cilindros metálicos verticais: alguns aspectos referentes à sustentabilidade** – Dissertação de Mestrado, Orientador: Kazuo Hatakeyama, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2007.

SENA, J. C. C (1881) – **Viagem de estudos metalurgicos no centro da provincia de Minas** - Annaes da Escola de Minas de Ouro Preto, 1881

SILVA, A.R. - **Sistema de produção do carvão vegetal em duas áreas da estrada AM-010, Amazonas** – Monografia para obtenção do grau de Engenharia Florestal, Orientador: Dr. Ulisses Silva da Cunha, Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Faculdade de Ciências Agrárias, Departamento de Ciências Florestais, Manaus, 2006.

SINCAL – **Pró-Carvão – Diagnóstico da Cadeia Produtiva de Carvão Vegetal e Lenha - Relatório Final** – Sindicato do Comércio Varejista de Carvão Vegetal e Lenha do Estado de São Paulo, 2000.

SVEDELIUS, G. (1875) – **Handbook for charcoal burners** – New York: John Wiley & Son.

CAPÍTULO 5

FORNOS CARBONIZADORES METÁLICOS DESCONTÍNUOS

- 5.1 – Tipos básicos de fornos metálicos carbonizadores de biomassa**
- 5.2 – Fornos metálicos cilíndricos horizontais e verticais**
- 5.3 – Forno metálico TPI com anéis desmontáveis e chaminés adotado**
- 5.4 – O forno container metálico da tese de mestrado de Barcellos (2002)**
- 5.5 – O forno container metálico da tese de mestrado de Guimarães Neto (2005)**
- 5.6 – O forno container metálico da tese de mestrado de Santos (2007)**
- 5.7 – Fornos containers cilíndricos metálicos verticais empregados na Bricarbrás**
- 5.8 – O Forno metálico JG-SCC**
- 5.9 – O forno metálico retangular da DPC**
- 5.10 – Baterias de fornos DPC e recuperação de produtos condensados da fumaça**
- 5.11 – O container metálico e o processo descontínuo da RIMA**
- 5.12 – O forno com caçamba metálica da tese de mestrado de Assis (2007)**
- 5.13 – Constatações do capítulo 5**
- 5.14 – Conclusões do capítulo 5**
- 5.15 – Referências do capítulo 5**

CAPÍTULO 5

FORNOS CARBONIZADORES METÁLICOS DESCONTÍNUOS

5.1 – TIPOS BÁSICOS DE FORNOS METÁLICOS CARBONIZADORES DE BIOMASSA

Os fornos metálicos carbonizadores surgiram para melhorar os métodos tradicionais de produção do carvão vegetal – que empregam terra, argila e alvenaria e operam em regimes descontínuos. Vêm sendo aperfeiçoados para reduzir o tempo de carbonização, aumentar os rendimentos volumétricos, aproveitar os subprodutos do processo, diminuir os custos logísticos, e diminuir a emissão de poluentes.

Os fornos metálicos carbonizadores são construídos para operar em regimes:

- batelada (ou descontínuo);
- semi-contínuo (também descontínuo), e
- contínuo (retorta).

Os fornos metálicos de batelada podem ser fixos ou móveis e esta escolha depende da localização da área de extração da matéria-prima, do custo de transporte e da mão-de-obra (Pinheiro e colaboradores, 2005 – citado por Santos, 2007).

Os fornos metálicos podem ser cilíndricos e retangulares. Os modelos “retangulares” são, na realidade, prismáticos, e possuidores de seções retas horizontais e paredes laterais quadradas ou retangulares, sendo conhecidos por essa terminologia.

As tecnologias de carbonização de madeira e resíduos vegetais incluem:

1ª – cilindros metálicos compostos de anéis desmontáveis e superpostos, encimados por um teto cônico e ladeado por chaminés verticais também metálicas;

2ª - cilindros metálicos verticais em fornos câmara muflados e queimadores de fumaça – constitui uma tecnologia industrial;

2ª – contêineres ou caixões metálicos horizontais com fonte externa de gases quentes – é outra tecnologia industrial para produzir carvão vegetal.

Os fornos containers cilíndricos da UFV e adotados na CIAFAL e BRICARBRAS possuem câmaras com faces e arestas retilíneas (“retangulares”) que podem envolver cilindros metálicos contendo a lenha, para que esta não entre em contato direto com a chama dos queimadores, constituindo, portanto, fornos câmara muflados.

Os fornos containers retangulares da DPC (outro grupo de pesquisadores) são os caixões metálicos que recebem as cargas em cestos metálicos de geometria similar transportados em caminhões.

Para que se possa compreender o processo produtivo de cada sistema de carbonização é importante, também, descrever o histórico do desenvolvimento de cada tipo.

5.2 - FORNOS METÁLICOS CILÍNDRICOS HORIZONTAIS E VERTICAIS

Da mesma forma que para os fornos de terra ou barro e de alvenaria, alguns dos trabalhos consultados são teses de mestrado e doutorado defendidas e aprovadas no Brasil, aqui parcialmente reproduzidas por revelarem os princípios construtivos e operacionais de modo muito bem ilustrado.

Segundo Quirino (2002), no processo de carvoejamento podem ser utilizados equipamentos mais simples ou mais sofisticados, dependendo de cada caso. Os fornos mais simplificados e populares (ilustrados abaixo) são utilizados em alguns lugares do pacífico sul, **principalmente para fazer carvão vegetal de cascas de cocos. É possível construir fornos metálicos de tambores reciclados ou novos** e empregá-los no próprio local sem necessidade de transporte dos resíduos, como se mostra abaixo.

1º - num tambor metálico de óleo de 200 litros, faz-se uma abertura de 20 cm ao longo do seu perímetro circular, conforme a figura abaixo:

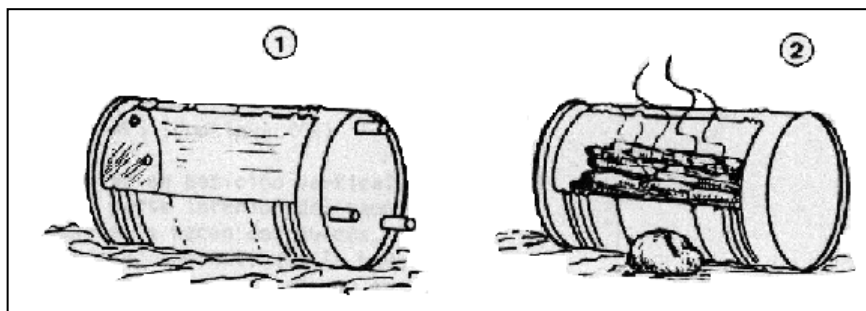


Figura 5.1 – Enchimento do forno e início da carbonização (Quirino, 2002).

2º - Com o tambor deitado sobre o solo e sua abertura paralela à direção do vento e a 20 cm do solo, colocam-se gravetos e lenhas finas para iniciar a carbonização. A seguir, ergue-se a abertura 10 cm e adicionam-se cascas de cocos. Repete-se esta operação até o tambor estar completamente cheio de cocos incandescentes e a abertura alcançar a posição superior;

3º - Cobre-se a abertura do tambor com a chapa que foi recortada do tambor, prendendo-a com arame. Gira-se o tambor de maneira que a abertura que foi fechada com a tampa fique virada sobre o solo. Vedando-se com terra qualquer entrada de ar, como se vê abaixo. Deixa-se o tambor nessa posição por aproximadamente 5 horas, até esfriar.

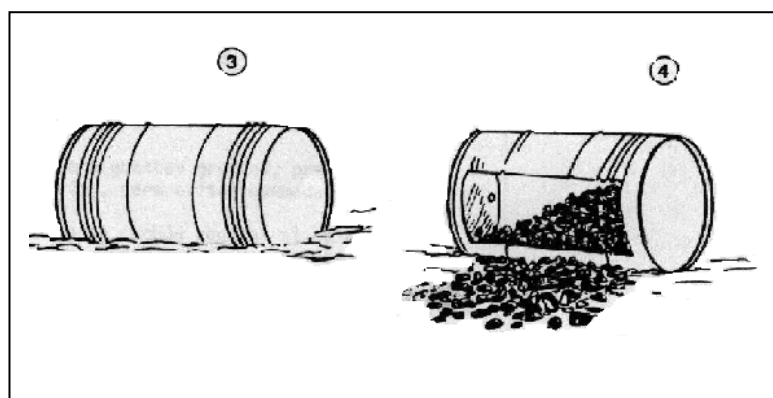


Figura 5.2 – Carvoejamento, esfriamento e retirada do carvão dos tambores (Quirino, 2002)

4º - Iniciando-se a carbonização pela manhã, já no final da tarde pode-se abrir e recolher o carvão.

Outra possibilidade consiste em utilizar os tambores na posição vertical, como as figuras seguintes.

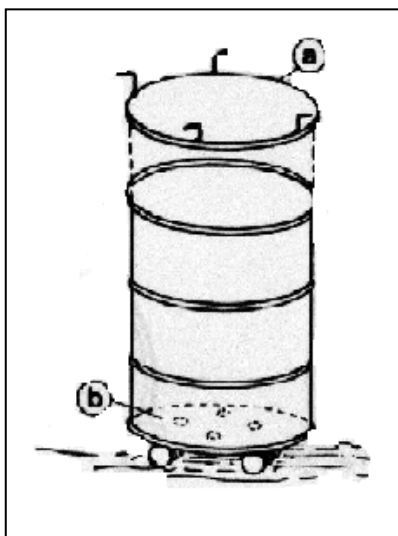


Figura 5.3 - Tambor de 200 litros com tampa removível e orifícios no fundo (Quirino, 2002).

Na figura anterior, a lateral do tambor é convertida em tampa, sendo feitas na outra lateral algumas perfurações para a entrada de ar de combustão de modo a convertê-la numa grelha. Inicia-se a combustão pelo fundo do tambor, alimentando-o em seguida com cascas de coco. Quando o tambor estiver pela metade de brasas vivas, veda-se a parte inferior com terra. Aguarda-se o final da carbonização e resfriamento.

Pode-se usar também tambores verticais com aberturas laterais para entrada de ar, como mostram as figuras 5.4(a) e (b). Estas aberturas têm funções semelhantes aos “tatus” e “baianas” dos fornos de alvenaria. À medida que elevam-se o nível das brasas dentro do tambor, selam-se as aberturas com argila. Como se observa na figura 5.4(b), pode-se também utilizar dois tambores soldados.

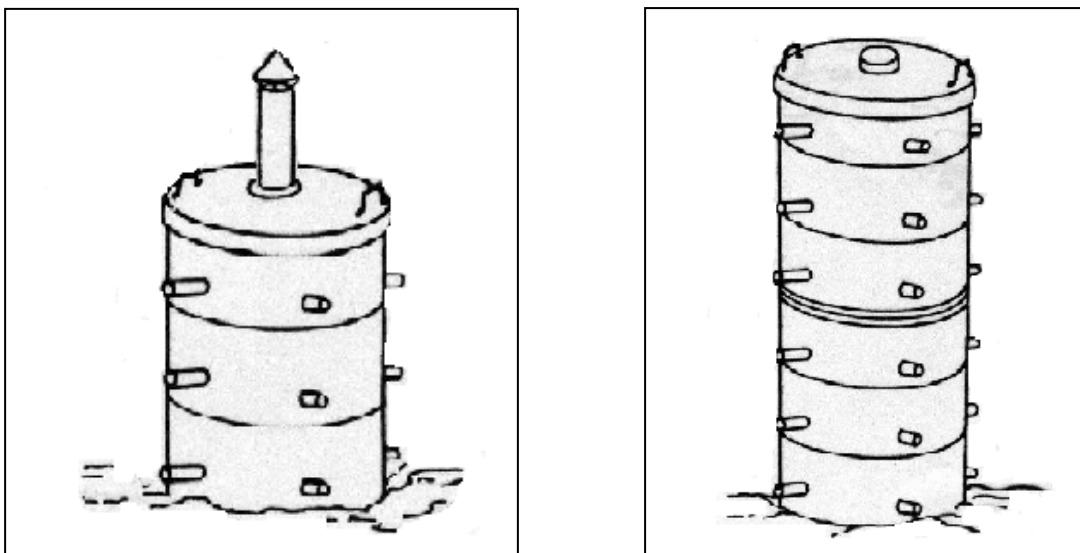


Figura 5.4– (a) à esquerda, um tambor metálico de 200 litros com chaminé, orifícios laterais e no fundo, mostrando a vedação do fundo com terra; (b) à direita, dois tambores superpostos, para aumentar a capacidade de produção.

5.3 - FORNO METÁLICO TPI COM ANÉIS DESMONTÁVEIS E CHAMINÉS ADOTADO

O uso amplo de fornos metálicos cilíndricos transportáveis originou-se na Europa durante os anos 30 do Século XX. O Reino Unido desenvolveu essa técnica durante a Segunda Guerra Mundial em seu Laboratório de Pesquisas de Produtos Florestais. E essa tecnologia foi transferida para os países em desenvolvimento nos anos 60 posteriores, notadamente, para o Departamento Florestal de Uganda, em Gana, no continente Africano (FAO, 1987). O Instituto de Produtos Tropicais ("**Tropical Products Institute – TPI**") adquiriu uma experiência considerável na operação de fornos metálicos móveis, pois desenvolveu um projeto de construção econômica, robusto e durável, fácil de operar, eficiente e produtivo para países em desenvolvimento, cuja denominação incorporou a sigla TPI.

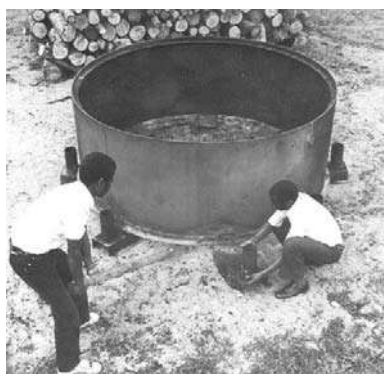


Figura 5.5 – Forno transportável TPI
(FAO, 1987)

As principais características tecnológicas do **forno TPI** são (FAO, 1987):

- 1ª – emprega folhas de aço com espessura 3 mm na fabricação da seção inferior e espessura 2mm na seção de topo e na cobertura;
- 2ª – as duas seções principais do forno TPI são cilíndricas;
- 3ª – cantoneiras de ferro de 50 mm – soldadas no interior das partes superiores de cada cilindro são usadas para suportar a seção superior e a cobertura;
- 4a – Os oito canais de entrada/saída posicionados sob a seção inferior do forno são abertos, Um colar é disposto ao redor da abertura da face do topo de cada canal para suportar a chaminé durante a operação do forno.
- 5ª – Quatro portais de descarga de vapor igualmente espaçados são instalados na cobertura do forno.

Há diversos modelos de fornos móveis TPI construídos no mercado, inclusive com espessuras de chapa de aço mais finas, o que compromete a sua durabilidade. O uso de aço "Corten "A" ao invés de aço doce é recomendável para aumentar a durabilidade do forno móvel TPI, a um custo aproximadamente 10% maior (FAO, 1987). A montagem de um forno metálico móvel TPI é descrita a seguir.



A – inserção de 4 suportes e canais de entrada de ar debaixo do anel



B – Enchimento com lenha, evitando entupir os 8 canais de passagem de ar/gases



C – Uso de resíduos inflamáveis para prover 2 diâmetros de ignição/combustão



D – Operação de carregamento com lenha de tamanhos pequenos e médios para deixar o ar passar e sustentar os maiores



E – Acendimento dos resíduos com o forno montado e coberto



F - Montagem das chaminés e preenchimento dos espaços entre os canais de entrada de ar e de saída de gases com areia ou solo



G – Representação do escoamento do ar no início da operação e dos vapores e gases emitidos durante a pirólise



H – Desmontagem dos cilindros metálicos revelando a redução do volume à metade durante a carbonização

Figuras 5.6 – Montagem e desmontagem de um forno transportável TPI (FAO, 1987)

5.4 – O FORNO CONTAINER METÁLICO DA TESE DE MESTRADO DE BARCELLOS (2002)

Daniel Câmara Barcellos defendeu em 2002 a tese de mestrado intitulada “Forno container para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e controle da poluição” no Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa, no Estado de Minas Gerais, sob a orientação do Prof. Dr. Alexandre Santos Pimenta, cujo equipamento é descrito a seguir.



Figura 5.7 – Instalação do forno container metálico construído para ensaios de carbonização (Barcellos, 2002)

A construção do forno container metálico utilizado por Barcellos (2002) consistiu num cilindro com diâmetro de 1,27 m e altura 1,50 m, perfazendo um volume nominal de 1,9 m³. Foi fabricado com chapa metálica (preta) com espessuras de 3 mm de parede, e 8 mm para a tampa e fundo do cilindro. A chapa do fundo foi perfurada com orifícios de 40 mm de diâmetro distribuídos em toda sua área. O fundo do container tinha uma abertura de saída da chaminé central de 15 cm de altura por 25 cm de diâmetro, por onde se fez a retirada dos gases quentes (fumos) durante a carbonização. Nas paredes laterais foram fixados 3 tubos metálicos para servir de poços termométricos nos níveis de 25 cm, 75 cm e 125 cm e abrigar os termopares que atingiram o eixo central do container (Figura 5.8)

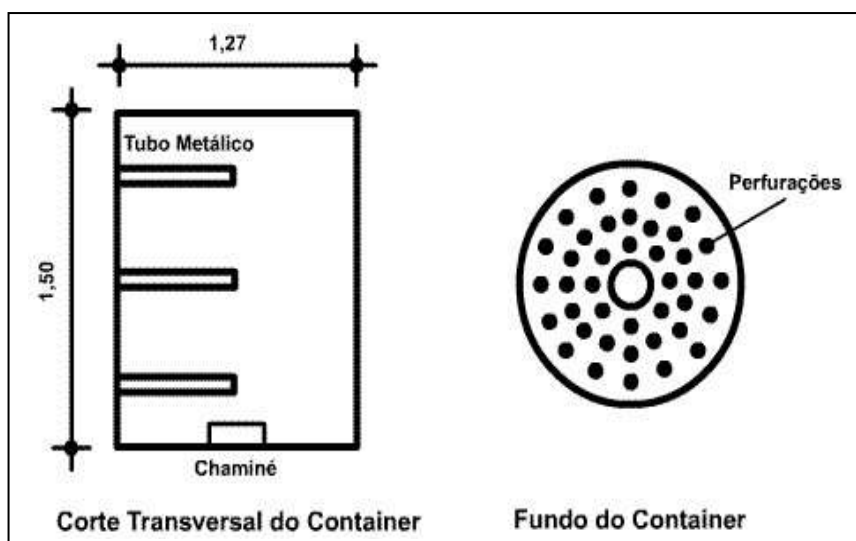


Figura 5.8 - Vista de perfil e superior do fundo do container metálico (Barcellos, 2002)

A câmara de combustão foi construída em alvenaria nas dimensões de 50 x 50 x 30 cm, possuindo uma porta metálica com janela regulável, localizada na parte inferior, que permitia o controle da entrada de oxigênio. A câmara dispunha de uma grelha de barras metálicas com diâmetro 35 mm para suportar a lenha, ou tico ou casca, etc.) no início do processo de carbonização (Barcellos, 2002).

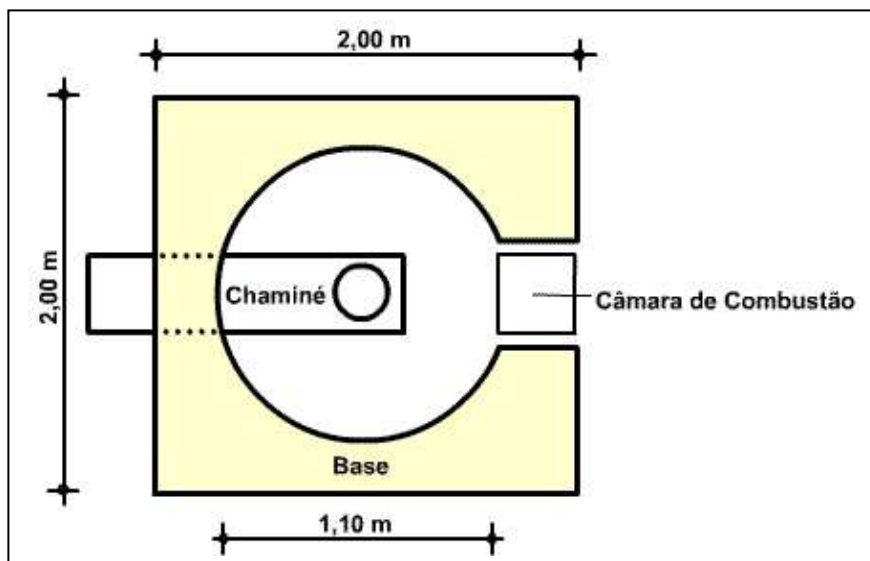


Figura 5.9 - Vista superior da base do forno poço (Barcellos, 2002)

O poço isolante, localizado sobre a base do forno, foi construído com tijolos comuns de argila, além do emprego de cimento, ferragens e areia para sua base e paredes, com as dimensões internas de 1,60 m x 1,60 m x 1,80 m. Possuía uma porta de dupla camada metálica preenchida com lã de vidro e com 5 cm de espessura total. A retirada do container era feita pela porta do poço isolante após o seu içamento, pelo uso de uma talha manual com capacidade para duas toneladas (Figura 5.10).

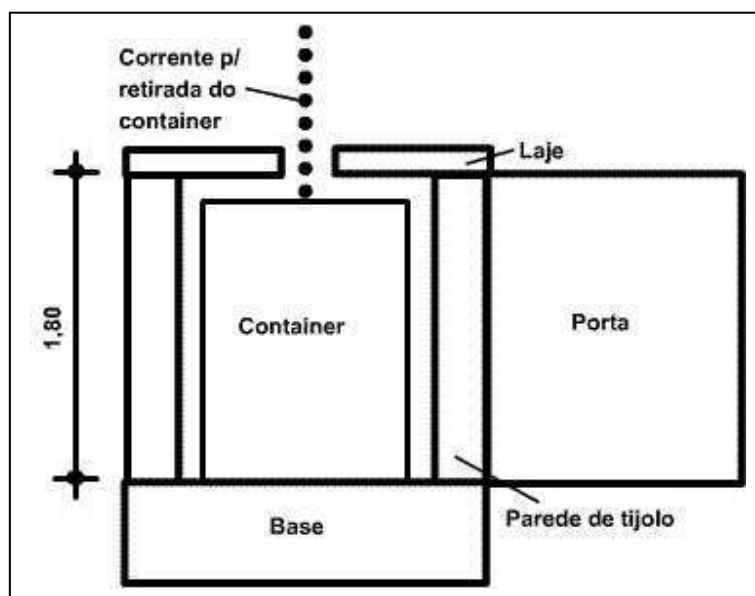


Figura 5.10 - Vista de perfil do poço isolante (Barcellos, 2002)

A **fornalha** utilizada para queimar os combustíveis formados por lenha com tamanhos médios de 30 cm ou resíduos vegetais, foi construída utilizando-se tijolos comuns e refratários, mais areia lavada, terra, melão de açúcar, brita, cimento, ferragens e chapas metálicas. A “**célula de queima**” com dimensões de 20 x 20 x 20 cm foi construída com vergalhões de 20 mm de diâmetro nominal. Com volume útil de 0,1 m³, localizava-se no centro da câmara de combustão e seu interior foi revestido com tijolos refratários (Barcellos, 2002).

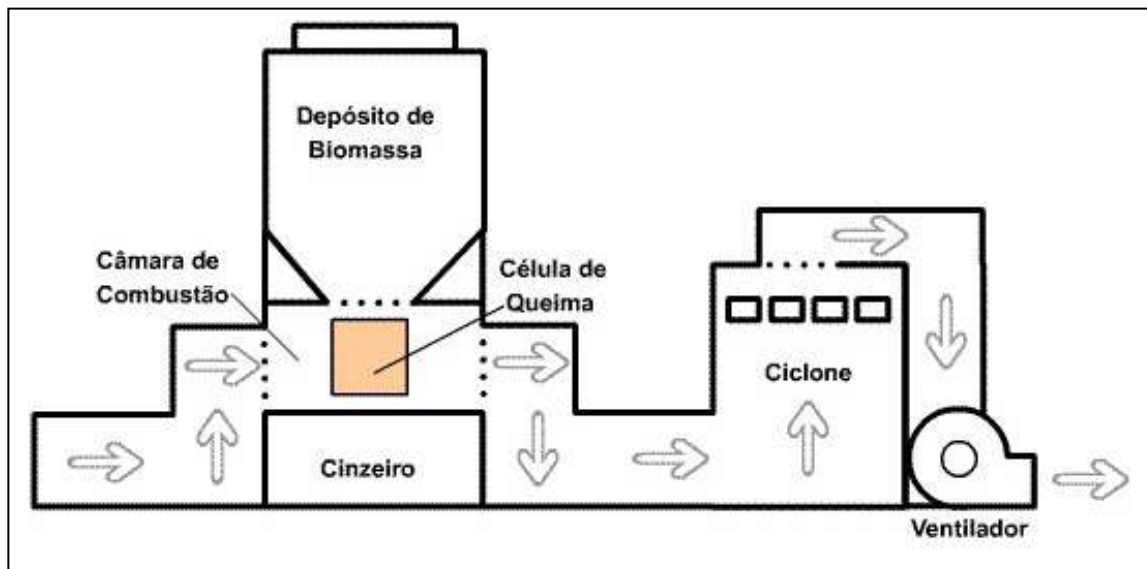


Figura 5.11 – Desenho esquemático do perfil do conjunto da fornalha externa (Barcellos, 2002)

A **operação de um forno container metálico** (Barcellos, 2002) **inicia-se** com o descarregamento do caminhão de lenha, que pode ser feito diretamente para dentro do container (e possibilita eliminar etapas de descarga, estocagem a céu aberto ou em galpões para posterior coleta e transporte para o reator). **Em seguida**, coloca-se a tampa para vedar o contêiner, que é içado por meio da talha e transportado até o poço isolante, que possui uma câmara de combustão na sua base onde são queimados resíduos ou lenha de baixa qualidade. **A combustão externa** gera gases quentes que atingem o interior do container através dos furos existentes na chapa metálica da sua base e aquecem a carga provocando sua pirólise ou decomposição térmica (craqueamento) (Barcellos, 2002).

A combustão de resíduos é feita até que o processo de carbonização se inicie. Após um ciclo operacional de 6 a 12 horas, a carbonização termina e o contêiner (com o carvão quente) é retirado do poço e colocado sobre uma caixa de areia onde resfriará durante quase 12 horas, para depois ser aberto e basculado para que seja descarregado. **Após a retirada do primeiro contêiner, um segundo contêiner pode ser colocado no mesmo poço isolante**, para iniciar uma segunda carbonização, de modo a produzir-se um processo ou ciclo semi-contínuo de produção de carvão vegetal (Barcellos, 2002).

Figura 5.12 – Retirada do container de um poço isolante após a carbonização da madeira no forno instalado na V&M do Brasil em Paraopeba, MG, com volume ampliado para 4 st (estéreis) de lenha (Barcellos, 2002)



5.5 – O FORNO COM CONTAINER METÁLICO DA TESE DE MESTRADO DE GUIMARÃES NETO (2005)

Rosalvo Maciel Guimarães Neto defendeu em 2005 sua tese de mestrado em 2002 intitulada “Avaliação técnica e econômica de um forno container em escala industrial” no Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da Universidade Federal de Viçosa, no Estado de Minas Gerais, sob a orientação do Prof. Dr. Alexandre Santos Pimenta, cujo equipamento é descrito a seguir.

Os trabalhos experimentais foram realizados na CIAFAL (Comércio e Indústria de Artefatos de Ferro e Aço Ltda) localizada em Divinópolis, no Estado de Minas Gerais.

Um **sistema de carbonização da madeira ou de resíduos vegetais em containers metálicos** significa, na prática, o uso de cilindros ou cestos prismáticos metálicos contendo a carga de lenha que são aquecidos dentro de **containers ou caixões** de seção reta quadrada ou retangular, **que são fornos muflados do tipo câmara** (em que o material reagente não entra em contato com a fonte térmica).

Guimarães Neto (2005) descreveu o **sistema do forno com container metálico industrial na CIAFAL** que incluía as seguintes partes:

- 1^a – os cilindros metálicos;
- 2^a – um secador de lenha;
- 3^a – um sistema de movimentação de carga;
- 4^a – quatro poços isolantes ou fornos câmara muflados;
- 5^a - um queimador de fumaça.

O termo **fumaça** foi adotado nas teses de Barcellos (2002) e Guimarães Neto (2005) para descrever a mistura de gases e vapores inicialmente branca emitida nos containers.

Cada **container metálico industrial** era constituído de um cilindro de aço, fabricado com chapas de 3/8” e 3/16”, com altura de 2,6 m e diâmetro de 2,1 m para resultando num volume nominal de 9 m³, conforme a Figura 5.13. A tampa do container foi fabricada com ferro fundido e pesava 800 kg, sendo dotada de orifícios distribuídos em toda a área, conforme a Figura 5.13.



Figura 5.13 – Cilindro metálico para carbonização e uma grelha do fundo
(Guimarães Neto, 2005)

O **fundo do container** dispõe de uma chaminé com 40 cm de altura por 30 cm de diâmetro, por onde são retirados os gases durante o processo de carbonização. No centro das paredes foram fixados alguns termopares nas alturas de 60 cm, 1,20 m e 1,80 m a partir da base (Guimarães Neto, 2005).

O **sistema de movimentação de carga e descarga** dos containeres metálicos consiste num pórtico rolante, equipado com uma talha elétrica, equipada com uma balança capaz de suportar 10 ton de peso (vide Figura 5.14). A carga e a descarga eram operadas manualmente por dois operadores. O tempo de carregamento é de 15 minutos e a descarga demanda 5 minutos, totalizando 20 minutos nesse processo.

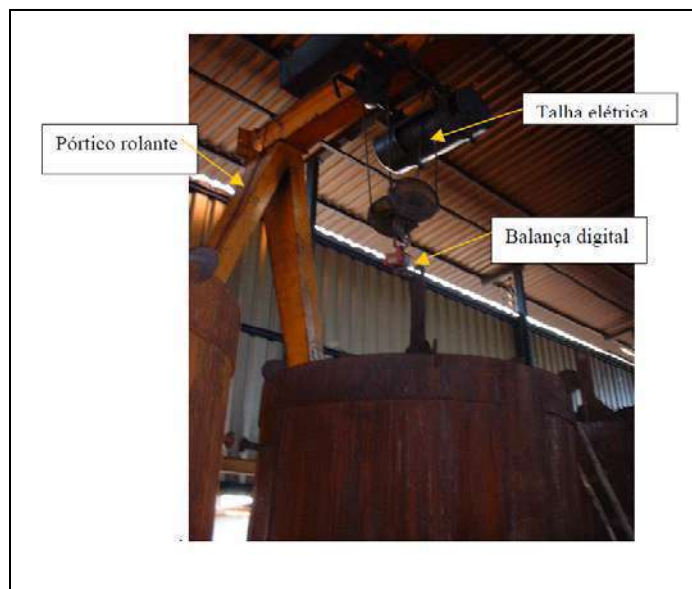


Figura 5.14 – Sistema de movimentação dos containeres metálicos
(Guimarães Neto, 2005)

Para o resfriamento, utilizava-se uma caixa de areia, sobre a qual o container era colocado durante 12 horas, descarregando-se a carga do carvão quando atingia a temperatura ambiente.

Quatros “**poços isolantes**” ou **fornos containeres do tipo câmara** são vistos na figura seguinte. Cada poço isolante corresponde a um recipiente isolante destinado a manter uma temperatura elevada em torno de cada container onde se processa a carbonização (Guimarães Neto, 2005).



Figura 5.15 – Vista dos poços isolantes, câmara de ignição e sistema de injeção de ar
(Guimarães Neto, 2005)

O **queimador de fumaça**, tipo “celular”, é utilizado para queima dos gases obtidos na pirólise da madeira. Na sua construção foram empregados tijolos comuns e refratários, areia lavada, terra, brita, cimento, ferragens e trilhos metálicos. As dimensões da célula de queima eram: 0,50 m x 0,50 m x 0,40 m, para vergalhões de 20 mm de diâmetro (aço ASTM 1050) e ficou localizada na extremidade da câmara de combustão e pirólise, cujo interior foi revestido com tijolos refratários.

Acima da célula de queima foi instalado uma tremonha ou depósito de biomassa, para abastecê-la por gravidade, na medida em que ocorre a queima do combustível. O queimador possui, ainda um cinzeiro localizado abaixo da célula de queima e um exaustor-ventilador centrífugo para aspirar os gases da pirólise (Guimarães Neto, 2005).



Figura 5.16 – Vista geral do queimador de fumaça
(Guimarães Neto, 2005)

O **secador de lenha** utilizou os fumos (ou emissões gasosas) quentes obtidos na queima da fumaça emitidos pela chaminé de exaustão através de tubulações, que resultaram da pirólise nos containeres. O “ar quente” gerado na queima da fumaça foi injetado na pilha de lenha, acelerando dessa forma, o processo de secagem da madeira, antes de ser carregada no forno container metálico.

5.6 – O FORNO COM CONTAINER METÁLICO DA TESE DE MESTRADO DE SANTOS (2007)

O processo semicontínuo de carbonização em cilindros metálicos verticais uma unidade de produção de carvão vegetal existente na Bricarbrás do Grupo Hübner, localizada no Estado do Paraná, foi descrito também por Santos (2007) e incluía as etapas seguintes:

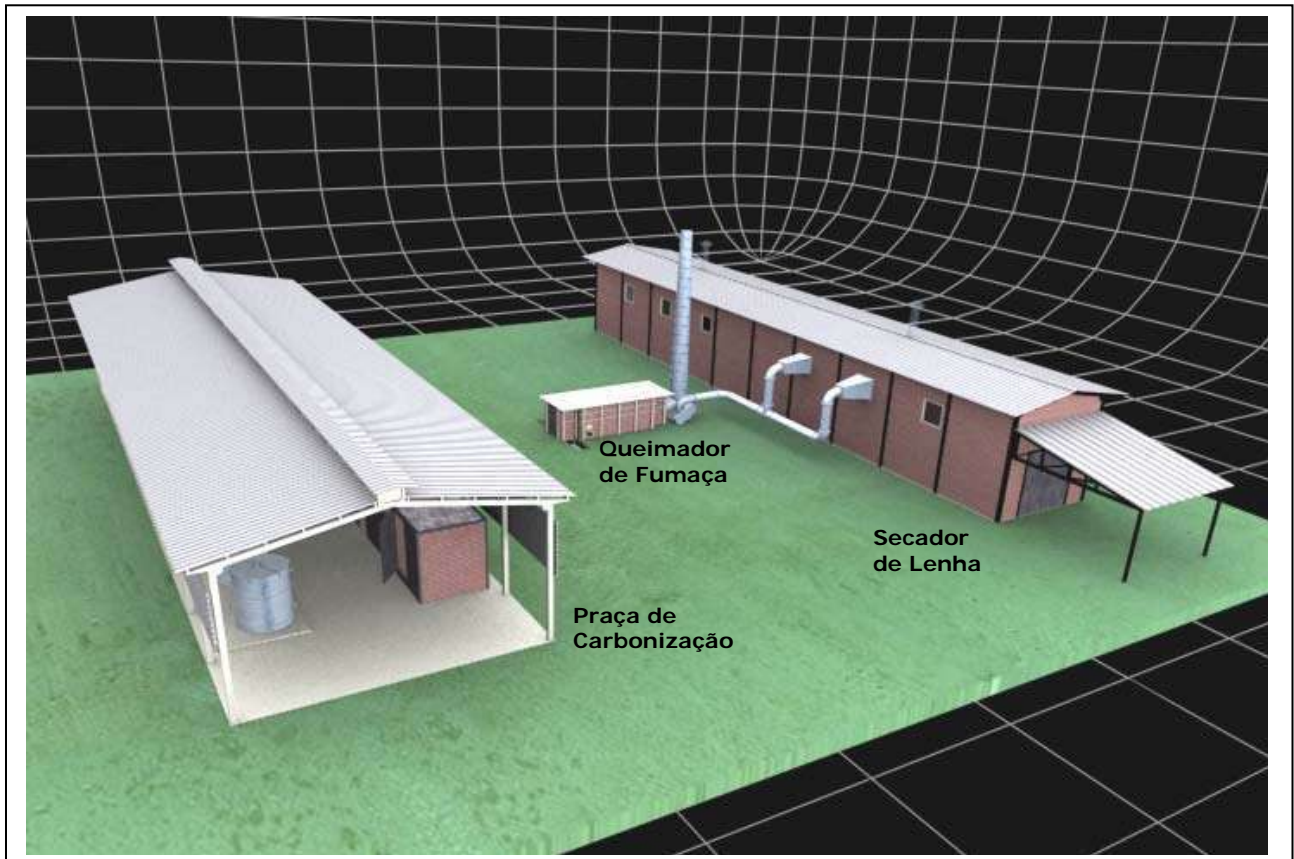


Figura 5.17 - Representação de uma planta de secagem e carbonização semicontínua de madeira em cilindros verticais utilizado na Bricarbrás –Grupo Hubner (Santos, 2007)

- 1 – Iniciar o processo de produção com o carregamento do cilindro metálico** com lenha previamente cortada em tamanho uniforme e com o teor de umidade reduzido.
- 2 - O cilindro metálico carregado é fechado na extremidade inferior com uma grelha** que permite a circulação do ar e dos fumos decorrentes da carbonização da lenha.



Figura 5.18 - Tampa ou grelha do cilindro de um cilindro metálico, acomodados em suportes para inspeção e manutenção (Santos, 2007)

3 – Com o cilindro assentado na posição vertical sobre um suporte na base do forno, inicia-se a carbonização a partir da ignição da lenha.

4 - A fumaça oriunda da carbonização é canalizada para o queimador.

5 - Parte dos gases quentes, provenientes dessa queima, é transferida para a unidade de secagem da lenha que pode contar, ainda, com o auxílio de um sistema de microondas.

A ignição do forno é feita com tiços e resíduos florestais (tocos e galhos) postos na base do forno que formam uma fonte de calor, que supre a demanda inicial de energia para a transformar a lenha em carvão vegetal. Dada a ignição, o cilindro carregado com lenha é posicionado pelo pórtico rolante dentro do **forno de carbonização**, as portas do forno são fechadas e a carbonização é iniciada.



Figura 5.19 – Forno câmara muflado (esq.) e ignição na base antes de carbonizar (direita)
(Santos, 2007; Bricarbras, 2006)

A câmara do forno container – conhecida como *poço isolante* - é feita de material isolador e tem como função minimizar a perda de calor enquanto ocorre a carbonização dentro do cilindro metálico. Cada forno container trabalha com três cilindros metálicos, conforme mostra a Figura 5.19(Santos, 2007).

Com a exaustão forçada pelo ventilador/exaustor, os gases quentes gerados na ignição sobem pelas perfurações da tampa do cilindro e vão até o topo do mesmo trocando calor com a carga lenhosa e a fumaça resultante da decomposição térmica da lenha desce deixando o leito pela chaminé. Com a convecção dos gases quentes ascendentes a carbonização se inicia, estando completa após 8 a 10 horas de processo, quando então, o cilindro é retirado de dentro do forno para o resfriamento. Esses cilindros são posicionados numa cancha ou caixa de areia e, uma vez expostos ao ar livre, o carvão vegetal perde calor livremente através das paredes metálicas, chegando a menos de 40°C entre 8 e 10 horas, ponto em que pode ser descarregado sem risco de auto-ignição.



Figura 5.20 – Cilindros metálicos na estação de pré-pirólise
(Guimarães Neto, 2005)

Segundo Santos (2007), **enquanto o primeiro cilindro se resfria**, outro cilindro com lenha é posicionado no forno e a carbonização recomeça.

Concluída a segunda carbonização, o cilindro é submetido ao resfriamento e um terceiro cilindro com lenha é posicionado no forno, iniciando-se nova carbonização. Enquanto isso, o **carvão vegetal frio do primeiro cilindro é descarregado e é feita um novo carregamento de carvão vegetal, isto é quase continuamente**, constituindo, portanto, um sistema semi-contínuo de produção com lenha (Santos, 2007).

Quando a terceira carbonização está concluída, o primeiro cilindro carregado com lenha volta para o forno e ciclo é reiniciado. Dessa forma, apesar de ser um sistema descontinuo, os fornos trabalham integrados (Santos, 2007).

A fumaça poluente gerada durante a carbonização é conduzida para um **queimador da fumaça** construído com tijolos refratários e tijolos comuns, onde os alcatrões e pirolenhos são integralmente queimados e transformados em "**gás quente limpo**". Após a queima, esses gases são conduzidos por tubulação para o secador de lenha (Santos, 2007).



Figura 5.21 - Vista lateral (a) e do interior (b) do queimador de fumaça

Quando em funcionamento, forma-se no interior do queimador de fumaça uma zona de reação com temperaturas que variam de 1000 a 1200°C, temperaturas essas capazes de destruir termicamente todos os componentes tóxicos e cancerígenos presentes na fumaça da carbonização, transformando-os em "**gases quentes e limpos**", queimando inclusive o metano, que é um dos agentes causadores do aquecimento global (Santos, 2007).

A passagem da fumaça poluente pelo centro da zona de queima é promovida por um ventilador/exaustor em sistema de Venturi, instalado no final do queimador, que gera uma pressão negativa capaz de promover a sucção dessa fumaça (Santos, 2007).

Em 2007, o **secador de lenha da Bricarbrás** era um sistema misto que utiliza ar quente do queimador e a radiação proveniente de um emissor de microondas, que auxiliava o processo de expulsão da água do interior das toras para a periferia das mesmas, onde o ar quente e seco promovia sua vaporização (Santos, 2007).

A água em forma de vapor era, então, retirada do sistema, sendo sua saída forçada por ventiladores (recirculadores de ar) através de aberturas posicionadas ao longo da base do secador (janelas inferiores) (Santos, 2007).

A medição da temperatura do ar quente introduzido no secador e da sua temperatura interna é feita através de aparelhos medidores de temperatura (pirômetros), instalados em pontos estratégicos na parede e na entrada de ar quente de modo a permitir o controle do processo (Santos, 2007).



Figuras 5.22– Secador de lenha da Bricarbras com destaques para os sopradores de recirculação de ar e os magnetrons emissores de microondas (Santos, 2007)

5.7 – A UNIDADE DE FORNOS CONTAINERS CILÍNDRICOS METÁLICOS VERTICAIS NA BRICARBRÁS

A Bricarbras, empresa pertencente ao Grupo Hübner, iniciou suas atividades em dezembro de 2005. Está instalada em Jaguariaíva, no norte pioneiro paranaense, onde foram implantados uma fábrica e um laboratório para produção de carvão vegetal a partir de biomassa e resíduos florestais, com a utilização de cilindros metálicos verticais. Sua capacidade produtiva mensal é de 2,5 mil metros cúbicos de carvão, com rendimento 40% superior ao da produção convencional. A Bricarbras também ofereceu ao mercado células menores e mais baratas, capazes de produzir 500 metros cúbicos mensais (Bricarbras, 2006).

O sistema de carbonização em fornos cilíndricos verticais utilizado na BRICARBRAS constitui uma evolução do sistema similar ao exposto por Guimarães Neto (2005).



Figura 5.23 - Aspecto de um forno container metálico novo e das toras de madeira consumidas na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Bricarbras (Bricarbras, 2010)

O sistema de carbonização em fornos containers cilíndricos verticais adotado na Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Bricarbras (originalmente considerada uma planta piloto que envolvia 4 fornos com capacidade produtiva de 432 MDC mensais - segundo Colombo, Pimenta e Hatakeyama, 2006) é composto de:

- 1º - base e câmara isolante,
- 2º - fornos cilíndricos metálicos verticais,
- 3º - sistema de movimentação e descarga ou pórtico rolante,
- 4º - sistema de exaustão de gases,
- 5º - queimador de fumaça (fornalha), e
- 6º - estufa para secagem da madeira.



Figuras 5.24 - Sistema de movimentação e descarga de cada cilindro metálico e a base de aquecimento e câmara isolante de carbonização da Bricarbras (Colombo, Pimenta; Hatakeyama, 2006)

A operação do forno container na Bricarbras consistia em encapsular um cilindro metálico cheio de madeira dentro da câmara isolante e iniciar a carbonização de modo similar ao usado no forno de superfície com câmara de combustão externa. As carbonizações duravam 8 a 10 horas e, ao final, o cilindro metálico era retirado, ocorrendo livre troca de calor com o ambiente com resfriamento rápido da carga através da parede (Colombo, Pimenta, Hatakeyama, 2006). Cada **unidade de produção de carvão vegetal (UPC)** da Bricarbras (2006) era composta das seguintes partes principais:

- 8 fornos;
- 3 cilindros metálicos por forno, totalizando 24 cilindros por UPC;
- 24 grelhas de ferro fundido com chaminé (1 por cilindro);
- 1 queimador de fumaça poluente;
- 1 estufa para secagem de lenha; e
- sistema informatizado para supervisão da carbonização.

Os **acessórios** para a operação da UPC eram em 2006:

- termopares para controle de temperatura interna dos cilindros;
- pórtico rolante elétrico equipado com "trolley" e talha;
- cavaletes metálicos para carga de lenha e descarga de carvão vegetal;
- ventilador/exaustor que faz a sucção da fumaça dos fornos
- ventilador/insuflador que conduz ar quente para o secador de lenha;
- balança tipo dinamômetro para pesagem da lenha e do carvão vegetal (CV);
- garfos e pás;
- gaiolas para medição de volume de CV;
- arcos metálicos para resfriamento dos cilindros por nebulização com água;
- suporte metálico para grelha; e
- esteira transportadora de carvão vegetal para carga de caminhões.



Figuras 5.25 – Vista lateral da Praça de Carbonização e os fornos com os cilindros metálicos (Bricarbras, 2006)



Figuras 5.26 – Vista interna da Praça de Carbonização e a grelha metálica com a chaminé (Bricarbras, 2006)



Figuras 5.27 – Cestos de acomodação da lenha e transporte das cargas numa empilhadeira
(Bricarbras, 2006)



Figura 5.28 – Fechamento de um cilindro metálico
(Bricarbras, 2006)

Para produzir carvão vegetal a partir de madeira e de resíduos florestais, o sistema executa o processo de carbonização em cerca de 9 h. Prevê também o melhor aproveitamento da matéria-prima, com necessidade de entrada de madeira aproximadamente 25% menor. Os gases gerados durante o processo de carbonização são direcionados para um queimador que opera com alta temperatura, queimando integralmente os poluentes alcatrões e as partículas pirolenhosas e emitindo para a atmosfera apenas vapor d'água e gás carbônico (Bricarbras, 2006).

O calor gerado no processo de queima dos gases poluentes é direcionado à estufa de secagem de lenha, reduzindo o consumo de energia. Para otimizar este processo, adota-se um sistema de microondas, que acelera a secagem na estufa.

Fornece-se o forno de carbonização em dois tamanhos: para produção de 4.000 m³ de carvão/mês e 1.000 m³/mês, podendo atender assim grandes e médios produtores (Bricarbras, 2006).



Figura 5.29 – Entrada do cilindro metálico sobre a base do forno de carbonização com ticos em combustão
(Bricarbras, 2006)



Figura 5.30 – Descarga mecanizada do cilindro metálico depositando carvão vegetal num vagão apropriado.
(Bricarbras, 2006)

O sistema de carbonização em fornos cilíndricos verticais, após a secagem de lenhas até teores de umidade na faixa de 4% a 6%, garante rendimentos gravimétricos em carvão vegetal de 35% a 40%, em contraposição aos 25% a 30% obtidos em fornos tipo rabo quente. A queima dos gases resultantes da pirólise da lenha reduz substancialmente a poluição atmosférica porque consome os componentes ácidos pirolenhosos, alcatrão não solúvel e a parte combustível dos gases não condensáveis, diminuindo a necessidade de madeira em 25% a 30% para obtenção da mesma quantidade de carvão (Colombo, Pimenta, Hatakeyama, 2006).

É possível transformar em carvão vegetal qualquer tipo de material lenhoso com diâmetro acima de 6 cm e comprimento superior a 20 cm. É viável carbonizar galhos, resíduos de colheita florestal, tocos, lenha em toras, resíduos de desdobro mecânico de serrarias, restos de poda, entre outros, reduzindo ainda mais a necessidade de abate de árvores (Colombo, Pimenta, Hatakeyama, 2006).

A estufa de secagem de lenha possibilita secar bateladas de 250 estêreos de lenha em intervalos de tempo que duram 30 a 48 horas.

A correta circulação e exaustão dos gases estão garantidas por um exaustor-soprador (ou ventilador) que aspira a fumaça (uma mistura de gases e vapores) do leito de carbonização da madeira e a conduz para um sistema de “queima”. Os fumos quentes da combustão da fumaça são consumidos na estufa de secagem da lenha, que aproveita o calor necessário para remover a umidade da madeira (adaptado de Colombo, Pimenta e Hatakeyama, 2006).

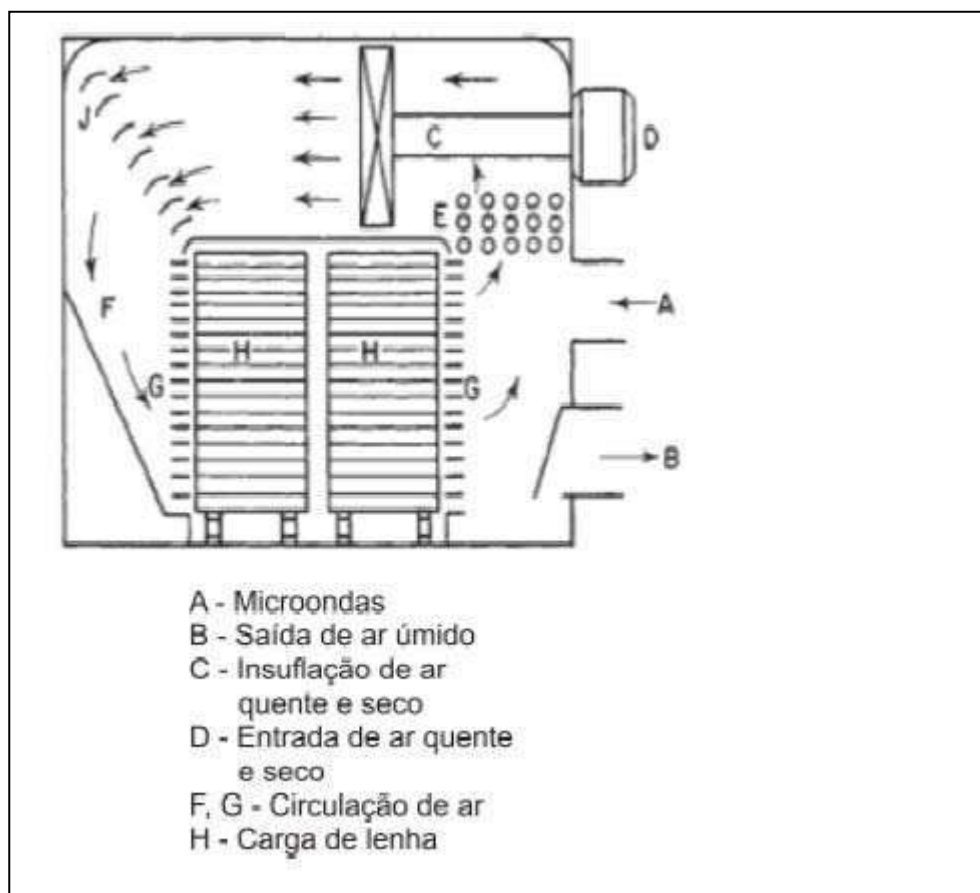


Figura 5.31 – Representação esquemática da operação do secador de lenha
 (Bricarbras, 2006)

As características técnicas da Unidade de Produção de Carvão Vegetal da Bricarbras incluem:

- 1 – 3 operações de carbonização diárias por forno;
- 2 – ciclos de pirólise 8 a 12 horas e resfriamento durante 10 a 14 horas;
- 3 – rendimentos lenha/carvão: 1,6/1
- 4 – produtividade mensal: 3000 MDC/mês

Dentre as vantagens do **Processo Bricarbras**, incluem-se:

- Fornos de grande durabilidade, sendo desnecessários reparos contínuos como os fornos de alvenaria
- Os trabalhadores não ficam expostos à inalação de pó e poluentes em forma de fumaça durante o trabalho e manuseio do carvão vegetal.
- Sistemas mecanizados a automatizados garantem economia de tempo nas atividades e mão-de-obra.
- Facilidade no treinamento de mão-de-obra e padronização da atividade.
- Altos rendimentos em carvão vegetal, com baixa geração de tiços (lenha semi-carbonizada).
- O sistema permite recuperar alcatrão vegetal e licor pirolenhoso a partir da fumaça, com o acoplamento de um sistema de condensação para obter produtos carboquímicos para a indústria de química fina.
- Pode ser montado em qualquer local, inclusive cidades, porque não emite poluentes gasosos.

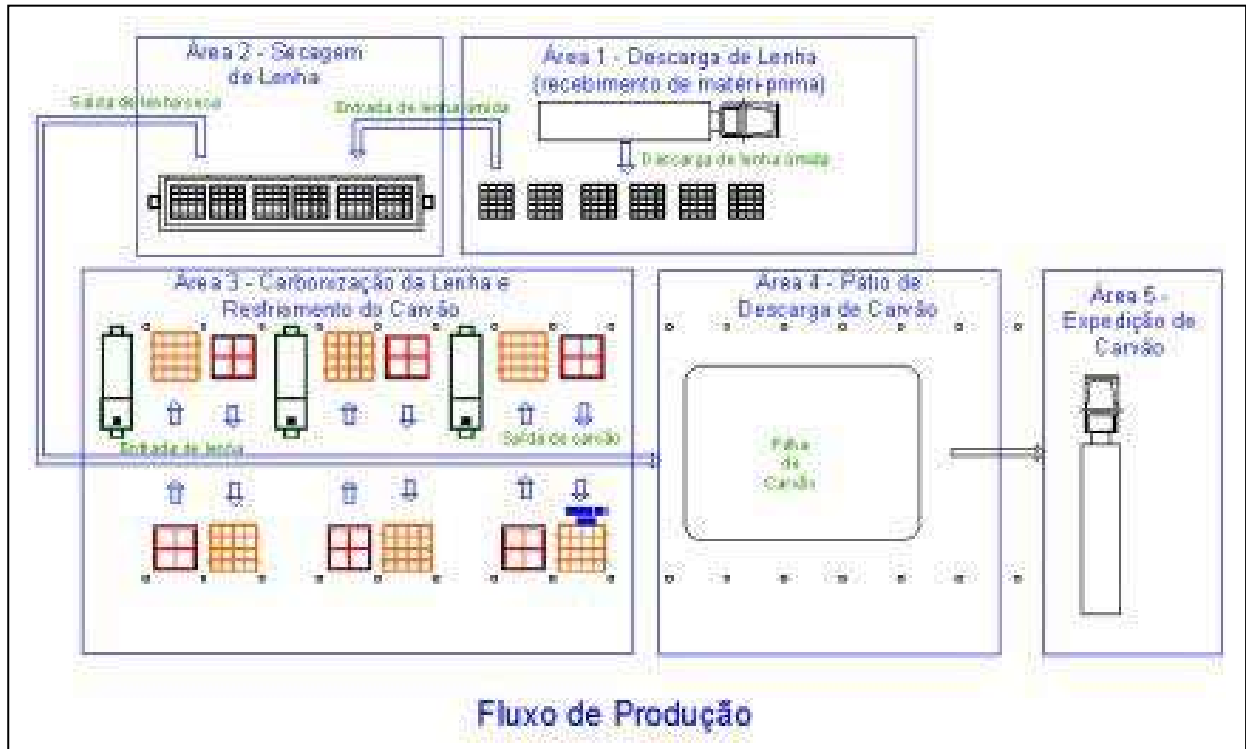


Figura 5.32 – Layout de uma planta de secagem e carbonização semicontínua de madeira (Santos, 2007)



Figura 5.33 – Outra visão dos fornos da Bricarbrás (Barcellos, 2010)

5.8 – FORNO METÁLICO JG-SCC

O forno JG-SCC é um aperfeiçoamento do forno metálico de batelada, similar ao forno TPI descrito pela FAO (1987). É uma alternativa para o aumento do volume de produção em função da possibilidade de uso de vários cilindros (enquanto um esfria, outro é carregado com lenha), o que lhe confere a característica de **semi-contínuo**.



Figuras 5.34 - Fornos metálicos móveis JG-SCC
(Pimenta, 2007)

Conforme se pode notar, as seções cilíndricas e a cobertura podem ser movidas por inteiro, ao contrário do forno TPI, e não se observam chaminés maiores do que o nível máximo da cobertura.

5.9 – O FORNO METÁLICO RETANGULAR E O PROCESSO INDUSTRIAL DA DPC

Em 1998, o engenheiro Sidney Pessoa, da Siderúrgica Terra Norte, do Pará, estava desenvolvendo uma pesquisa no sentido de viabilizar a produção de carvão vegetal a partir do coco babaçu e convidou os pesquisadores, Álvaro Lúcio e Delfino Neto para fazer parte do projeto. O processo DPC OU *Drying-Pyrolysis-Cooling* foi, então, desenvolvido, para além das expectativas iniciais, no qual **um container metálico é um reator termoquímico - que pode atuar como estufa de lenha verde, retorta de pirólise da lenha seca e resfriador do carvão vegetal obtido na etapa anterior** (DPC-Thermal Processing, 2010).

Foram rompidos os limites das tecnologias de processamento térmico da biomassa, num conjunto de soluções que permite obter, virtualmente, através do plantio de vegetais sem poluição ambiental, a energia fornecida pelo sol, captada sabiamente pela natureza e abundantemente pelo verde dos trópicos, bem como aquela resultante da coleta de resíduos agropecuários e de industrialização. Sabe-se que nos processos primitivos ou rudimentares de carbonização utilizados no Brasil, os produtos voláteis (vapores e gases condensáveis e não-condensáveis) emitidos durante a etapa de pirólise, são lançados para a atmosfera, causando poluição e danos ao meio ambiente. O processo DPC utiliza esses voláteis como combustível na câmara de combustão da fornalha externa (DPC-Thermal Processing, 2010)..

O Processo DPC realiza em paralelo e independentemente **as três fases de carbonização** que ocorrem num ciclo de produção de carvão vegetal: a secagem da lenha, a pirólise (ou destilação seca) da madeira e o resfriamento do coque vegetal obtido numa operação em batelada, cujas etapas básicas de operação são apresentadas na Figura 5.35 abaixo.

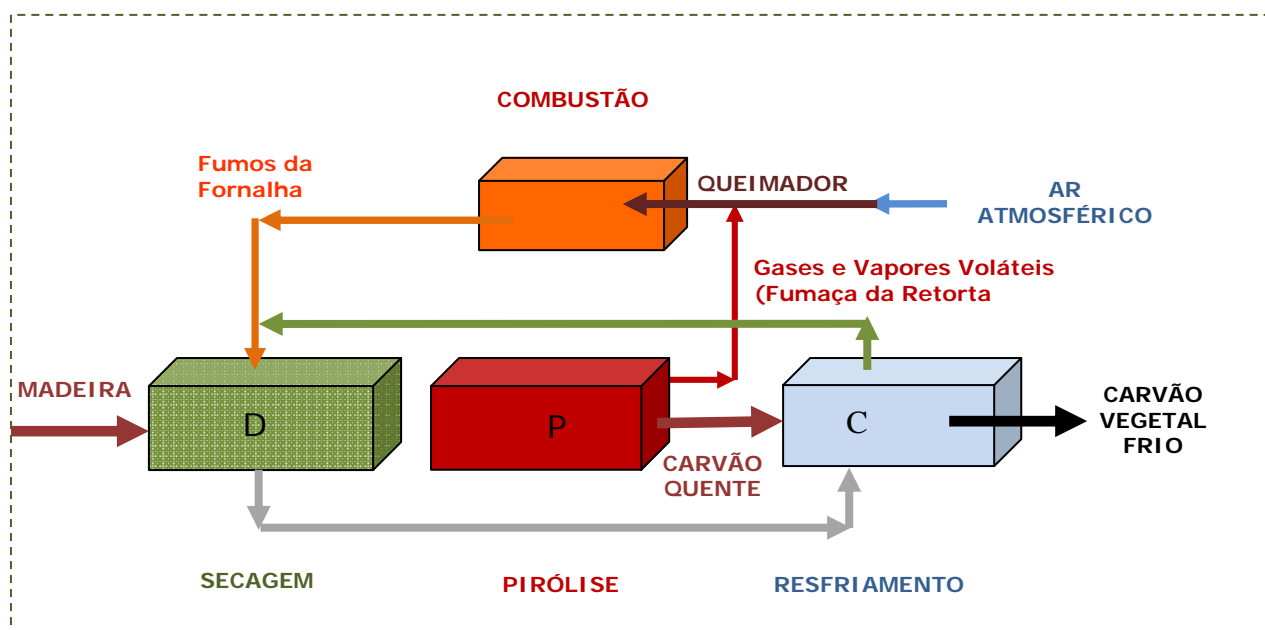


Figura 5.35 – Representação esquemática do ciclo inicial de operação do Processo DPC com 4 equipamentos térmicos: uma fornalha, uma estufa, uma retorta e um resfriador

Originalmente, um container metálico vazado contendo um lote de lenha é inserido na estufa e recebe as emissões gasosas quentes (ou fumos) da fornalha externa, onde foram queimados a fumaça ou gases e vapores emitidos durante a etapa de pirólise da madeira. A lenha seca é transferida para a retorta e gera o carvão vegetal quente, que irá perder o calor acumulado no resfriador, o qual, também, fornece ar aquecido para a estufa de secagem. Porém, findo o resfriamento, o container com lenha seca é descarregado da câmara, e, em seguida, é alimentado com lenha verde.

Assim, a câmara de resfriamento passa, então, a funcionar como estufa de secagem. Na estufa original, muda a natureza dos gases que percolam a biomassa previamente seca, passando este então a funcionar como retorta ou reator de pirólise. E a retorta passa a funcionar como unidade de resfriamento.

Para aumentar a produtividade, e para garantir a regularidade de suprimento de gás combustível à câmara de combustão, uma instalação industrial consiste no mínimo de cinco reatores.

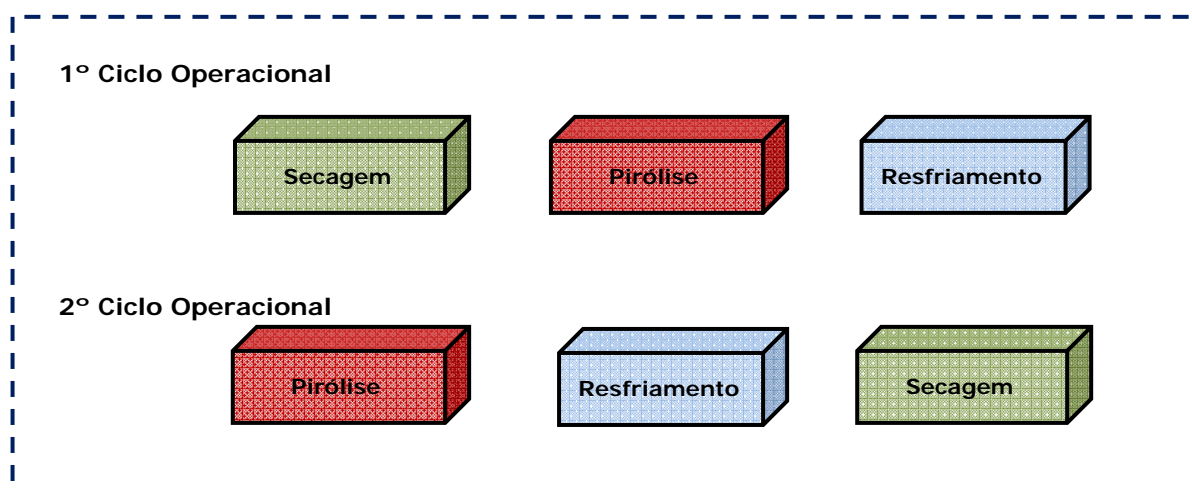


Figura 5.36 - Ciclos operacionais do Processo DPC – Thermal Processing

Para que essas seqüências operacionais sejam exeqüíveis é necessário empregar um conjunto de sopradores para movimentar e direcionar os gases de exaustão da câmara de combustão da fornalha e da retorta de pirólise como ilustrado a seguir pela DPC – Thermal Processing. Nessa tecnologia **cada equipamento do processo de conversão de lenha em carvão vegetal é um reator químico, embora a secagem e o resfriamento sejam conceitualmente duas operações unitárias.**

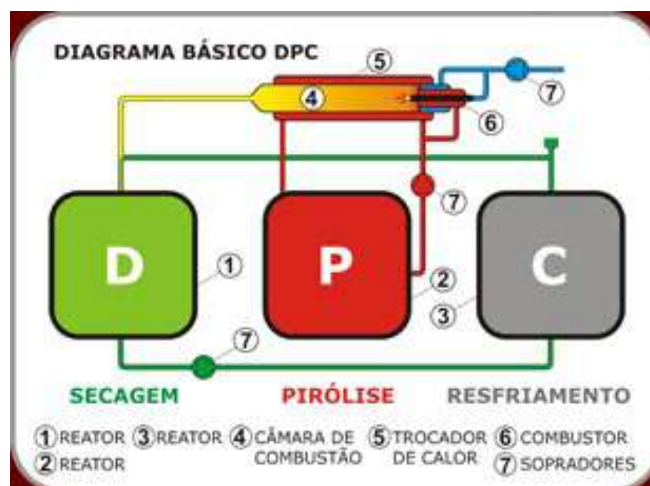


Figura 5.37 – Esquema de operação do Processo DPC (2010)

Os fundamentos e características operacionais do Processo DPC são:

- I – Cada container metálico retangular pode atuar como estufa, retorta e resfriador.
- II – Há consumo dos gases inflamáveis emitidos durante a pirólise como fonte da energia térmica necessária à carbonização da madeira.
- III – Utilizam-se os gases emitidos durante a pirólise como fluido térmico para a transferência de calor à madeira durante a fase endotérmica da pirólise.
- IV - As etapas de secagem, pirólise e resfriamento do carvão vegetal ocorrem simultânea e independentemente em reatores nos quais a madeira (ou o carvão vegetal gerado) permanece estática e evita a formação de finos.
- V – A carga sólida em cada reator é percolada por gases cuja natureza depende da etapa em andamento.
- VI - O processo DPC permite a utilização de diversos tipos de biomassa como matéria prima, desde resíduos de serrarias até capim elefante, passando por lenha com quaisquer dimensões.

A sequência de fotos abaixo refere-se a um modelo de aplicação do processo DPC.



A biomassa é introduzida num *container roll on*, que equivale a um forno tipo câmara muflado, em que a fonte de aquecimento é externa.



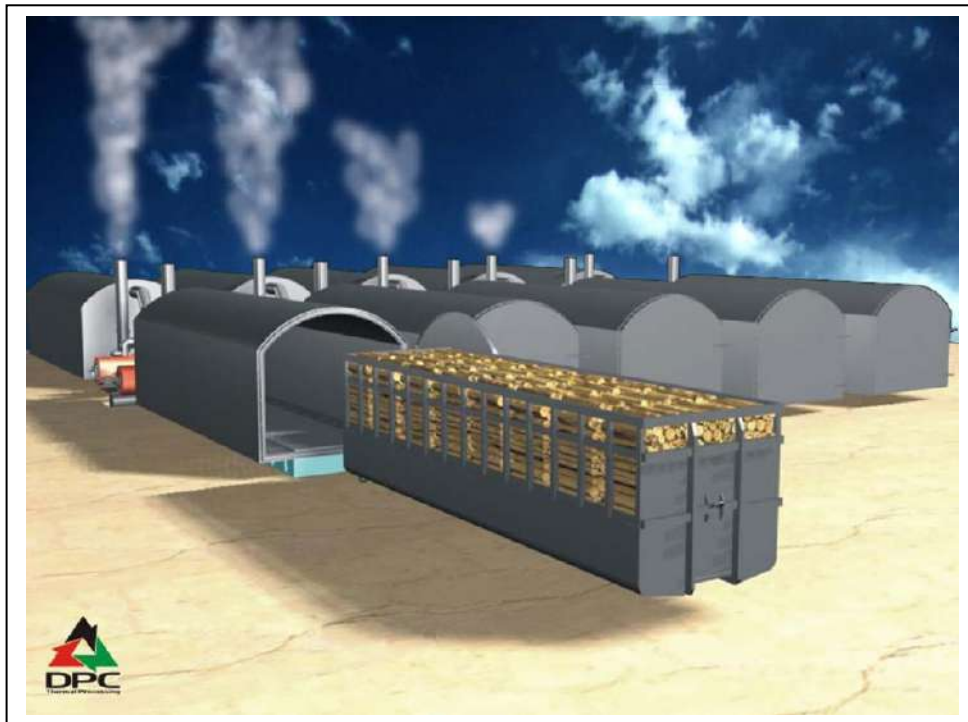
O caminhão transporta a carga e insere o container no reator. Finalizado o processo, o container é removido e o conteúdo é transferido para o armazenamento.



Figura 5.38 – Etapas de carregamento de lenha e descarga de carvão vegetal do Processo DPC (DPC, 2010; Rezende e Carazza, 2008)

5.10 – BATERIAS DE FORNOS DPC E RECUPERAÇÃO DE PRODUTOS CONDENSADOS DA FUMAÇA

A recuperação de produtos biocarboquímicos é relatada ou descrita por vários autores e não será abordada no presente trabalho de modo amplo e aprofundado. Merece destaque a concepção de bateria de fornos DPC complementada com a representação esquemática das instalações de condensação de fumaça e destilação dos produtos liquefeitos entre dois conjuntos de fornos.



Figuras 5.39 – Etapas de carregamento de lenha e descarga de carvão vegetal do Processo DPC (DPC, 2010; Rezende e Carazza, 2008)

5.11 – O CONTAINER METÁLICO E O PROCESSO DESCONTÍNUO DA RIMA

Segundo Vicentim e colaboradores (2008), a tecnologia do forno container cilíndrico da Rima visou, desde 2001, atingir as seguintes metas: 1ª – acelerar a pirólise em função da exaustão; 2ª – empregar um forno metálico móvel; 3ª – mecanizar a operação e 4ª – automatizar o controle. Os procedimentos operacionais são ilustrados nas figuras seguintes.



Figura 5.40 – Ciclo operacional do processo descontínuo RIMA com forno cilíndrico (Vicintim e colaboradores, 2008)

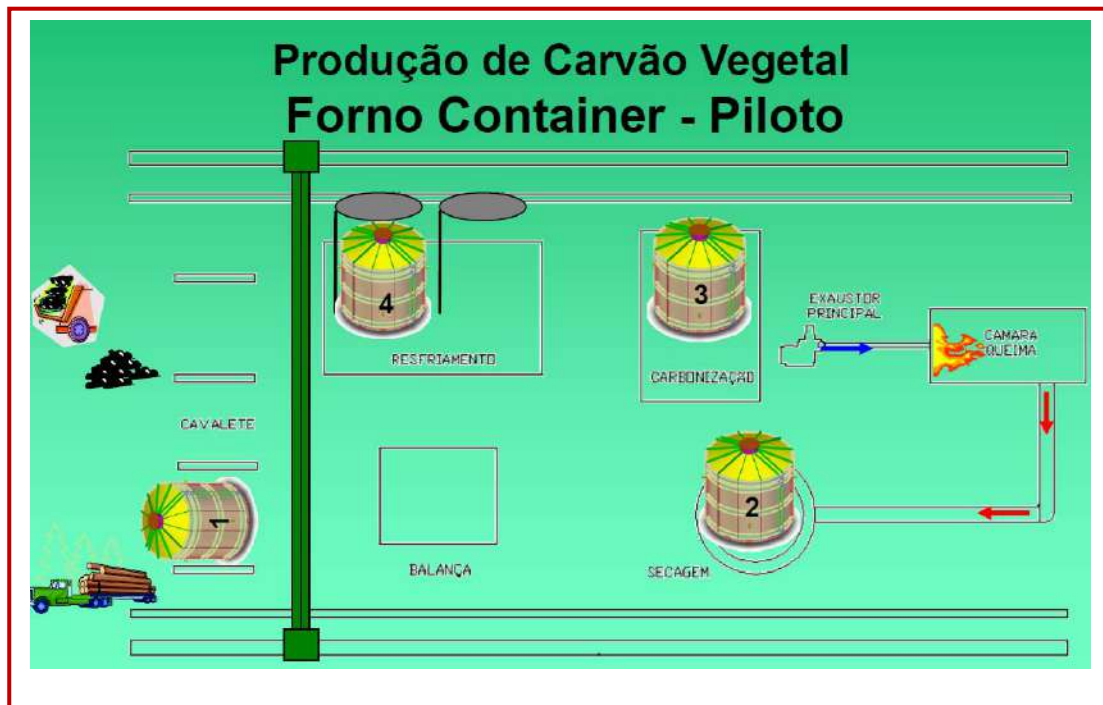
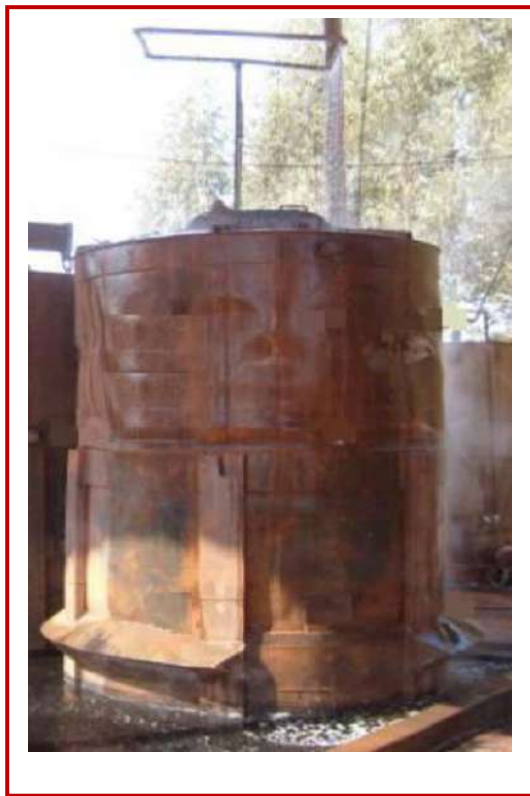


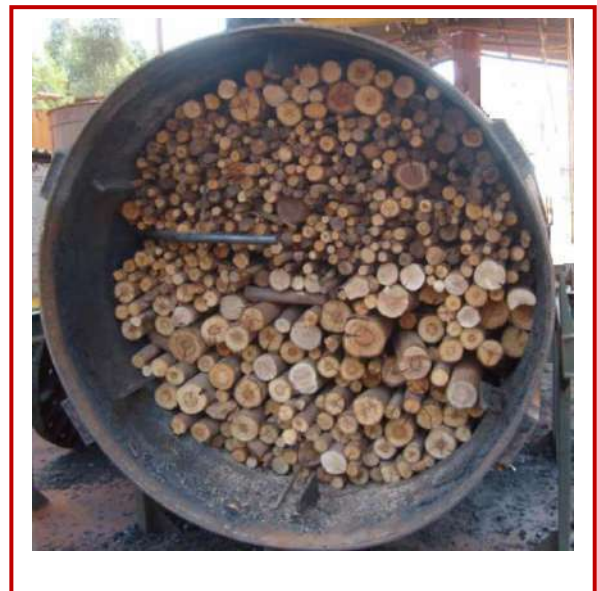
Figura 5.41– Seqüência de procedimentos do processo descontínuo RIMA com forno cilíndrico: 1 – carregamento da lenha no container, 2 – secagem, 3 – carbonização com queima paralela da fumaça para uso no secador, 4 – resfriamento do carvão vegetal obtido. (Vicintim e colaboradores, 2008)



Figura 5.42 – Galpão dos equipamentos termoquímicos do processo descontínuo RIMA
(Vicintim e colaboradores, 2008)



(a)



(b)

Figura 5.43 – Forno container do processo descontínuo RIMA
(a) visto de perfil e (b) carga de lenha no seu interior
(Vicintim e colaboradores, 2008)

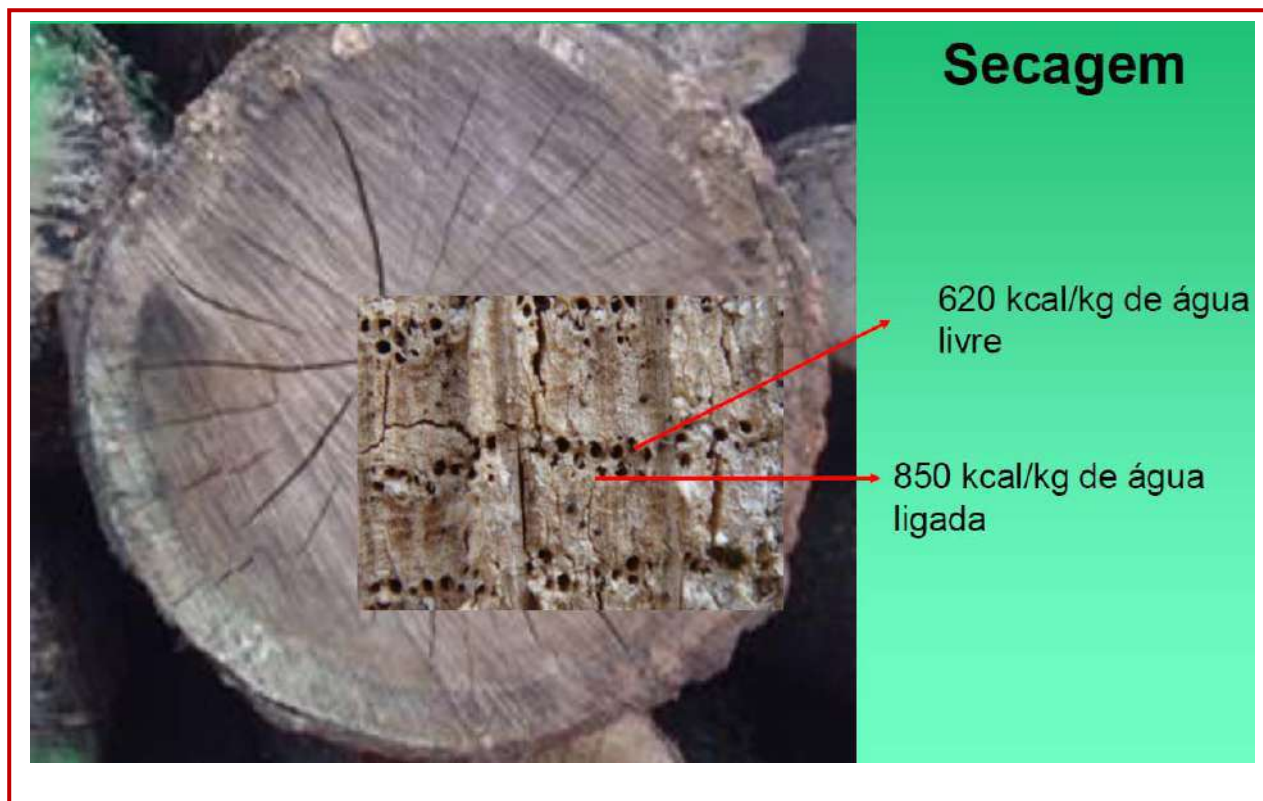


Figura 5.44 – Demandas térmicas para a secagem da lenha (Vicintim e colaboradores, 2008)

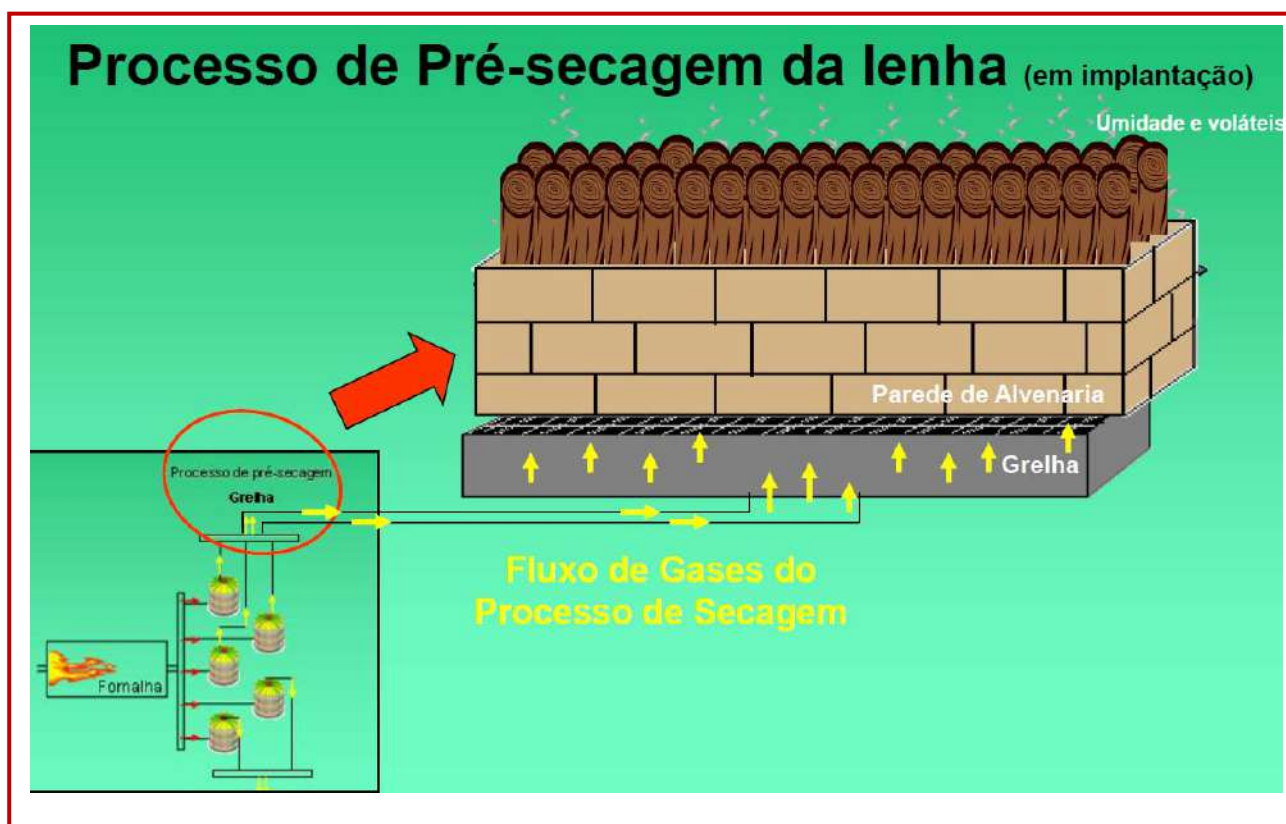


Figura 5.45 – A pré-secagem da lenha a ser implantada no processo da RIMA (Vicintim e colaboradores, 2008)

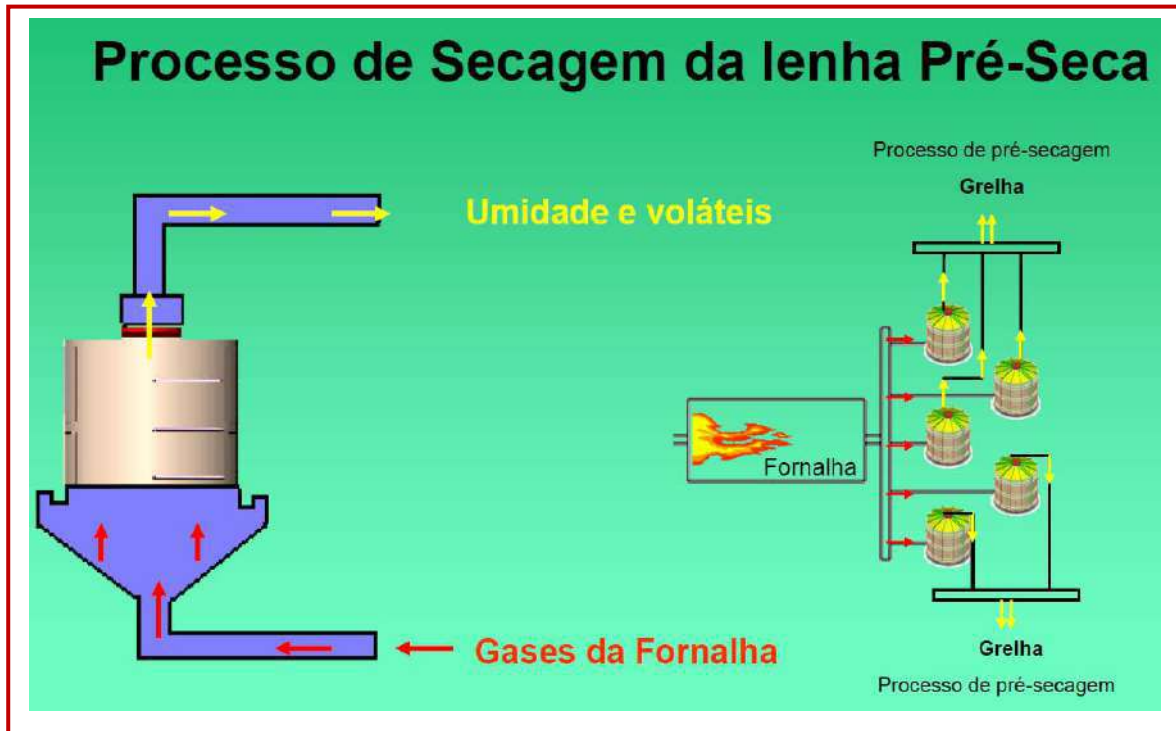


Figura 5.46 – Secagem da lenha pré-seca com os gases quentes oriundos da fornalha
(Vicintim e colaboradores, 2008)

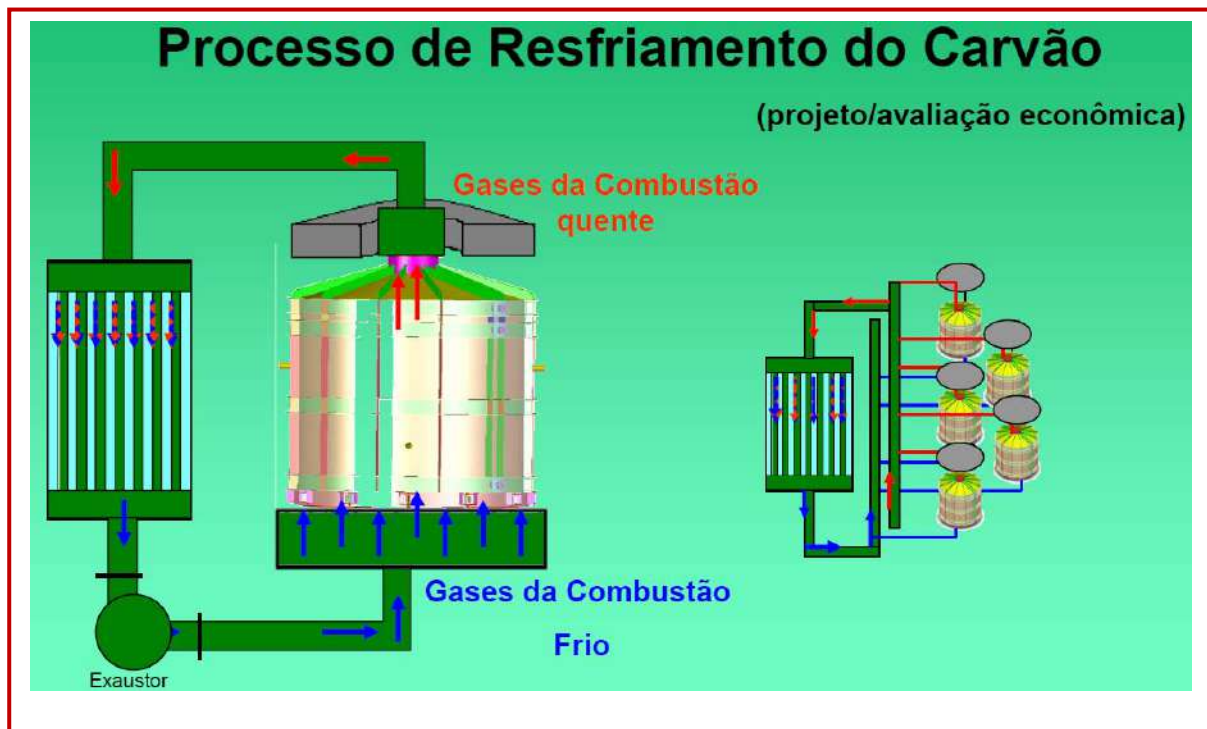


Figura 5.47 – Secagem da lenha pré-seca com os gases quentes oriundos da fornalha
(Vicintim e colaboradores, 2008)

5.12 – O FORNO COM CAÇAMBA METÁLICA DA TESE DE MESTRADO DE ASSIS (2007)

Claudinéia Olímpia de Assis (2007) projetou, construiu, ensaiou e ajustou o protótipo de um sistema alternativo para carbonização de madeira em escala piloto, envolvendo as seguintes partes:

1ª - Unidade de carvoejamento: é composta por uma caçamba metálica com capacidade aproximada para 1m³ de madeira roliça, com tampa metálica, contendo dimensões internas de 1,06m x 1,06m x 1,15 m. Utilizou-se na sua confecção chapa metálica do tipo SAE 1012 e de 6,3 mm de espessura.

2ª - Unidade isolante: estrutura confeccionada em alvenaria, com espessura de 18cm. Durante sua confecção procurou-se deixar uma folga de 5 cm em relação à dimensão externa da caçamba. Esta unidade apresenta 1,50m de altura, e nela foi inserida a unidade de carvoejamento. A estrutura de alvenaria dispõe de uma porta metálica, revestida de lã de vidro para isolamento térmico.

3ª - Câmara de combustão externa - encontrava-se a 20 cm de profundidade do solo (abaixo do piso do forno) e apresentava 25 cm de largura, dispondo de uma porta metálica com revestimento isolante (lã de vidro), comunicando-se diretamente com a base do forno. A comunicação foi feita por meio de quatro entradas de gases quentes. Sob a porta encontrava-se uma abertura retangular de 25 cm x 5 cm, para a entrada de ar, controlada por uma válvula.

O protótipo foi construído nas dependências da Unidade Experimental de Secagem e Desdobro da Madeira, do Departamento de Ciências Florestais, na Universidade Federal de Lavras. Foram construídos quatro dutos de seção quadrada de 7,5 cm x 7,5 cm para entrada de ar quente no interior da unidade isolante, ligados na câmara de combustão. Foi construída uma chaminé, de tiragem central, com seção interna de 15 cm x 15 cm para a saída dos gases. As carbonizações foram feitas com madeira de *Eucalyptus* spp. existentes na Universidade Federal de Lavras.



Figura 5.50 - As unidades de carvoejamento (caçamba metálica com tampa) e isolante
(Assis, 2007)

O sistema incluiu, depois dos primeiros ensaios experimentais, as seguintes melhorias, ilustradas na Figura 5.51:

1ª - aberturas opostas com sistema de fechamento (janelas) na unidade de carvoejamento, para permitir a circulação de gases no seu interior (Figura 5.51 a e b);

2ª - alteração da entrada de gás quente da câmara de combustão para a unidade isolante (Figura 5.51e);

3ª - construção de uma chaminé metálica e móvel de tiragem lateral e em formato de coifa (conforme a Figura 5.51 c, d e f).

Em cada operação ou ensaio de carbonização, a unidade de carvoejamento foi retirada da unidade isolante, ainda quente, para que a etapa de resfriamento fosse realizada ao ar livre, reduzindo o tempo total de pirólise lenta.

Ao término das carbonizações todo o carvão vegetal foi medido e pesado, visando a determinação de rendimento.

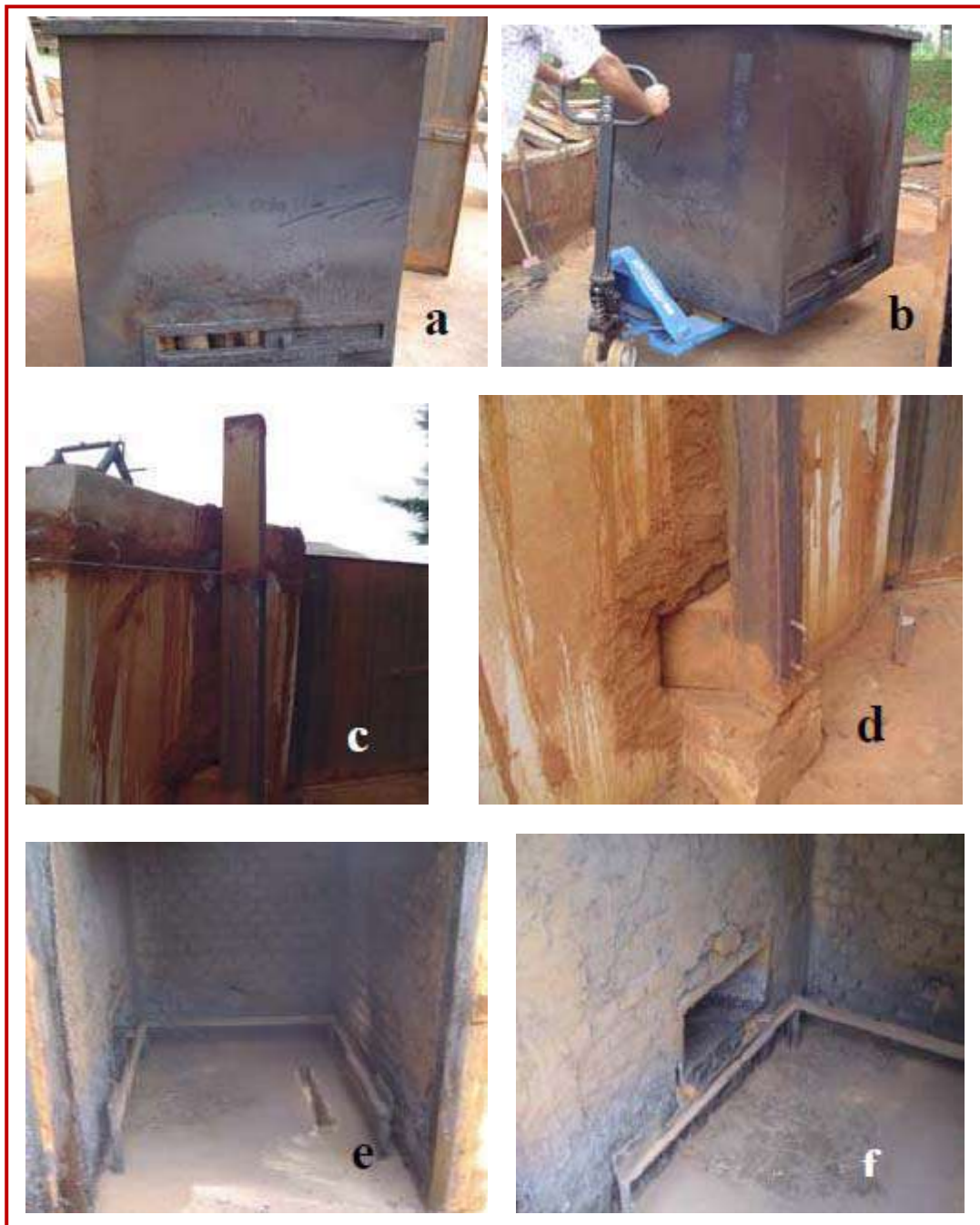


Figura 5.51 – Detalhamento do sistema de carvoejamento em caçamba metálica

- (a) unidade de carvoejamento carregada, (b) sistema de transporte e colocação na unidade isolante, (c e d) presença de uma chaminé metálica móvel, (e) abertura na entrada de gás na câmara e (f) abertura para a saída dos gases pela chaminé. (Assis, 2007)

Tanto a madeira como o carvão vegetal produzido foi pesado em uma balança, tipo plataforma, com capacidade de 300 ± 1 kg. A relação volumétrica foi determinada, levando-se em consideração o volume nominal da unidade de carvoejamento.

As carbonizações foram conduzidas procurando manter a temperatura inicial de carbonização em torno de 200°C , a fim de não prejudicar a qualidade do carvão produzido, e assegurar uma temperatura final em torno de 450°C .

O controle da temperatura foi obtido atuando-se na abertura da câmara de combustão, de acordo com as temperaturas registradas pelos termopares, reduzindo ou aumentando a entrada de ar para o interior da unidade de carvoejamento.

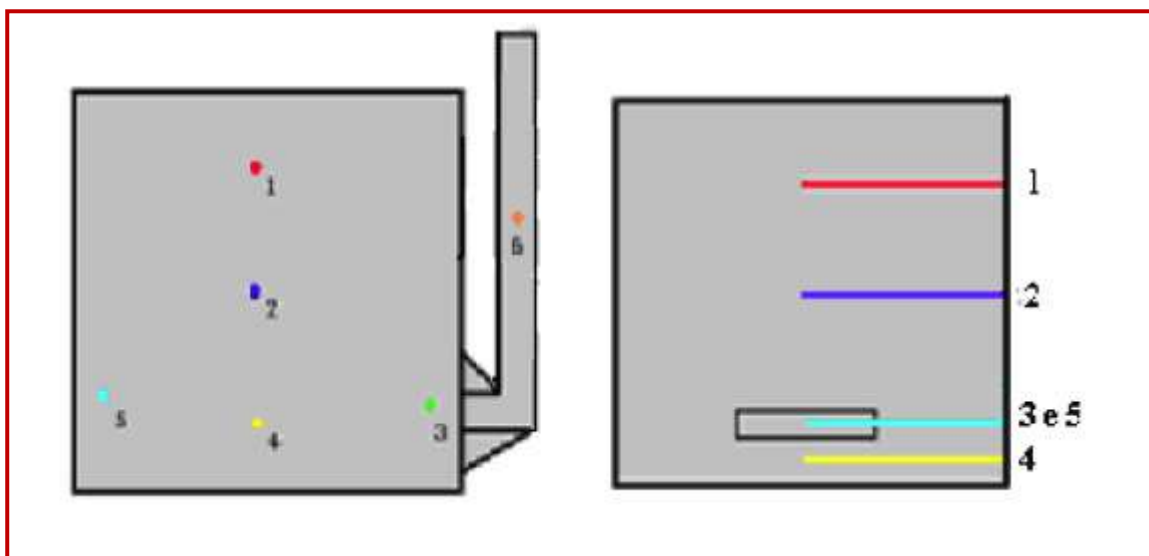


Figura 5.52 – Esquema da distribuição dos pares termoeletricos na unidade de carvoejamento (Assis, 2007)

Dentre as vantagens do sistema de caçamba metálica com tampa, Assis e colaboradores (2008) concluíram que:

- 1ª - O tempo de carbonização e o rendimento em carvão vegetal não sofreram interferência da umidade da madeira;
- 2ª - A unidade de carvoejamento (metálica) exerceu papel decisivo na etapa de secagem da madeira enfiada;
- 3ª - O tempo de carbonização, o rendimento em carvão vegetal, o teor de carbono fixo e de material volátil não foram afetados significativamente pela forma de esfriamento;
- 4ª - O tempo médio de esfriamento determinado com o auxílio dos pares termoeletricos foi 13 h e 38 h para a condição fora e dentro da unidade isolante, respectivamente;
- 5ª - Observou-se uma redução de 73,33% no tempo de esfriamento quando a unidade de carvoejamento esfriava fora da unidade isolante.

5.13 – CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 5

- 1ª – Fornos metálicos podem ser **cilíndricos ou retangulares**. Foram feitos para operar em regime **descontínuo (batelada e semi-cotínuo) e contínuo (Retorta)**
- 2ª – As tecnologias adotadas no Brasil para carbonização industrial de madeira e resíduos vegetais são as que utilizam **cilindros metálicos verticais em fornos câmara muflados e queimadores de fumaça e a tecnologia que adota caixões metálicos horizontais com fonte externa de gases quentes**.
- 3ª – **Câmara do forno container é conhecida como poço isolante**.
- 4ª – O forno metálico **JG-SCC** é um aperfeiçoamento do forno metálico de batelada por possuir característica de um **forno semi-contínuo**.
- 5ª – Nos fornos JG-SCC as seções cilíndricas e a cobertura podem ser movidas por inteiro e não se observam chaminés maiores do que o nível máximo da cobertura.

6ª – O processo DPC (*Drying-Pyrolysis-Cooling*) é constituído por três container metálico retangular que podem atuar como **estufa, retorta e resfriador**.

7ª – Um **container roll on** equivale a um forno tipo **câmara muflado** em que a fonte de aquecimento é externa.

5.14 – CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 5

1ª - O aperfeiçoamento das técnicas tradicionais de carbonização proporcionaram o aumento do rendimento volumétrico, o aproveitamento dos subprodutos do processo, diminuição do custo logístico e diminuição da emissão de gases poluentes na atmosfera através do desenvolvimento de fornos metálicos

2ª – O tipo de processo de carbonização é um fator muito importante, pois influencia na eficiência da carbonização do carvão vegetal.

3ª – Os processos de carbonização do carvão vegetal podem ser classificados em: primitivos, descontínuos e contínuos. Os sistemas primitivos são os mais simples sistemas utilizados. O sistema descontínuo surgiu para facilitar a operação nos fornos, melhorar a eficiência da carbonização e as condições de trabalho. O sistema contínuo é formado pelas retortas que apresentam um grande desenvolvimento da carbonização de carvão vegetal.

4ª – Em relação aos tipos de fornos utilizados para a produção de carvão vegetal podemos citar os fornos carbonizadores metálicos que surgiram para aperfeiçoar os fornos mais simples de barro e alvenaria. E podem ser classificados em cilíndricos ou retangulares.

5.15 – REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 5

ASSIS, C.O. – **Sistema Alternativo para Carbonização de Madeira** - Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia da Madeiras, Universidade Federal de Viçosa, Orientador: Dr. Paulo Fernando Trugilho, Minas Gerais, 2007.

ASSIS, C.O.; TRUGILHO, P.F.; MENDES, L.M.; SILVA; J.R.M. da e LIMA, J.T. – **Sistema Alternativo para Carbonização de Madeira – *Scientia Forestalis***, Piracicaba, v. 36, n. 78, p.133-140.

BARCELLOS, D.C. – **Forno Container para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e controle da poluição** – Tese de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Orientador: Dr. Alexandre Santos Pimenta, Minas Gerais, 2002.

BARCELLOS, D.C. – **Avanços tecnológicos nos processos de produção de carvão vegetal de florestas plantadas** – Seminário *Bases Energéticas para uma Indústria Verde – UNIFEMM*, 5 a 7 de abril de 2010 – extraído de www.fiemg.org.br/admin/BibliotecaDeArquivos/Image.aspx?ImgId... em 08 de junho de 2010.

BRICARBRAS – **Inovação Tecnológica para Produção Limpa de Carvão Vegetal: Briquetagem e Carbonização do Brasil Ltda.** - *Biomassa & Energia*, v. 3, n. 1, 2006.

BRICARBRAS – **Unidade de Produção de Carvão** – Acessado e extraído em 05 de junho de 2010 de <http://www.bricarbras.com.br/carvaovegetal.php>.

BRICARBRAS – **Forno para carbonização é ecologicamente correto** – disponibilizado e acessado em <http://www.nei.com.br/lancamentos/lancamento.aspx?i=11346> e extraído em 25 de junho de 2010.

COLOMBO, S.F.O.; PIMENTA, A.S.; HATAKEYAMA, K. – **Produção de Carvão Vegetal em Fornos Cilíndricos Verticais: Um Modelo Sustentável** – XIII SIMPEP, Bauru, SP, 6 a 8 de Novembro de 2006.

DPC – **Processo Drying-Pyrolysis-Cooling** – DPC=Thermal Processing, acessado e extraído de www.dpcbiomassa.com.br em 05 de junho de 2010.

FAO – **Simple Technologies for Charcoal Making** - FAO forestry paper 41, Rome – 1987, acessado e extraído de <http://www.fao.org/docrep/X5328e/x5328e00.HTM> em julho de 2010.

GUIMARÃES NETO – **Avaliação técnica e econômica de um forno container em escala industrial** – Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Orientador: Prof. Dr. Alexandre Santos Pimenta, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2005.

PINHEIRO, P.C.C.; SAMPAIO, R.S.; BASTOS FILHO, J.G. – **Organização da Produção de Carvão Vegetal em Fornos de Alvenaria** - *Biomassa & Energia*, v. 2, n. 3, p. 253-258, 2005, acessado em 13 de junho de 2010 e extraído de <http://www.renabio.org.br/publicacoes.php?l=revista>

QUIRINO, W.F. – **Utilização Energética de Resíduos Vegetais** – Laboratório de Produtos Florestais – LPF IBAMA – Convênio MMA/IBAMA/2001-06, ISBN 85-7300-131-3, 2002- cópia acessada e extraída de www.mundoflorestal.com.br em 15 de maio de 2010.

QUIRINO, W.F. - **Possibilidades de valorização energética dos resíduos da cadeia produtiva madeira e móveis** - Congresso Paraense de Soluções Tecnológicas e Ambientais como Fator De Competitividade da Cadeia Produtiva Madeira e Móveis, acessado e extraído de <http://www.pa.sebrae.com.br/madmoveis/pdfs/Appossibvalenergetica.pdf> em 07 de junho de 2010.

REZENDE, M.E. e CARAZZA, F. – **Pirólise e Biocarboquímica no Brasil - Bases para desenvolver uma nova indústria** – Forum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2008, acessado e extraído de <http://painelflorestal.com.br/upload/biocarbo.pdf> em 08 de junho de 2010.

PIMENTA, A.S. - **Comunicação privada – citada por Sueli de Fátima de Oliveira Miranda Santos** - setembro, 2007.

SANTOS, S.F.O.M. - **Produção de carvão vegetal em cilindros metálicos verticais: alguns aspectos referentes à sustentabilidade** – Dissertação de Mestrado, Orientador: Kazuo Hatakeyama, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2007.

VICINTIM, R.A.; ALVES, J.U.; VILELA, A.O.; SOUZA, F.L.E. – **Projeto Container de Carbonização Rima Industrial S/A** – Belo Horizonte, Outubro de 2008.

CAPÍTULO 6

RETORTAS E PROCESSOS CONTÍNUOS PARA CARBONIZAR LENHA

- 6.1 – Processos descontínuos e contínuos de carbonização de madeira
- 6.2 – Carbonização e combustão de madeira
- 6.3 – Sistemas de Retortas de Carbonização Modernos
- 6.4 – Classificação dos sistemas de aquecimento de retortas
- 6.5 – Vantagens e desvantagens dos sistemas de aquecimento de retortas
- 6.6 – Processos contínuos de carvoejamento
- 6.7 – O Alto forno para carbonização de madeira ou retorta de Lambiotte
- 6.8 – O Processo Lambiotte-SIFIC de carbonização da madeira
- 6.9 – A recuperação de sub-produtos no Processo Lambiotte-SIFIC
- 6.10 – O Processo Lambiotte- CISR de carbonização de biomassa
- 6.11 – O alto-forno da unidade de carbonização continua da ACESITA ENERGÉTICA
- 6.12 – Retorta ou forno contínuo de soleiras ou câmaras múltiplas
- 6.13 – Operação da retorta contínua de câmaras múltiplas
- 6.14 – A retorta de vagões ou Arkansas
- 6.15 – A Retorta Reichert-Lurgi ou Degussa é descontínua
- 6.16 – Processo Lurgi
- 6.17 – O Forno Túnel do Processo O.E.T. CALUSCO
- 6.18 – Retortas Cilíndricas Horizontais VMR – VALLOUREC-MANNESMANN
- 6.19 – O Processo IPT-SP para carbonizar cavacos, cascas de coco e pellets de folhas
- 6.20 – Sistemas de leito fluidizado e carbonizadores similares
- 6.21 – Meios de recuperação de subprodutos da carbonização
- 6.22 - Critérios para a escolha de sistemas de carbonização de biomassa
- 6.23 – Processos e reatores de pirólise rápida ou flash
- 6.24 – Processos em reator de leito fluidizado borbulhante
- 6.25 - O processo ENSYN (RTP) em reator leito fluidizado circulante.
- 6.26 – Pirólise ablativa em reator de prato rotatório
- 6.27 – Pirólise ablativa em reator de cone rotativo
- 6.28 - Processos com reatores do tipo de vórtice
- 6.29 - Processo a vácuo “Pyrocycling”
- 6.30 – A unidade piloto com reator de leito fluidizado borbulhante na UNICAMP
- 6.31 – Constatações do capítulo 6
- 6.32 – Conclusões do capítulo 6
- 6.33 – Referências do capítulo 6

CAPÍTULO 6

RETORTAS E PROCESSOS CONTÍNUOS PARA CARBONIZAR LENHA

6.1 – PROCESSOS DESCONTÍNUOS E CONTÍNUOS DE CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA

Os processos de termo-destruição de biomassa para produzir carvão vegetal são descritos de várias maneiras nas referências bibliográficas. É necessário, ainda, abordá-los para atender as finalidades tecnológicas (de projeto e operação) do presente projeto.

Um processo químico **descontínuo** envolve a alimentação apenas inicial, ou, então, por etapas, ou ambas as maneiras, de matérias-primas e insumos a um reator e sua operação durante um intervalo de tempo curto ou prolongado (minutos, horas ou dias), e a remoção contínua ou descontínua de produtos e subprodutos do mesmo.

Um processo químico **contínuo** é aquele em que ocorre alimentação de matérias-primas, insumos e fontes de energia a um reator e a remoção de produtos e subprodutos do mesmo, durante um longo intervalo de tempo (dias ou semanas ou meses) até alguma parada programada ou imprevista para manutenção dos equipamentos.

Uma carbonização pode ser realizada no chão (a céu aberto, em fossos e valas, em cavernas, e em fornos e retortas. No Brasil, **os processos descontínuos são representados (e realizados) em fornos de alvenaria** (de terra, argila e concreto) e, **em casos crescentes, em fornos metálicos** (poucos até os anos 80). **Os processos contínuos são representados (e realizados) em fornos e retortas** (Valente e Lelles, 1983 – citados por Ferreira, 1988).

6.2 – CARBONIZAÇÃO E COMBUSTÃO DE MADEIRA

A denominação exata do processo de transformação (termoquímica) de madeira em carvão e outros subprodutos, encontrada na literatura, é de difícil determinação, uma vez que vários autores fazem considerações distintas (Ferreira, 1988).

Segundo Wenzl (1970 – citado por Ferreira, 1988), a **carbonização** ou a **pirólise** ocorre quando a madeira é aquecida num recipiente fechado em ausência de ar (ou oxigênio).

Uhart (1976 – citado por Ferreira, 1988) considerou que a **destilação seca** é o processo de transformação térmica (termoquímica) da madeira cujo objetivo principal é a produção de frações condensáveis (alcatrão, ácido acético, metanol, etc.) e, a **carbonização visa, principalmente, produzir o carvão vegetal**. Brown (1948 – citado por Ferreira, 1988) considerou que o **carvão vegetal é madeira carbonizada** resultante de combustão parcial ou incompleta, produzido pela queima ou aquecimento da madeira num forno, na ausência de ar.

De acordo com Martins (1980 – citado por Ferreira, 1988), **pirólise da madeira** é o processo no qual é aquecida em ambiente fechado, com exclusão de ar, onde gases, vapores d'água e de líquidos orgânicos são liberados, enquanto o alcatrão e, principalmente, o carvão são deixados como resíduos.

Segundo Valente e Lelles (1983 – citados por Ferreira, 1988), **carbonização da madeira** é a sua transformação térmica (termoquímica) na ausência de oxigênio ou ar e com calor sendo fornecido por uma fonte externa. Para esses autores, uma **combustão de madeira** é a sua transformação térmica (termoquímica) em presença de ar ou oxigênio, em quantidade suficiente para promover uma decomposição completa (em cinzas e gases como CO, CO₂, etc). Sob tais conceitos admite-se que **o carvão produzido numa retorta – em ausência de ar – é resultado de uma carbonização**. Assim, **o carvão produzido em fornos de alvenaria, resulta de um processo misto de combustão e carbonização**, onde parte da carga de lenha (ou ticos e resíduos) é queimada dentro da câmara para fornecer a energia necessária para a carbonização do restante da madeira.

Almeida e Rezende (1982) consideram **pirólise** sendo um processo pelo qual a madeira é submetida a tratamento térmico (termoquímico) a temperaturas elevadas numa atmosfera controlada, que sendo redutora é denominada **carbonização**.

Carbonização é uma forma particular do processo tecnológico químico denominado **pirólise**, que é a destruição pelo aquecimento de substâncias complexas em outras mais simples. **Carbonização** é o termo usado **quando substâncias carbonáceas complexas tais como madeira ou resíduos agrícolas são fragmentadas pelo aquecimento em carbono elementar e compostos químicos que também podem conter carbono em sua estrutura química**. O termo **carbonização** também se aplica à pirólise do carvão para produzir coque (FAO, 1985).

6.3 – SISTEMAS DE RETORTAS DE CARBONIZAÇÃO MODERNOS

Segundo a FAO (1985) **a destilação de madeira realizada pelo aquecimento de lenha numa retorta fechada e da recuperação dos vapores liberados na pirólise tornaram-se importantes com o crescimento da indústria química européia no Século XIX**. Naquela época, não havia escassez de carvão vegetal e madeira para sua produção. O interesse residia nos subprodutos químicos da pirólise de lenha.

Os sistemas originais usavam um vaso ou tambor de ferro fundido que poderia ser fechado com uma tampa parafusada, dentro de um forno de aquecimento aquecido com queima de carvão. O ferro fundido trabalhava bem à medida que resistia aos fumos corrosivos do ácido acético produzido na destilação. Descobriu-se logo que o gás não-condensável de madeira liberado durante o processo poderia ser queimado para aquecer as retortas. Posteriormente, na operação de seis unidades operadas em grupo, descobriu-se que o gás oriundo dessas retortas na etapa final de cada carbonização poderia ser queimado nos estágios iniciais do ciclo em outros fornos de retortagem. Essas constatações possibilitaram aumentar a eficiência global de consumo de combustíveis e reduzir o custo da recuperação de matérias-primas químicas (FAO, 1985).

A necessidade dessas matérias-primas biocarboquímicas persistiu nos anos 20 do Século XX e começou a declinar com o crescimento da indústria do petróleo com seus métodos alternativos de produzir os produtos básicos: ácido acético, acetona e metanol. Ao final da II Guerra Mundial o declínio da indústria de destilação seca da madeira era completo (FAO, 1985).

Entretanto, prosseguiu a demanda pelo carvão vegetal nos países industrializados para produzir carvão ativado, útil como agente de redução química e na Metalurgia. Era vantajoso produzir carvão vegetal a partir de sobras e descartes de madeira para a indústria química mesmo com o declínio da importância dos sub-produtos da pirólise, gerando uma nova oportunidade para investimentos de capital (FAO, 1985).

A necessidade continuada de carvão vegetal de alto grau (ativado) gerou atenções focalizadas em encontrar rotas para produzi-lo com maior eficiência de conversão, com menor demanda de mão-de-obra e menos poluentes do que as técnicas envolvendo fornos metálicos e caieiras (FAO, 1985).

Também foram desenvolvidas as retortas de gás ascendente contínuas e semi-contínuas dos tipos Lambiotte e Reichert. A retorta Waggon (Vagão) ou Arkansas surgiu antes com o intuito de reduzir a intensidade de mão-de-obra dos métodos tradicionais e de coleta dos sub-produtos (FAO, 1985).

Durante os anos 60 do século XX, surgiu nos EUA a necessidade de converter em carvão vegetal as serragens de cortiça e madeira de pinus e briquetá-las para um mercado recreativo urbano crescente. Surgiu o forno de câmaras múltiplas de Herreshoff para a conversão de finos de biomassa. A recuperação de sub-produtos químicos era menos importante e adotou-se a queima de gases e vapores para descarte em chaminés ou para cogeração de energia em caldeiras de usinas termoelétricas (FAO, 1985).

Os diversos sistemas que se revelaram comercialmente viáveis são descritos a seguir. É importante considerar as circunstâncias particulares de cada equipamento/processo porque a validade de um para uma determinada situação pode ser inadequada para outra (FAO, 1985).

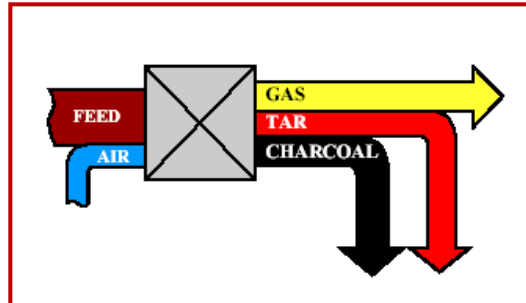
No Brasil, vários autores mencionam a unidade de carbonização contínua da ACESITA ENERGÉTICA, que, de acordo com Ferreira (1988) obtinha 15 t/dia de carvão e 35 t/dia de licor pirolenhoso. Segundo informações obtidas em 12 e 13 de agosto de 2010 com funcionários da ArcelorMittal, essa unidade de carbonização contínua foi desativada.

6.4 – CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE RETORTAS

Almeida e Rezende (1982), a FAO (1985). Gronli (2005) consideram a seguinte classificação de carbonizadores de lenha pelo sistema de aquecimento empregado em:

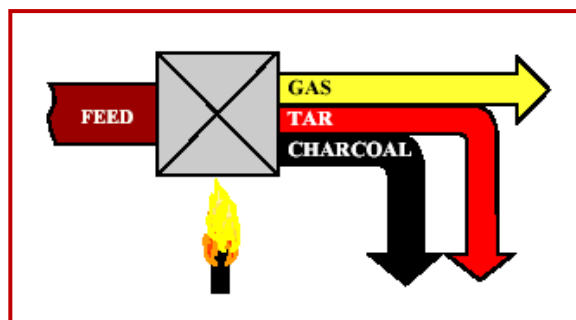
1º tipo – FONTE INTERNA DE CALOR OU AQUECIMENTO DIRETO

Parte da carga de madeira é queimada para aquecer o restante. Adotado em fornos primitivos ou tradicionais, na retorta Herreshoff e nos reatores de leito fluidizado e agitado (FAO, 1985)



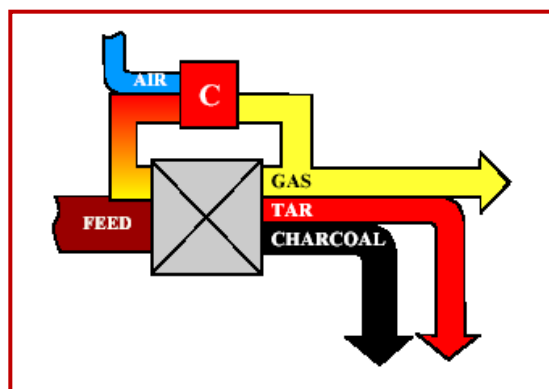
2º tipo – FONTE EXTERNA DE CALOR COM AQUECIMENTO INDIRETO

Ocorre a queima externa de combustível para gerar o calor da carbonização. A queima externa de madeira ou gás oriundo da sua gasificação produz gases quentes que passam através das paredes encamisadas ou ocas da retorta selada que contém a lenha. Esse método é ainda usado para alguns equipamentos simples tais como as "retortas de tambores de óleo" que foram implementadas no Caribe e a "retorta Constantine" desenvolvida na Austrália (FAO, 1985).



3º tipo – FONTE EXTERNA COM AQUECIMENTO DIRETO POR GASES RECIRCULANTES

Faz-se o aquecimento direto da lenha pelo gás quente soprado através da retorta. A transferência de calor nesse sistema é boa porque o gás quente (sem oxigênio livre) tem contato direto com a lenha a ser aquecida. Os exemplos de fornos mais conhecidos desse sistema são as retortas Lambiotte, de Reichert e o forno Schwarz (FAO, 1985).



6.5 – VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS SISTEMAS DE AQUECIMENTO DE RETORTAS

1º tipo – FONTE INTERNA DE CALOR OU AQUECIMENTO DIRETO

Parte da carga de madeira é queimada para aquecer o restante. **A velocidade de queima é controlada pela vazão de ar admitida ao forno, poço, caieira (monte ou pilha) ou retorta. Esse é o sistema tradicional para produzir a maioria do carvão vegetal no mundo e na retorta Herreschoff. É eficiente se controlado adequadamente à medida que o calor é gerado exatamente onde seja necessário e não apresenta problemas de transferência de calor.** Os carbonizadores de leito fluidizado e outros tipos de leito agitado também adotam esse sistema. **Sua principal desvantagem nos equipamentos simples é que quantidades excessivas de madeira são queimadas e desperdiçadas porque a entrada de ar não é controlada com eficiência (FAO, 1985).**

2º tipo – FONTE EXTERNA DE CALOR COM AQUECIMENTO INDIRETO

Ocorre a queima de combustível para gerar o calor da carbonização. A queima externa de madeira ou gás oriundo da sua gasificação produz gases quentes que passam através das paredes encamisadas ou ocas da retorta selada que contém a lenha.

A maioria das retortas iniciais construídas para destilar madeira e suprir os biocarboquímicos, antes do advento da indústria petroquímica, empregava esse sistema de aquecimento. **Esse tipo de aparato não é eficiente, devido à dificuldade de promover uma boa transferência de calor através das paredes metálicas da retorta para a carga de lenha cujo contato direto com as suas faces é irregular. Isto é, a transferência era convectiva ao invés de condutora por contato direto, e provocava superaquecimento das paredes provocando danos à sua estrutura e operação.** Esse método é ainda usado para alguns equipamentos simples tais como as de *“retortas de tambores de óleo”* que foram implementadas no Caribe e a *“retorta Constantine”* desenvolvida na Austrália (FAO, 1985).

3º tipo – FONTE EXTERNA COM AQUECIMENTO DIRETO POR GÁS RECIRCULADO

Faz-se o aquecimento direto da lenha pelo gás quente soprado através da retorta. A transferência de calor nesse sistema é boa porque o gás quente (sem oxigênio livre) tem contato direto com a lenha a ser aquecida. Por não possuir oxigênio livre, não ocorre combustão dentro da retorta e o gás transfere calor durante o seu percurso, resfriando-se para novamente ser utilizado com finalidades de aquecimento.

O sistema de aquecimento do 3º tipo, embora tecnologicamente excelente, é mais complicado do que o 1º tipo (de queima parcial da carga) e, a menos que exista uma razão forte para seu uso, seu custo não pode ser justificado comparando-se ambos os casos.

Os exemplos de fornos mais conhecidos desse sistema são as retortas Lambiotte e Reichert.

A retorta Reichert opera em batelada, aquecendo a carga de madeira para convertê-la em carvão pela passagem do gás quente circulante sem oxigênio livre por meio de um soprador e um sistema de recuperadores. Esse sistema assemelha-se a uma retorta em batelada com gás ascendente sem a vantagem da alimentação contínua (FAO, 1985).

Outro exemplo é o do forno Schwarz desenvolvido na Europa, que tem uma câmara externa de combustão ou grelha e **as emissões gasosas quentes da madeira queimam e passam através da carga. As emissões gasosas efluentes são lançadas ao ambiente através de uma chaminé** (FAO, 1985).

6.6 - PROCESSOS CONTÍNUOS DE CARVOEJAMENTO

Os processos descritos no antológico trabalho de Almeida e Rezende (1982), intitulado *O processo de carbonização contínua da madeira*, visaram as rotas tecnológicas de maior interesse para a indústria brasileira voltada para produzir carvão vegetal, e focalizavam a pirólise de madeira, ao invés de sua gasificação.

Os primeiros processos de carbonização contínua incluíam o aquecimento externo da carga, com gases quentes que circulavam ao redor de um invólucro metálico contendo a lenha, produzindo baixos rendimentos térmicos e o rápido desgaste do equipamento. Nos processos utilizados nos anos 80 do século XX, a madeira era aquecida por contato direto de gases quentes injetados no interior dos fornos de carbonização. Alguns desses processos termoquímicos constituíam rotas de gasificação, como o REICHERT-LURGI (ou DEGUSSA) e o SIFIC-LAMBIOTTE, que foram concebidos para recuperar e tratar as frações condensáveis, porque não existia um mercado efetivo para o consumo de carvão vegetal, que se tornou um produto suplementar (Almeida e Rezende, 1982).

Outro texto também antológico foi produzido pela FAO (1985) intitulado *Industrial Charcoal Making*, que ilustra com clareza o que são os processos industriais contínuos de carvoejamento, e que fundamenta nossa abordagem.

A *carbonização contínua* da madeira ocorre em seqüência através de uma série de zonas para possibilitar o uso econômico de mão-de-obra e energia, reduzindo, assim, os custos de produção e aumentando o rendimento de carvão por quantidade de lenha consumida. A *concepção de um carbonizador contínuo* no qual a madeira escoava verticalmente abaixo à medida em que é aquecida e carbonizada *inspirou-se obviamente na idéia do processo de fusão redutora do minério de ferro em alto-forno para produzir carvão vegetal em pedaços grandes* (FAO, 1985).

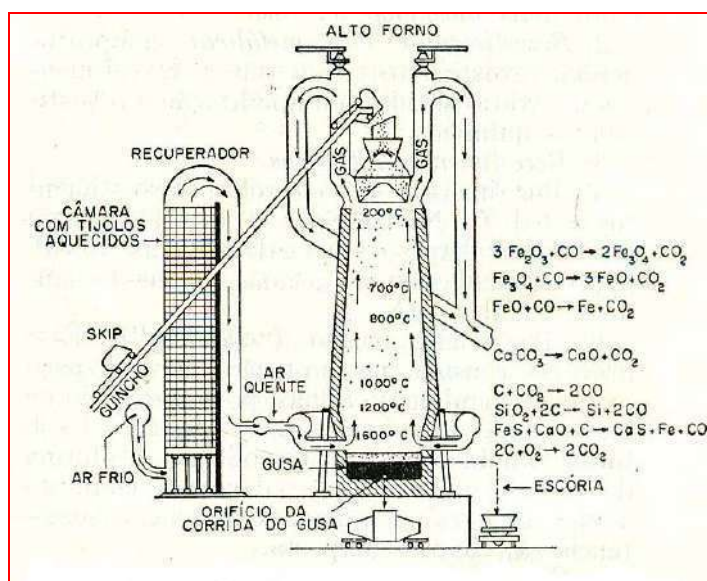


Figura 6.1 – Desenho esquemático do corte de um alto-forno com as principais reações que nele são desenvolvidas (FAO, 1985)

Segundo a FAO (1985), existem muitos sistemas contínuos de carbonização baseados em correias e parafusos transportadores e leitos fluidizados, cujos custos são elevados.

As *retortas para carbonização* de madeira apresentam as vantagens do maior aproveitamento de matérias voláteis liberadas no processo termoquímico contínuo, a redução de mão-de-obra envolvida e a maior produtividade operacional. As principais desvantagens das retortas incorporam a alta velocidade de carbonização, a complexidade operacional e seus custos de implantação (Ferreira, 1988).

Sistemas de carbonização contínua para o mesmo capital de investimento dão um aumento de produção em comparação à complexa tecnologia de sistemas em batelada para o mesmo investimento, um maior rendimento do que as tecnologias simples e economia definida em combustível necessário para a carbonização em comparação com qualquer outro sistema (FAO, 1985).

6.7– O ALTO FORNO PARA CARBONIZAÇÃO DE MADEIRA OU RETORTA LAMBIOTTE

Para obter carvão vegetal em pedaços num alto-forno (vertical), era necessário abandonar a idéia de secar a carga e aquecê-la ao seu ponto de carbonização através da queima de parte da madeira alimentada ao forno, por ser um processo muito difícil de controlar. **Foi necessário aquecer a carga consumindo gás quente livre de oxigênio, produzido externamente e soprado através da lenha descendente.** Dessa forma, obteve-se carvão vegetal em pedaços sem contaminação com cinzas e controle total do processo, porque o carbonizador sempre operava em temperatura inferior ao ponto de combustão do produto (FAO, 1985).

A recuperação do calor dos gases e vapores que emergem do topo do alto-forno carbonizador foi obtida pela sua queima em condições controladas em queimadores similares aos usados nos altos-fornos. Daí, os gases quentes foram soprados para dentro da retorta em pontos apropriados, de modo a completar a carbonização sobre o carvão vegetal descendo da zona de pirólise. **A corrente gasosa ascendente dentro da torre (ou coluna vertical) transferia seu calor em contracorrente para a carga de madeira descendente.** O carvão vegetal obtido na parte inferior da retorta era resfriado antes de chegar à base pela de sopragem de gás combustível frio e livre de oxigênio e pela sua extração bem abaixo do ponto de entrada da corrente gasosa oriunda de ventaneiras e queimadores (FAO, 1985).

O gás combustível sobe aquecido através do resfriamento do carvão vegetal e entra pelas ventaneiras para ser queimado com ar e gerar nova corrente gasosa ascendente quente que é soprada na torre de modo a remover o alcatrão residual existente no carvão vegetal, e, então, subir ao topo da torre liberando seu conteúdo térmico para a carga de madeira que desce. A posição das zonas diferentes na torre pode ser controlada regulando-se a velocidade de injeção do gás e sua temperatura e a velocidade de alimentação da madeira no topo e de vazão de remoção de carvão vegetal na sua base. Esse tipo de retorta desenvolvida no início dos anos 40 (FAO, 1985) é conhecido como **"continuous vertical hot rising gas retort"** ou **"retorta Lambiotte"**, devido ao seu inventor (FAO, 1985).

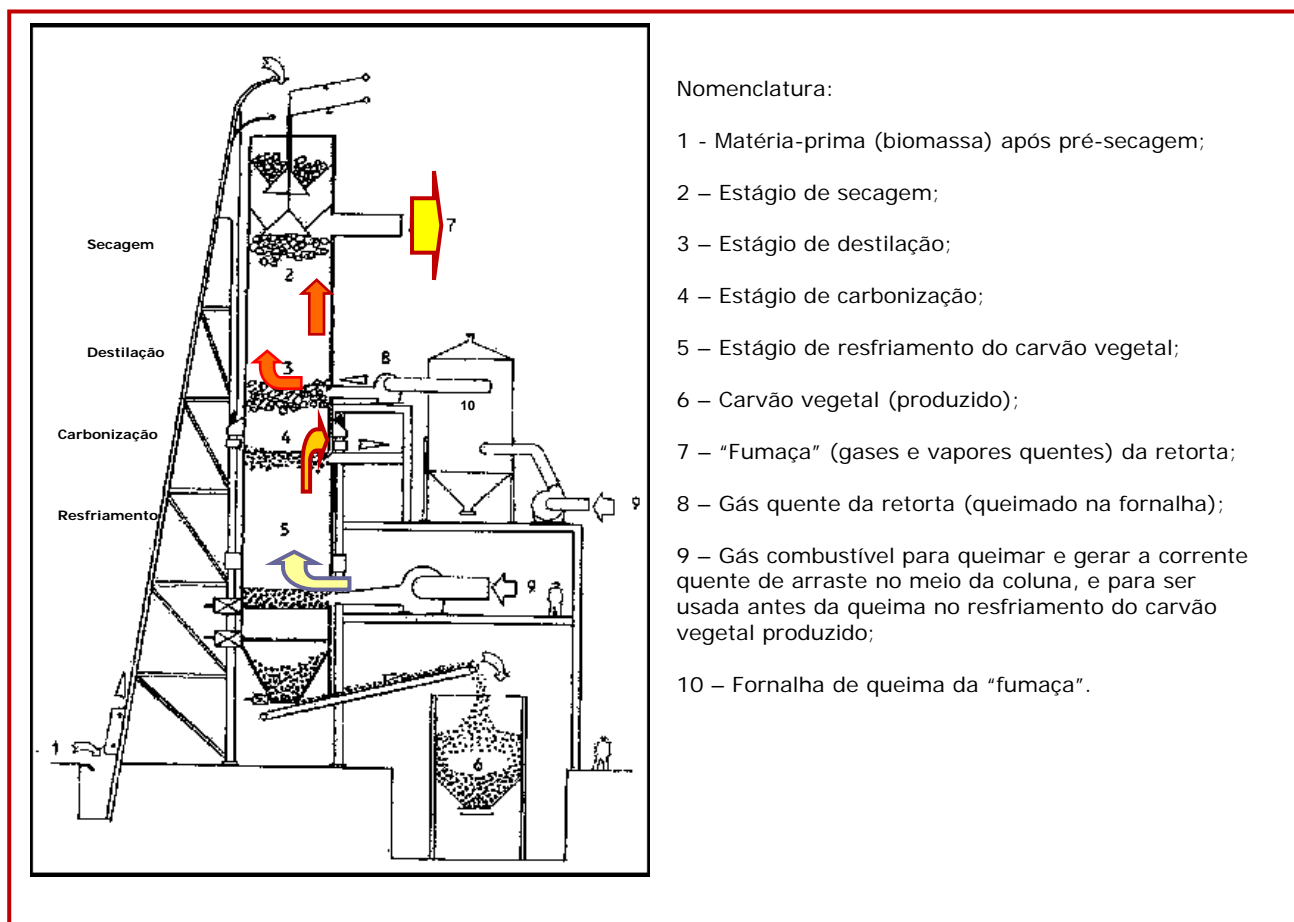


Figura 6.2 – Retorta de gás quente ascendente ou Lambiotte-SIFIC
(adaptado de FAO, 1985)

6.8 – O PROCESSO LAMBIOTTE- SIFIC DE CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA

O processo de carbonização Lambiotte é contínuo. A retorta tem a forma de um cilindro vertical com altura de 18m a 33m e diâmetro de 4,3m, possuindo uma abertura de alimentação no topo e um cone de descarga no fundo. **A madeira percorre três zonas quentes dentro do forno: secagem, destilação e carbonização e a zona de resfriamento** (Gronli, 2005).

Existem dois diferentes sistemas de aquecimento para o processo Lambiotte: o **SIFIC (francês)** e o **sistema CISR (belga)**. Ambos operam com dois circuitos fechados de **gás**, um para o(s) estágio(s) de secagem, destilação e carbonização da biomassa, e o outro para o estágio final de resfriamento do carvão vegetal (Gronli, 2005).

O processo Lambiotte-SIFIC pode ser operado com a recuperação de subprodutos biocarboquímicos. Os vapores pirolenhosos são retirados do topo da retorta, a fração condensável é colhida nos condensadores e lavadores antes da queima do gás remanescente numa fornalha. Uma parte dos gases combustíveis é condicionada e re-injetada no meio da retorta para servir de meio de aquecimento para as etapas de secagem-destilação-carbonização. Outra parte é resfriada e re-injetada como agente de resfriamento do carvão vegetal (Gronli, 2005).

No processo Lambiotte-SIFIC a madeira pré-secada é levantada ao topo da retorta por meio de uma vagoneta de monta-carga ou um transportador, e é despejada numa comporta de sino duplo que permite a entrada de madeira e ainda impede a fuga de quantidades significativas de gases da retorta. O nível da madeira na retorta é monitorado e o carregamento é controlado de forma a manter o nível constante por meio de controles automáticos (FAO, 1985).

Durante a carbonização, a madeira desce lentamente em contracorrente ao gás inerte quente que seca a madeira e a leva à temperatura de carbonização. A travessia da carga de madeira dura cerca de 11 horas na retorta até sair como carvão na sua base através de um par de comportas engatadas hidraulicamente operadas, que permitem a saída de pequenos lotes a cada 20 minutos. O tempo para atravessar a retorta e os intervalos entre as remoções de carvão na base estão sob o controle do operador e podem ser alterados para se adequar ao teor de umidade da madeira, taxa de produção de carvão exigida e exigências fixadas de carbono no produto. O movimento da carga pela retorta leva à formação de finos indesejáveis. Porém, com descarga intermitente, como descrito acima, este efeito é reduzido e o percentual de finos resulta ser quase o mesmo que nos processos dos fornos de tijolos convencionais (FAO, 1985).

O carvão tem que ser resfriado quando deixa a retorta, de outra forma entraria em ignição em contato com o ar. O resfriamento é realizado por um sopro frio de gás (inerte ou combustível livre de oxigênio) no fundo da retorta. Conforme o gás do resfriamento sobe, extrai o calor do carvão vegetal, que desce a retorta até as portas de descarga. O gás aquecido é retirado no meio da retorta, pelas ventaneiras, logo abaixo do ponto onde o gás quente oriundo da fornalha é soprado para dentro da coluna (FAO, 1985).

A circulação correta do gás é assegurada por um controle estrito das pressões em pontos críticos. O gás quente é geralmente produzido pela queima de gases combustíveis numa fornalha com ar e este gás quente neutro é soprado em torno de 900°C num ponto um pouco acima do ponto de saída do fluxo de gás de resfriamento. Essa operação retira o alcatrão restante do carvão neste ponto e completa a etapa de carbonização. O gás passa pela retorta, doando o seu calor para a carga descendente e retirando e lavando os voláteis desprendidos pela madeira descendente (FAO, 1985).

O **modelo Lambiotte-SIFIC**, opera um processo integrado que pode produzir carvão vegetal, produtos químicos e combustíveis. A transferência de calor é feita por contato direto de gases quentes com a carga, sendo **a corrente gasosa oriunda da reciclagem de uma fração dos voláteis combustíveis produzidos no próprio processo. O sistema permite incluir um secador e unidades de recuperação de voláteis** (Pontette, 1981 – citado por Ferreira, 1988). É, provavelmente, o tipo mais sofisticado de retorta para fabricar carvão vegetal em pedaços a partir de tábuas e toras, devido à qualidade e rendimento do produto. Porém, existem outros sistemas comerciais bem sucedidos (FAO, 1985).

Existem diversas plantas de carbonização Lambiotte na Europa, a maior delas instalada em Premery na França, em que o processo SIFIC produz 25.000 t/ano de carvão a partir de carvalho em duas retortas. Ácido acético e alguns outros reagentes químicos são recuperados a partir do ácido pirolenhoso. O excesso de gás é usado para pré-secar a lenha em dois alto-fornos com altura de 20 m e diâmetro de 3 m (Gronli, 2005).

6.9 – A RECUPERAÇÃO DE SUB-PRODUTOS NO PROCESSO LAMBIOTTE-SIFIC

As instalações europeias originais das retortas Lambiotte, o gás de topo (ou corrente gasosa) oriundo(a) da coluna era processado(a) para recuperar subprodutos químicos porque essa concepção de equipamento é adequada. **A madeira bem seca continua sendo essencial para minimizar a entrada de combustível extra e evitar a diluição excessiva do ácido pirolenhoso**, pois reduz os custos, por evitar a evaporação posterior da água. A emissão de gases a partir da cabeça da retorta é mantida numa temperatura suficiente para evitar a condensação de alcatrão e outros voláteis no topo da coluna e na tubulação associada. A alta eficiência térmica da retorta Lambiotte é devida ao fato de que os produtos do sistema, carvão e voláteis deixarem a retorta com aproximadamente a mesma temperatura com que a madeira entra (FAO, 1985).

Há uma série de opções para o descarte das emissões de vapor e gases no topo da retorta. A mais óbvia é a utilização dessa corrente gasosa para aquecer a madeira e esfriar o carvão. Se a madeira a ser carbonizada estiver bem seca, haverá calor suficiente nas emissões gasosas quando sofrer a queima final com ar para realizar tal desempenho (FAO, 1985).

A corrente de vapores e gases quentes emitidos na retorta Lambiotte é dividida em duas. A primeira fração é queimada diretamente na fornalha para aquecer a carga. A segunda corrente gasosa é resfriada e lavada para remover o alcatrão e, em seguida, é injetada na base da coluna para esfriar o carvão descendente. **A corrente gasosa que sai do lavador é misturada com o resto da primeira corrente gasosa, sendo queimada para gerar gases quentes isentos de oxigênio livre, que será injetado na coluna Lambiotte.** Qualquer deficiência térmica causada pela utilização da madeira úmida, etc., tem que ser compensada com a queima de combustível extra no forno, tal como petróleo ou gás natural (FAO, 1985).

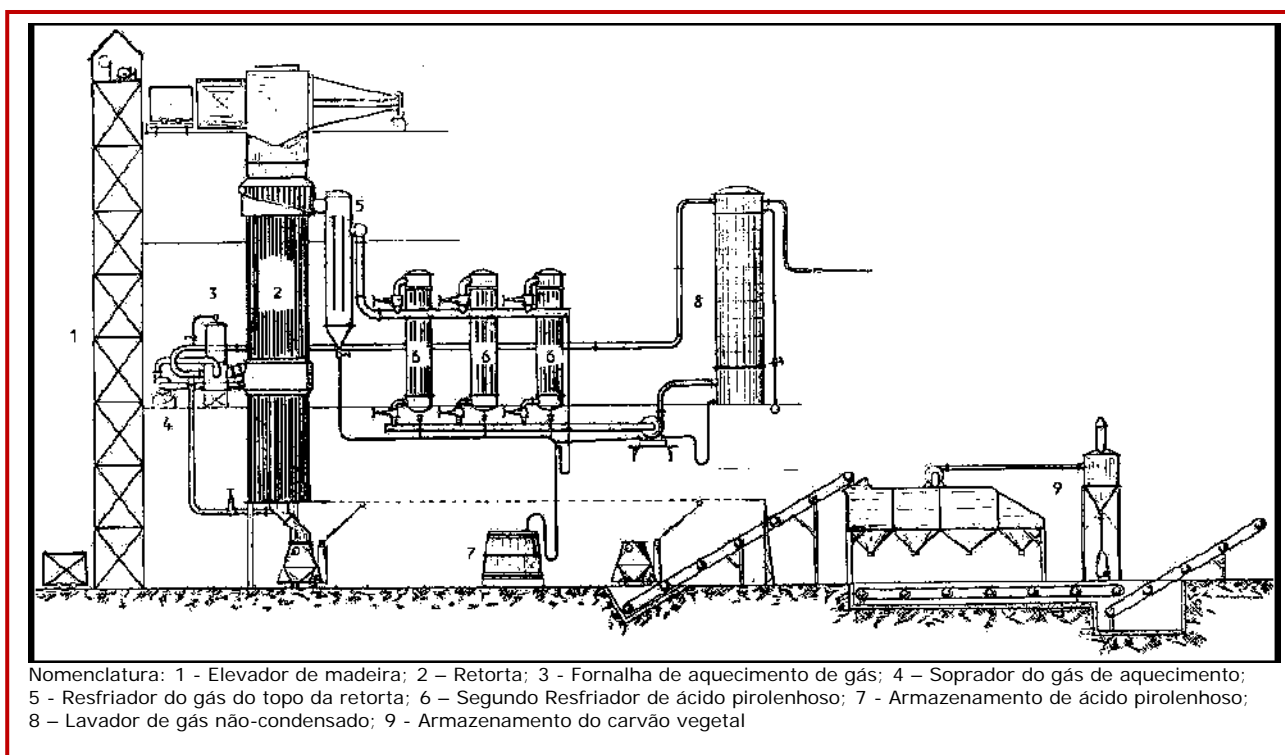


Figura 6.3 – Recuperação de subprodutos biocarboquímicos da retorta vertical contínua de gás quente ascendente
(FAO, 1985)

Alternativamente, a totalidade da corrente gasosa quente efluente pode ser queimada para produzir vapor na co-geração de energia elétrica e o calor necessário para a operação da retorta pode ser obtido pela queima de outro combustível, como petróleo, carvão ou gás natural. A vantagem desse procedimento é que ele evita o manuseio de gases de saída da retorta e do alcatrão associado e outros líquidos biocarboquímicos. Algumas das vantagens são perdidas se esses combustíveis alternativos forem caros, o que geralmente é o caso nos dias atuais (anos 80 do século XX) (FAO, 1985).

As grandes retortas nas siderúrgicas de Wundowie na Austrália queimavam os gases contendo alcatrão para gerar energia elétrica e usavam o gás limpo do alto-forno como agente de resfriamento e aquecimento das retortas. O melhor método para uso em determinada instalação fabril depende de fatores locais. Mas, é necessário pagar pela energia térmica consumida, e a eficiência desse consumo depende, a longo prazo, da secagem da madeira de forma tão eficaz quanto possível antes que seja carregada na retorta (FAO, 1985).

A elevação acentuada do consumo de energia quando o teor de umidade da lenha aumenta não é o único problema. O aumento da entrada de umidade no sistema reduz a capacidade instalada da planta e diminui a produção. Esses problemas podem ser reduzidos se a madeira passar através de um secador antes de entrar na retorta (FAO, 1985).

Várias tentativas foram feitas para simplificar o processo Lambiotte- SIFIC, que é notável por seu elevado custo de investimento. A modificação de maior sucesso do sistema foi a retorta CISR-Lambiotte que é menor e tem sido operada comercialmente há vários anos (FAO, 1985).

6.10 - PROCESSO LAMBIOTTE- CISR DE CARBONIZAÇÃO DE BIOMASSA

O processo Lambiotte-CISR é mais simples, porque não possui um sistema de recuperação de sub-produtos biocarboquímicos. A retorta é aquecida por um dispositivo interno de combustão o qual queima parte dos vapores pirolenhosos. Na parte inferior da retorta, um segundo gás circulante resfria o carvão vegetal antes de ser descarregado do conversor. Essa corrente de vapor é resfriada e lavada numa torre de lavagem. Sendo o processo Lambiotte contínuo, a qualidade e a homogeneidade da alimentação é crucial. As peças de madeira não podem variar em tamanho e o teor de umidade não pode exceder 25% em base seca (Gronli, 2005).

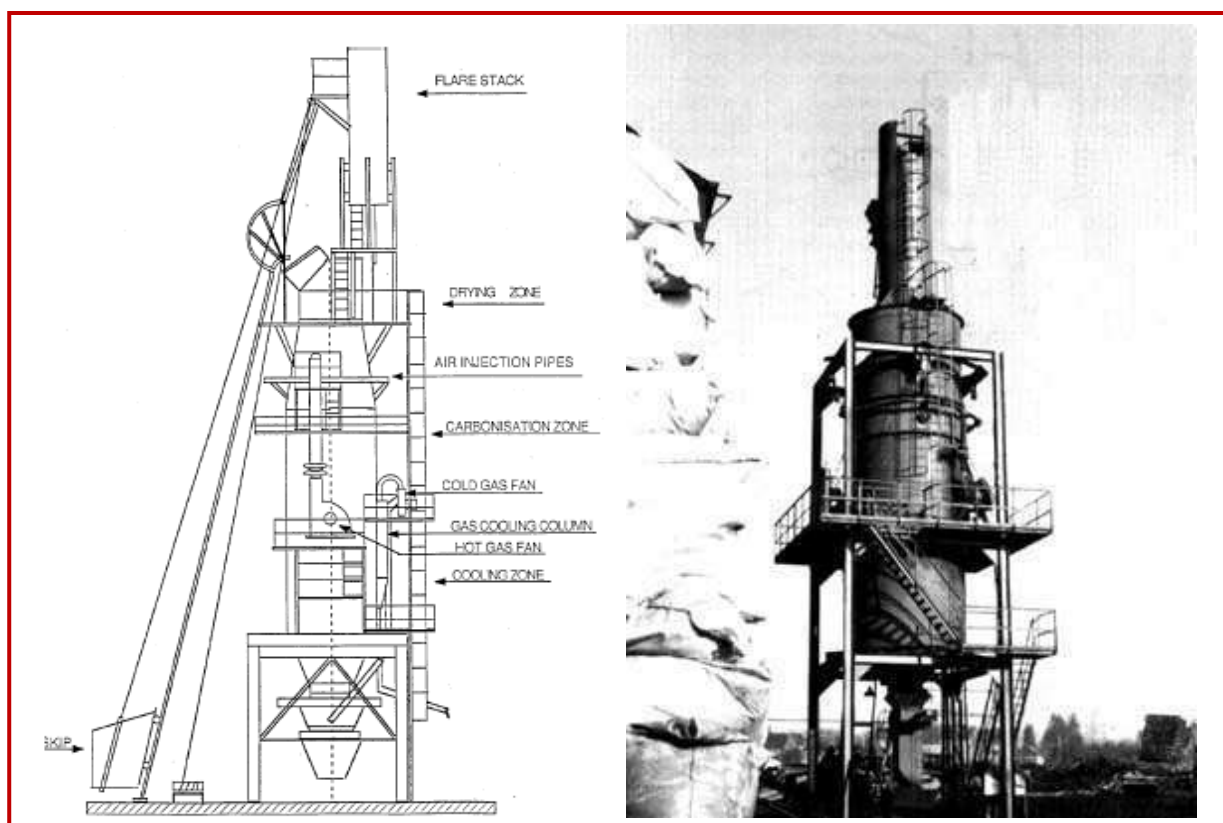


Figura 6.4 – Alto-forno Lambiotte CISR de carbonização – sistema belga (Gronli, 2005)

A retorta Lambiotte-CISR é aquecida por gás quente isento de oxigênio livre, obtido da queima de parte dos gases e vapores de retorta. Tal queima fornece a energia necessária para completar a secagem da madeira, elevá-la a uma temperatura de decomposição espontânea, **retirar o excesso de alcatrão aprisionado ou retido na estrutura porosa do carvão vegetal** e compensar as diversas perdas de

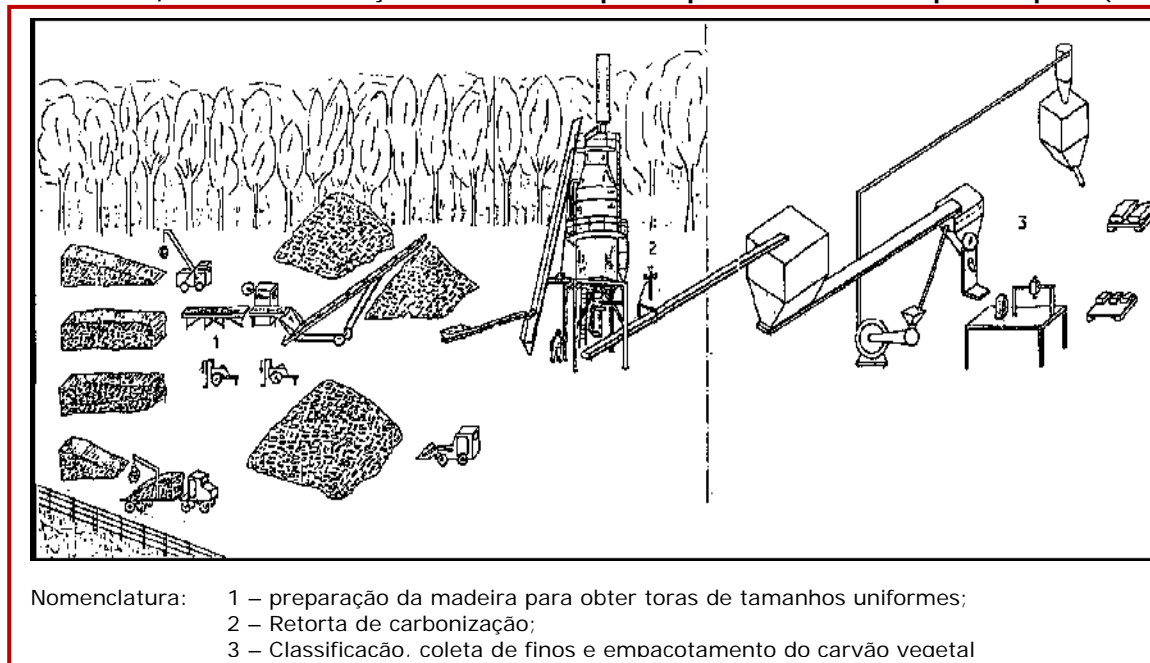
calor da retorta. O carvão vegetal produzido é resfriado pela passagem do restante da corrente gasosa da retorta, após ter sido resfriado e limpo, inserido na base da retorta como ocorre no sistema SIFIC maior. Essa corrente gasosa se aquece enquanto esfria o carvão e é misturado com o resto do gás oriundo do topo da retorta para ser queimado com o ar numa fornalha de aquecimento para ser então, injetado no centro da coluna um pouco acima do ponto de saída do gás de resfriamento (FAO, 1985).

É importante manter o teor de umidade da lenha alimentada à retorta em torno de 30% ou menos. Caso contrário, será difícil queimar as emissões gasosas proveniente da retorta e será impossível produzir a corrente gasosa de aquecimento necessária na coluna. **A quantidade de ar de combustão misturada com os gases de aquecimento também deve ser cuidadosamente controlada para atingir a temperatura máxima.** Se não houver cuidado, será difícil gerar calor suficiente para a carbonização da madeira e manter o processo operando, sendo necessário consumir combustíveis adicionais, como o petróleo, para compensar a deficiência térmica. **A temperatura de carbonização na retorta é estabelecida pela qualidade do carvão vegetal a ser produzido. Se essa temperatura não for atingida, o carvão sofrerá queima parcial e a retorta irá gradualmente parar de funcionar corretamente** (FAO, 1985).

Algumas características típicas da retorta Lambiotte-CISR são:

- Tamanho da retorta: altura de 18 m, diâmetro de 3 m;
- Alimentação típica: aproximadamente 7.000 t/ano de madeira seca;
- Tipos de matérias-primas: tocos e chapas, possuindo dimensões em torno de comprimento de 350 mm, espessura de 100 mm e umidade não superior a 30%;
- Rendimento: aproximadamente 2.500 t/ano de carvão vegetal;
- Consumo de energia para operar: cerca de 25 kw de eletricidade;
- Água de refrigeração (potável ou tratada) para refrigeradores de gás e purificadores;
- Petróleo ou gás natural para a partida e aquecimento de emergência de gás de arraste na coluna.

Um problema que afeta todos os carbonizadores de aço é a corrosão pelo ácido acético e ácidos relacionados desenvolvidos durante a carbonização. Isto afeta particularmente a retorta do tipo vertical contínuo porque deve haver sempre uma parte da retorta a uma temperatura resistente ao ataque dos vapores ácidos e o movimento contínuo do material retorta abaixo remove qualquer camada protetora que pode se formar na superfície do metal, expondo constantemente para novo ataque. **A corrosão dos componentes da retorta pode ser facilmente superada, a um custo considerável, utilizando-se aço inoxidável naquelas partes onde o ataque é rápido** (FAO, 1985).



Nomenclatura: 1 – preparação da madeira para obter toras de tamanhos uniformes;
2 – Retorta de carbonização;
3 – Classificação, coleta de finos e empacotamento do carvão vegetal

Figura 6.5 – Instalação fabril de carvão vegetal pelo Processo Lambiotte CISR
(FAO, 1985)

6.11 – O ALTO-FORNO DA UNIDADE DE CARBONIZAÇÃO CONTÍNUA DA ACESITA ENERGÉTICA

A unidade de carbonização contínua da ACESITA ENERGÉTICA S.A. era composta da **planta de carbonização contínua** com capacidade para 15 t/dia de carvão e 35 t/dia de licor pirolenhoso e de um embrião (unidade piloto) de uma **planta de recuperação de produtos biocarboquímicos** onde, pelo processamento deste licor, seriam obtidos 4 t/dia de alcatrão e 0,8 t/dia de metanol. Foi desativada por motivos econômicos (Magalhães e colaboradores, 1986).

A madeira, com umidade em torno de 25%, cortada em toletes de 20 cm de comprimento, era introduzida pelo topo do alto-forno (retorta) vertical de carbonização. Em seu trajeto até o fundo, a madeira, em contato direto com uma corrente ascendente de gás e vapor, atravessava diferentes zonas térmicas do forno: secagem, carbonização e resfriamento do carvão (Magalhães e colaboradores, 1986).

A extensão dessas zonas era controlada pela temperatura do tipo de corrente gasosa que aí circulava. Assim, na zona de resfriamento era introduzida a corrente GNC (gases não condensáveis) de reciclo à temperatura ambiente e no final da zona de carbonização era injetado outra corrente gasosa de fumos da combustão a 750°C. Esse corrente de fumos quentes era gerada pela queima de GNC de reciclo no combustor que se misturava ao fluxo proveniente da zona de resfriamento. Esta mistura, inicialmente a 400 – 500°C, se resfriava à medida que cedia calor à madeira e que recebia os voláteis (gases e vapores) gerados nas zonas de carbonização e secagem, até sair no topo do forno a 100-50°C. No topo do alto-forno ocorria a exaustão dessa mistura de gases e vapores, sendo, em seguida, introduzida em recuperadores do alcatrão, similares aos dos fornos de alvenaria e daí até o condensador. Após separar os condensáveis, obtinham-se a corrente gasosa GNC para ser reintroduzida na coluna do alto-forno. Os condensados são levados até os tanques de armazenamento, onde o alcatrão insolúvel é separado do licor pirolenhoso por decantação (Magalhães e colaboradores, 1986).

No módulo da planta de recuperação de produtos biocarboquímicos, o licor pirolenhoso era, inicialmente, destilado para obtenção de metanol bruto e evaporado para recuperação do alcatrão solúvel. Os demais componentes do ácido pirolenhoso era lançados na atmosfera sob a forma de vapor. A unidade piloto contendo as etapas de processamento para promover a recuperação do ácido acético, do acetato de etila e o fracionamento do alcatrão vegetal, recebeu a denominação de "**embrião da planta química**" (Magalhães e colaboradores, 1986).

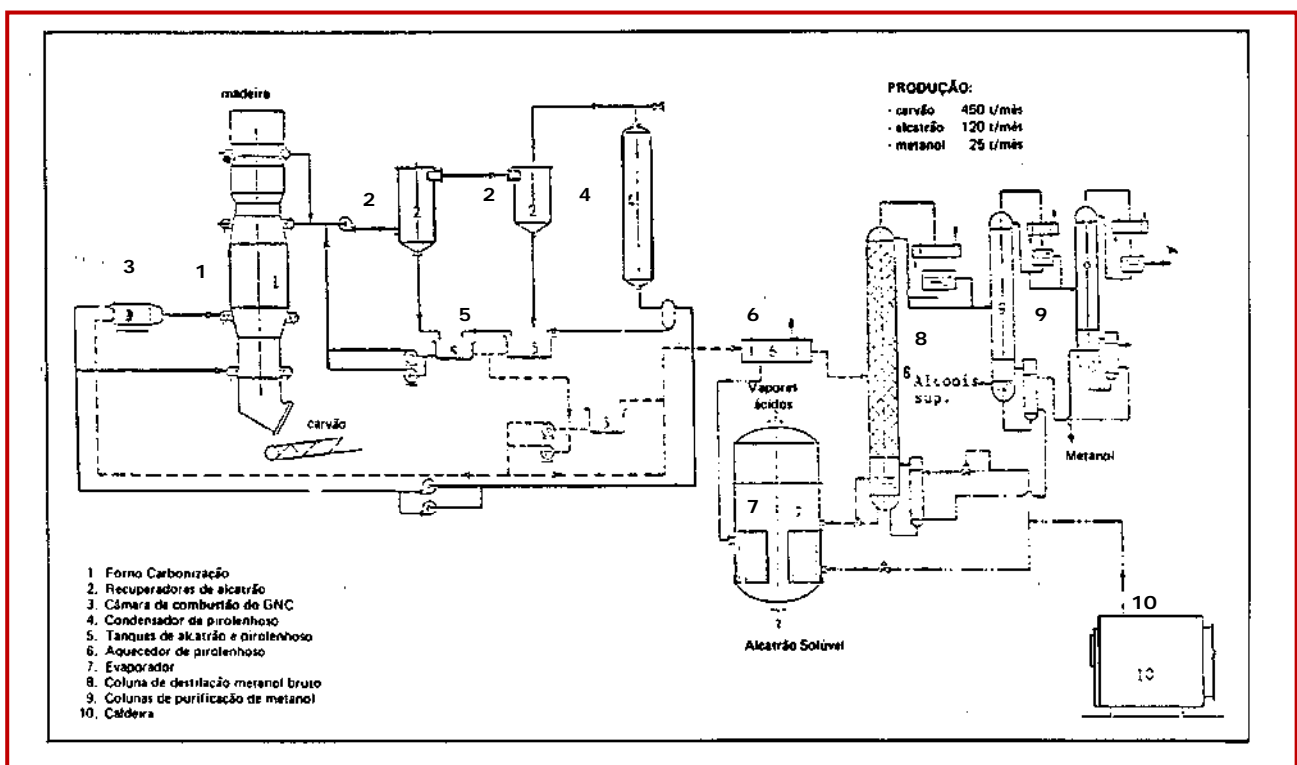


Figura 6.6 – Fluxograma da unidade mista das plantas de carbonização contínua e de recuperação de carboquímicos da ACESITA ENERGÉTICA S.A.

((Magalhães e colaboradores, 1986)

A planta da retorta de carbonização contínua pode ser vista em separado na figura seguinte.

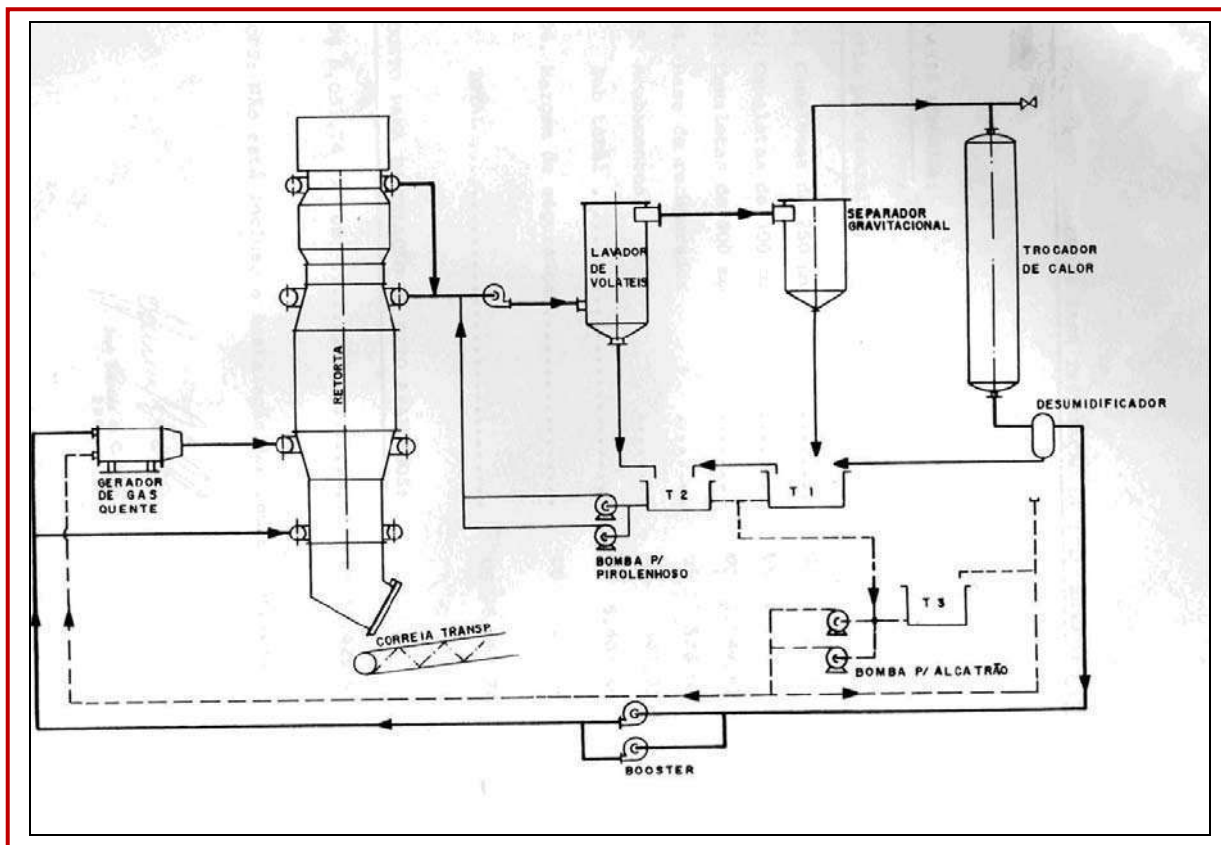


Figura 6.7 – Fluxograma da planta com a retorta carbonização contínua e o sistema de lavagem, separação e reciclagem de gases não-condensáveis (GNC) para queima na ACESITA ENERGÉTICA S.A.
(Magalhães e colaboradores, 1986)

A recuperação de subprodutos biocarboquímicos na ACESITA ENERGÉTICA S.A. iniciava-se após a decantação do licor pirolenhoso que era dividido em duas correntes: uma de alcatrão insolúvel e outra de ácido pirolenhoso para serem beneficiados em separado, conforme as figuras 6.7 e 6.8, mas não será abordada aqui. A figura seguinte apresenta um registro fotográfico do forno daquela empresa.

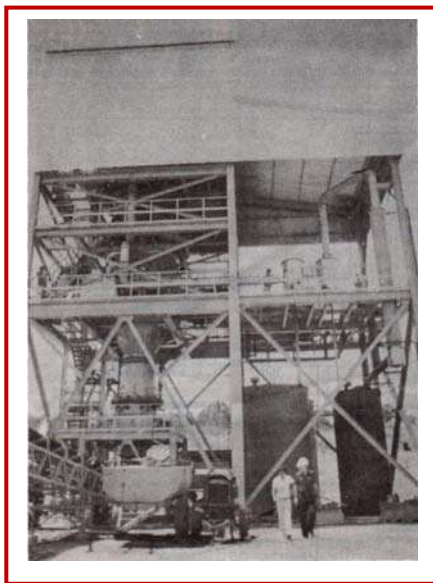


Figura 6.8 – Vista da área de descarga do forno de carbonização na ACESITA ENERGÉTICA S.A.
(Magalhães e colaboradores, 1986)

6.12- RETORTA OU FORNO CONTÍNUO DE SOLEIRAS OU CÂMARAS MÚLTIPLAS

É conhecido por vários nomes: *Herreshoff, McDougall, Wedge, Pacific, etc.* É constituído por diversas soleiras anulares montadas umas sobre as outras. Em cada uma existem braços revolventes, acionados por um eixo central comum. A alimentação entra no centro do forno do poço. Os braços impulsionam a carga para a periferia, onde ela cai na soleira inferior. Nesse, a carga é deslocada para o centro, onde cai na câmara seguinte. O procedimento prossegue até a base do conjunto. O eixo central é oco e resfriado internamente pela circulação forçada de ar. Os queimadores podem ser montados em qualquer das soleiras e o ar de circulação é usado na combustão. Esses fornos operam com materiais granulares, os quais percorrem um longo percurso em contracorrente com os gases de combustão. As unidades industriais têm diâmetros de 6 a 22 ft e incluem de 4 até 16 fornos. A área das soleiras ocupa de 70 até mais de 4.000 ft² (Perry e Chilton, 1980).

A retorta contínua de soleiras múltiplas (*"rotary hearth furnace"* ou *"continuous multiple hearth roasting furnace"*) ou *forno Herreshoff* é um método comprovado para carbonizar pequenas partículas de madeira e cortiça. Ao contrário dos outros dois carbonizadores descritos anteriormente o forno Herreshoff não irá operar com madeira em lâminas. **A alimentação deve ser na forma de partículas moderadamente finas, tais como serragem ou fragmentos de casca. Resíduos agrícolas, como vagens e fragmentos de cascas também podem ser processados.** Resulta da transferência de tecnologia de um modelo adotado em indústrias químicas e metalúrgicas, p. ex., para ustular minérios de enxofre antes do processamento posterior. O *forno Herreshoff* é interessante pois opera continuamente obtendo o calor necessário para sua secagem final e carbonização da carga através da queima de parte desta pela admissão controlada do ar para as soleiras, à medida que o material avança do topo para o fundo. Se pudesse operar com alimentação de tocos de madeira, seria um sistema contínuo ideal (FAO, 1985).

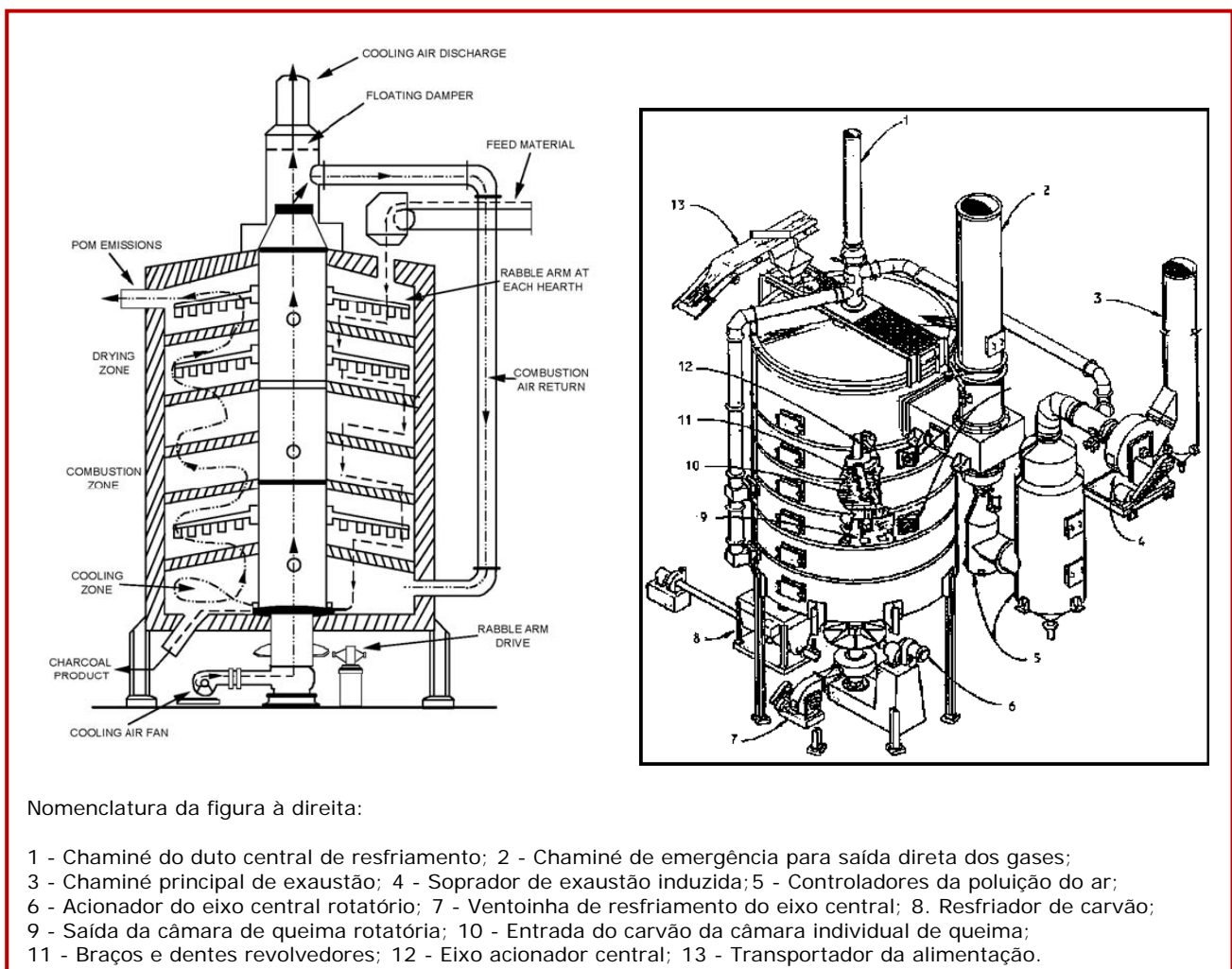


Figura 6.9 – Forno Herreshoff contínuo de câmaras múltiplas para produzir carvão vegetal
(Domac, Trossero e Siemons, 2008)

Uma desvantagem do **forno de soleiras múltiplas (Herreshoff)** em relação à retorta de gás ascendente (Lambiotte) reside no fato de só carbonizar madeira ou cortiça finamente dividida, resultando em carvão vegetal em pó, que demanda briquetagem para ser vendido. Os briquetes não são adotados nos processos metalúrgicos comuns. O único mercado econômico é o dos churrascos, que corresponde a um consumidor razoavelmente sofisticado. Outra desvantagem do forno Herreshoff é que produz carvão vegetal em pó e uma mistura de gases e vapores quentes, que é um poluente ambiental. Considerando-se que é antieconômico recuperar os sub-produtos dessa mistura gasosa, a única utilidade seria pra produzir calor para produzir briquetes ou gerar vapor d'água industrial que poderia movimentar turbinas termoelétricas. Se nenhum consumo econômico pode ser descoberto para o calor da queima dessa mistura de gases, então, ela deve ser meramente descartada ou queimada num "flare" (FAO, 1985).

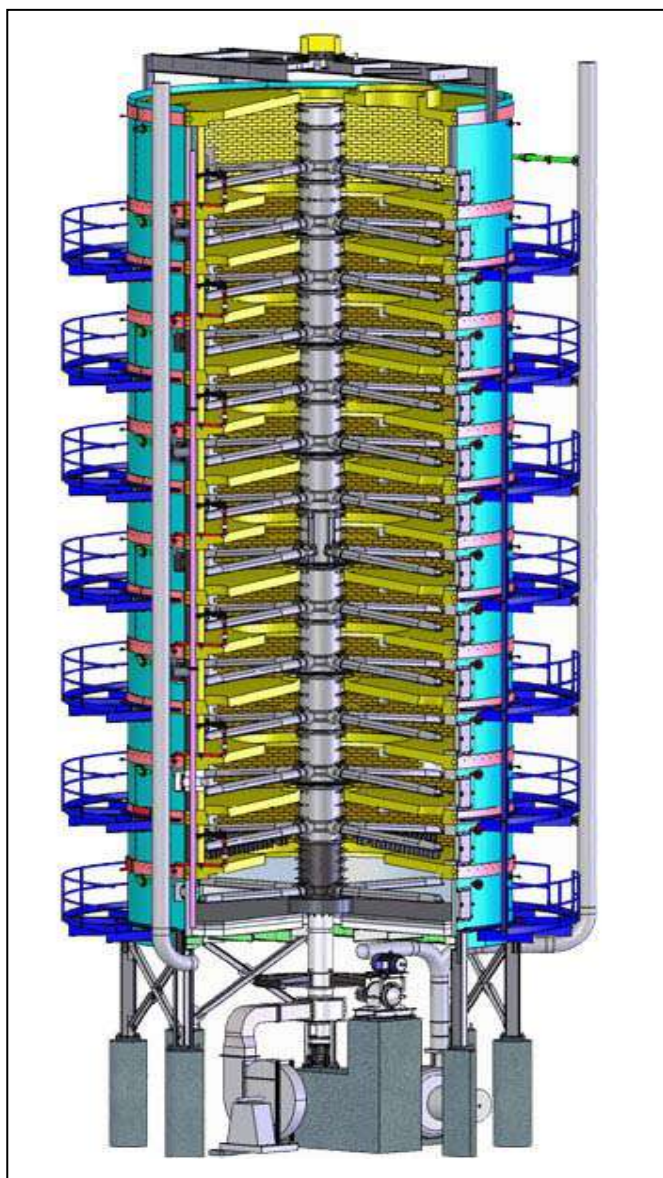


Figura 6.10 – Forno vertical a soleiras múltiplas (com 7 câmaras)
(Industrial Furnace Company, Inc., 2010; Perry e Chilton, 1980)

As câmaras circulares são apoiadas num reservatório cilíndrico refratário. Cada câmara tem um furo central por onde passa um eixo oco, e em cada câmara há um conjunto de braços revolventes. Estas peças são ocas para que o sistema possa ser resfriado internamente por convecção de ar. As pás unidas aos braços raspam a superfície da câmara conforme os braços giram lentamente, a 1 ou 2 RPM, as pás giram o material, movimentando-o ao longo das câmaras. As pás de uma câmara são organizadas para mover os grãos do centro para a beira, onde ele cai pela abertura central para a soleira abaixo. Desta forma, a biomassa move-se lentamente através do sistema, sendo constantemente revolvida para ser exposta à corrente ascendente dos gases de combustão (FAO, 1985).

6.13 – OPERAÇÃO DA RETORTA CONTÍNUA DE CÂMARAS MÚLTIPLAS

A operação da fornalha é iniciada utilizando-se queimadores a gás ou petróleo em cada câmara para elevar a temperatura para cerca de 600 °C, causando a ignição da matéria-prima. Quando a fornalha atinge a temperatura normal de operação de 900 a 1000 °C, os queimadores são desligados. Uma vez que a fornalha é acesa, ela deve funcionar continuamente 24 h/dia. A vazão de admissão do ar é regulada de modo que haja a carbonização da madeira e que o carvão saia do forno na forma de finos. Os gases e vapores produzidos são uma mistura altamente poluente de gases e vapores condensáveis da madeira: alcatrão, ácido pirolenhoso e vapor de água. Após a sua remoção do topo do forno podem ser queimados diretamente em caldeiras para gerar vapor ou energia. Caso contrário, os gases devem ser queimados para evitar poluição ambiental, e transportados numa tubulação até chaminés altas para serem lançados na atmosfera, porque instalações desse tipo, por razões econômicas, são quase sempre localizadas em áreas densamente habitadas (FAO, 1985).

O carvão vegetal que sai do forno deve ser resfriado para evitar a combustão espontânea. Isto é realizado pela passagem lenta do carvão vegetal através de um cilindro de aço horizontal equipado com pás que levantam o carvão e permitem que ele entre em contato com as paredes que são resfriadas com jatos de água. O carvão resfriado é armazenado num silo com capacidade suficiente para manter 2 ou 3 dias de suprimento para a unidade de fabricação de briquetes, uma instalação anexa necessária para tal forno (FAO, 1985).

A quantidade de madeira ou outros resíduos necessários para manter o forno funcionando é muito grande. Uma pequena unidade requer cerca de 4 t/h de resíduos secos e as unidades maiores em torno de 10 t/h. Como em todos os sistemas de carbonização a capacidade é influenciada pelo teor de umidade da matéria-prima. As quantidades acima terão rendimento de 1 a 2,5 t/h de carvão, apresentando cerca de 45% de umidade inicial. Essa produção alcança cerca de 9.000 a 21.000 t/ano de resíduos, produzindo 2200 a 5200 toneladas de finos de carvão vegetal (FAO, 1985).

Esses finos de carvão vegetal possuem poucos usos, desta forma, e devem ser transformados em briquetes. A grosso modo, a briquetagem duplica o custo do carvão vegetal fino. Os fornos Herreshoff tem sido bem sucedidos quando empregados em conjunto com grandes fábricas de compensados, no sul do EUA, onde a conjunção de suprimentos adequados de matéria prima adequada, sob a forma de casca de árvore e serragem com a proximidade de um mercado consumidor sofisticado e urbano de churrasqueiras, fornece uma combinação rentável (FAO, 1985).

Embora seja teoricamente possível recuperar os condensáveis pirolenhosos das emissões gasosas da coluna, alguns fatores econômicos parecem desfavoráveis, e, portanto, os gases emitidos são queimados para produzir energia ou simplesmente para descarte (FAO, 1985).

6.14 – A RETORTA DE VAGÕES OU ARKANSAS

A Europa e os EUA tem empregado amplamente a retorta Waggon ou Arkansas. Esse modelo perdeu terreno nos anos 30 devido ao desenvolvimento das retortas semi-contínuas que apresentavam menores custos operacionais globais. A retorta Waggon apresentava, em particular, custos elevados de manutenção para os vagões de aço e para o envoltório externo da retorta. Não obstante, um par de plantas sobreviveu na Europa apesar dos elevados custos operacionais de mão-de-obra. Entretanto, o processo atualmente só tem interesse histórico (FAO, 1985)

Os princípios operacionais e o layout da retorta Waggon são representados na Figura 6.8. As matérias-primas usuais são lenha em toras redondas, rachadas e tábuas de serrarias. O comprimento médio é de 1,0 a 1,2 m e materiais menores podem ser usados, mas tendem a cair fora dos vagões. A madeira deve sofrer secagem até 25% do teor de umidade para gerar bons resultados. Um ano de secagem ao ar é uma boa prática num clima adequado. **A madeira deve ser carregada em vagões de aço com laterais móveis.** Os vagões devem possuir dimensões ajustáveis à retorta para garantir a eficiência volumétrica máxima. Os vagões rolam para dentro da retorta em trilhos de aço que os conectam a uma câmara de resfriamento de mesmas dimensões da retorta, de modo que possam sair do ambiente de carbonização rapidamente para o local seguinte que deverá estar fechado durante a perda de calor da carga de carvão vegetal (FAO, 1985).

O número mínimo de conjuntos de retortas e câmaras de resfriamento para garantir um regime permanente de gás emitido na pirólise é seis, porém, números maiores foram comuns. Os trilhos conectam as retortas com os pátios de estocagem da lenha. As instalações maiores possuíam vários quilômetros de trilhos e pequenas locomotivas para mover os vagões. Toda essa complicação tendeu a multiplicar os custos de manutenção, supervisão e operacionais (FAO, 1985).

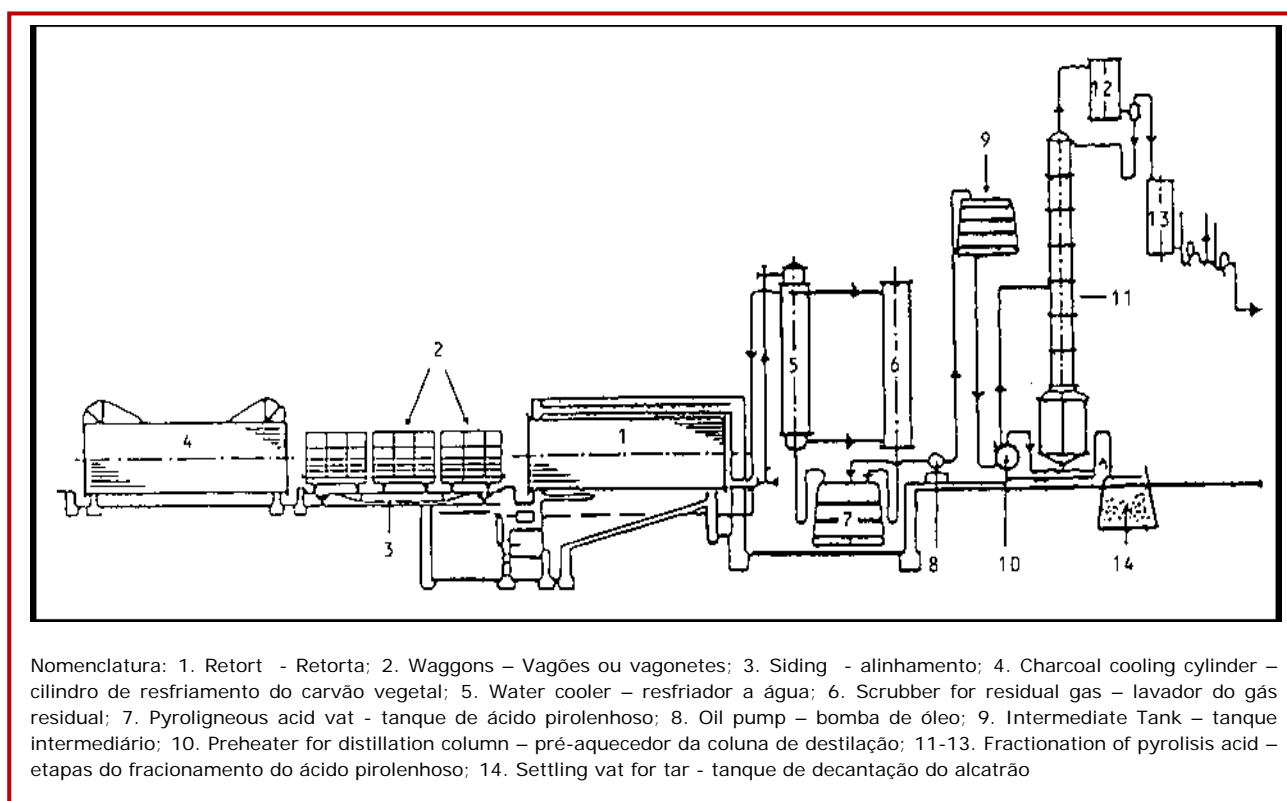


Figura 6.11 – Unidade de processo da retorta de vagões
(FAO, 1985)

As retortas de vagão possuíam tipicamente 8 m de comprimento, acolhendo dois vagonetes, sendo capazes de conter até o dobro desse comprimento. Possuíam formato aproximadamente cilíndrico para juntar os vagonetes carregados tão próximos quanto possível. De fato, percebeu-se na Austrália que a despeito de sua menor eficiência volumétrica, que os esforços para construir esses fornos circulares horizontais e acrescentar-lhes portas circulares, resultou na equalização das tensões térmicas e reduziu acentuadamente os custos e as horas de manutenção (FAO, 1985)

Também percebeu-se que a queima do gás destilado da madeira numa câmara de queima separada e a sua recirculação em torno da retorta circular, por meio de um duto helicoidal de transferência de calor, possibilitou melhorar a eficiência do conjunto e reduzir a manutenção. Entretanto, a fragilidade dos vagões permanecia e os custos ainda tendiam a ser excessivos (FAO, 1985).

As retortas de vagão foram aquecidas pela queima de gás da destilação da madeira e ar sob a retorta. O gás era obtido das demais retortas ao final de cada ciclo de carbonização e era necessário operá-las em grupos para garantir a continuidade desse suprimento gasoso quente. As emissões gasosas da destilação seca da madeira eram obtidas pela remoção dos gases e vapores das retortas por meio de um soprador e passando a corrente gasosa através de condensadores resfriados a água que resultavam, primeiro, na condensação do alcatrão e, então, do ácido pirolenhoso. Os gases não-condensáveis passavam diretamente e eram enviados para outra retorta para serem queimados com ar e prover o calor de carbonização. O alcatrão e o ácido pirolenhoso eram estocados num tanque para serem separados e processados numa refinaria apropriada (FAO, 1985).

O estágio de carbonização consumia 22 horas e tão logo terminava, a retorta era aberta para retirar os vagonetes ao longo do curto espaço para o resfriador, que era fechado para extinguir a queima (ou oxidação ao rubro) do carvão vegetal gerado, que incandescia imediatamente após a sua remoção do local da pirólise. O resfriamento consumia 24 a 48 horas dependendo das condições climáticas e se as paredes da câmara eram resfriadas com jatos de água. Essa retorta produzia pequena quantidade de finos, porém o manuseio descuidado do carvão vegetal resfriado poderia gerar 5 a 10% (FAO, 1985)

Os dados tecnológicos resumidos para o sistema de retorta de vagão (FAO, 1985) são os seguintes:

- 1 – Dimensões da retorta (câmara): 8 a 16 m de comprimento por 2.5 m de diâmetro
- 2 - Capacidade: 35 a 60 m³.
- 3 – Carga de lenha alimentada: 9 -18 ton de lenha seca por carga ou 270 tons mensais.
- 4 – Dimensões das toras de madeira: 1 a 1.2 m de comprimento, diâmetro máximo ou espessura: 12 cm.
- 5 – Teor de umidade: 25%
- 6 – Rendimentos médios: carvão vegetal 30 - 33%, ácido pirolenhoso 20 - 25%



Figura 6.12 – Resíduos de madeira empregados na unidade de processo da retorta de vagões (FAO, 1985)



Figura 6.13 – Estufa de pré-secagem de madeira da unidade de processo da retorta de vagões
(FAO, 1985)



Figura 6.14 – Câmara de condensação numa unidade de processo da retorta de vagões(Suécia)
(FAO, 1985)

Se o alcatrão e o ácido pirolenhoso são queimados em conjunto com as emissões gasosas da madeira, existirá um amplo suprimento de calor para operar as retortas e manter um excesso para outras finalidades. Quando há recuperação de subprodutos alguma adição de fontes térmicas para o gás da destilação da madeira pode ser necessário (FAO, 1985).

Assim como nas empresas fabricantes de carvão vegetal, a logística do suprimento de madeira é o fator dominante no custo de produção. Além disso, os custos de manutenção das retortas e dos equipamentos associados podem constituir uma grande parcela dos custos. O sistema de retorta de vagões tem algumas vantagens se for possível controlar os custos de manutenção melhorando-se o projeto da câmara. É tecnicamente simples aprender as características operacionais (FAO, 1985)

6.15 – A RETORTA REICHERT-LURGI OU DEGUSSA É DESCONTÍNUA

A primeira tentativa bem-sucedida de eliminar as dificuldades de transmissão de calor para a carga dentro da retorta através das próprias paredes de metal ocorreu com a retorta Reichert, que era a principal causa dos pesados custos de manutenção da retorta de Vagões e seus predecessores. **Na retorta Reichert o calor é transferido à madeira através da sopragem do gás aquecido recirculado através da carga dentro da retorta.** O gás é estável (sem oxigênio livre) ou redutor para evitar a ignição da madeira podendo ser algum combustível gasoso aquecido. Gases da combustão também são adequados, mas a vantagem do emprego de um gás combustível é que os vapores e gases liberados pela destilação da madeira, durante sua transformação em carvão vegetal, quando combinado com a corrente gasosa de aquecimento, não dilui a mistura além do ponto de combustibilidade fácil. Assim sendo, a corrente dos vapores e gases da destilação pode ser queimada em seguida para gerar vapor ou outra fonte térmica para o processo. Desse modo, a necessidade de drenar a corrente gasosa da destilação da madeira (e do sistema) sem queimá-lo é eliminada. O problema na maioria das situações é encontrar uma fonte de gás combustível conveniente. Normalmente os gases e vapores da madeira e da retorta são consumidos e gás excedente é constantemente drenado para manter constante o volume de gás circulante (FAO, 1985).

A unidade principal do sistema Reichert é uma grande retorta vertical com capacidade de carga de cerca de 100 m³ (altura de 8,5 m e diâmetro de 5m). O teto e o fundo são cônicos, porém, somente o inferior é revestido com refratários (FAO, 1985; Gronli, 2005). **A retorta Reichert-Degussa opera com o aquecimento oriundo de gás recirculado**, sendo alimentada com lenha no topo por meio de uma correia transportadora. Após o carregamento, a tubulação principal de aquecimento é aberta para deixar entrar a corrente gasosa de aquecimento no seu interior. Durante o ciclo, que dura de 16 a 20 horas, a zona de carbonização move-se lentamente para o fundo. **Após deixarem a retorta pelo topo, a fração condensável (alcatrão, vapor d'água, etc.) é removida nos condensadores e lavadores de gases. A fração não condensável vai para um trocador de calor, onde é aquecido para as temperaturas necessárias à carbonização (450 a 550 °C).** Dessa forma, os vapores pirolenhosos passam através da lenha não-carbonizada, removendo a sua umidade. O excesso de gás é descartado, queimado e usado para aquecer o trocador de calor e a pré-secagem das lenhas da alimentação (Gronli, 2005).

O carvão vegetal produzido é descarregado num silo hermeticamente fechado (à prova de ar) para ser resfriado. O Processo Degussa é usado e pertence à Chemviron Carbo localizada em Bodenfale, Alemanha, que produz quase 24.000 t/ano a partir de madeira de faia (carvalho-do-Brasil) em 7 retortas, com rendimento típico de 34% para o carvão vegetal. Aproximadamente, 500 t/ano de ácido acético muito puro é recuperado em um processo com 19 estágios e vendido para a indústria eletrônica. Além disso, fragâncias defumadoras ("**smoke flavours**") são produzidas e vendidas para as indústrias de alimentos (Gronli, 2005)

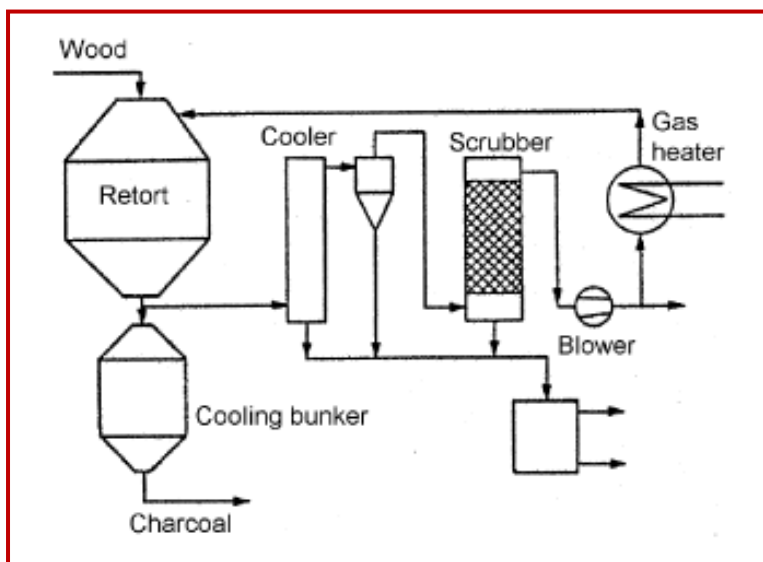


Figura 6.15 – A retorta Reichert no Processo Degussa (Gronli, 2005)

O modelo Degussa corresponde, na verdade, a um processo descontínuo com as unidades operacionais operando por bateladas. Como a usina é formada de várias unidades, o conjunto destas tem uma produção contínua de carvão vegetal. Cada unidade vertical recebe o carvão e os gases quentes no topo e a carbonização avança em direção ao fundo ou base da coluna. Como a velocidade é mais baixa do que a retorta Lambiotte (18 horas para cada operação), a madeira pode ser carregada com umidade em torno de 18% em base seca (Ferreira, 1988). **As dificuldades do modelo Degussa incluem:** 1ª - coordenação ou entrosamento entre os tempos de operação das diversas unidades, para que o sistema opere continuamente; 2ª – unidades grandes de difícil operação; 3ª – quando a madeira é muito úmida, a falta da unidade de secagem aumenta muito o tempo de carbonização (Ferreira, 1988).

A matéria-prima é madeira de comprimento máximo de quase 30 cm e 10 cm de espessura. A lenha deve ser pequena para escoar para dentro da retorta, mas sem impedir a circulação do gás. Grandes pedaços de madeira carbonizam mais lentamente do que os pequenos e esta velocidade irregular de carbonização tende a retardar a produção evitando que o tempo ótimo de carbonização seja atingido. Deve haver um compromisso entre o custo de preparação e secagem da madeira, o tempo de carbonização e, ainda, a velocidade de produção obtida pela retorta (FAO, 1985).

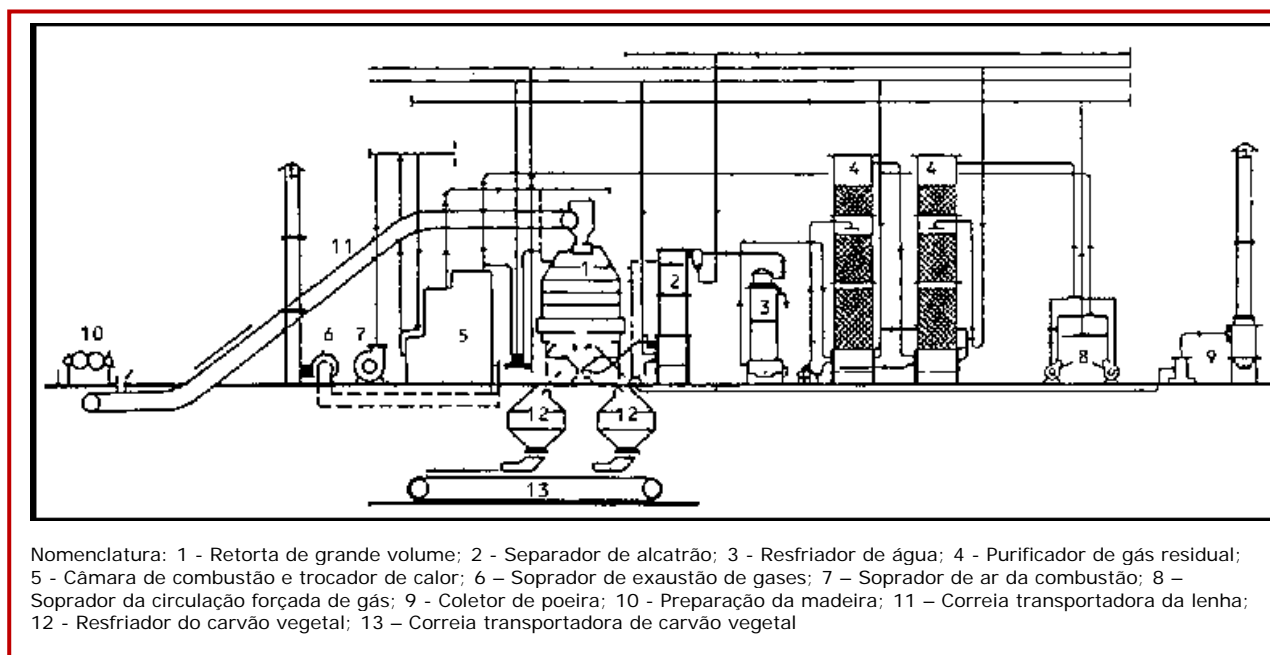


Figura 6.16 – O Processo Degussa com uso da retorta Reichert
(FAO, 1985)

Qualquer gás que seja usado para aquecer a carga precisa ser queimado com ar sob condições cuidadosamente controladas numa fornalha especial e sua temperatura eleva-se acima de 450-550 °C. É, então, soprado para a retorta e doa seu calor para a madeira. **A corrente gasosa e vaporosa que é liberada pela destilação e carbonização (pirólise da madeira) soma-se à corrente gasosa de aquecimento na sua passagem pela retorta.** Por esta razão é necessário descartar um pouco da corrente gasosa para manter constante o volume de circulação dos gases. É vantajoso descartar o gás após ele emergir da retorta para ser reaquecido através de purificadores de gás de alcatrão e condensadores para remover a fração condensável, pois esta pode ser queimado na forma de combustível líquido, providenciado-se que a carga de lenha para a retorta tenha um teor de umidade não muito alto. Dessa forma evita-se o descarte de um componente combustível valioso. **Quando a carbonização está completa, a parte inferior da retorta Reichert é aberta, e o carvão cai em recipientes de aço fechado para esfriar.** Se o resfriamento rápido do carvão vegetal for necessário, este pode ser resfriado antes da descarga, através da passagem de uma corrente gasosa fria através da retorta (FAO, 1985).

Em 1985, a retorta Reichert acumulava 40 anos de sucesso operacional e comercial. Se forem empregados os recursos de mecanização adequados à manipulação da madeira e do carvão vegetal e os controles automatizados para circulação de gases, os custos operacionais serão satisfatórios. No entanto,

o custo do investimento continua alto, e em termos globais, provavelmente os custos não são tão econômicos quanto os das retortas Lambiotte de gases ascendentes (FAO, 1985).

Almeida e Rezende (1982) adotaram a denominação **Processo Reichert-Lurgi** ao processo descontínuo DEGUSSA, desenvolvido em 1935, **o qual opera vários fornos de maneira sincronizada, prevalecendo um caráter contínuo ao processo como um todo**. O fluxograma da figura seguinte inclui uma retorta vertical com um volume de 100 m³ que opera com aproximadamente 25 t de madeira, sendo a fonte de calor os gases quentes alimentados através do topo. A velocidade de carbonização é controlada pela vazão e temperatura dos gases de circulação. **A carbonização inicia-se no topo da retorta e avança em direção ao fundo no mesmo sentido do fluxo de gás (escoamento paralelo ou cocorrente)**.

À esquerda da figura da retorta, foi inserido um **diagrama “percurso na retorta x temperatura de operação” que esquematiza a distribuição das zonas termoquímicas no seu interior em determinado instante: C é a zona de Carbonização; D é a zona de secagem da madeira e DP é zona em que os gases e vapores ainda estão em temperatura próxima ao seu ponto de orvalho**. A temperatura de saída dos gases e vapores da zona DP aumenta de 80 a 350 °C à medida que a zona de carbonização se aproxima do fundo da retorta. Os produtos recuperáveis da destilação seca são separados dos gases não-condensáveis ao passarem em resfriador (trocadores de calor), separador de alcatrão e lavador de gases. **Parte dos gases não-condensáveis é retirada do sistema para ser queimada nos geradores de gases quentes ou na secagem da madeira**. Os gases aquecidos a aproximadamente 480°C saem dos aquecedores para retornar à retorta e fechar o ciclo ou circuito gasoso (Almeida e Rezende, 1982). Ou seja, cada retorta dos vários existentes no processo Reichert-Lurgi possui seus próprios equipamentos de resfriamento, separação de alcatrão e lavagem de gases. **Uma figura semelhante é apresentada adiante em 6.21**.

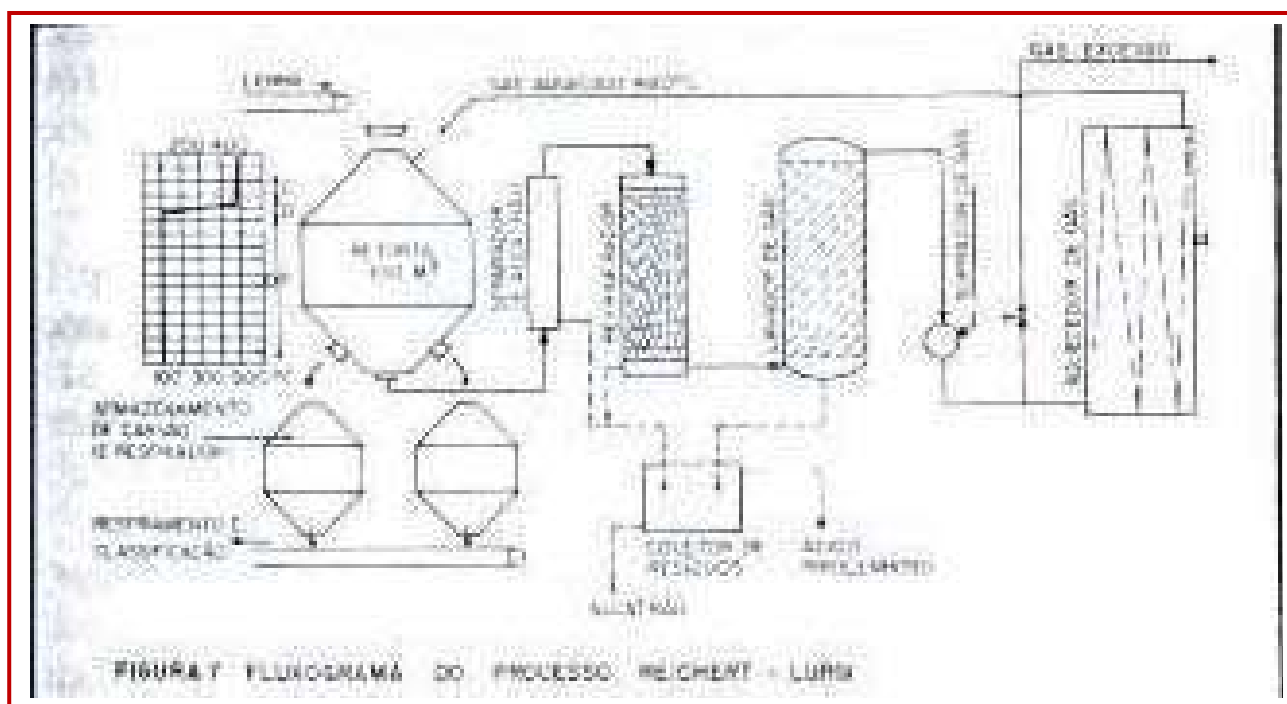


Figura 6.17 – Processo Reichert-Lurgi
(Almeida e Rezende, 1982)

A secagem da madeira é feita para atingir até 18% de umidade, considerado um valor que não prejudica a produtividade da retorta. Se a secagem for feita na retorta, demandará o aumento do número de fornos por planta ou do volume individual de cada retorta em 50%, além de aumentar o tempo de duração do ciclo de carbonização em cerca de 6 horas. **Em condições normais ou usuais, com a umidade original da madeira em torno de 20 a 25%, um grupo de 6 retortas poderá operar com autosuficiência energética**. Na prática, quase sempre é necessário adicionar um suplemento de energia (Almeida e Rezende, 1982).

Uma dificuldade do Processo Reichert-Lurgi reside na coordenação ou integração entre os diferentes tempos de secagem, carbonização e resfriamento de carvão, para que se obtenham

bons rendimentos térmicos. **Outra dificuldade é a necessidade de operar grandes equipamentos** de condensação e separação dos gases e vapores de recirculação e produtos (biocarboquímicos) da carbonização (Almeida e Rezende, 1982).

6.16 – PROCESSO LURGI

Um processo de carbonização similar ao de Lambiotte foi desenvolvido pela Lurgi. **A retorta é dividida numa zona superior de carbonização e numa inferior de resfriamento, cada uma com seus gases próprios de recirculação** (Gronli, 2005).

A corrente gasosa para a zona de carbonização é injetada no meio da retorta e ascende na coluna. **Os vapores pirolenhosos deixam a retorta no topo e são liberados para um incinerador projetado para sua combustão por etapas.** No primeiro estágio, o gás da retorta é queimado em condições aproximadamente estequiométricas. No segundo estágio, adiciona-se mais ar para garantir a completa combustão antes de ser emitido para a atmosfera. **Cerca de 1/3 dos gases de combustão são removidos e condicionados (550 a 700°C) para servir de agente extrator de arraste (“rinsing gás”) das frações alcatroadas e pirolenhosas dos poros do carvão durante a carbonização.** O excesso dos gases de combustão é liberado do segundo estágio para a atmosfera através de uma chaminé, porém, é possível recuperar o conteúdo térmica descartado através de um trocador de calor.

O circuito de recirculação na zona inferior da retorta é projetado para resfriar suficientemente o carvão vegetal que desce e ascende em contracorrente, aquecendo-se. A corrente gasosa injetada no fundo é previamente resfriada com água num lavador de gases. A maior planta de carvão vegetal da LURGI constitui parte da Silicon Metal Complex (SIMCOA) em Burnbury, Western Australia e produz 27000 t/a em 2 retortas de madeira local.



Figura 6.18 – Processo Lurgi na Austrália para produção de carvão (Gronli, 2005)

6.17 – O PROCESSO O.E.T. CALUSCO DE FORNO TÚNEL

A carbonização da madeira realizada no processo O.E.T. Calusco (anteriormente, CARBOLISI) ocorre num forno túnel horizontal percorrido por vagonetas, cujo comprimento é 45m em formato U, que permite a entrada de carga de madeira, que é convertida em carvão vegetal que sai nos mesmos vagões, e é apresentado na figura seguinte (Gronli, 2005).

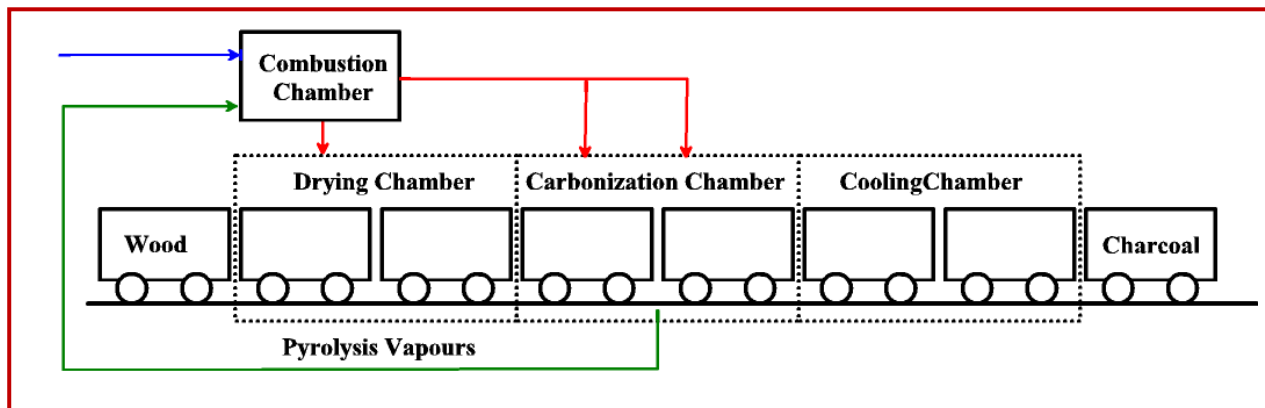


Figura 6.19 – Desenho esquemático do processo de carbonização O.E.T. Calusco (Gronli, 2005)

O túnel é dividido em três seções, onde a madeira sofre: 1º - pré-secagem, 2º - carbonização e 3º - resfriamento. Cada seção corresponde a uma câmara que é separada da outra por meio de portas de correr (*"slide doors"*). Cada vagonete tem a capacidade de 12 m³, sendo revestido por meio de camadas de aço, movendo-se em rodas sobre trilhos, e é conectado com um sistema de reboque. O processo de carbonização é energeticamente auto-suficiente porque à medida que o teor de umidade da alimentação é inferior a 45 a 50% em base seca (Gronli, 2005)

Os gases e vapores pirolenhos são queimados numa câmara de combustão externa. Os gases de combustão são separados em 3 partes. Uma parte é condicionada e remetida para uma câmara de pré-secagem onde entra em contato com a lenha *in natura*. A segunda parte é enviada para a câmara de carbonização onde aquece indiretamente a madeira através de um trocador de calor colocado no túnel. A terceira parte é resfriada e usada como agente de resfriamento do carvão vegetal produzido (Gronli, 2005).

O tempo de residência total no túnel é de 25 a 55 horas dependendo do teor de umidade e da alimentação usada. Existem diversas unidades de carbonização pelo processo do forno-túnel na Itália, sendo as maiores delas em Milazzo e Mortera, cada uma com uma capacidade de produção de 6.000 t/ano (Gronli, 2005).

6.18 – RETORTAS CILÍNDRICAS HORIZONTAIS VMR – VALLOUREC-MANNESMANN

O processo VMR, oriundo da França, é constituído de duas retortas (R1 e R2) e uma câmara central para a combustão. Cada retorta é capaz de acolher um cilindro contendo lenha para depois ser removido com o carvão vegetal produzido. O primeiro cilindro é carregado com madeira antes de ser colocado na retorta R1. Cada cilindro tem uma capacidade de aproximadamente $4,5\text{m}^3$. A primeira retorta R1 é aquecida com combustível, usando aquecimento externo (gás ou óleo combustível, tipo diesel). Após a pirólise ser iniciada, os gases e vapores pirolenhosos são destinados à queima numa câmara de combustão externa para produzir calor destinada à segunda retorta cilíndrica R2, sendo suspenso o suprimento externo de gás ou óleo combustível. Após a conclusão da fase de carbonização em R1, o cilindro contendo o carvão vegetal resultante, é removido para resfriamento e é substituído por outro cilindro com madeira nova. O cilindro contendo o carvão vegetal é coberto com uma tampa apropriada e deixado a resfriar (Gronli, 2005).

O processo VMR é um sistema operacional alternativo, porque os vapores pirolenhosos de uma retorta são queimados para fornecer energia térmica para a operação da outra. O tempo total da carbonização é de 8-12 horas e o rendimento da produção de carvão vegetal é de 30 a 32%, ambos dependentes do teor de umidade e do tipo de lenha alimentado ao processo. Uma planta industrial com 12 unidades de retortas, operando numa base de 24 horas, tem uma capacidade de produção de 6 a 7000 t/ano e precisa de 3 operadores por turno (Gronli, 2005).

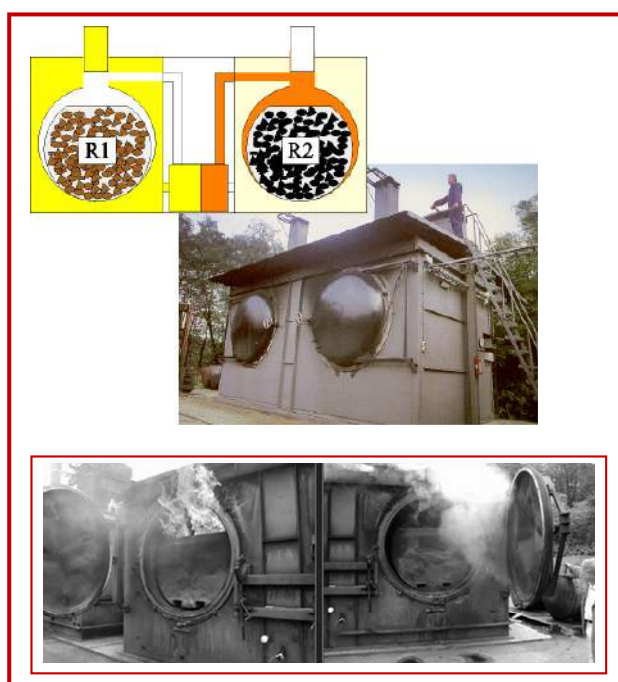


Figura 6.20 – Retortas horizontais VMR – Vallourec-Mannesmann:esquema operacional, imagens e abertura de uma retorta antes do resfriamento
(Gronli, 2005 e Rousset, 2007 – citado por Vital e Pinto, 2009)

O forno é constituído de duas portas e um canal de combustão (que pode ser a diesel ou a gás). A pirólise, nesse caso, ocorre pelo contato com gases quentes. A tecnologia não é barata, custa ao redor €\$ 1,5 milhão por usina com capacidade anual de 2.500 a 20.000 t/ano. No processo VMR, o rendimento volumétrico é de 60% a 70%. O processo possui um sistema digitalizado de controle dos níveis de gases dentro das câmaras e de suas emissões, o que já permite monitoramento e futuros melhoramentos. O processo VMR utiliza o gás carbônico e o condensa com outros gases para a fabricação de alcatrão e de muitos outros produtos carboquímicos (Vital e Pinto, 2009).

No caso brasileiro, em que a maior parte das usinas de pior qualidade queima a mata nativa do cerrado, para a produção estimada de 5 milhões de t/ano em Minas Gerais, de carvão vegetal para produzir ferro gusa, a tecnologia francesa VMR não parece, pela escala de produção, ser a ideal. Seria necessário implantar 250 projetos dessa natureza, somando a cifra de €\$ 1,5 milhões. Entretanto, por também utilizar restos de serrarias, o processo VMR deve ser considerado uma alternativa à produção de carvão vegetal na Amazônia, onde a atividade madeireira já está instalada. Isso transformaria dejetos em insumo primário (Vital e Pinto, 2009).

6.19 – O PROCESSO IPT-SP PARA CARBONIZAR CAVACOS, CASCAS DE COCO E PELLETS DE FOLHAS

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT desenvolveu um processo de carbonização em nível de planta piloto com capacidade para processar **150 k/h de cavacos de madeiras leves (eucalipto e pinus) e até 450 kg/h de material mais denso (casca de coco de babaçu e pellets de folhas de eucalipto)**. Em Terezinha (Estado do Piauí) foi instalada uma planta de demonstração para processar 1.000 k/h de casca de coco de babaçu (Almeida e Rezende, 1982).

A matéria-prima é picada ou peletizada para se obter a granulometria adequada ao seu processamento e, então, enviada ao secador para redução do seu teor de umidade até quase 10%. **A energia térmica consumida na secagem é fornecida pelo contato direto dos gases quentes provenientes da combustão de parte dos gases não-condensáveis gerados na pirólise** (Almeida e Rezende, 1982).

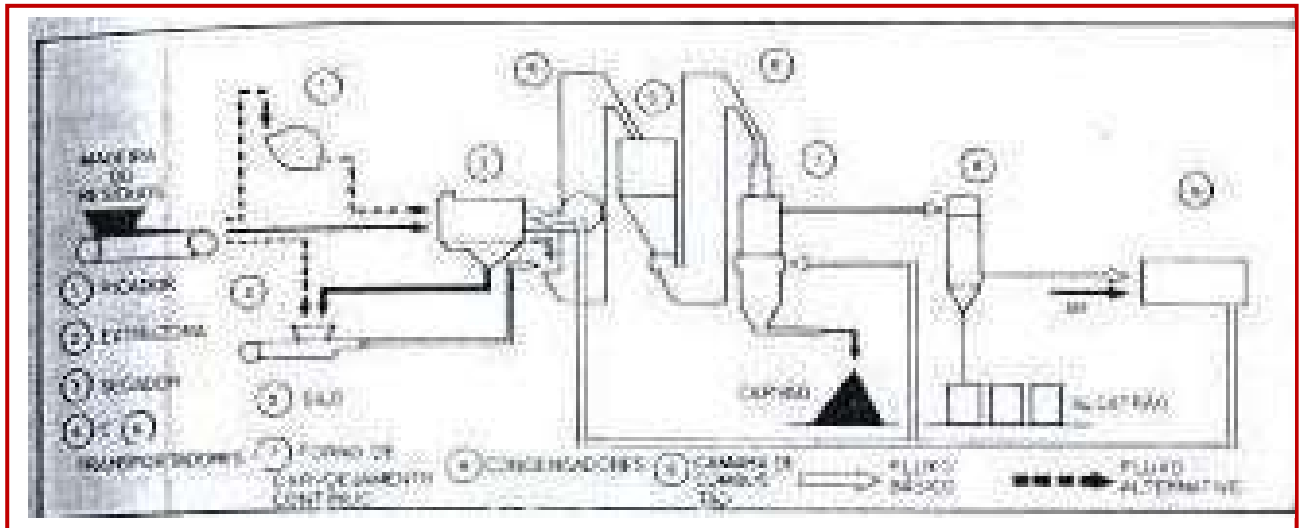


Figura 6.21 – Fluxograma do Processo IPT-SP para carbonizar cavacos e cascas de coco (Almeida e Rezende, 1982).

Do secador, a matéria-prima é levada por transportadores de caçamba ou canecos até o silo de material seco, que transfere a carga para outro transportador similar que alimenta o topo do forno de carbonização. Devido ao uso de matéria-prima e a insuflação de gases quentes na região intermediária do forno carbonizador, o ciclo térmico de produção é rápido e possibilita otimizar os rendimentos em condensados (alcatrão e outros produtos químicos). O carvão é descarregado pelo fundo do forno de carvoejamento para posterior resfriamento, e os voláteis são retomados no topo do forno, passando por condensadores para recuperar o alcatrão e a fração aquosa e limpar o gás não-condensável (que é enviado para a câmara de combustão, da qual saem emissões gasosas livres de oxigênio para os pontos de injeção na retorta e no secador, onde é necessário fornecer calor) (Almeida e Rezende, 1982).

Quando for possível trabalhar com matéria-prima bastante seca, o consumo energético na secagem é reduzido e disponibiliza-se um excesso de gás condensável para outros usos fora da unidade. O rendimento em alcatrão (29%) é considerado alto, enquanto que o de carvão (22%) e em fração aquosa (16%) são considerados baixos quando comparados aos obtidos em outros processos industriais. Essa diferença na distribuição ponderal dos produtos pode ser explicada, a princípio, pela rapidez do ciclo térmico da produção de carvão. **Um aquecimento muito rápido da madeira acelera a rápida liberação dos voláteis, que faz com que tenham pouco tempo de permanência na matriz sólida, dificultando os efeitos catalíticos e autocatalíticos que favoreceriam a quebra termoquímica das moléculas por mecanismos que poderiam formar, preferencialmente, carvão e a reações secundárias de elevada exotermicidade** (Almeida e Rezende, 1982).

Assim, **quando os voláteis escapam rapidamente da matriz sólida em carbonização, favorecem a formação de alcatrão e provavelmente definem um caráter endotérmico ou menos exotérmico para a reação de pirólise do Processo IPT-SP quando compara com as reações termoquímicas de outros processos industriais.** A grosso modo, admite-se que a pirólise apresenta

caráter endotérmico, sendo o **Processo IPT mais adequado para obter maior rendimento de combustível líquido** (Almeida e Rezende, 1982). [Desconhecem-se detalhes sobre a retorta IPT-SP.](#)

6.20 – SISTEMAS DE LEITO FLUIDIZADO E CARBONIZADORES SIMILARES

Após o aumento dos preços do petróleo nos anos 70 do Século XX, surgiram diversos sistemas para produzir gás quente para finalidades de aquecimento a fim de substituir petróleo ou gás. Basearam-se na queima de madeira ou cortiça finamente dividida, etc., em câmaras de combustão com admissão controlada de ar atmosférico e usando, em alguns casos, o **sistema do leito fluidizado**, no qual uma carga de serragem, ou qualquer combustível similar, é mantida em suspensão pela sopragem de ar através da câmara e queima-se a madeira usando o oxigênio contido no sopro (FAO, 1985).

Tais **sistemas de leito fluidizado** produzem carvão vegetal em forma de pó, controlando a vazão de alimentação, de modo que as partículas carbonizadas de madeira sejam removidas do leito fluidizado numa quantidade suficiente para evitar que sejam queimadas e convertidas em gases de combustão. É necessário empregar um bom sistema de controle para manter a temperatura nem muito quente nem muito fria para uma alimentação cujo teor de umidade e finura varia (FAO, 1985).

Os **sistemas de leito fluidizado** são atraentes porque são menores que, por exemplo, a retorta Herreschoff que demanda cerca de 100 toneladas de estoque de alimentação diárias como carga mínima para operar (FAO, 1985). Será abordados adiante no âmbito da pirólise rápida.

Muitas propostas foram feitas para carbonizar madeira finamente dividida e resíduos agrícolas pelos métodos contínuos, que operariam numa escala menor do que a do consagrado forno de câmaras rotatórias múltiplas e que possibilitaria recuperar os subprodutos biocarboquímicos, ou reduzir consideravelmente as perdas térmicas em processos de aquecimento ou co-geração de energia. Aparentemente, tais sistemas oferecem um meio para transformar resíduos imprestáveis em carvão através de um investimento de capital relativamente modesto (FAO, 1985).

Um sistema de leito fluidizado de carbonização requer uma unidade de pré-secagem ao ar livre e briquetagem, para que a temperatura operacional seja elevada ao seu ponto de decomposição espontânea para formar carvão vegetal, e, posteriormente, ser aquecido para reduzir o teor de alcatrão até um valor aceitável. Dessa forma, entende-se ser possível gerar um saldo positivo de energia térmica para sustentar o processo, que demanda um projeto cuidadoso de um sistema de instrumentação e controle para garantir tais benefícios (FAO, 1985).

A maior dificuldade operacional num sistema de leito fluidizado é a de separar o carvão do resto do material contido no equipamento e recuperá-lo para briquetagem e venda. Esta tarefa deve ser realizada num sistema simples que não demande grandes gastos de energia e disponibilize um saldo térmico positivo que evite o consumo e a queima de outros combustíveis para operar o processo (FAO, 1985).

É relativamente fácil queimar madeira finamente dividida e resíduos similares em unidades de combustão fechada em operação contínua para apenas produzir gás quente para processos de aquecimento, e a separação de sólidos limita-se às cinzas resultantes. Algumas unidades comerciais deste tipo foram desenvolvidas nos anos 70 instaladas no E.U.A. e em outros países para substituir o petróleo e o gás natural. A queda relativa dos preços da energia oriunda do petróleo, entretanto, tem levado a maior parte do incentivo à utilização de tais sistemas, mas eles continuam a ser uma opção válida tecnicamente, apesar de demandar o consumo de energia elétrica e de sofisticados instrumentos de controle instrumentais (FAO, 1985)

6.21 – MEIOS DE RECUPERAÇÃO DE SUBPRODUTOS DA CARBONIZAÇÃO

Quando se emitem, diretamente para a atmosfera, os gases e vapores oriundos da destilação seca da madeira e de sua carbonização, como ocorre nas tecnologias simples, ocorre o desperdício de energia térmica e química dessas frações. E isso reflete-se na eficiência e no custo do processo de fabricação do carvão vegetal (FAO, 1985).

A maneira mais simples de recuperar parte desses gases e vapores consiste em coletar o alcatrão condensado a partir dos tubos do carbonizador. Esse alcatrão tem um valor econômico definido e é relativamente simples de coletar. Porém, uma recuperação mais ampla desses gases e vapores requer um maior investimento sob a forma de uma refinaria de escala completa de subprodutos. Quando os sistemas complexos de retorta são usados para fazer carvão vegetal, é mais simples utilizar essas emissões gasosas como fonte de calor para a carbonização, e se houver um excesso, este pode ser utilizado para queimar e co-gerar energia termelétrica ou calor de processo. Dentre as vantagens: destacam-se: 1º - o custo de capital é relativamente baixo; 2º - os requisitos tecnológicos e a poluição do meio ambiente são minimizados; 3º - a economia de madeira combustível permite que mais carvão seja produzido com a mesma quantidade de lenha (FAO, 1985).

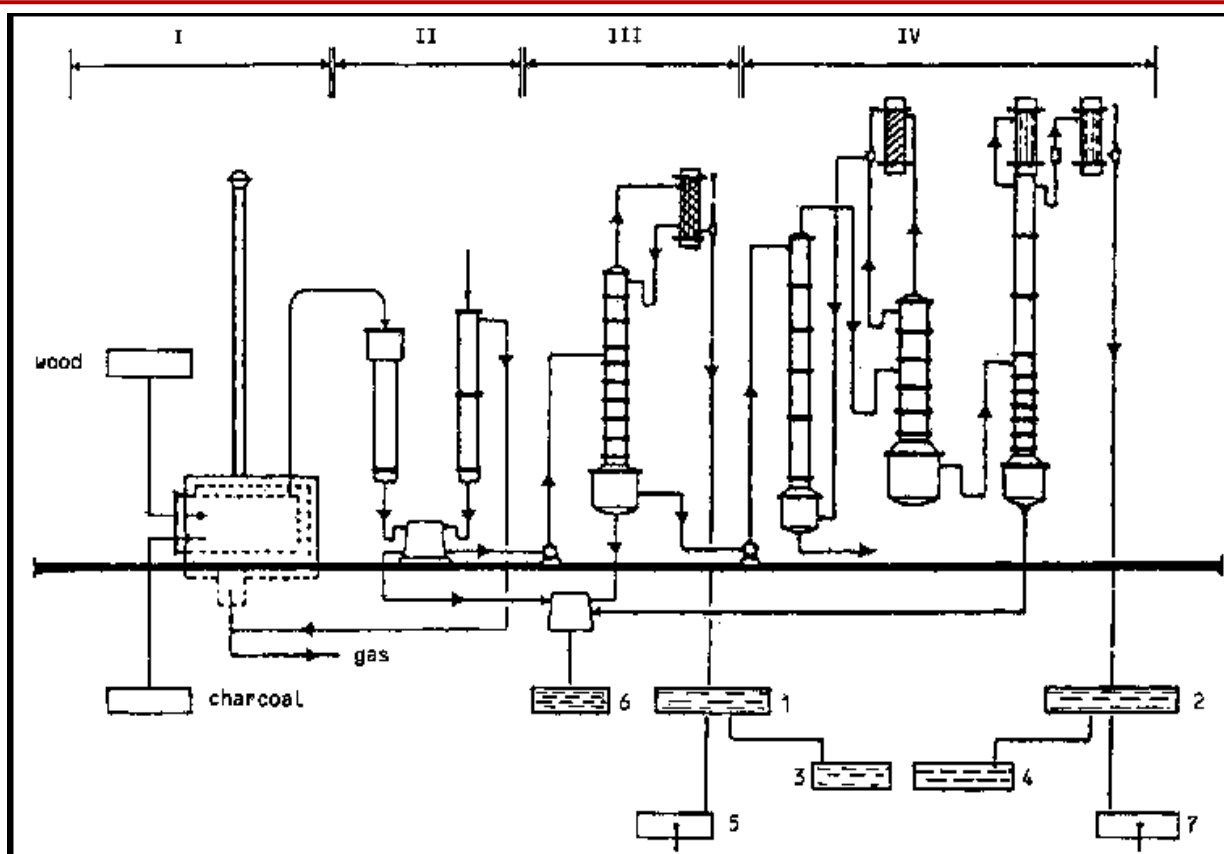
A única dificuldade na operação desse tipo de sistema de recuperação de calor consiste em recuperar calor suficiente para eliminar a necessidade de queimar combustível de petróleo ou gás, demasiadamente caros, como calor de reposição para manter a retorta operando. Isso pode transformar uma instalação lucrativa, em um empreendimento inviável. ***A chave para o sucesso é secar a madeira antes de entrar na retorta. Um investimento na instalação de um secador operado com o aporte de uma corrente gasosa residual para a madeira ou resíduos usados poderá ser útil.*** Em geral, se o teor de umidade da matéria-prima na retorta for mantido em 30% ou menos, haverá calor suficiente na recuperação do gás residual para manter a carbonização sem acrescentar mais calor. As quantidades de calor envolvidas são bastante significativas. Os números reais podem variar com a natureza e com o teor de umidade da matéria-prima. Assim, obtém-se calor a partir dos gases e vapores oriundas da destilação seca da madeira, que é disponibilizado para a carbonização, ***após a queima dos mesmos com o ar em um forno apropriado que faz parte do complexo da retorta*** (FAO, 1985).

As emissões gasosas que saem da retorta com seu conteúdo de alcatrão são difíceis de trabalhar depois de esfriarem. O alcatrão é pegajoso e entope redes de gás e válvulas e limpá-las é difícil e caro. É essencial manter quentes as áreas onde as emissões de gases e vapores serão utilizadas para aquecer a retorta ou para gerar energia, até que entrem na fornalha, onde serão queimados. Isso evita a deposição de alcatrão. A temperatura na corrente de gases e vapores quentes é de cerca de 300 °C (FAO, 1985).

Se a recuperação de subprodutos químicos for feita em seguida à emissão dos gases e vapores da destilação seca da madeira, então esses passam diretamente por coletores (ou poços) de alcatrão e condensadores. O líquido condensado com o alcatrão, nesta fase, é conhecido como ácido pirolenhoso bruto e ele deve ser armazenado para permitir que o alcatrão insolúvel possa ser decantado.

Os gases e vapores oriundos da madeira (pirolenhosos) continuam sem mudanças a partir dos condensadores e simplesmente arrastam um pouco de alcatrão na forma de névoa que pode ser separada posteriormente em outros poços de alcatrão ou depuradores. Ou então, os gases e vapores impregnados com alcatrão podem ser queimados diretamente no aquecedor da retorta. ***Infelizmente o "gás da madeira" apresentará baixo poder ou capacidade calorífica se os condensáveis incluindo alcatrão foram removidos previamente.*** A quantidade total de calor que pode produzir não é suficiente, a menos que a madeira seca seja processada, para realizar o processo de carbonização. Isto implica que a entrada de calor adicional será necessária para operar o processo de carbonização. O custo desses insumos, independentemente da sua fonte de calor, seja madeira, petróleo ou gás natural tem de ser compensado dos lucros obtidos a partir da recuperação de subprodutos químicos (FAO, 1985).

Obviamente, antes de investir em estudos de recuperação de subprodutos, é necessário desenvolver estudos cuidadosos para assegurar a viabilidade financeira do investimento. A figura seguinte apresenta uma descrição esquemática de uma usina de fabricação de carvão vegetal que inclui a recuperação de subprodutos químicos a partir do ácido pirolenhoso e alcatrão. As funções das várias unidades são descritas a seguir. Na figura posterior um processo de carbonização integrado é apresentado (FAO, 1985).



Nomenclatura das etapas do processo de carbonização: I. Carbonização; II. Recuperação de ácido pirolenhoso; III. Produção de metanol bruto; IV. Concentração de ácido acético

Nomenclatura dos produtos biocarboquímicos obtidos: 1. Metanol bruto; 2. Ácido acético bruto; 3. Metanol; 4. Ácido acético; 5. Alcool concentrado ("Methylating spirit"); 6. Alcatrão; 7. Descarte de água servida

Figura 6.22 - Planta de carvão vegetal com refinaria para recuperar subprodutos químicos (FAO, 1985)

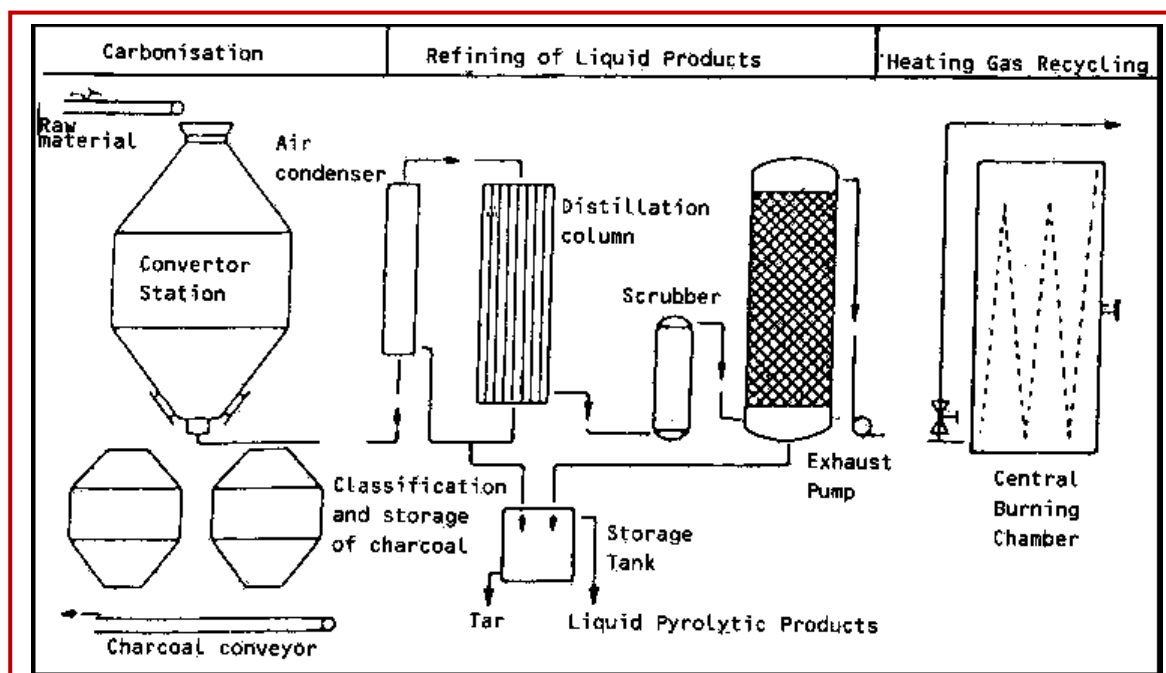


Figura 6.23 - Processo de carbonização integrado – fluxograma esquemático (FAO, 1985)

O alcatrão pode ser recuperado durante a carbonização com poucos equipamentos.

Existem dois tipos de alcatrão produzido: **alcatrão insolúvel em água e alcatrão solúvel em água**. A maior parte de alcatrão solúvel em água é recuperada a partir da base primária quando o metanol, ácido acético, acetona, etc., é separado do alcatrão presente. Infelizmente, o alcatrão solúvel tem pouco uso comercial. A maior parte dos componentes do alcatrão insolúvel é separada quando os vapores da retorta passam primeiro pelos condensadores e são recuperados por decantação da mistura de alcatrão solúvel em água e do ácido pirolenhoso. Pequenas quantidades desse alcatrão são recuperadas de diversas partes do sistema de tratamento de efluentes gasosos e podem ser adicionados ao resto (FAO, 1985).

Os equipamentos necessários para refinar o alcatrão (se não for destinado à venda como alcatrão bruto) **são duas colunas de destilação e uma coluna de retificação**. A figura seguinte revela que o alcatrão é separado em três frações: I é utilizado como combustível, II e III contém materiais úteis e podem ser separados na usina de destilação do alcatrão. **Este é um processo químico complexo, que exige operários qualificados e volumes significativos de matéria-prima para que o processo seja viável** (FAO, 1985).

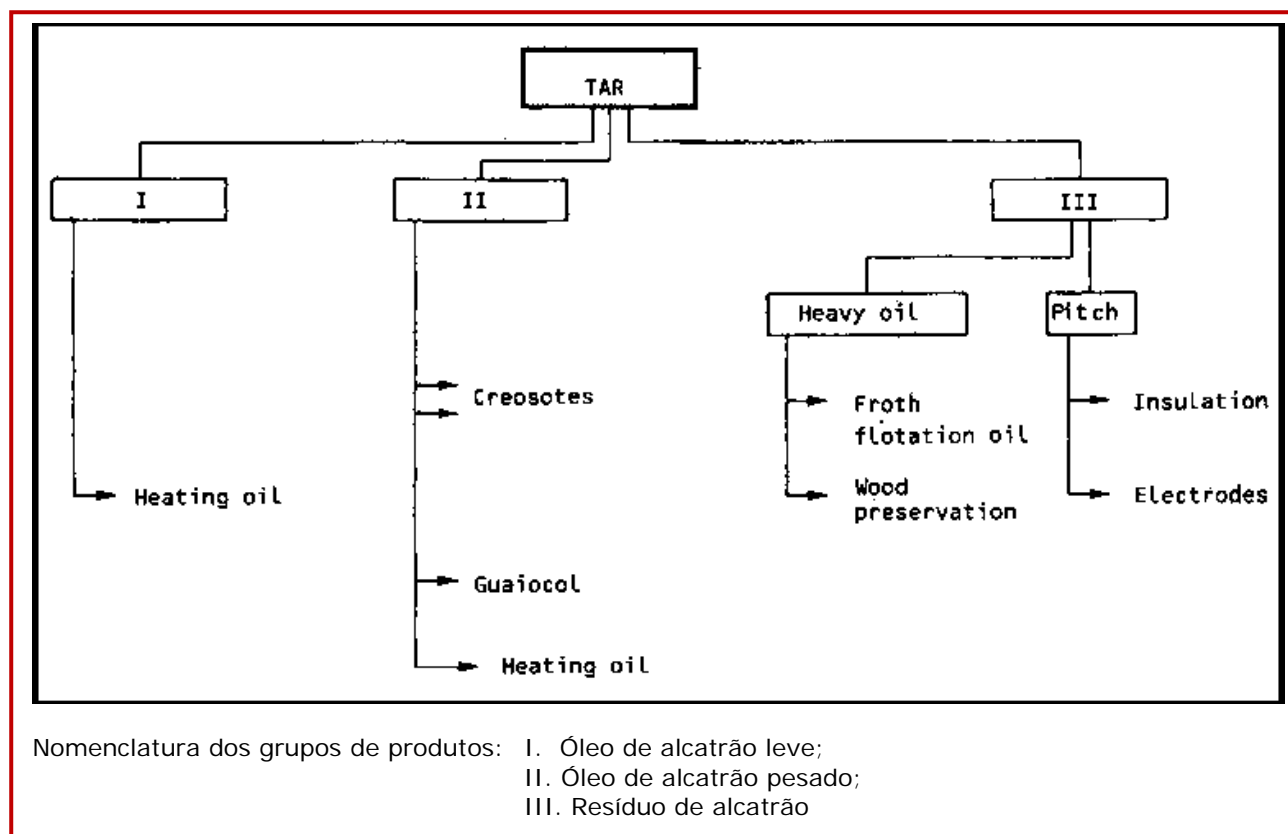


Figura 6.24 – Frações do alcatrão oriundo de uma planta de carvão vegetal
(FAO, 1985)

Pelas razões descritas acima, as unidades de destilação de alcatrão da madeira são implantadas em várias retortas para aumentar as quantidades produzidas e existem nos países com indústrias químicas avançadas (FAO, 1985).

6.22 - CRITÉRIOS PARA A ESCOLHA DE SISTEMAS DE CARBONIZAÇÃO DE BIOMASSA

A escolha de um tipo de sistema de retorta de carbonização exige muito cuidado por causa do investimento de capital e do número de anos para que o equipamento possa operar em um local fixo. Uma decisão desse tipo não pode ser tomada superficialmente, já que existe uma chance de que o investimento seja recuperado, a área utilizada precisa estar comprometida por 20 a 30 anos. Os recursos também devem ser gerenciados de forma que as necessidades do sistema da retorta de carbonização sejam adequadamente atendidas. Isso impede outros usos para a terra, uma decisão difícil, onde a população está aumentando e as pressões sobre a terra cada vez maior. ***O uso de sistemas com retortas complexas introduz um grau de inflexibilidade na alocação de recursos e os governos podem achar difícil conviver com essa perspectiva*** (FAO, 1985).

Um fator importante a ser considerado é o **custo do transporte da madeira**. Retortas em geral não podem ser movidas do lugar original como ocorre com os fornos de poço, medas e de alvenaria. Esse fator pode exercer um efeito drástico sobre os custos de produção de carvão vegetal (FAO, 1985).

Outro fator de seleção do sistema de carbonização é o tipo de material a ser carbonizado: madeira maciça, cortiça ou resíduos agrícolas? Somente a madeira maciça pode produzir carvão em pedaços. Outros tipos de matéria-prima, com a possível exceção das cascas de coco, produzirão carvão vegetal em pó, demandando uma etapa de fragmentação de partículas e envolvendo um custo adicional do equipamento antes de ser comercializado, que inclui os custos do ligante químico e da operação unitária em si. Um suprimento de ligante - geralmente, amido de algum tipo - equivale a 8-10% do peso do carvão produzido e deve ser disponível na região da planta. Se a região não for agrícola e/ou ocorrer escassez de alimentos, obter o ligante pode ser difícil e isso adiciona outro elemento de inflexibilidade no sistema global de fabricação de carvão vegetal (FAO, 1985).

O fator seguinte, durante a tomada de decisão sobre a escolha de um sistema de carbonização, consiste em saber se os subprodutos biocarboquímicos podem ser produzidos a partir das emissões gasosas e vapores da retorta. Em caso afirmativo, então, o financiamento para construir a refinaria é necessário. Devido aos custos e a concorrência da indústria petroquímica, a decisão de produzir subprodutos é bastante improvável. A refinaria exige técnicos especializados e operadores de instalações e longos períodos de treinamento antes que a operação possa se iniciar. Sem um planejamento cuidadoso e um compromisso a refinaria de biocarboquímicos poderá tornar-se um fracasso. Por conseguinte, é provável que a decisão seja tomada apenas para usar as emissões gasosas da retorta de carbonização para ajudar nas etapas da pirólise ou para gerar energia termoelétrica ou vapor de processo ou como combustível. Felizmente uma decisão sobre uma refinaria ao contrário da planta de briquetagem pode ser adiada na maioria dos casos. A refinaria pode ser adicionada numa fase posterior se demonstrar ser útil (FAO, 1985).

6.23 – PROCESSOS E REATORES DE PIRÓLISE RÁPIDA OU FLASH

Rocha, Cortez e Pérez (2004) descreveram vários tipos de **processos contínuos e reatores termoquímicos** avançados e capazes de realizar processos de pirólise rápida e recuperar produtos líquidos e gasosos, abaixo listados.

1. Reatores de leito fluidizado - borbulhante e circulante
2. Reator de prato rotativo (Pirólise ablativa)
3. Reator de cone rotativo (Pirólise ablativa)
4. Reator de vórtice (Pirólise ablativa)
5. Reator de pirólise a vácuo.

Todos os reatores mencionados permitem um rápido aquecimento e uma rápida transferência de massa desde o reator quente para a região de resfriamento (Rocha, Cortez e Pérez, 2004).

Alguns tipos de reatores já foram testados no mundo para realizar a pirólise rápida de biomassa:

1º - o reator de leito fluidizado borbulhante da empresa *Wellman* na Inglaterra com capacidade de alimentação de 250 kg/h de biomassa; com a mesma tecnologia, também, existem os reatores de 75 kg/h e 400 kg/h da empresa *Dynamotive* e o de 20 kg/h da empresa RTI, ambas no Canadá.

2º - Vários reatores de leito transportado com capacidade de até 3.300 kg/h pertencentes à empresa americana *Red Arrow*, foram instalados: um de capacidade de 650 kg/h na empresa ENEL, na Itália e um de 20 kg/h no instituto VTT na Finlândia, todos fornecidos pela empresa canadense *Ensyn*.

3º - Um reator de leito circulante de capacidade de 10 kg/h de biomassa está operando na fundação CRES da Grécia. Um reator experimental de leito rotativo no instituto BTG na Holanda com capacidade de 250 kg/h e um outro em projeto de 2.000 kg/h.

4º - Dois reatores de pirólise ablativa, ambos com capacidade de 20 kg/h de alimentação de biomassa, estão em operação: um no NREL, laboratório do governo americano e outro na Universidade de Aston na Inglaterra.

5º - Um sistema de pirólise a vácuo de 3.500 kg/h pertence à empresa *Pyrovac* no Canadá.

6º - O reator de leito fluidizado da UNICAMP será o primeiro reator de pirólise rápida de biomassa no Brasil para produzir bio-óleo. As características de qualidade dos produtos da pirólise em leito fluidizado dependem dos parâmetros de operação do reator e da natureza do agente de fluidização (Rocha, Cortez e Pérez, 2004).

O processo de pirólise rápida em reatores de leito fluidizado utilizando ar como agente de fluidização é complexo. Isso é provocado pelas restrições que devem ser cumpridas durante a operação do reator, tais como:

1. A vazão de ar utilizada deve ser tal que garanta uma adequada fluidização do leito de inertes;
2. As vazões de ar devem corresponder com não mais do que um 5 a 15 % do ar estequiométrico;
3. Conseguir baixos tempos de residências da fase gasosa dentro do reator. Procura-se evitar reações secundárias significativas;
4. Conseguir uma adequada distribuição de temperatura ao longo da altura do reator a qual é uma consequência dos itens anteriores.

Esses equipamentos avançados incorporam reatores de pirólise rápida que se destinam a empreendimentos industriais envolvendo mão-de-obra selecionada e treinada de nível médio ou superior ao invés das pessoas simples oriundas da catação e destinação de resíduos sólidos municipais ou urbanos.

Segundo Rocha, Cortez e Pérez (2004), a separação e coleta dos líquidos pirolíticos é uma tarefa difícil, devido à natureza dos aerossóis contidos nos produtos voláteis. São vários os tipos de recuperadores utilizados para este propósito. Geralmente, todas as novas tecnologias combinam um sistema de resfriamento, que pode ser um condensador ou um "*quencher*" (resfriador estequiométrico rápido ou instantâneo) e um sistema de recuperação de aerossóis (dos quais os mais eficientes são os precipitadores eletrostáticos). Existem, também, outras possíveis configurações.

6.24 – PROCESSOS EM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE

O Processo Waterloo de pirólise rápida baseia-se no reator de leito fluidizado borbulhante e foi desenvolvido na Universidade de Waterloo no Canadá, para realizar a pirólise rápida de materiais lignocelulósicos. Essa tecnologia tem sido aplicada com sucesso em muitos outros laboratórios. As capacidades das unidades variam desde 100 g/h até 250kg/h (Rocha, Cortez e Pérez, 2004).

No Instituto de Química da Madeira (IWC) em Hamburg, Alemanha, este tipo de sistema foi testado em unidades de 100 kg/h.

A companhia **Unión Fenosa** possui uma planta instalada na Europa, trabalhando com um reator de leito fluidizado borbulhante com capacidade para 250 kg/h de biomassa. Esta planta está situada em Meirama, Espanha, a qual está integrada a um projeto de pesquisa da União Européia. Os óleos são coletados por meio de resfriamento rápido ("*quencher*s") com vários trocadores de calor situados para obter várias frações de líquidos. Neste caso, os gases da pirólise são queimados e o calor liberado é usado para secagem de matéria-prima. Os gases quentes da queima são realimentados para o reator borbulhante (Rocha, Cortez e Pérez, 2004).

6.25 - O PROCESSO ENSYN (RTP) EM REATOR LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE.

O processo térmico rápido **ENSYN (RTP)** baseia-se no princípio de um **leito fluidizado circulante**. Uma unidade com capacidade de 650 kg/h, está situada em Bastardos, Itália, e é parcialmente financiada pela União Européia. Outra planta em pequena escala com capacidade para 20 kg/h, está operando no **Technical Research Center (VTT)**, Espoo, Finlândia. A tecnologia RTP tem sido

aplicada por empresas nos Estados Unidos e no Canadá para a produção comercial de “fumaça líquida” (fase aquosa do alcatrão, a qual contém produtos químicos conservantes e aromatizantes).

6.26 – PIRÓLISE ABLATIVA EM REATOR DE PRATO ROTATÓRIO

Na tecnologia de carbonização de biomassa por **pirólise rápida ablativa** os cavacos de madeira são prensados na superfície aquecida do reator por meio de um prato rotatório. Na superfície quente da madeira aparece um filme líquido o qual é removido por atrito, fazendo possível com que apareçam novas camadas de líquido.

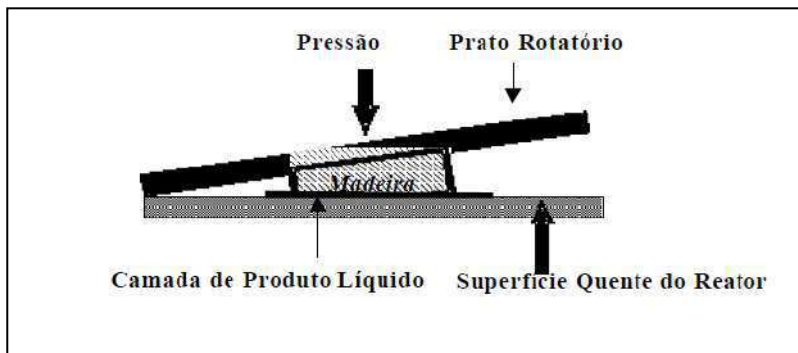


Figura 6.25 – Representação esquemática de um reator de prato rotatório para pirólise rápida (Bridgwater e Boocock, 1997 – citados por Rocha, Cortez e Pérez, 2004).

A pirólise ablativa parece ser muito promissora para a sua aplicação industrial, porque satisfaz os requisitos estabelecidos para a pirólise rápida, em virtude das elevadas taxas de aquecimento e de transferência de calor e massa, independente da prática comum de usar partículas grandes de biomassa (madeira). Na **Aston University**, em Birmingham, UK, um reator deste tipo está sob pesquisa e desenvolvimento, com capacidade de 1 a 2 kg/h (Bridgwater e Boocock, 1997 – citados por Rocha, Cortez e Pérez, 2004).

6.27 – PIRÓLISE ABLATIVA EM REATOR DE CONE ROTATIVO

O princípio do reator de **cone rotativo**, desenvolvido na **Twente University**, na Holanda, baseia-se na transferência rápida de calor desde a superfície sólida de um cone rotativo para pequenas partículas de madeira, as quais são misturadas visando-se conseguir uma melhor transferência de calor com a areia ou um material cataliticamente ativo. Uma unidade de 50 kg/h foi testada com sucesso.

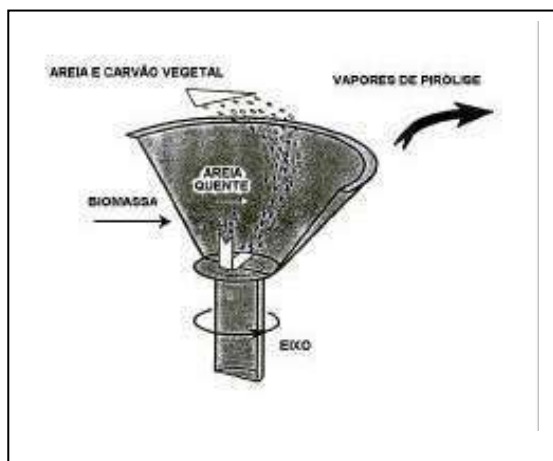


Figura 6.26 - Reator de cone rotativo (Rocha, Cortez e Pérez, 2004).

Nesse tipo de reator utilizam-se dois tipos de leitos fluidos. O primeiro atua no interior do leito cônico e permite uma conversão estagiada da partícula de biomassa. As partículas carregadas no leito são succionadas pela ação rotativa do cone, sendo que, a mistura de biomassa e material sólido se movimentam na forma de uma espiral ascendente ao longo das paredes do cone quente desde o fundo até o topo do reator (Rocha, Cortez e Pérez, 2004).

O segundo leito fluido, que é constituído pelo fluido de combustão, encontra-se ao redor do cone rotativo, e o mesmo contém areia e carvão vegetal. Entre os dois leitos fluidos existe uma conexão através de orifícios. As partículas de carvão que permanecem no segundo leito são queimadas, sendo a entalpia sensível utilizada para o aquecimento do próprio reator.

O transporte da areia quente para o cone interior é realizada através de um pequeno duto. A vantagem de este sistema é que não é necessário um gás de arraste, e que a capacidade de saída dos sólidos (areia e biomassa) é muito elevada (3 kg/s). A desvantagem deste sistema é que exige operar com partículas muito pequenas (200 micrômetros = 0,2 mm) (Rocha, Cortez e Pérez, 2004).

6.28 - PROCESSOS COM REATORES DO TIPO DE VÓRTICE

Os Processos com reatores do tipo de vórtice têm sido desenvolvidos para a nesta última década no **National Renewable Energy Laboratório - NREL**, em Golden, Colorado, EUA. Pequenas partículas são forçadas, por meio de uma corrente de vapor a elevada velocidade, a girar na parede interior quente de um reator cilíndrico a 625oC. Em concordância, a transferência de calor ocorre tanto por contato direto como por radiação entre as partículas e as paredes do reator. Os produtos líquidos e sólidos que se depositam na superfície durante a pirólise são removidos por atrito. As partículas sólidas que não foram completamente pirolisadas são recicladas e o carvão vegetal quente é separado por meio de ciclones. Importantes protótipos têm sido criticamente avaliados, o maior dos quais tem uma capacidade de 20 kg/h. As diversas atividades do NREL foram resumidas por ZERNIK (1997) e DIEBOLD & SCAHILL (1997).

6.29 - PROCESSO A VÁCUO "PYROCYCLING"

É um recente desenvolvimento do **Institute Pyrovac Inc.**, em Sainte-Foy, Canadá (ROY, 1997; ROY ET AL., 1997 A,B). Um sistema de agitação especial na câmara de pirólise a vácuo é aquecido fechando os contatos com os pratos quentes. O fato de usar sal fundido como meio de aquecimento proporciona uma efetiva transferência de calor. A vantagem é a rápida remoção dos voláteis desde o reator quente. A operação sob determinadas condições técnicas deverá demonstrar a funcionalidade dos sofisticados detalhes técnicos do sistema, por exemplo, as válvulas ou comportas de entrada e saída.

6.30 – A UNIDADE PILOTO COM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE NA UNICAMP

A fluidização do leito é realizada usando ar como agente de fluidização, de modo que a pirólise seja realizada em ausência parcial de oxigênio. Aproximadamente 15% da biomassa alimentada é queimada no reator. O reator apresenta capacidade para processar até 200 kg/h de biomassa vegetal base seca. Os principais produtos são o bio-óleo e finos de carvão.



Figura 6.27 - O reator de leito fluidizado e a unidade piloto de pirólise rápida experimental da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

6.31 – CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 6

1ª – Um **processo químico descontínuo** envolve a alimentação apenas inicial, ou, então, por etapas, ou ambas as maneiras, de matérias-primas e insumos a um reator e sua operação durante um **intervalo de tempo curto ou prolongado** (minutos, horas ou dias), e a remoção contínua ou descontínua de produtos e subprodutos do mesmo.

2ª – Um **processo químico contínuo** é aquele em que ocorre alimentação de matérias-primas, insumos e fontes de energia a um reator e a remoção de produtos e subprodutos do mesmo, durante um **longo intervalo de tempo** (dias ou semanas ou meses) até alguma parada programada ou imprevista para manutenção dos equipamentos.

3ª – **Carbonização** é o termo usado quando substâncias carbonáceas complexas tais como madeira ou resíduos agrícolas são fragmentadas pelo aquecimento até liberarem partículas de carbono elementar e compostos químicos que também podem conter carbono em sua estrutura química.

4ª – A necessidade continuada de **carvão vegetal de alto grau (ativado)** gerou atenções focalizadas em encontrar rotas para produzi-lo com maior eficiência de conversão, com menor demanda de mão-de-obra e menos poluentes do que as técnicas envolvendo fornos metálicos e caieiras.

5ª – **As retortas para carbonização de madeira apresentam as vantagens** do maior aproveitamento de matérias voláteis liberadas no processo termoquímico contínuo, a redução de mão-de-obra envolvida e a maior produtividade operacional. **As principais desvantagens das retortas** incorporam a alta velocidade de carbonização, a complexidade operacional e seus custos de implantação.

6ª - **O processo de carbonização Lambiotte é contínuo** e a madeira percorre três zonas quentes dentro do forno vertical: secagem, destilação e carbonização e a zona de resfriamento.

7ª - **Existem dois diferentes sistemas de aquecimento para o processo Lambiotte: o SIFIC (francês) e o sistema CISR (belga)**. O aparato Lambiotte-SIFIC pode ser operado com a recuperação de subprodutos biocarboquímicos e o **sistema Lambiotte-CISR é mais simples, porque não possui um sistema de recuperação de sub-produtos biocarboquímicos**.

8ª - **A retorta contínua de soleiras múltiplas ou forno Herreshoff** é um método comprovado para carbonizar pequenas partículas de madeira e cascas ou cortiça.

9ª – **A retorta contínua do processo adotado pela ACESITA ENERGÉTICA teve sua operação descontinuada**, e cogitou-se produzir regularmente os subprodutos alcatroados e pirolenhosos.

6.32 – CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 6

1ª – No Brasil, **os processos descontínuos são representados em fornos de alvenaria e em fornos metálicos. Os processos contínuos são representados em fornos e retortas.**

2ª – No **aquecimento por fonte interna de calor ou aquecimento direto** parte da carga de madeira é queimada para aquecer o restante. Por **fonte externa de calor com aquecimento indireto** ocorre a queima externa de combustível para gerar calor para a carbonização. No caso da **fonte externa com aquecimento direto por gases recirculantes**, faz-se o aquecimento direto da lenha pelo gás quente soprado pela retorta.

3ª – **Existem retortas e fornos contínuos e descontínuos operando com biomassa alimentada em pedaços, fibras e partículas finas nas etapas de fabricação industrial de carvão vegetal.**

4ª – O “gás da madeira” (gases e vapores oriundos da destilação seca e da carbonização de lenha), quando emitidos para a atmosfera incorporam o desperdício de energia térmica e química dessas frações. É viável e simples de recuperar e aproveitar parte das emissões gasosas consiste em coletar as frações condensáveis num trocador de calor e queimar os não-condensáveis para gerar calor útil ao processo.

5ª – **Os equipamentos de produção contínua são adotados para atender grandes demandas de carvão vegetal e podem ser empregados, também, para produzir carbono ativado.**

6.33 – REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 6

ALMEIDA, M.R. e REZENDE, M.E. – **O processo de carbonização contínua da madeira** –in: PENEDO, W.R. (Ed.) - **Uso da Madeira para Fins Energéticos** – p. 141 – 156, CETEC, Belo Horizonte, 1982.

BASTOS FILHO, J.G. – **Desenvolvimento e Teste de Um Forno Metálico para Carbonização da Madeira** - Tese de Mestrado em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Ferreira Valente, Viçosa, Minas Gerais, Julho de 1986.

BTG – Module 1d – **Biomass Pré-treatment** - extraído de www.btgworl.com em 05 de agosto de 2010.

BROWN, N.C. – **Timber products and industries**, 7 th Ed. - John Wiley & Sons, New York, 1948.

DOMAC, J. e TROSSERO, M. (Editors) e SIEMONS, R. (Colaborador) – **Industrial Charcoal Production** – FAO TCP/CRO/3101 (A) Development of a sustainable charcoal industry – North-West Croatia Regional Energy Agency, Zagreb, Croatia, June 2008.

FAO - **Industrial Charcoal Making - FAO FORESTRY PAPER 63 - FORESTRY DEPARTMENT, FAO CORPORATE DOCUMENT REPOSITORY, 1985** - Extraído de <http://www.fao.org/docrep/x5555e/x5555e03.htm>

FERREIRA, L.M.H.C. – **Desenvolvimento de uma Retorta para Carbonização da Madeira** – Tese de Mestrado, Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Ferreira Valente, Viçosa, Minas Gerais, Julho de 1988.

GRONLI, M. - **Industrial production of charcoal** - Seminar on Energy Carriers and Energy Systems in Developing Countries held by Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Research Trondheim at Makerere and Uganda Universities, SINTEF Energy Reserch, N-7465 Trondheim, Norway, 2005 - extraído de <http://terrapreta.bioenergylists.org/files/Gronli.pdf> em 5 de agosto de 2010.

INDUSTRIAL FURNACE COMPANY, INC. – **Multiple Hearth Furnaces Services** - Extraído em 02 de maio de 2010 de <http://www.industrialfurnace.com/index.php?p=2>.

MAGALHÃES, J.G.R.; ALMEIDA, M.R. REZENDE., M.E.A. e DUARTE, V.N. – **Carboquímica Vegetal, O que há além da madeira na ACESITA ENERGÉTICA** – SOL & SOLO, no 13. Novembro (1986)

MARTINS, H. – **Madeira como fonte de energia** –in: PENEDO, W.R. (Ed.) - **Uso da Madeira para Fins Energéticos** – p.09-26, CETEC, Belo Horizonte, 1980

PERRY, R.H. e CHILTON, C.H. - **Manual de Engenharia Química, 5ª Edição** - Guanabara Dois, RJ, 1980.

PONTETTE, J. – **Carbonização contínua da madeira** – Texto mimeografado, Federação das Indústrias de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1981.

ROCHA, J. D.; PÉREZ, J. M.; CORTEZ, L. A. B. – **Aspectos Teóricos e Práticos do Processo de Pirólise de Biomassa** – Curso “ Energia na Indústria de Açúcar e Álcool”, UNIFEI, Itajubá, 12 a 16 de julho de 2004.

ROUSSET. P. - **Fotografias e figuras - Les Chemp des Reserche** – in: Seminário de Produção do Carvão Vegetal, SINDIFERPA, Belém, 04 de dezembro de 2007 -- citado por Vital e Pinto (2009)

VALENTE, O.F. e LELLES, J.G. – **Carbonização de Madeira** – in: MASUDA, H. (Ed.) - **Carvão e coque aplicados à Metalurgia** – p. 85-151, ABM, Associação Brasileira de Metalurgia, 1983

VITAL, M.H.F. e PINTO, M.A.C. – **Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil** – Siderurgia, BNDES Setorial 30, p. 237- 29, setembro de 2009.

WENZL, H.F.J. – **The Chemical Technology of Wood** – New York, Academic Press, 1970.

CAPÍTULO 7

FORNOS PARA ATIVAÇÃO DE CARVÕES

7.1 – Fundamentos da produção de carvão vegetal e carbonos ativados

7.2 – O carbono ativado pode resultar de uma destilação seca complementar

7.3 – O uso eficiente do calor na carbonização

7.4 - Fundamentos da ativação de carvões

7.4.1 – Desvolatilização das matérias-primas carbonosas via pirólise

7.4.2 – Processos de ativação de coques e materiais recém-carbonizados

7.4.2.1 – Ativação com reagente químico líquido ou sólido

7.4.2.2 – Ativação gasosa ou purga oxidante – não é ativação meramente física

7.5 - Tipos de poros em partículas de carvões e carbonos ativados

7.6 – Etapas básicas para ativação dos carvões

7.6.1 – Ativação química de substâncias e carvões vegetais

7.6.2 – Ativação físico-química com vapor d'água industrial

7.6.3 – Ativação físico-química gasosa com CO₂

7.7 - Parâmetros para classificar carvões ativados

7.8 – Condições operacionais e reações termoquímicas para ativação dos carvões

7.9 – Processos de fabricação de carvões ativados

7.10 – Fornos para ativação industrial de carvões

7.10.1 - Forno vertical a soleira múltipla – para ativar carvões

7.10.2 - Forno horizontal rotatório para ativar carvões

7.10.3 - Forno vertical de leito fluidizado para ativar carvões

7.11 – Constatações do capítulo 7

7.12 – Conclusões do capítulo 7

7.13 – Referências do capítulo 7

CAPÍTULO 7

FORNOS PARA ATIVAÇÃO DE CARVÕES

7.1 – FUNDAMENTOS DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL E CARBONOS ATIVADOS

Nosso desafio é: conceber uma retorta ou forno capaz de coqueificar resíduos sólidos em particular, as cascas de coco verde. É necessária, ainda, uma revisão complementar dos conceitos variados e processos de carbonização e ativação (ou pirólise complementar) de materiais vegetais.

Carvão Vegetal é um produto sólido da pirólise de biomassa obtido a temperaturas acima de 300°C, de cor negra, que retém a morfologia da lenha original e queima sem chama. Não é um carbono puro nem um composto simples, porque sua composição inclui os elementos químicos predominantes C, H, O, e, também, pode conter N, S e cinzas. Sua análise imediata indica um teor de carbono fixo maior que 70%, além de matéria volátil e cinzas. Tem sido produzido há milênios (Czernik, 2008)

Carvão ativo ou carbono ativado é um material poroso com grande área superficial capaz de adsorver substâncias, que pode ser **de origem mineral, vegetal e animal** - cujas definições, conceitos e aplicações foram inicialmente apresentadas no Capítulo 1, mas são revistos a seguir.

Carbono ativado é o termo genérico usado para descrever uma família de adsorventes carbonáceos com uma forma altamente cristalina e uma estrutura porosa interna altamente desenvolvida. Uma ampla variedade de produtos de carbono ativado está disponível no mercado, exibindo diferentes características marcantes que dependem da matéria-prima e da técnica de ativação usada em sua produção. Na seleção de um carbono ativado, é importante possuir uma compreensão clara das características de adsorção e físicas do material que está sendo adquirido para otimizar suas características de desempenho (CPL, 2010).

Carbono ativado é o nome comercial para produtos altamente porosos, feitos de matérias-primas carbonáceas, que possuem grandes áreas internas de 400 a 1600 m²/g e um grande volume de poros maior que 30 cm³/100g. Acima de tudo, a grande área superficial interna superior a 1000 m²/g é significativa (DEGEL, 1990).

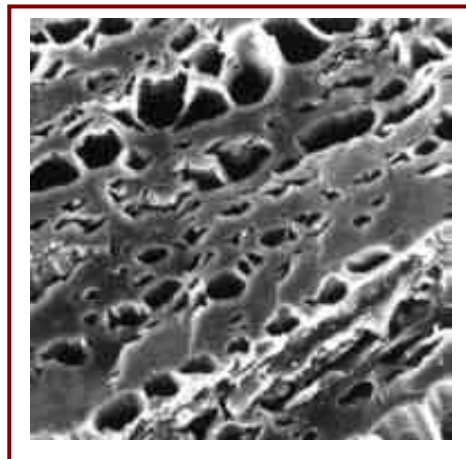


Figura 7.1 – Micrografia eletrônica de varredura da estrutura porosa da superfície de uma partícula de carbono ativado
(CPL, 2010)

A distribuição de tamanho de poros revelada na Figura 7.2 seguinte mostra esquematicamente o sistema de poros, que é importante para operações unitárias de adsorção e desorção.

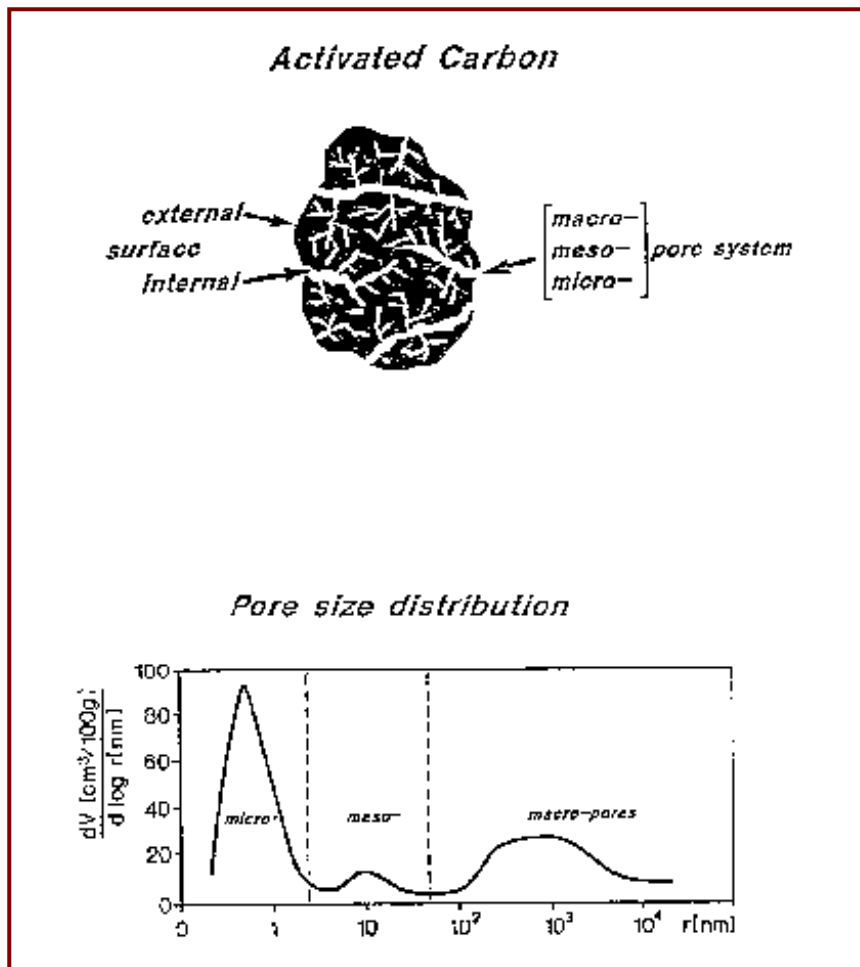


Figura 7.2 – Modelo genérico de uma partícula de carvão ativado e dos tamanhos usuais
(DEGEL, 1990)

As grandes superfícies específicas são criadas especificamente pelos microporos. O estado de agregação ou conformação dos produtos comerciais de carbono ativado são: pulverizado, granular e conformado (DEGEL, 1990).

Devido às propriedades de superfície principalmente hidrofóbicas, o carbono ativado absorve preferencialmente substâncias orgânicas e outros compostos não-polares a partir de fases gasosas e líquidas.

Nos anos 1900 a 1902, Ostreijko desenvolveu patentes de fabricação de carbono ativado e que constituem a base de todos os processos industriais atuais. de acordo com os seguintes princípios básicos de ativação, que serão apresentados adiante (DEGEL, 1990):

- **ativação química, e**
- **ativação por gás (ou vapor).**

Biomassa é uma matéria vegetal, ou produto renovável da fotossíntese, que inclui árvores, gramas e capins, resíduos de agricultura, rejeitos animais e descartes sólidos municipais (Czernik, 2008)

Tabela 7.1 – Distribuição das Fontes Mundiais de Biomassa
(Czernik, 2008)

TIPOS GENÉRICOS	DESTINAÇÃO
Biomassa rica em amido, graxos e proteínas	Suprimentos alimentícios: < 20% da Biomassa Total
Biomassa lignocelulósica em árvores, gramas e capins, resíduos de agricultura	Não alimentícios: > 80% da Biomassa Total

A **pirólise da biomassa** é a decomposição térmica, que ocorre na ausência de oxigênio, de grupos ou blocos poliméricos em temperatura superior a 300°C, produzindo a ruptura de ligações químicas e a despolimerização parcial e fragmentação para formar moléculas menores que são liberadas como gases e vapores que podem reagir com resíduos sólidos produzindo estruturas mais condensadas. **A pirólise de biomassa sempre produz produtos sólidos (carvão vegetal), líquidos (água e substâncias orgânicas) e gasosos (CO, CO₂, CH₄ e H₂)** dependendo da alimentação e das condições de processamento (Czernik, 2008).

Tabela 7.2 – Classificação dos Processos de Pirólise de Biomassa
(Czernik, 2008)

TIPOS	CARACTERÍSTICAS BÁSICAS	CARVÃO	LÍQUIDOS	GASES
CARBONIZAÇÃO ou PIRÓLISE LENTA	Temperaturas baixas (< 500 °C) Tempos de residência longos	35%	30%	35%
PIRÓLISE RÁPIDA	Temperaturas moderadas Tempos de residência curtos	12%	75%	13%
GASIFICAÇÃO	Temperaturas elevadas Tempos de residência longos	10%	5%	85%

7.2 – O CARBONO ATIVADO PODE RESULTAR DE UMA DESTILAÇÃO SECA COMPLEMENTAR

Durante a (destilação seca ou pirólise ou carbonização da madeira), a lenha é aquecida em algum tipo de vaso fechado (retorta), isento da presença de oxigênio do ar atmosférico que poderia iniciar a sua ignição e queimá-la até convertê-la em gases da combustão e cinzas. **Sem oxigênio, a madeira decompõe-se numa variedade de substâncias**, sendo a principal o **carvão vegetal**, que é um sólido poroso composto principalmente de carbono elementar. Outros componentes são as cinzas da madeira original que compõem 0,5% a 6% da massa original, dependendo do tipo de lenha, quantidade de cascas ou cortiça, contaminação com terra e areia, etc. e substâncias alcatroadas que estão distribuídas na estrutura porosa do carvão vegetal (adaptado de FAO, 1985).

Os produtos líquidos e gasosos da destilação seca podem ser coletados a partir dos vapores quentes emitidos da retorta, após passagem através de um condensador resfriado com água. Os **gases não-condensáveis** – formadores do “**gás da madeira**” (ou “*wood gas*”) - que saem do condensador são geralmente queimados para recuperar a energia térmica e química que contém e liberam, **que corresponde a um poder calorífico baixo, da ordem de 10% do apresentado pelo gás natural**. Os **produtos biocarboquímicos distintos do carvão vegetal** produzido na retorta são conhecidos como **sub-produtos (“by-products”)** (adaptado de FAO, 1985).

O carvão vegetal comercial comum possui capacidade limitada de absorver substâncias em fase líquida ou gasosa. Para que o carvão possua essa propriedade de absorção, deve-se inicialmente remover os materiais alcatroados que bloqueiam a estrutura do esqueleto de carbono puro do carvão vegetal. Quando isso é feito a área superficial aumenta literalmente alguns milhões de vezes provendo igualmente um grande número de sítios onde as moléculas de outras substâncias podem ser mantidas ou adsorvidas e, portanto, removidas dos gases ou líquidos tratados pelo carvão vegetal, que é denominado **carvão vegetal ativado** (FAO, 1985).

O uso do carvão vegetal para produzir carbono ativado é relativamente novo, quando comparado com seu uso na metalurgia ou nas indústrias químicas. Os primeiros mercados do carvão ativado desenvolveram-se inicialmente na Europa em torno do início do Século XX. Os **carbonos ativados ou ativos** são carbonos que sofreram um tratamento complexo para aumentar suas propriedades adsorptivas. Mais de 70 tipos distintos de carvões ativados são comercializados (FAO, 1985).

Embora a área superficial da estrutura porosa e a capacidade de adsorção de todos os carbonos ativados esteja interrelacionada, o tamanho da área de superfície não é o único determinante da adequação de um dado produto para um objetivo específico. Em outras palavras, **os carbonos ativados com grandes áreas superficiais totais, porém com uma estrutura microporosa podem ser eficientes para remover odores leves causadores de impurezas nos gases, mas serem ineficientes para remover compostos formadores de cores fortes em soluções líquidas**. Isso que explica a grande variedade de tipos, graus e formas de carbonos ativados encontrada no mercado das indústrias químicas (FAO, 1985).

O carvão vegetal a ser consumido pelo fabricante de carbono ativo deve atender a uma especificação associada com ensaios de desempenho na planta para determinar seus limites de aceitação. Suas aplicações dependem do seu baixo teor de cinzas e disponibilidade em termos de qualidade da consistência.

As especificações usuais exigidas para os carvões vegetais destinados à fabricação de carbono ativado incluem (FAO, 1985): **carbono fixo – mínimo de 82%, cinzas – 4%, matéria-volátil – 10%, umidade – 4%, ensaio de acidez ou pH (de um extrato de água de uma amostra de carvão vegetal) – 4 a 10**.

O carvão vegetal foi inicialmente a única matéria-prima para produzir carbono ativado, mas foi parcialmente substituído devido a considerações de preços e disponibilidade limitada de madeira por outros materiais carbonosos tais como carvões minerais (incluindo o linhito), coque de petróleo, turva e musgo (biomassa microbiana) (FAO, 1985).

A experiência demonstra que não existem diferenças básicas na qualidade dos carbonos ativados feitos a partir de outras matérias-primas, **exceto que, no caso de aplicações para gases ou vapores, o carbono ativo oriundo de carvão vegetal é superior**. Admite-se que a produção de carbono ativado é um processo de baixa rentabilidade com relação à carga de matéria-prima, mesmo que não seja baseado em carvão vegetal (FAO, 1985).

7.3 – O USO EFICIENTE DO CALOR NA CARBONIZAÇÃO

Ocorrem diversas etapas endotérmicas e exotérmicas de transferência de calor durante a carbonização da madeira, e o seu controle afeta a eficiência e a qualidade da produção do carvão vegetal ou ativado.

O calor para o processo de carbonização pode ser oriundo de: (a) diretamente do calor de reação de combustão; (b) dos fumos da combustão de sub-produtos e/ou da alimentação diretamente ao reator; e (c) dos fumos da combustão através das paredes do reator (Czernik, 2008),

Os **princípios básicos do processo de carbonização** envolvem a queima de um combustível para iniciar suas etapas, que pode ser oriundo da própria lenha ou madeira a carbonizar. Mesmo que possamos usar calor exotérmico oriundo da carbonização, porém a queima inicial de parte da madeira representa uma perda material e de energia, porque a madeira queimada não é convertida em carvão vegetal, mas em gases de combustão (FAO, 1985).

Os **três estágios principais da carbonização** que demandam o fornecimento de calor são:

1º - a secagem da madeira;

2º - o aumento da temperatura até 270 °C para iniciar a pirólise espontânea e auto-sustentável que libera o calor para manter o processo em andamento.

3º - O aquecimento final no intervalo de 500 a 550 °C para remover o alcatrão residual nos poros da estrutura de carbono do carvão vegetal previamente formado e aumentar o teor de carbono fixo até um valor aceitável de carvão vegetal de boa qualidade.

Um processo de carbonização ideal seria aquele que não exigisse o aporte externo de calor. Dessa forma, O calor exotérmico do processo seria capturado junto com o calor produzido na queima de gases e líquidos liberados e este seria suficientes para secar a umidade residual da madeira e fazê-la atingir a etapa de pirólise espontânea e, então, o calor necessário para remoção final do alcatrão impregnado nos poros.

Na prática da carbonização, ocorrem perdas térmicas através das paredes da retorta e a secagem prévia insuficiente, sendo impossível atingir tal idealidade. Entretanto, **algumas retortas e processos de carbonização conseguem minimizar essas perdas e aproximam-se da idealidade quando as condições climáticas permitem a secagem adequada da lenha ou madeira ou resíduos vegetais** (FAO, 1985).

Nenhuma lenha irá carbonizar-se até que esteja praticamente seca. A água da madeira verde constitui aproximadamente 59% do seu peso original e deve ser totalmente evaporada antes do início da pirólise formadora de carvão vegetal (dentro de uma retorta). **É mais econômico maximizar a secagem da lenha usando energia solar antes de pirolisá-la**, sendo viável em clareiras florestais e áreas de matagais e pequenas árvores, onde podem secar durante meses sem o receio de ataques de insetos ou apodrecimento. Convém avaliar a perda de rendimento em carvão vegetal devido ao teor excessivo de umidade perante a resultante da deterioração biológica da madeira (FAO, 1985).

Tabela 7.3 – Calor para produção de carvão vegetal
(adaptado de Czernik, 2008 e FAO, 1985)

TEMPERATURAS	ETAPAS DE PROCESSAMENTO
< 280 °C	ENDOTÉRMICAS – secagem, despolimerização e desvolatilização
300 a 500 °C	EXOTÉRMICAS – formação de carvão
> 500 °C	ENDOTÉRMICAS – carbonização do carvão ou destilação complementar

Admitindo-se que a lenha seja pirolisada com alguma umidade residual na maioria dos processos de carbonização conhecidos, as etapas e produtos principais são aquelas contidas na tabela 7.4.

**Tabela 7.4 - Etapas da formação do carvão vegetal e de sua ativação
identificadas em condições laboratoriais
(FAO, 1985)**

CONDIÇÕES TERMQUÍMICAS	FENÔMENOS FÍSICOS E QUÍMICOS	PRODUTOS
20 a 110 °C Endotermia	- a madeira lenha absorve calor e perde umidade; - a temperatura é mantida pouco acima de 100 °C até que a madeira seque e atinja peso constante.	- vapor d'água simples
110 a 270 °C Endotermia	- traços residuais de água são removidos; - inicia-se a decomposição da madeira, liberando-se gases e vapores.	- CO, CO ₂ ácido acético e metanol
270 a 290 °C Exotermia	- inicia-se a decomposição exotérmica da madeira; - libera-se calor auto-sustentável; - liberam-se gases, vapores e algum alcatrão.	- mistura de gases e vapores
290 a 400 °C Exotermia	- prossegue a decomposição da madeira; - liberam-se vapores incluindo gases combustíveis, predominam os alcatrões quando sobe a temperatura.	- CO, H ₂ , CH ₄ e CO ₂ - ácido acético, metanol, acetona, e alcatrões
400 a 500 °C Exotermia	- a 400 °C a obtenção de carvão vegetal (macio) está praticamente completa, mas seus poros contém quantidades apreciáveis de alcatrão (30% aprisionados)	- carvão vegetal com alcatrão impregnado
500 a 550 °C Endotermia	- o carvão vegetal <u>macio</u> demanda aquecimento adicional para liberar o alcatrão e atingir 75% de pureza em C que é o normal para uma boa qualidade comercial, - completa-se a carbonização ou destilação seca ou pirólise.	- carvão vegetal - alcatrão liberado

**Tabela 7.5 - Etapas do aquecimento lento de biomassa
(adaptado de Czernik, 2008)**

TEMPERATURA	FASE SÓLIDA	FASE GASOSA
< 200 °C	Secagem	- Vapor d'água simples
230 a 250 °C	Retificação	Ácido acético e metanol
250 a 280 °C	Torrefação	Extratos ou destilados
300 a 500 °C	Desvolatilização	Orgânicos, H ₂ O, gás
> 500 °C	Carbonização e Destilação Secundária (Ativação)	Alcatrões, H ₂ O e gás

7.4 – FUNDAMENTOS DA ATIVAÇÃO DE CARVÕES

7.4.1 – Desvolatilização das matérias-primas carbonosas via pirólise

Antes de serem ativados, os materiais carbonosos que possuem alto teor de voláteis (é o caso de diversos tipos de biomassa), devem passar por um processo de pirólise sob temperaturas inferiores a 700°C em ausência de oxigênio, para serem removidos gases e vapores (desvolatilização), que resultará em aumento do teor de carbono fixo do material (Bansal, 1989 – citado por Bezzon, 1998).

Industrialmente, a etapa de carbonização pode ser realizada no próprio forno de ativação e os gases gerados são queimados proporcionando uma fonte de energia para o próprio processo ou forno. A desvolatilização que ocorre durante a carbonização libera pequenos poros na estrutura interna do carvão, que, posteriormente, são desenvolvidos na etapa de ativação (Dai, 1995 – citado por Bezzon, 1998).

Os principais parâmetros que determinam a qualidade e o rendimento do carvão produzidos na pirólise são: velocidade de aquecimento, temperatura final, pressão, tempo de residência à temperatura final e características da matéria prima utilizada.

Velocidades reduzidas de aquecimento e menores valores de temperatura final resultam em pouca desvolatilização e altos rendimentos mássicos de carvão vegetal. As pressões operacionais superiores à atmosférica e a utilização de materiais com altos teores de carbono fixo agem no sentido de aumentar os rendimentos mássicos de carvão (Dai, 1995 – citado por Bezzon, 1998).

7.4.2 – Processos de ativação de coques e materiais recém-carbonizados

A ativação pode ser realizada por ação química ou físico-química. Nos dois casos, o agente ativador retira átomos de carbono internos, aumentando, o tamanho e o número de poros (adaptado de Torregrosa, 1991- citado por Bezzon, 1998 - e Softel, 1985):

7.4.2.1 – Ativação com reagente químico líquido ou sólido

Na *ativação com reagentes de ativação química*, **o material é impregnado com um reagente ativador na forma de uma solução concentrada. Dessa maneira, ocorre uma reação química entre o agente ativador e os átomos internos de carbono, que são retirados da matriz carbonosa para aumentar ou gerar novos poros internos.** O grau de impregnação determina o número e a distribuição de tamanho de poros no carvão ativado (Jaroniec, 1990; Jagtoyen, 1993 – citado por Bezzon, 1998).

Após a ativação química, o carvão ativado resultante é lavado e filtrado para remoção do agente ativador, que é reciclado. Os principais reagentes ativadores são: o ácido fosfórico, cloreto de zinco, ácido sulfúrico, hidróxido de triclaneto de potássio, carbonatos de metais alcalinos, sulfeto de potássio e cloretos de cálcio e magnésio (Ahmadpour, 1996 – citado por Capobianco, 2005).

7.4.2.2 – Ativação gasosa ou purga oxidante – não é ativação meramente física

A **ativação gasosa** (erroneamente de ativação física por pessoas que desconhecem os fundamentos dos processos químicos industriais) **consiste no tratamento do material carbonizado com gases ou vapores oxidantes (em geral oxigênio, dióxido de carbono e vapor d'água) sob altas temperaturas num forno ou equipamento termoquímico.**

O carbono presente no interior dos poros reage quimicamente com o agente oxidante, produzindo óxidos de carbono que se difundem para fora da partícula de carvão (adaptado de Keirsse, 1988 – citado por Bezzon, 1998).

7.5 - TIPOS DE POROS EM PARTÍCULAS DE CARVÕES E CARBONOS ATIVADOS

O processo de ativação de carvões consiste em criar ou ampliar o número de poros numa partícula de carbono puro ou impregnado com alcatrão e pirolenhosos. Os poros são formados ou expostos durante o processo de ativação (adaptado de Strand, 2001).

O processo de ativação gasosa – representado sucintamente na Figura 7.3 - inclui três etapas básicas de ativação e uma complementar para preservar suas propriedades de desempenho:

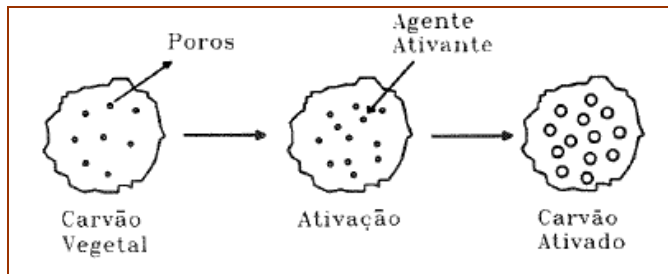


Figura 7.3 - Representação das etapas do processo de ativação gasosa de carvão vegetal (Bezzon, 1998)

- 1ª - difusão do agente ativador no interior dos poros;
- 2ª - reação química do agente ativador com as moléculas de carbono;
- 3ª - difusão dos produtos gasosos da reação oxidante para fora da partícula, resultando no aumento do volume interno de poros e da área superficial;
- 4ª - preservação dos átomos de carbono fixo na matriz do carvão ativado em ambiente inertizado.

Os poros dos carbonos (Strand, 2001):

- 1º - Microporos – com raios < 1 nm (poros pequenos) – realizam absorção;
- 2º - Mesoporos - raios entre 1 a 25 nm (poros médios) – também realizam absorção;
- 3º - Macroporos – raios > 25 nm (poros maiores) – transportam líquidos na estrutura de C.

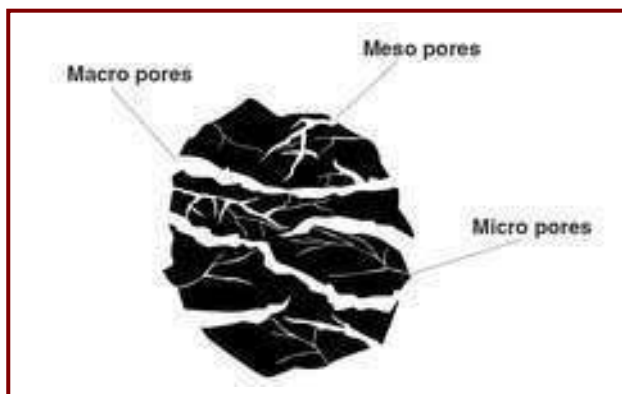


Figura 7.4 – Tipos de poros numa partícula de carvão ou carbono (Strand, 2001)

Os macroporos das partículas de carbono ativado atuam como canais para que os mesoporos e microporos possam absorver as substâncias visadas. Os carbonos granulares ativados possuem sempre macroporos, porém os pulverizados frequentemente não apresentam esse tipo, porque a moagem produz partículas muito pequenas que eliminam sua ocorrência (Strand, 2001)

Stoekli (1991 – citado por Bezzon, 1998) relata que os poros dos carvões ativados são divididos em 3 categorias de acordo com o diâmetro interno médio (D), sendo que a maior contribuição da área superficial interna é dada pelos microporos:

- A - microporos ($D < 20 \text{ \AA}$),
- B - mesoporos ($20 \text{ \AA} < D < 500 \text{ \AA}$) e
- C - macroporos ($D > 500 \text{ \AA}$).

7.6 – ETAPAS BÁSICAS E PROCESSOS DE ATIVAÇÃO DE CARVÕES

7.6.1 – Ativação química de substâncias e carvões vegetais

A **ativação química** é usada, principalmente, nos carvões vegetais oriundos de madeiras e caroços de azeitonas, e a **carbonização e a ativação ocorrem simultaneamente**. A **matéria prima da ativação química consiste de pedaços ou lascas de madeira**, e é misturada com uma substância ativadora e desidratante, em geral, **o ácido fosfórico ou o cloreto de zinco, ocorrendo a 500°C, podendo ocorrer algumas vezes a 800°C**. O **ácido fosfórico provoca a dilatação da madeira e abre sua estrutura celulósica** e, durante a ativação, age como um estabilizador e garante que o carbono não entre em colapso novamente. O resultado é um carbono ativado muito poroso cheio de ácido fosfórico, que é posteriormente lavado e removido para reciclagem e uso na próxima carga de carvão vegetal. E nenhuma lasca ou placa cristalina é encontrada no carbono ativado que se forma, o qual adquire uma estrutura porosa muito aberta que é ideal para a absorção de moléculas grandes, úteis, por exemplo, para clarificar líquidos. No entanto, esse carbono ativado com ácido fosfórico é moído para obtê-lo pulverizado (Strand, 2001).

Zhang e colaboradores (2004) evitam a ativação química que pode gerar problemas ambientais secundários no descarte dos carbonos ativados com sais de zinco e ácido fosfórico.

7.6.2 – Ativação físico-química com vapor d'água industrial

A **ativação por arraste com vapor d'água industrial** é usada na fabricação de carbono ativado a partir de turfa, carvão, cascas de cocos, linhito, antracito ou madeira. **Primeiramente, a matéria-prima lignocelulósica é convertida em carvão por aquecimento**. Quando o carvão vegetal é usado na ativação com arraste de vapor, suas partículas formam camadas lamelares (parecidas com batatas fritas finas) planas ou encurvadas, com espessura de 0,35 nm e alguns nm de largura e comprimento, e encontram-se em desarranjo (ou dispersas como num saco de batatas fritas). **Vapor d'água a 130°C é soprado num carvão submetido a uma temperatura aproximada de 1000 °C**. Parte das lascas ou lamelas tornam-se gasosos e formam poros quando se expandem e escoam nas partículas. Um material duro, como cascas de coco (ou similar a um casquilho) escapa da matriz sólida deixando microporos, enquanto que um material macio como a turfa produz mesoporos (Strand, 2001).



Figuras 7.5 – Arranjos obtidos na ativação de carvão vegetal com vapor d'água após tempos de ativação (A) curtos - obtém muitos microporos; (B) médios - geram muitos mesoporos; e (C) longos - produzem muitos meso e macroporos.

(Strand, 2001)

Se a injeção de vapor d'água industrial durar muito tempo, maior será a conversão de lamelas de carbono em gás e o número de poros formados aumentará. Primeiro, obtém-se microporos. À medida que o processo continua, as lamelas circundantes convertem-se para gás e os poros se transformam em mesoporos. Se houver continuidade, formam-se macroporos. Isso também ocorre na estrutura das matérias-primas. Madeira, turfa e cascas de coco possuem estruturas celulares definidas que são mantidas durante o processo inteiro de ativação por vapor d'água (Strand, 2010).

7.6.3 – Ativação físico-química gasosa com CO₂

A escolha do gás CO₂ como agente de ativação baseia-se no fato de ser limpo e fácil de manipular e é preferida para atividades laboratoriais de ativação de carvões vegetais, pois, também facilita o controle do processo devido às velocidades lentas de reação química em torno dos 800 °C. Além disso, relataram que outros pesquisadores concluíram que para a obtenção de microporos é mais vantajoso utilizar fornos horizontais (Zhang e colaboradores, 2004).

7.7 - PARÂMETROS PARA CLASSIFICAR CARVÕES ATIVADOS

Diversos parâmetros descrevem o comportamento, as características das superfícies e as propriedades dos carvões ativados, a saber:

1º – estado de agregação dos carvões ativados: pulverizado, granulado, peletizado

Geralmente, o **carvão ativado pulverizado** é usado como descorante, o **produto granular** para tratamento de água e o **reagente peletizado** em fase gasosa e catálise. Porém, essa associação de estados de agregação e utilização não constitui uma regra. Por exemplo, no mercado brasileiro o carvão ativado pulverizado é muito utilizado para remoção de odor e gosto em estações de tratamento de água (Alphacarbo, 2010).

2º - impregnação de agentes químicos inorgânicos e orgânicos nos carvões ativados:

Os impregnantes visam atender objetivos químicos específicos em: suportes catalíticos, colunas reatores de adsorção, filtros para gases e líquidos (Reinoso, 2004 – citado por Capobianco, 2005).

impregnantes inorgânicos - manganês, zinco, ferro, lítio, cátions de alumínio, iodo e prata.

impregnantes orgânicos - piridina, acetona e amina terciária.

3º - granulometria:

- **carvões ativados pulverizados** - possuem uma granulometria fina, uma área superficial externa elevada, uma distância de difusão pequena e apresentam altas taxas de adsorção. São usados preferencialmente para adsorver substâncias da fase aquosa das soluções em que são adicionadas, sendo necessário após algum tempo de ação, promover sua separação física por filtração ou decantação.

- **carvões ativados granulados** possuem tamanhos de partículas de carbono maiores aos carvões pulverizados e maiores áreas superficiais externas. São empregados para adsorverem vapores e gases. São utilizados ainda em estações de tratamento de água e para descorar e separar componentes de sistemas aquosos.

4º - esfericidade:

A observação das descrições dos produtos anunciados para venda de carvões ativados revela que as formas geométricas comerciais das partículas dos carvões ativados podem ser: **esféricas, irregulares (granulares e pulverizadas e cilíndricas (peletizadas))**.

Os carvões ativados esféricos apresentam alta resistência mecânica e excelente capacidade de adsorção de SO₂ e NO₂ (Katori e colaboradores (1975), além de Nagai e colaboradores (1977).

5º - porosidade:

As propriedades finais do carvão ativado são definidas, pelo tipo de precursor (material carbonizado) e as características do processo de ativação empregado. As propriedades que determinam as características adsorptivas do carvão ativado são: 1º - o volume de poros, 2º - a distribuição de tamanho dos poros, e, 3º - a sua área superficial interna (WILDMAN, 1991 – citado por BEZZON, 1998).

As características e propriedades dos carvões ativados devem ser estabelecidas para cada aplicação ou uso final. A seletividade de um carvão ativado para a adsorção de determinados compostos é resultado principalmente da distribuição do tamanho dos microporos. (Bansal, 1989 – citado por Bezzon, 1998).

Strand (2001) destacou que se tornou uma prática padronizada descrever o nível de atividade no carbono pela quantidade de carbono convertida em gás e mantida dentro dos espaços vazios (os poros). Assim, um **carbono ativado altamente ativado** é aquele que possui a maior quantidade de espaços vazios e são aqueles que incluem muitos mesoporos e macroporos. Porém, isso não garante sua qualidade comercial nem constitui indicador de sua eficiência, em particular para purificar o álcool.

7.8 – CONDIÇÕES OPERACIONAIS E REAÇÕES TERMOQUÍMICAS PARA ATIVAÇÃO DOS CARVÕES

Os principais fatores que afetam o processo de ativação incluem o controle a temperatura, a concentração do agente ativador e o tempo de ativação. A velocidade de reação para uma mesma temperatura é semelhante para o CO₂ e vapor d'água, podendo ser, muitas vezes, maior para o caso do O₂. Para cada processo, as condições de ativação variam as propriedades finais do carvão ativado obtido.

A temperatura permite controlar as velocidades da difusão da reação química (Pastor-Villegas, 1994 – citado por Bezzon, 1998).

Sob baixas temperaturas, a velocidade da reação do carbono com o agente ativador é lenta se comparada à velocidade da difusão; assim, a reação química é o mecanismo limitante do processo.

Se a temperatura de ativação aumenta, a velocidade da reação química aumenta e o mecanismo limitante passa a ser a difusão do agente ativador no interior da partícula. Nesse caso, ocorre perda de material, devido à uma significativa queima superficial, e a estrutura porosa interna não é formada devidamente, pois o agente ativador reage com o carbono antes de alcançar o interior da partícula (Skille, 1995 – citado por Bezzon, 1998).

Os principais agentes ativadores são o O₂, CO₂ e o vapor d'água de processo ou industrial. A reação do carbono com O₂ resulta em CO e CO₂ de acordo com as seguintes estequiometrias:



Sendo essa reação altamente exotérmica, é necessário manter um controle rigoroso da temperatura de ativação através da remoção do excesso de calor gerado no leito de carvão (Essenhigh, 1991 – citado por Bezzon, 1998). Em geral, dilui-se o O₂ com vapor d'água ou N₂, diminuindo sua pressão parcial e retirando o calor através do aumento do fluxo de massa total. A ativação com O₂ é realizada a temperaturas relativamente baixas (menores que 500° C), em relação à ativação com vapor d'água e CO₂ (Cuesta, 1993 – citado por Bezzon, 1998).

A reação do carbono com vapor d'água é endotérmica, entre 800°C e 1000°C, é a seguinte:



Emprega-se a combustão dos gases produzidos (H₂ e CO) como fonte de calor para o processo, tornando-o auto sustentável (Ullman, 1991 – citado por Bezzon, 1998). Os gases são queimados em uma câmara de combustão e o calor introduzido no reator de ativação:



A ativação, utilizando CO₂ como agente ativador, é um processo endotérmico que ocorre a temperaturas elevadas (800-1000°C), cuja reação básica é:



Qualquer coque ou carvão ativado que seja estocado em ambiente inertizado com N₂ é protegido de reações posteriores de oxidação, a menos que seja utilizado em seguida à sua produção ou ativação.

7.9 – PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CARVÕES ATIVADOS

Degel (1990) descreveu na figura seguinte o processo de produção de pellets de carbono ativado por meio de ativação gasosa (usando vapor d'água industrial) utilizado na empresa Carbo-Tech GmbH, que era uma empresa alemão de médio porte (que possuía 230 funcionários e executivos).

O carvão betuminoso pré-lavado (em geral, na mina de extração) é finamente moído e submetido

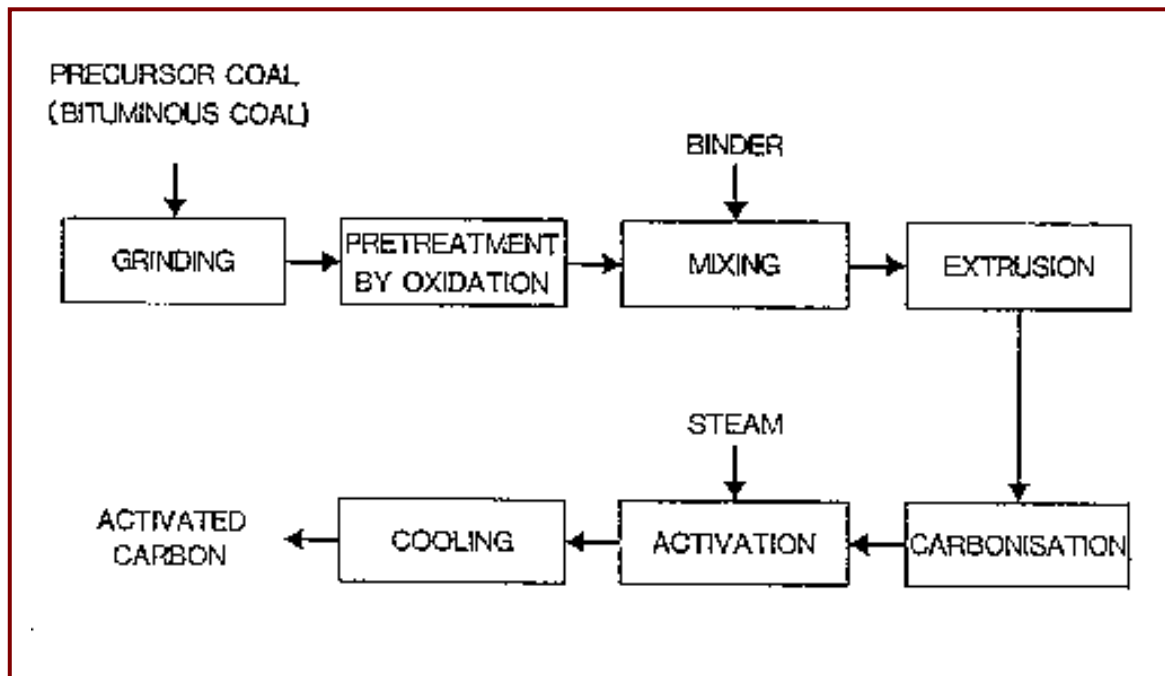


Figura 7.6 – Processo de fabricação de carbono ativado da Carbo-Tech GmbH (Degel, 1990)

A indústria de carbono ativado usa muitas variações dos métodos básicos de processamento para obter produtos com propriedades otimizadas dos diversos usos finais. Essas variedades vinculam-se aos estágios finais de processamento ao invés do **processo básico de ativação que é geralmente executado pelo aquecimento do carvão vegetal até uma temperatura de cerca de 800 °C numa atmosfera de vapor superaquecido, que permite degradar e remover os alcatrões que obstruem a sua estrutura microfina.**

Existem diversos tipos de equipamentos empregados que dependem principalmente do volume de carvão vegetal a ser processado. O princípio operacional de qualquer sistema é o mesmo: o carvão vegetal é aquecido e agitado numa atmosfera de vapor superaquecido para remover os alcatrões. **Embora, a princípio, outros gases possam ser usados, o vapor d'água industrial é o mais amplamente empregado (FAO, 1985).**

A figura seguinte apresenta as características básicas do processo de ativação (FAO,1985)

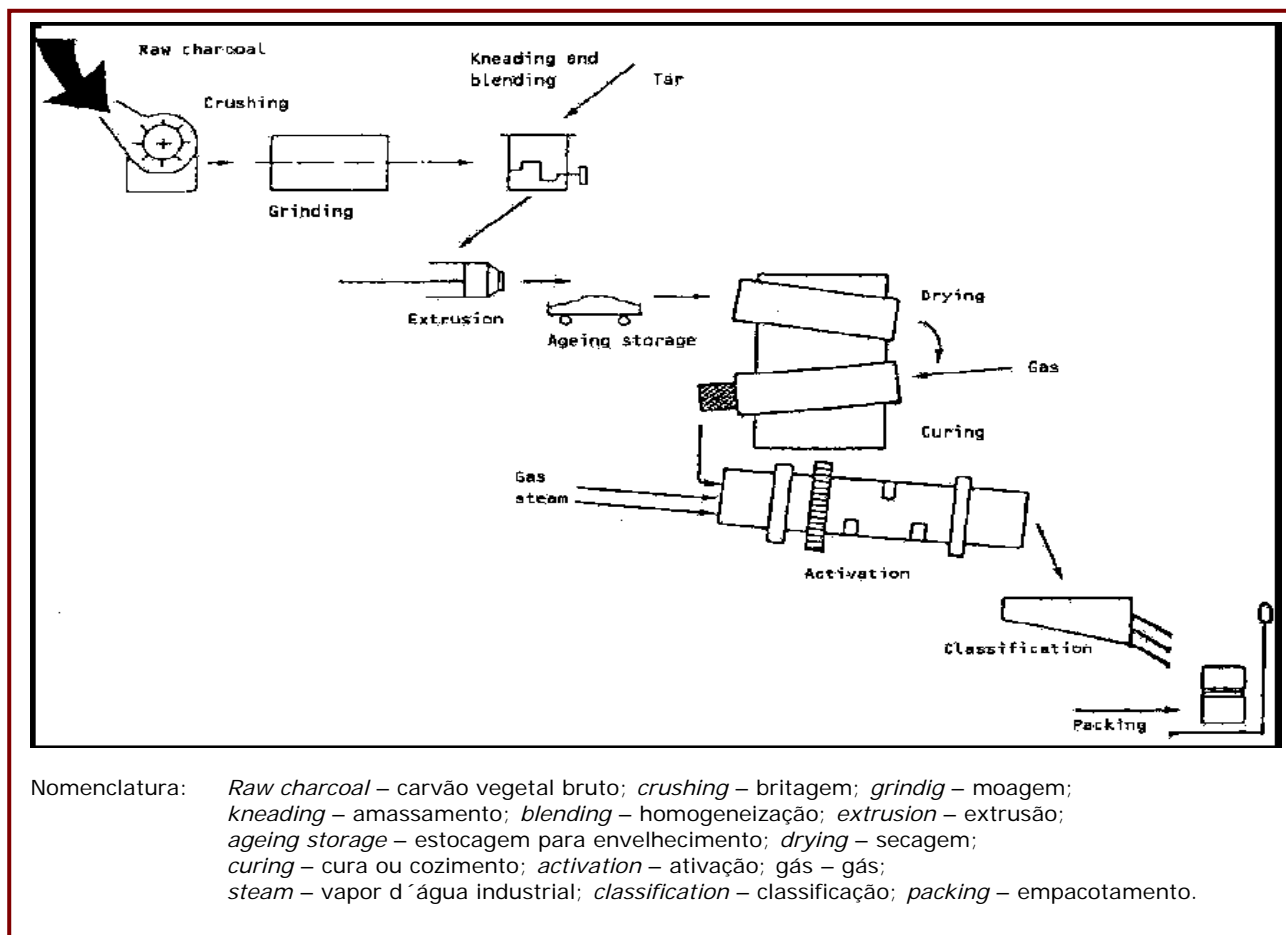


Figura 7.7 – Fluxograma básico da produção de carvão vegetal ativado (FAO,1985)

Para grandes quantidades de produto, utiliza-se o forno rotativo de câmaras ou soleiras múltiplas, que é usado para consumir cascas, cortiças e serragens. Para volumes menores são freqüentemente processados num forno vertical onde cascatas de carvão vegetal caem sobre chicanas refratárias que permitem a exposição plena à atmosfera do forno de ativação (FAO, 1985)

A experiência demonstrou que **para processos de adsorção gasosa o carvão vegetal mais adequado é aquele oriundo das cascas de coco porque sua elevada resistência combinada com a de uma estrutura porosa fina possibilita a sua reciclagem por muitas vezes no equipamento sem perder sua estrutura granular e sem impedir o escoamento do gás** (FAO, 1985).

O carvão vegetal quente que sai do forno (de ativação) é posto a resfriar em tambores ou containeres de aço até que atinja a temperatura ambiente. Na condição de carvão vegetal com tamanho de partículas de grãos de areia é moído até gerar um pó que exponha ao máximo sua estrutura ativa. Ao mesmo tempo, um tratamento especialista é provido ao carbono ativado para adaptá-lo ao seu uso particular. Por exemplo, o carvão vegetal ativado destinado à purificar óleos vegetais é tratado de modo diferente para os empregados no descaramento de vinhos. Todos esses processos são mantidos em sigilo pelos fabricantes de modo a melhorar sua competitividade no mercado industrial (FAO, 1985),

Os detalhes exatos desses processos são irrelevantes para o produtor de **carvão vegetal** que está procurando um fabricante de carbono ativado como comprador, o que não é problemático, porque seu produto **tem baixo teores de cinzas e matéria-volátil** o que o torna adequado para venda. Só existe uma exceção que é o caso do carvão vegetal usado para fabricar carbono ativo para purificar gases e para recuperação de solventes de impressão e processos correlatos e para as máscaras contra gases usadas por militares e civis (FAO, 1985).

Piovesan (1989) descreveu na revista Química e Derivados o **processo de fabricação do carvão ativado no Brasil**, que foi considerado simples, com as seguintes etapas:

1ª – faz-se a coleta ou recolhimento da matéria-prima (casca de coco, caroço de pêssego, nó de pinho ou acácia negra);

3ª - é feita a pré-carbonização ou não desse material, segundo as necessidades específicas de cada produto final;

4ª – se a matéria-prima for não-carbonizada previamente é alimentada a um alto-forno ou retorta e emprega-se o **método físico-químico de limpeza ou arraste** de hidrocarbonetos voláteis contidos nos poros originais, utilizando-se o vapor d'água industrial associada com o aquecimento até 1000 °C, saindo o produto do leito de ativação para ser moído ou peneirado.

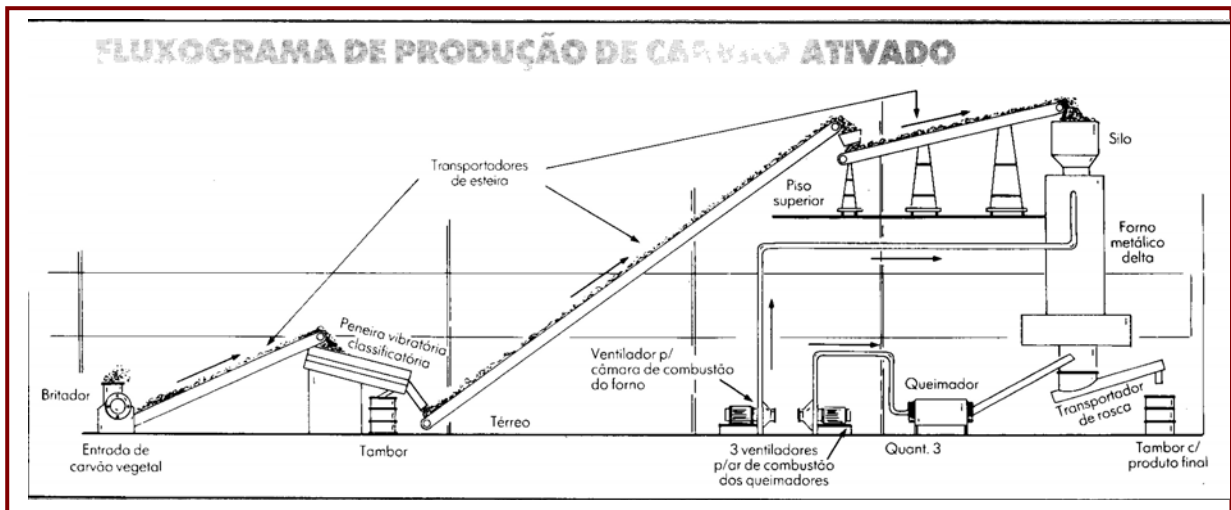


Figura 7.8 – Fluxograma básico da produção de carvão vegetal ativado (Piovesan, 1989)

7.10 – FORNOS PARA ATIVAÇÃO INDUSTRIAL DE CARVÕES

Os equipamentos termoquímicos industriais citados na literatura técnica para ativar carvões sintéticos ou naturais são os que empregam gases ou vapores oxidantes em altas temperaturas, sendo classificados de acordo com o modo de operação. Os tipos mais comuns são os fornos verticais, horizontais rotatórios e de leito fluidizado (Ullman, 1991- citado por Bezzon, 1998).

No entanto, os fornos de ativação de carvões também podem executar a carbonização das matéria-prima carbonosa numa etapa de processamento, conforme será descrito adiante.

7.10.1 - Forno vertical a soleira múltipla - para ativar carvões

Os fornos verticais possuem sistemas de câmaras superpostas, isto é, cada uma posicionada acima da outra. O material a ser ativado é alimentado na câmara superior e o fluxo de gás ativador é inserido na parte inferior do forno. O carvão se move por gravidade em sentido contra corrente com fluxo de gás (vide figura seguinte).

Cada forno vertical pode conter quatro seções: 1ª - secagem, 2ª - carbonização, 3ª - ativação e 4ª - resfriamento. O carvão ativado, já resfriado, é retirado da parte inferior do forno. O sistema de aquecimento é externo e utiliza a queima dos gases produzidos na carbonização e na ativação como fonte de energia.

A vantagem do forno vertical deve-se ao fato de ser auto-sustentável energeticamente. Suas desvantagens são: 1ª - o alto custo de construção; 2ª - baixa eficiência energética e, 3ª - a heterogeneidade do carvão ativado produzido, já que diferentes pontos do reator são submetidos a diferentes temperaturas e concentrações do agente ativador.

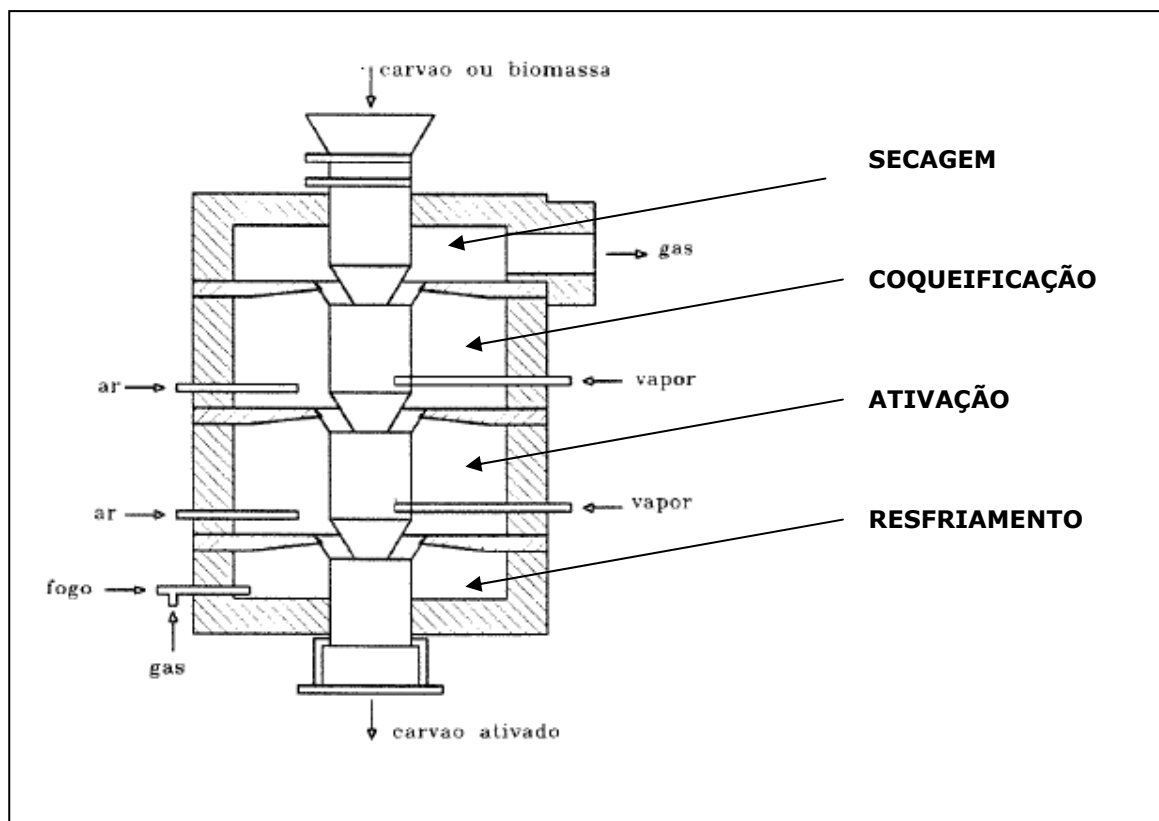


Figura 7.9 - Forno vertical de ativação de carvão
(Bezzon, 1998)

7.10.2 - Forno horizontal rotatório para ativar carvões

Os fornos horizontais rotatórios propiciam melhor misturação (contatos físicos) entre o agente ativador e o coque pré-produzido, além de manter um perfil de temperaturas mais uniforme ao longo de seu comprimento interno (Bezzon, 1998).

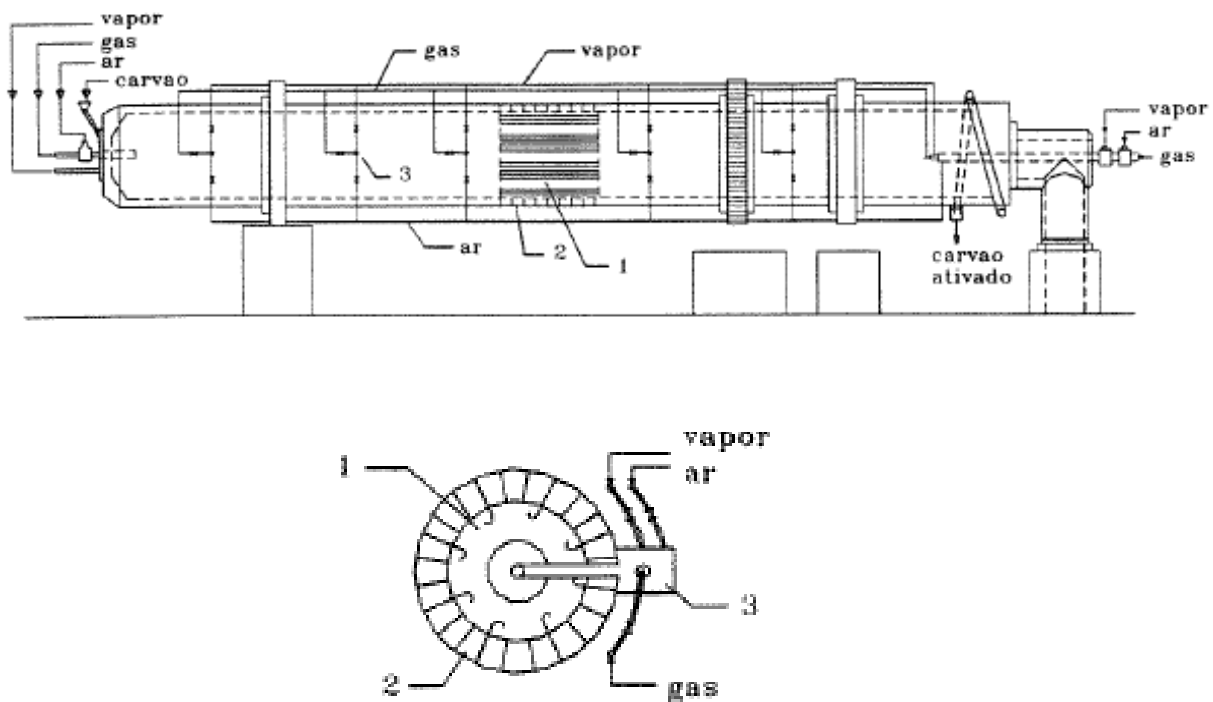
O material a ser ativado e o gás ativador podem ser introduzidos em contra ou co-corrente, dependendo do processo.

Devido ao grande comprimento deste forno e as altas temperaturas necessárias para ativação, **o aquecimento deve ser direto através da queima de gás combustível.**

Para que seja obtido um bom controle da composição do gás e da temperatura ao longo do forno, existem vários queimadores e linhas de gás distribuídos ao redor da carcaça do forno. (Bezzon, 1998).

O escoamento ou movimentação horizontal do carvão, desde a entrada do carvão ou material a ser ativado até a saída do carvão ativado, é realizada através de um sistema de pás internas.

A injeção do agente ativador é feita através de tubulações distribuídas homogeneamente ao longo do forno. A figura seguinte descreve esquematicamente um forno horizontal rotatório para ativar carvão.



1. aletas ou pás internas; 2. leito de tijolo; 3. queimadores

Figura 7.10 - Forno horizontal rotatório para ativar carvões
(Bezzon, 1998)

7.10.3 - Forno vertical de leito fluidizado para ativar carvões

Os fornos de ativação de carvões em leito fluidizado são utilizados com partículas de pequenas dimensões. Nesses fornos, as partículas estão em constante movimento e em contato direto com o agente ativador, que apresenta concentração homogênea em todo o volume do forno. (Bezzon, 1998).

No regime de leito fluidizado do carvão cru e do produto ativado, as condições de ativação são controladas mais facilmente, sendo que o tempo da ativação é mais curto em relação aos processos de leito fixo. O resultado é um produto mais homogêneo com menor custo de fabricação. O sistema em leito fluidizado é constituído, basicamente, de uma câmara cilíndrica, onde, na parte inferior, tem-se um prato perfurado para admissão e distribuição dos gases (Bezzon, 1998).

O processo pode operar com aquecimento direto e ser auto-sustentável, através da queima dos gases combustíveis gerados na ativação (CO e H_2). Em alguns casos, utiliza-se o aquecimento externo por eletricidade ou por queima de gás combustível. As principais limitações desses fornos são seu alto consumo de gases e a possibilidade de ativação somente de pequenas partículas. A figura seguinte apresenta um diagrama esquemático de um forno de ativação em leito fluidizado (Bezzon, 1998).

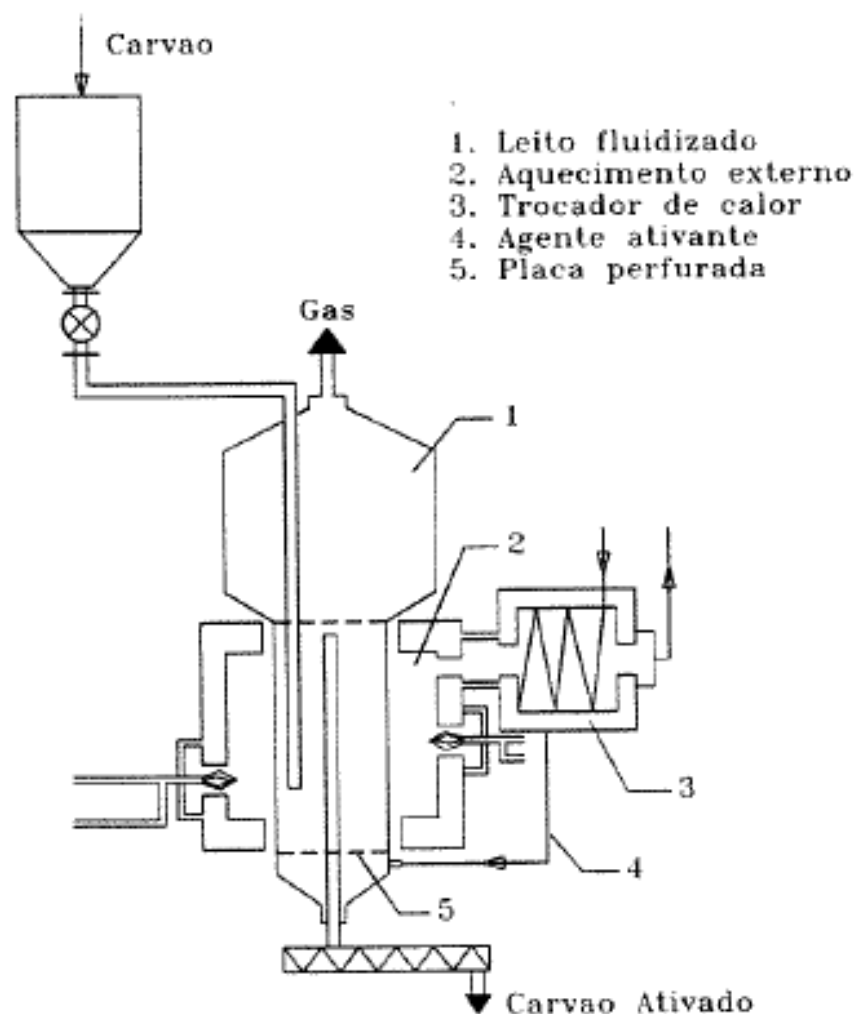


Figura 7.11 - Forno vertical em leito fluidizado de ativação de carvões
(Bezzon, 1998)

7.11 – CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 7

1ª - A pirólise de biomassa sempre produz produtos sólidos (carvão vegetal), líquidos (água e substâncias orgânicas) e gasosos (CO, CO₂, CH₄ e H₂).

2ª – Os gases não-condensáveis – formadores do “gás da madeira” (ou “*wood gas*”), são aqueles que saem do condensador na etapa de condensação dos vapores quentes efluentes da retorta e possuem poder calorífico baixo, da ordem de 10% do apresentado pelo gás natural.

3ª - O carvão vegetal comercial comum possui capacidade limitada de absorver substâncias em fase líquida ou gasosa. A capacidade de adsorção é maximizada quando as substâncias alcatroadas são retiradas do esqueleto do carvão, tornando-o carvão vegetal ativado.

4ª - Os processos de carbonização e ativação posterior envolvem, no mínimo, a queima de um combustível para iniciar suas etapas, que pode ser oriundo da própria lenha ou madeira a carbonizar.

5ª - A etapa de carbonização pode ser realizada no próprio forno de ativação –se houver uma distribuição adequada de temperaturas ao longo do percurso da biomassa, do carvão e carbono ativado resultantes, e os gases gerados e efluentes são queimados proporcionando uma fonte de energia para o próprio processo ou retorta.

6ª - Os principais parâmetros que determinam a qualidade e o rendimento do carvão produzidos na pirólise são: velocidade de aquecimento, temperatura final, pressão, tempo de residência à temperatura final e características da matéria prima utilizada.

7ª - A ativação pode ser realizada por ação química ou físico-química. Nos dois casos, o agente ativador retira átomos de carbono internos das partículas existentes de carvão, aumentando, o tamanho e o número de poros.

8ª - A ativação química é usada, principalmente, nos carvões vegetais oriundos de madeiras e caroços de azeitonas, e ocorre simultaneamente à carbonização (complementar).

9ª - A ativação por arraste com vapor d'água industrial é usada na fabricação de carbono ativado a partir de turfa, carvão, cascas de cocos, linhito, antracito ou madeira.

10ª - A escolha do gás CO₂ como agente de ativação baseia-se no fato de ser limpo e fácil de manipular e é preferida para atividades laboratoriais de ativação de carvões vegetais, pois, também facilita o controle do processo devido às velocidades lentas de reação química em torno dos 800 °C.

11ª - Os principais fatores que afetam o processo de ativação (química) incluem o controle a temperatura, a concentração do agente ativador e o tempo de ativação.

12ª - Os fornos verticais de ativação de carvões podem empregar câmaras ou soleiras rotatórias e leitos fluidizados, ambos para partículas finas.

13ª - Os fornos horizontais rotatórios propiciam melhor misturação (ou contatos físicos) entre o agente ativador e o coque pré-produzido, além de manter um perfil de temperaturas mais uniforme ao longo de seu comprimento interno.

7.12 – CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 7

1ª – **Na destilação seca ou pirólise ou carbonização da madeira, a lenha é aquecida em algum tipo de vaso fechado (retorta), isento da presença de oxigênio do ar atmosférico** que é convertida em gases da combustão e cinzas.

2ª - **A madeira decompõe-se numa variedade de substâncias**, sendo a principal o **carvão vegetal**. **Os produtos líquidos e gasosos da destilação seca** podem ser coletados a partir dos vapores quentes emitidos da retorta, após passagem através de um condensador resfriado com água. Os **gases não-condensáveis** – formadores do **“gás da madeira”** que saem do condensador são geralmente queimados para recuperar a energia térmica e química.

3ª - Os **carbonos ativados ou ativos** são carbonos que sofreram um tratamento complexo para aumentar suas propriedades adsorptivas.

4ª - Os **carbonos ativados com uma estrutura microporosa podem ser eficientes para remover odores leves causadores de impurezas nos gases, mas serem ineficientes para remover compostos formadores de cores fortes em soluções líquidas.**

5ª – A eficiência e a qualidade da produção do carvão vegetal ou ativado estão relacionadas com o controle das etapas endotérmicas e exotérmicas de transferência de calor, durante a carbonização da madeira.

6ª – A carbonização apresenta **três estágios principais: a secagem da madeira; o aumento da temperatura até 270 °C para iniciar a pirólise espontânea e auto-sustentável** que libera o calor para manter o processo em andamento; **o aquecimento final no intervalo de 500 a 550 °C** para remover o alcatrão residual nos poros da estrutura de carbono do carvão vegetal previamente formado e aumentar o teor de carbono fixo até um valor aceitável de carvão vegetal de boa qualidade.

7ª - **Antes de serem ativados**, os materiais carbonosos que possuem alto teor de voláteis, devem passar por um **processo de pirólise** sob temperaturas inferiores a 700°C em ausência de oxigênio, para serem removidos gases e vapores, que resultará em aumento do teor de carbono fixo do material.

8ª - **A velocidade de aquecimento, temperatura final, pressão, tempo de residência à temperatura final e características da matéria prima** utilizada são os parâmetros que determinam o rendimento e a qualidade do carvão produzido na pirólise.

9ª – Para a ativação utiliza-se agente ativador, no qual retira átomos de carbono internos, aumentando, o tamanho e o número de poros. **A ativação pode ser realizada por ação química ou físico-química.**

10ª - Na ativação com reagentes de **ativação química**, **o material é impregnado com um reagente ativador na forma de uma solução concentrada. A ativação gasosa consiste no tratamento do material carbonizado com gases ou vapores oxidantes (em geral oxigênio, dióxido de carbono e vapor d'água) sob altas temperaturas.**

11ª – Os tipos mais comuns de **foros de ativação industrial de carvões** são: os foros verticais, horizontais rotatórios e de leito fluidizado.

12ª - Cada **forno vertical** pode conter quatro seções: **secagem, carbonização, ativação e resfriamento**. O carvão ativado, já resfriado, é retirado da parte inferior do forno. O sistema de aquecimento é externo e utiliza a queima dos gases produzidos na carbonização e na ativação como fonte de energia.

13ª - Os **foros horizontais rotatórios** apresentam melhor misturação (contatos físicos) entre o agente ativador e o coque pré-produzido, além de manter um perfil de temperaturas mais uniforme ao longo de seu comprimento interno. O material a ser ativado e o gás ativador podem ser introduzidos em contra ou co-corrente, dependendo do processo.

14ª - Os **foros em leito fluidizado** são utilizados com partículas de pequenas dimensões.

7.13 - REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 7

AHMADPOUR, A, D.O., D.D. – **The Preparation of Activated Carbons from Coal by Chemical and Physical Activation** – in: CARBON, Vol. 34, no-4, pp.471-479, 1996 – citado por Capobianco (2005).

ALPHACARBO – **Carvão Ativado** – Alphacarbo Industrial Ltda, Guarapuava, PR, Disponível em <http://www.alphacarbo.com.br> ; Acesso em 06 de abril de 2010.

BANSAL, R.C., DOMNET, J.B., STOECKLI, F. – **Active Cabon Marcel Dekker, Inc.**, v.1, 1989 – citado por Bezzon (1998).

BEZZON, G., - **Avaliação de possíveis impactos energéticos e ambientais derivados da introdução de novas tecnologias para obtenção eficiente de carvão vegetal e carvão ativado** - Tese de Doutorado, 1998, Universidade Estadual de Campinas, SP.

CAPOBIANCO, G. - **Desenvolvimento de peneiras moleculares de carbono a partir de recursos de biomassa renováveis** - Tese de Doutorado, 2005, Universidade Estadual de Campinas, SP

CPL - **Production Operations and Processing Techniques; Properties of Activated Carbon e Summary of Typical Applications** - CPL CARBON LINK - extraído de www.activated-carbon.com em 16 de agosto de 2010.

CUESTA, A., MARÍNEZ-ALONSO, A., TÁSCON, J.M.D. – **Correlation between Arrhenius kinetic parameters in the reaction of different carbon materials with oxygen** – Energy & Fuels, v.7, n.6, p.1141-1145, 1993.

CZERNIK, S. – **Fundamentals of Charcoal Production** – IBI Conference on Biochar, Sustainability and Security in a Changing Climate, September 8-10, Newcastle, UK, 2008 - extraído de www.biochar-international.org em 05 de agosto de 2010.

DAI, X., NORBERG, N., ANTAL, Jr., M.J. – **Production of Charcoal and Activated Carbon at Elevated Pressures** – in: Symposium on Materials and Chemicals Synthesis from Fossil and Biomass- Spring ACS Conference, Anaheim, abril 1995 – citado por Bezzon (1998).

DEGEL, H.J. - **Activated Carbon for Solvent Recovery** - Meeting of the European Rotogravure Association Engineers Group Mulhouse/France. 20/21 March 1990.

DOMAC, J. e TROSSERO, M. (Editors) e SIEMONS, R. (Colaborador) – **Industrial Charcoal Production** – FAO TCP/CRO/3101 (A) Development of a sustainable charcoal industry – North-West Croatia Regional Energy Agency, Zagreb, Croatia, June 2008.

ESSENHIGH, R.H. – **Rate Equations for The Carbon – Oxygen Reaction: an Evolution of the Langmuir Adsorption Isotherm at Atmospheric Pressure** – Energy & Fuels, v.5, n.1, p.41-46, 1991 – citado por Bezzon (1998).

FAO - **Industrial Charcoal Making** - FAO FORESTRY PAPER 63 - FORESTRY DEPARTMENT, FAO CORPORATE DOCUMENT REPOSITORY, 1985 - Extraído de <http://www.fao.org/docrep/x5555e/x5555e03.htm>

JAGTOYEN, M., DERBYSHIRE, F.- **Some considerations of the origins of porosity in carbons from chemically activated** - Carbon, v.31, n.7, p.1185-1192,1993.

JARONIEC, M., LU, X., MADEY, R. – **Use of argon adsorption isotherms for characterization microporous activated carbons** – Fuel – v.69, p.516-518, abril 1990.

KATORI, K., NAGAI, H, SHUKI, Z., AND AMAGI, U.S.- **Patente 3,909,449**, Sept.30,1975

KEIRSSE, H., HARTOYO, W., BUEKENS, A., SCHOETERS, J., JANSSENS, J. – **Preparation of Activated Carbon by the Partial Gasification of Charcoal** – in: RESEARCH IN THERMOCHEMICAL BIOMASS CONVERSION, *Elsevier Applied Science*, v.1, p.531-541, 1988 – citado por Bezzon (1998).

PASTOR-VILLEGAS, J., VALENZUELA – CALAHORRO, C., GOMEZ-SERRANO, V. – **Preparation of**

Activated Carbon from Rockrose Char. Influence of Activation Temperature - *Biomass & Bioenergy* – v.6, n.6, p.453-459, 1994 - – citado por Bezzon (1998).

PIOVESAN, E. – **Carvão ativado une forças para expandir** – *QUÍMICA E DERIVADOS*, pg. 12 a 16, abril (1989).

QUIRINO, W.F. – **Possibilidades de valorização energética dos resíduos da cadeia produtiva madeira e móveis** – I Congresso Paraense de Soluções Tecnológicas e Ambientais como Fator de Competitividade da Cadeia Produtiva Madeira e Móveis,

REINOSO, F.R. – **Absorbentes en la solución de algunos problemas ambientales** – programa CYTED, ISBN: 84-96023-20-6, Madrid, España, 2004 - citado por Capobianco (2005).

SKILLE, JORGAN – **Production of Activated Carbon from Biomass** – Honolulu: Hawaii. Natural Energy Institute, University of Hawaii, 1995 – Tese de Mestrado - – citado por Bezzon (1998).

SOFTEL, R.W. – **Activated Carbon** – in: Kirk-Othmer Concise Encyclopedia of Chemical Technology - A Wiley-Interscience Publication - p.204-205, John Wiley & Sons, NY, 1985.

STRAND, G. – **Activated carbon for purification of alcohol – and some useful distillation tips** – Malmoe, Sweden, 2001.

TORREGROSA, R., MARTÍN-MARTÍNEZ, J. – **Activation of Lignocellulosic Materials: a Comparison Between Chemical, Physical and Combined Activation in Terms of Porous Structure - *Fuel*** – v.70, p. 1173-1180, 1991 - – citado por Bezzon (1998).

ULLMAN'S ENCYCLOPEDIA OF INDUSTRIAL CHEMISTRY – **Activated Carbon** - Wiley-VCH - Weinheim, v.5, p.124-140, 1991

WILDMAN, J., DERBYSHIRE, F. – **Origins and functions of macroporosity in activated carbons from coal and wood precursors.** *Fuel*, v.70, pp.655-661, maio 1991.

ZHANG, T.Y.; WALAWENDER, W.P.; FAN, L.T.; FAN, M.; DAUGAARD, D. E BROWN, R.C. – **Preparation of activated carbon from forest and agricultural residues through CO₂ activation - *Chemical Engineering Journal***, Vol.105, No.1-2, 53-59, 2004.

CAPÍTULO 8

REVISÃO PATENTÁRIA DE EQUIPAMENTOS E PROCESSOS PARA OBTENÇÃO E USO DE CARVÕES ATIVADOS

8.1 – O universo das patentes de coqueificadores

8.2 – Descrições de patentes selecionadas de coqueificadores

8.2.1 - Patente Nº 5.946.342 – Processo e equipamento para produção de carvão ativado

8.2.2 - Patente Nº 6.206.941 – Equipamento e processo para carbonização e ativação de materiais carbonáceos

8.2.3 - Patente Nº 3.434.932 – Método para produção de coque e calor

8.2.4 - Patente Nº 4.126.518 – Método e Forno com câmara inclinada para carbonizar material fluente que contenha carvão

8.2.5 - Patente Nº 4.242.225 – Método e equipamento para produção de carvão ativado

8.2.6 - Patente Nº 5.435.983 – Processo para produção de carvão a partir de madeira e material herbáceo

8.2.7 - Patente Nº 8.304.300 – Processo e instalação para destilação seca de biomassa

8.2.8 - Patente Nº 2.166.225 – Processo e equipamentos para produção de carvão ativado

8.2.9 - Patente Nº 4.935.099 – Processo de fabricação de carvão vegetal

8.2.10 - Patente Nº 4.123.332 – Processo e Equipamentos para tratamento de um material carbonizável sólido pulverizado

8.3 – Constatações do capítulo 8

8.4 – Conclusão do capítulo 8

8.5 – Referências do capítulo 8

CAPÍTULO 8

REVISÃO PATENTÁRIA DE EQUIPAMENTOS E PROCESSOS PARA OBTENÇÃO E USO DE CARVÕES ATIVADOS

8.1 – O UNIVERSO DAS PATENTES DE COQUEIFICADORES

Para atender às finalidades do presente projeto final de graduação - voltado para conceber um coqueificador de cascas de coco verde – foi desenvolvido um trabalho de revisão patentária através de bancos de dados de patentes, tais como *ESPACENET*, *PATENTESONLINE*, *GOOGLEPATENTES* e o *INPI*.

As buscas de modelos patenteados visaram encontrar fornos, retortas ou coqueificadores de simples montagem e capazes de produzir carvão ativado a partir de cascas de coco residuais após o consumo de água de coco.

Várias patentes foram localizadas, mas foram selecionadas quase duas dezenas buscando identificar critérios de construção de fácil montagem e operação, capazes de processar as cascas de coco residuais descritas nos capítulos anteriores.

Foram identificados equipamentos termoquímicos e complementares concebidos para produzir carvões ativados capazes de processar matérias-primas genéricas, específicas e resíduos, a saber:

1º - matérias-primas genéricas – que servem para coqueificar: carvões minerais, biomassas, serragem, resíduos vegetais e urbanos de origem vegetal.

2º - carvão (mineral);

3º - biomassa – madeira, cascas, serragem, folhas etc.;

4º - cascas de coco verde, babaçu etc.

5º - resíduos sólidos urbanos e rurais.

Foram elaboradas as tabelas 3.1, 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 de acordo com os tipos de matérias-primas vislumbrados pelos autores dos pedidos de patentes.

O regime de operação contínuo denota, preliminarmente, a concepção de um equipamento voltado para média grandes instalações industriais, ao passo que os projetados para operar em batelada podem prestar-se ao uso em cooperativas de reciclagem e processamento de pequeno e médio porte.

8.2 – DESCRIÇÕES DE PATENTES SELECIONADAS DE COQUEIFICADORES

Algumas patentes localizadas revelaram-se interessantes e são reproduzidas nas páginas seguintes, em que foram incluídos seus desenhos esquemáticos, componentes e, em alguns casos, os desenhos esquemáticos foram incorporados em fluxogramas de processamento.

A tabela abaixo mostra de forma resumida algumas patentes que tratam de equipamentos e formas de processamento de carvão ativado que utilizam resíduos sólidos e carvão vegetal como fonte de matéria prima das patentes utilizadas como fonte de referência, as quais irão nos orientar na escolha do equipamento proposto.

Tabela 8.1 – Coqueificadores genéricos para obtenção de carvão ativado

PATENTE nº	TÍTULO	MATÉRIA(S)-PRIMA(S)	CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS DO(S) PRODUTO(S)	EQUIPAMENTO(S) E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	CONDIÇÕES OPERACIONAIS TERMOQUÍMICAS	ETAPAS E/OU CRITÉRIOS DE PROCESSAMENTO
WO 2008/6081	Método para preparar carvão ativado usando combustíveis de resíduos orgânicos de alimentos	Resíduos orgânicos de alimentos, cascas de frutos pó de coco carbonizado, e aditivo aglutinante (amido vegetal)	- alto poder calorífico; - resistência térmica constante; - geração de cinzas; - perdas reduzidas de massa.	Forno túnel elétrico com esteira.	Regime contínuo 500°C a 800°C; tempo: 1-3 horas; opera com vácuo	1ª - pré-mistura da matéria-prima em ambiente com N ₂ ; 2ª - mistura do material carbonizado com aglutinante; 3ª - extrusão e moldagem; 4ª - secagem.
3.840.476	Processo para ativação de materiais carbonáceos	Cascas de coco, madeira, caroços, coque de petróleo	Volume maximizado dos poros; Rendimentos nas etapas: 1ª conversão: 15 a 35 % gases; 2ª conversão: 45 a 70% gases;	- leito fluidizado; - ciclone separador do carvão ativado e de emissões gasosas.	Regime contínuo Temperaturas: 1ª conversão: 260 a 430 °C; 2ª conversão: 760 a 900 °C; Pressões nas duas conversões: 10 ≤ P ≤ 75 psia,	1ª - ativação com ar em leito fluidizado na temperatura da 1ª conversão; 2ª - a ativação do coque prossegue com uma corrente gasosa na temperatura da 2ª conversão; 3ª - separação dos gases num ciclone, para posterior recuperação de calor.
5.946.342	Processo e equipamento para produção de carvão ativado	Carvão, cascas de coco, material celulósico, e produtos de petróleo	Carvão ativado	- forno cilíndrico elétrico.	Regime contínuo 400 ≤ T ≤ 1000°C	1ª - uso de uma torre de lavagem 2ª - recuperação de calor: uma unidade de tratamento de resíduos de gás, uma unidade de aquecimento a gás e uma unidade geradora de vapor; 3ª - pós-queima de compostos orgânicos voláteis;
6.206.941	Equipamento e processo para carbonização e ativação de materiais Carbonáceos	Cascas de coco, lascas de madeira, serragem, carvão	Carvão ativado; Gases e vapores (calor gerado será usado para aquecer a coluna)	- funil de alimentação; - reator cilíndrico; - caixa de combustão; - aquecimento com resistências elétricas.	Regime contínuo	- controladores de temperatura

8.2.1 - Patente Nº 5.946.342 – Processo e equipamento para produção de carvão ativado

Processo e equipamento melhorado para produção e reativação de carvão ativado consistindo na passagem de um substrato através de uma ou mais zonas definidas por eletrodos. Energia elétrica passando através do leito de substrato cria calor que promove a devolatilização e ativação do substrato. Vapor, CO₂, ou um gás alternativo podem ser usados para promover o processo de ativação, enquanto outras zonas podem ser preenchidas com gás inerte como N₂ para promover a reação de pirólise. Preferencialmente esses gases passam através do leito num fluxo co-corrente descendente como o carbono para prevenir fluidização (Evan E. Koslow, Weston, Conn, 1998).

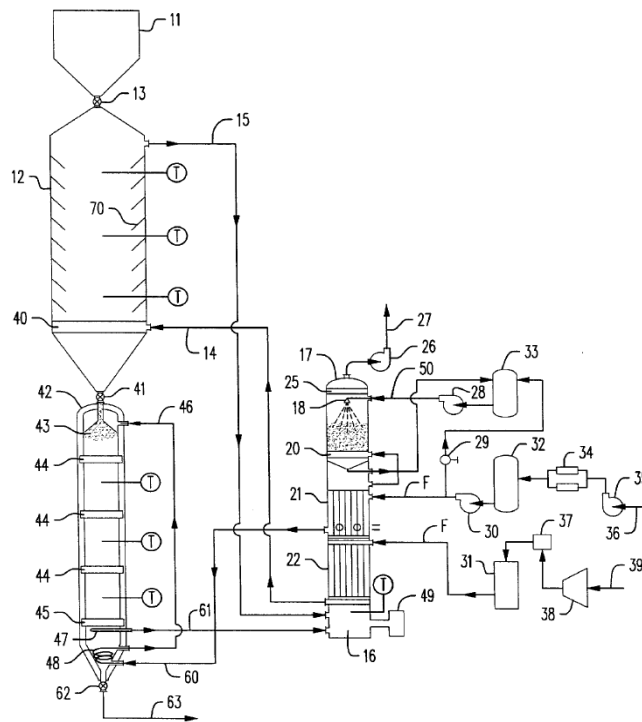


Figura 8.1 – Equipamento para produção de carvão ativado (Evan E. Koslow, Weston, Conn, 1998)

- | | |
|---|---|
| 11. Funil de alimentação | 38. Compressor |
| 12. Forno cilíndrico | 39. Injeção de ar |
| 13. Válvula rotativa | 40. Coletor de distribuição de nitrogênio |
| 14. Entrada de nitrogênio quente | 41. Válvula rotativa |
| 15. Saída de nitrogênio | 42. Forno de produção de carvão ativado |
| 16. Unidade de resíduo de tratamento de gás | 43. Dispositivo de distribuição uniforme |
| 17. Torre de lavagem de gases | 44. Eletrodos superiores |
| 18. Água para lavagem dos gases | 45. Eletrodo inferior |
| 20. Coletor de gases | 46. Entrada de vapor |
| 21. Gerador de vapor | 47. Coletor de vapores e gases residuais |
| 22. Aquecedor | 48. Resistência |
| 25. Coletor de distribuição de água | 49. Incinerador |
| 26. Soprador | 50. Corrente de água |
| 27. Saída de gases limpos | 60. Corrente de vapor |
| 28. Bomba | 61. Corrente de resíduos gasosos |
| 29. Tubulação para passagem de água | 62. Válvula rotativa |
| 30. Bomba | 63. Saída do produto |
| 31. Separador de nitrogênio | 70. Chicanas |
| 32. Tanque de água | |
| 33. Tanque de água | |
| 34. Unidade de osmose reversa | |
| 35. Bomba | |
| 36. Injeção de água | |
| 37. Filtro | |

8.2.2 - Patente Nº 6.206.941 – Equipamento e processo para carbonização e ativação de materiais carbonáceos

Equipamento para conversão de matéria-prima carbonácea em produto carbonizado e ativado. Inclui um dispositivo para aquecimento da matéria-prima para formar o produto carbonizado, equipamento para ativação e fornecimento de subprodutos da ativação ao dispositivo para ajudar no aquecimento. O equipamento aquece uma coluna de matéria-prima carbonácea para que ocorra a pirólise, formando o produto carbonizado, vapores e gases. Fluxo ascendente dos gases e vapores são contidos de modo que fluam com o produto carbonizado pela parte inferior da coluna onde são queimados em uma caixa de combustão e os gases quentes resultantes são usados para aquecer a coluna através de um tubo (Du Plessis, 1998).

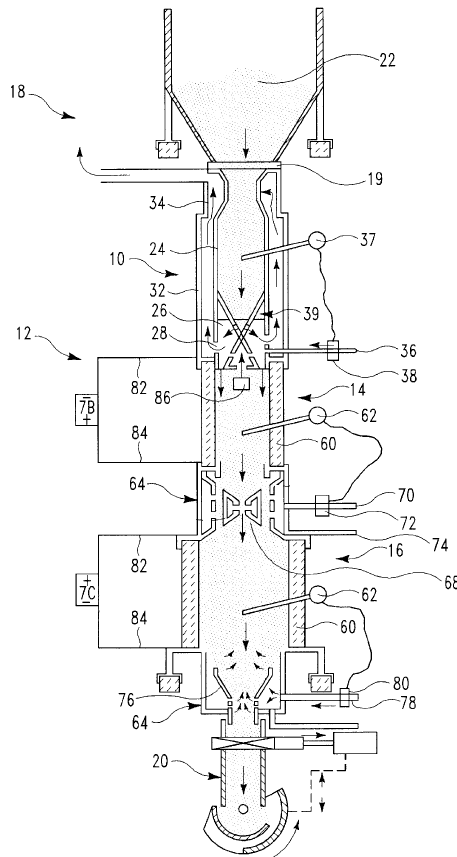


Figura 8.2 – Equipamento para carbonização e ativação de materiais carbonáceos
(Du Plessis, 1998)

- | | |
|---|-------------------------|
| 10. Seção de carbonização | 68. Orifício central |
| 12. Reator | 70. Tubo |
| 14. Seção superior do reator | 72. Válvula |
| 16. Seção inferior do reator | 74. Tubo |
| 18. Funil de alimentação | 76. Cone central |
| 19. Válvula | 78. Tubo |
| 20. Depósito de carvão ativado | 80. Válvula |
| 22. Matéria prima | 82. Terminal elétrico |
| 24. Tubo (passagem de gases) | 84. Terminal elétrico |
| 26. Caixa de combustão | 86. Eletrodo de grafite |
| 28. Abertura da caixa de combustão | |
| 32. Tubo | |
| 34. Saída de gases | |
| 36. Tubo (entrada de ar para combustão) | |
| 37. Termopar | |
| 38. Válvula de controle de temperatura | |
| 39. Separador de gás | |
| 60. Parede refratária | |
| 62. Termopar | |
| 64. Camisa de vapor | |

Tabela 8.2 – Coqueificadores de carvão mineral para obter carvão ativado

PATENTE Nº	TÍTULO	MATÉRIA(S)-PRIMA(S)	CARACTERÍSTICAS DO(S) PRODUTO(S)	EQUIPAMENTOS E OS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	CONDIÇÕES OPERACIONAIS TERMOQUÍMICAS	ETAPAS DE PROCESSAMENTO E/OU CRITÉRIOS
3.434.932	Método para produção de coque e calor	Carvão	Coque com baixo teor de voláteis; 7% a 10% de voláteis são reduzidos até 3,65% ou menos	Forno de eixo vertical.	Regime contínuo Temperaturas: no final da esteira: 760 a 870 °C; no topo da coluna: 1100 a 1370 °C.	1ª - esteira alimentadora, anterior ao forno, com aquecimento.
4.867.848	Processo e aparelho para produzir coque moldado em forno vertical aquecido Eletricamente	Carvão	Coque	Forno vertical (parte superior para saída de gases e na parte inferior para descarregamento do coque); Sistema de aquecimento elétrico.	Regime batelada 800°C a 1100°C	1ª - forno com três zonas: pré-aquecimento, carbonização e resfriamento; 2ª - recuperação de gases e tratamento com: resfriamento; lavagem; remoção de alcatrão, água condensada e naftaleno. 3ª - pré aquecimento para eliminar voláteis;
4.246.071	Processo para recuperação de calor a partir do resíduo de coque	Carvão	Coque		Regime contínuo *150 ≤ T1 ≤ 250 °C; T para coqueificação: ~ 1000 ° C	1ª - secagem prévia* do carvão na temperatura T ₁ , com gases da coqueria; 2ª - alimentação seca do forno de coque; 3ª - coqueificação; 4ª - refrigeração numa torre de resfriamento;
4.242.225	Método e equipamento para produção de carvão ativado	Carvão	Carvão ativado	Alto-forno	Regime contínuo Temperatura do alto-forno: 1100 - 1300° C; Temperatura de entrada do carvão no forno de ativação: 800 a 900 °C	1ª - carvão entra aquecido no forno de ativação; 2ª - secagem (reduz umidade de ~60% a 12%); 3ª - retirada de grãos com Dp < 1mm); 4ª - ativação.

8.2.3 - Patente Nº 3.434.932 – Método para produção de coque e calor

Carvão é alimentado numa esteira móvel horizontal através de um forno de carbonização. Quantidades limitadas de ar são alimentadas ascendentemente e passam através do carvão na esteira para queimar apenas parte dos voláteis, deixando uma quantidade comparativamente grande de voláteis no carvão parcialmente carbonizado.

O carvão parcialmente carbonizado, ou seja, coques altamente voláteis caem da esteira num forno vertical, que se prolonga para baixo a partir da parte traseira do forno de carbonização, para formar uma coluna que desce progressivamente e é finalmente descarregada no centro do forno para um resfriador.

Formam-se correntes térmicas na parte traseira do forno de carbonização de modo que o oxigênio não reagido da retorta mais o oxigênio não reagido entranhado no coque queimam violentamente com os voláteis do coque à medida que este cai no topo da coluna do forno vertical, criando uma camada de queima intensa sobre o topo da chaminé, arrastando e consumindo a maioria dos voláteis remanescentes no coque (Marsfield, 1964).

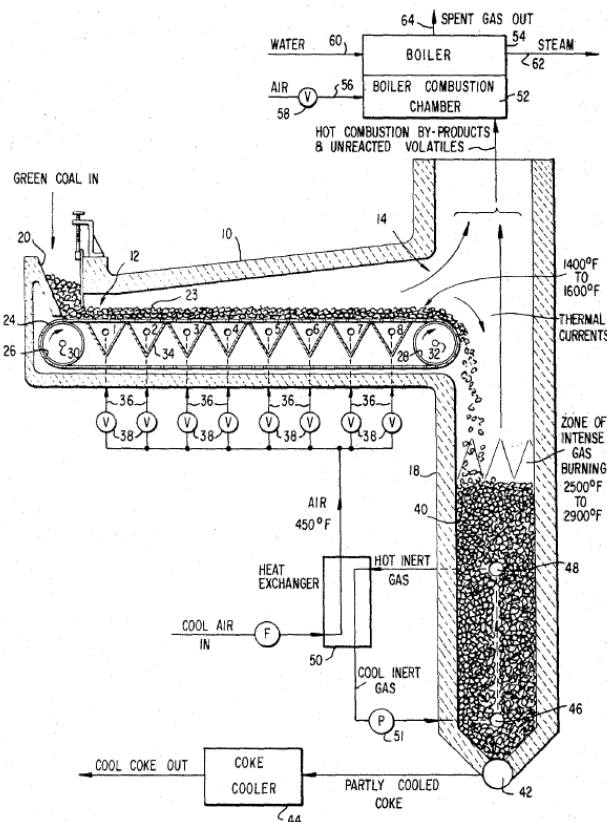


Figura 8.3 – Equipamento para produção de coque e calor (Marsfield, 1964)

- | | |
|----------------------------|----------------------------------|
| 1-8. Zonas de separações | 44. Resfriamento do coque |
| 10. Forno de carbonização | 46. Entrada de gás inerte |
| 12. Extremidade de entrada | 48. Saída de gás inerte |
| 14. Extremidade de saída | 50. Trocador de Calor |
| 18. Forno eixo vertical | 51. Bomba |
| 20. Funil de alimentação | 52. Câmara de combustão |
| 23. Leito de matéria prima | 54. Caldeira |
| 24. Esteira | 56. Entrada de ar para combustão |
| 26. Correia dentada | 58. Válvula |
| 28. Correia dentada | 60. Entrada de água |
| 30. Eixo da esteira | 62. Saída de vapor |
| 32. Eixo da esteira | 64. Saída de gás |
| 34. Caixa de ar | |
| 36. Conduítes | |
| 38. Válvulas | |
| 40. Coluna de coque | |
| 42. Eixo do forno | |

8.2.4 - Patente Nº 4.126.518 – Método e Forno com câmara inclinada para carbonizar material fluente que contenha carvão

Método e equipamento para coqueificar ou carbonizar madeira, turfa, resíduos, detritos ou semelhantes, por meio de gases em uma câmara inclinada através do qual se move o material a partir do topo para o fundo sob a influência da gravidade. O gás é conduzido do fundo para a parte superior em fluxo contracorrente com o material através da câmara de tratamento.

Os gases constituintes de uma mistura de um suprimento de ar e gás de destilação escapando do material no estado gasoso para a mistura de gás quente, são exclusivamente conduzidos para a câmara de tratamento acima do material em contato direto imediatamente devido à ascensão natural e o calor necessário para coqueificar ou carbonizar o material é produzido apenas na câmara de tratamento pela combustão do gás de destilação com o ar injetado (Da Silva Bento, 1977).

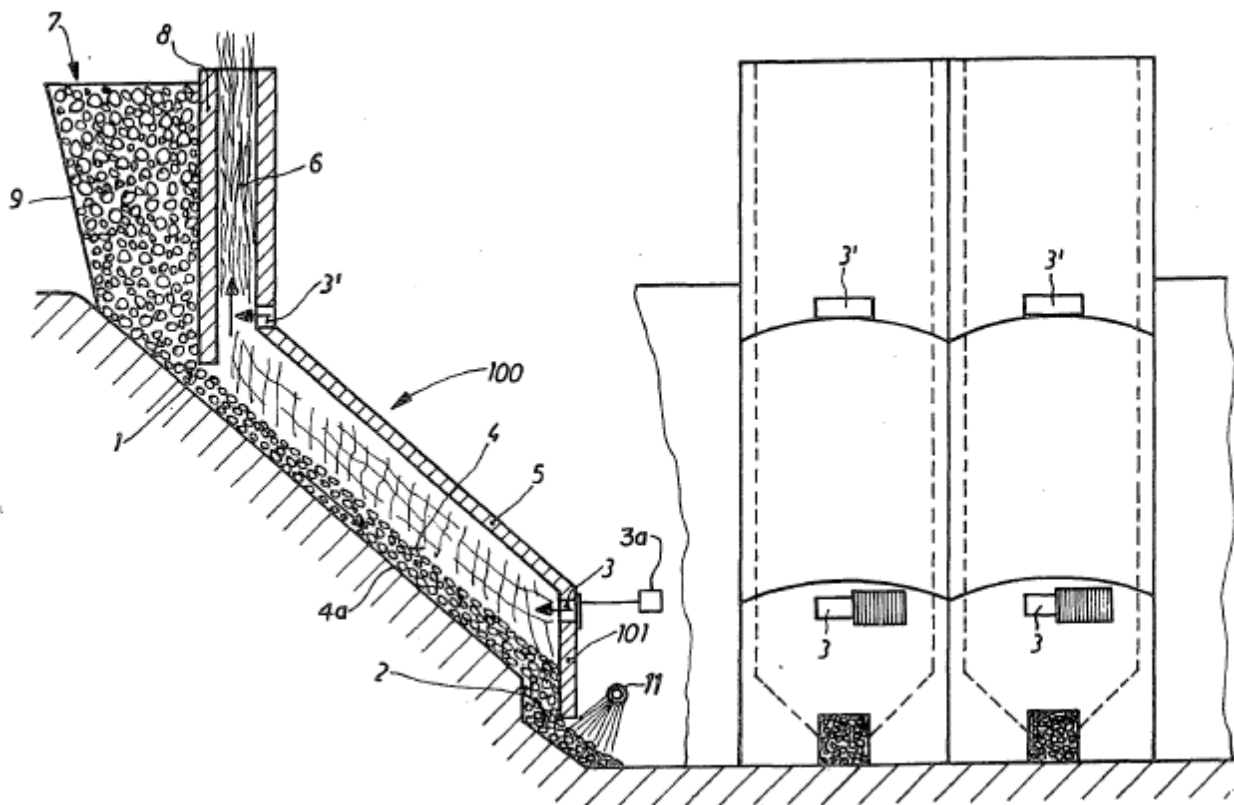


Figura 8.4 – Equipamento para coqueificar ou carbonizar (Da Silva Bento, 1977)

- | | |
|--|--|
| 1. Entrada do forno | 9. Parede do funil |
| 2. Saída do forno | 10. Plataforma oscilante |
| 3. Entrada primária de ar | 11. Bico pulverizador de água |
| 3a. Controlador de entrada de ar | 100. Forno inclinado |
| 3'. Entrada secundária de ar | 101. Região superior da parede do fim do forno |
| 4. Superfície do material coqueificado | |
| 4a. Superfície do forno | |
| 5. Parte superior do forno | |
| 6. Chaminé | |
| 7. Funil de alimentação | |
| 8. Parede do forno | |

8.2.5 - Patente Nº 4.242.225 – Método e equipamento para produção de carvão ativado

Trata-se de um forno de ativação de coque. Parte dos gases residuais são alimentados ao reator de ativação para agir como um gás de aquecimento. Esses gases quentes residuais são passados para uma caldeira de recuperação. Coque com menor capacidade de adsorção podem ser alimentados no forno com carvão ou sozinho diretamente no reator para reativação (Wolfrum,1979).

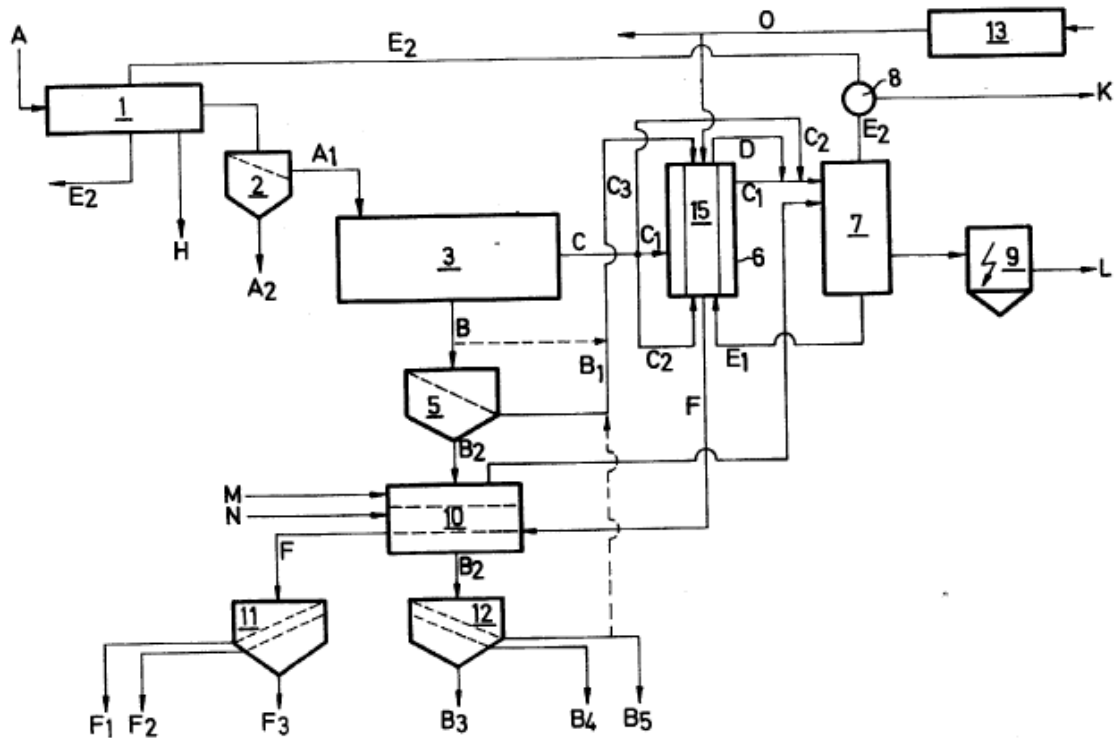


Figura 8.5 – Equipamento de ativação de coque (Wolfrum, 1979)

- | | | |
|--|--|---------------------------------------|
| 1. Forno de secagem | A1. Fração remanescente | D. Gás residual da câmara de ativação |
| 2. Classificador de grãos | A2. Grão com menos de 1mm | E1. Vapor produzido na caldeira |
| 3. Alto-forno | B. Coque | E2. Vapor de escape |
| 5. Classificador de grãos | B1. Grão de 1 a 6 mm | F. Carvão ativado |
| 6. Reator de ativação | B2. Grão com menos de 1mm | F1. Frações de carvão ativado |
| 7. Caldeira de resíduos | B3. Frações de grãos finos de carvão | F2. Frações de carvão ativado |
| 8. Turbina | B4. Frações de grãos finos de carvão | F3. Frações de carvão ativado |
| 9. Precipitador eletrostático | B5. Frações de grãos finos de carvão | H. Vapores |
| 10. Sistema de arrefecimento | C. Gás residual do alto-forno | K. Energia elétrica |
| 11. Classificador de grãos | C1. Parte dos resíduos do fluxo de gás | L. Gás residual |
| 12. Classificador de grãos | C2. Parte dos resíduos do fluxo de gás | M. Entrada de água |
| 13. Dispositivo para produzir peças em forma de briquetes ou pellets | | N. Entrada de ar |
| 15. Câmara de ativação | | O. Briquetes ou pellets |
| A. Carvão bruto | | |

Tabela 8.3 – Coqueificadores de biomassa para obter carvão ativado

PATENTE nº	TÍTULO	MATÉRIA(S)-PRIMA(S)	CARACTERÍSTICAS DO(S) PRODUTO(S)	EQUIPAMENTOS, CRITÉRIOS E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	CONDIÇÕES OPERACIONAIS TERMOQUÍMICAS	ETAPAS DE PROCESSAMENTO E/OU CRITÉRIOS
5.435.983	Processo de produção de carvão a partir de madeira e material vegetal herbáceo	Madeira, plantas vegetais ou biomassa	35% a 50 % sólidos ≤ 25% material volátil poder calorífico: 13000 Btu/lb	- retorta cilíndrica vertical com abertura central selante no topo; - aquecimento interno; - controle da pressão interna; - leito móvel de acomodação dos pedaços de biomassa interna do aquecedor para encher e esvaziar o volume útil.	Regime batelada T > 390°C; 15 ≤ P ≤ 150 psig	- sequências de carregamento e descarga alternadas pelo uso de dois cestos; - remoção das emissões gasosas e cinzas.
8.304.300	Processo e instalação para destilação seca de biomassa	Biomassa	50 a 80 % de carvão pulverizado a 200 mesh	- retorta tubular com casco cerâmico ou metálico, com pistões ou rosca sem fim; - isolamento térmico externo; - bocais laterais de saída de gases e condensáveis; - transportador helicoidal; - trocador de calor envolvido por camisa de circulação de líquido refrigerante	Regime contínuo Temperatura de carbonização: 300 ≤ T ≤ 800°C	- aquecimento da biomassa no reator até a T de carbonização em presença de uma quantidade controlada de O ₂ para evitar excesso de combustão; - mover e revolver continuamente a biomassa; - coleta de gases e condensáveis

8.2.6 - Patente Nº 5.435.983 – Processo para produção de carvão a partir de madeira e material herbáceo.

Um processo de batelada melhorado para conversão de madeira e material herbáceo produz carvão, em base de peso seco na faixa de aproximadamente 35-50%, tendo um conteúdo de matéria volátil de cerca de 25% ou menos, e valor de combustão de 13.000 btu/libra. O processo de batelada pode ser conduzido em 2 horas ou menos. Com quase instantâneo recarregamento para as próximas bateladas sem substancial resfriamento do reator utilizado no processo e sem exposição do carvão quente processado ao ar ou O₂, suficiente para causar combustão na retirada do reator (Antal, Jr., 1993).

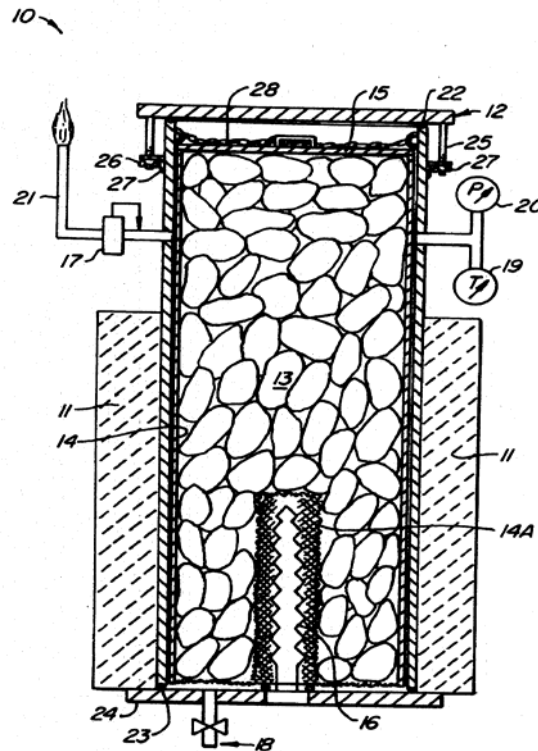


Figura 8.6 – Equipamento para produção de carvão (Antal, Jr., 1993)

10. Reator Cilíndrico
11. Isolante
12. Entrada com abertura para cima
13. Material Carbonáceo
14. Cesto
- 14a. Tela
15. Cesto
16. Aquecedor
17. Regulador de pressão
18. Válvula de despressurização
19. Sensor de temperatura
20. Sensor de pressão
21. Remoção de gases e vapor
22. Anel de selagem
23. Anel de selagem
24. Placa inferior
25. Parafuso de vedação
26. Porca de parafuso
27. Suporte
28. Corrente

8.2.7 - Patente Nº 8.304.300 – Processo e Instalação para Destilação Seca de Biomassa

Compreende as etapas de: alimentar continuamente a biomassa, na condição finamente particulada, pela abertura de entrada extrema de um reator tubular, aquecer a biomassa no interior do reator até que a mesma alcance uma temperatura de carbonização, em presença de uma quantidade controlada de oxigênio, deslocar e revolver continuamente e simultaneamente a biomassa ao longo do interior do reator, enquanto se processa o aquecimento da mesma, coletar os gases e condensáveis e resfriar (Kirkland, 1985).

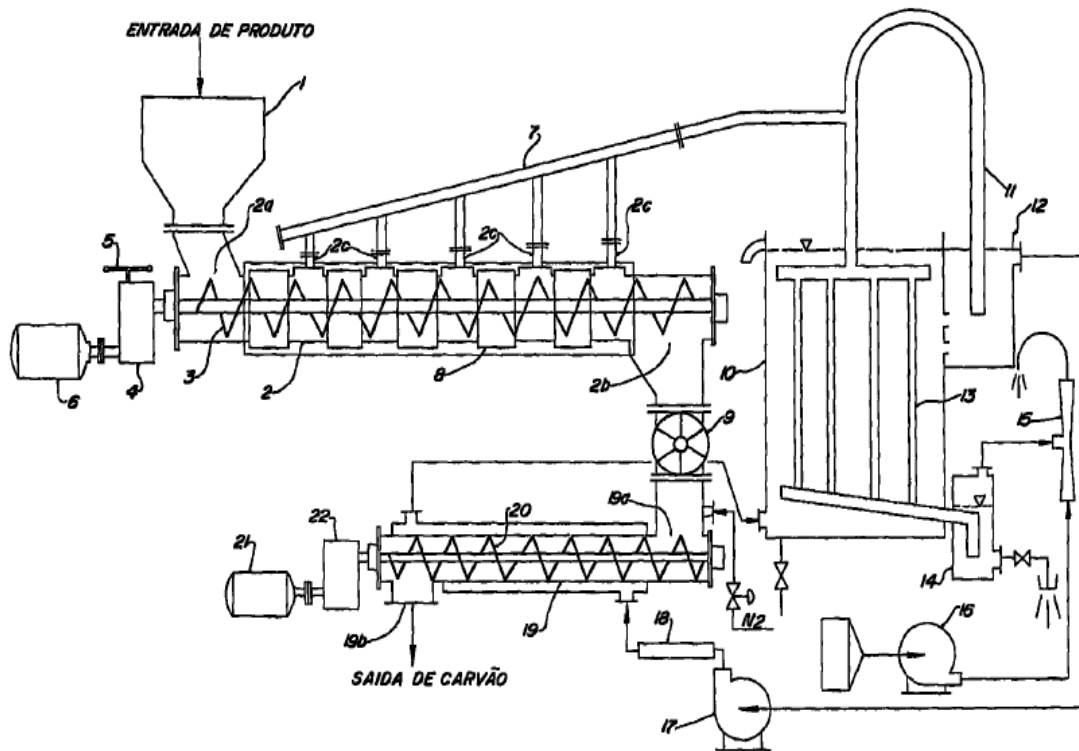


Figura 8.7 – Equipamento para destilação seca de biomassa (Kirkland, 1985)

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> 1. Tremonha de alimentação 2. Reator tubular 2a. Abertura de entrada 2b. Abertura de saída 2c. Bocais de saída de gases e condensáveis 3. Transportador helicoidal 4. Variador de velocidade 5. Regulador de tempo de residência 6. Motor elétrico 7. Tubulação de coleta de gases 8. Resistência elétrica 9. Válvula rotativa 10. Dispositivo de condensação 11. Dispositivo anti-explosão 12. Tanque anti-explosão 13. Elemento de condensação | <ul style="list-style-type: none"> 14. Tanque de coleta para líquido pirolenhoso condensado 15. Dispositivo formador de vácuo 16. Ventilador 17. Bomba de refrigeração 18. Dispositivo equalizador 19. Trocador de calor 20. Transportador helicoidal 19a. Entrada de produto carbonizado 19b. Saída de produto carbonizado 21. Motor 22. Variador de velocidade |
|---|---|

Tabela 8.4 – Coqueificadores de cascas de coco para obtenção de carvão ativado

PATENTE Nº	TÍTULO	MATÉRIA(S)-PRIMA(S)	CARACTERÍSTICAS DO(S) PRODUTO(S)	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	CONDIÇÕES OPERACIONAIS TERMOQUÍMICAS	ETAPAS DE PROCESSAMENTO E/OU CRITÉRIOS
5.064.805	Produção de carvão ativado de alta qualidade	Casca de coco	Grande área superficial e baixo teor de enxofre; Dp ~ 100 mesh.	Forno vertical com agitação	Regime Batelada 1º aquecimento: ~ 250C; 2º aquecimento: 500 ≤ T ≤ 900°C	<ul style="list-style-type: none"> - misturar material carbonáceo e ativador na proporção ponderal entre 1:2 e 1:6; - ativador: KOH granulado hidratado com teor de água de 2 a 25% p/p, - após ativar, resfriar o produto à T ambiente e lavar várias vezes com água para remoção de KOH

Tabela 8.5 – Coqueificadores de madeira, celulósicos, turfa e seus resíduos

PATENTE Nº	TÍTULO	MATÉRIA(S)-PRIMA(S)	CARACTERÍSTICAS DO(S) PRODUTO(S)	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	CONDIÇÕES OPERACIONAIS TERMOQUÍMICAS	ETAPAS DE PROCESSAMENTO E/OU CRITÉRIOS
2.166.225	Processo e equipamento para produção de carvão ativado	Madeira ou material celulósico similar	Carvão ativado;	Descrição não divulgada	Regime Contínuo Pré secagem: $100 \leq T \leq 125^{\circ}\text{C}$; Carbonização: $300 \leq T \leq 400^{\circ}\text{C}$; Ativação: $1000 \leq T \leq 1100^{\circ}\text{C}$.	- pré-secagem da madeira; - carbonização; - ativação do carvão; - obtenção de licor pirolenhoso concentrado; - obtenção de alcatrão.
4.935.099	Processo de fabricação de carvão vegetal	Pedaços de madeira	Carvão vegetal	Reator vertical.	Regime Contínuo Combustão dos gases emitidos na carbonização: $800 \leq T \leq 1250^{\circ}\text{C}$ Refrigeração dos gases de combustão $450 \leq T \leq 900^{\circ}\text{C}$.	- carga introduzida na retorta; - injeção de gás quente para carbonização; - produção de vapores e gases da carbonização; - alimentação dos gases de carbonização para uma câmara de combustão; - parte dos gases de combustão são resfriados; - os gases de escape do topo são retirados afim de evitar formação de condensado.
4.280.878	Estrutura e processo para reaproveitar calor do mecanismo de produção de carvão	Resíduos de madeira	Recuperar os produtos da combustão dos resíduos de madeira	- fornos secadores de madeira; - fornalha cilíndrica fixa com entradas laterais de ar axiais; - pós-queimador; - controladores de temperatura.	Regime Contínuo T na pós-queima: 538°C	- carbonização forno; - pós-queima dos gases emitidos; - gases quentes são distribuídos através dos fornos de secagem.
4.126.518	Método e forno com câmara inclinada para carbonizar material fluente que contenha carvão	Madeira, turfa, Resíduo, detritos ou semelhantes	Coque	Forno cilíndrico inclinado fixo	Regime contínuo	- matéria prima é introduzida e vai do topo ao fundo por ação da gravidade; - desgaseificação ou volatização; - carbonização.

8.2.8 - Patente Nº 2.166.225 – Processo e equipamentos para produção de carvão ativado

Esta invenção tem como objetivos produzir um carvão ativado superior a partir da madeira por um novo processo contínuo que recupera todos os produtos em excesso que tenham valor, desenvolver um novo aparelho adaptado para produção contínua do carvão ativado, diretamente a partir da madeira, em 3 etapas individualmente controlada: Pré-secagem, carbonização da madeira pré-seca e ativação do carvão produzido. Produzir um carvão ativado de qualidade superior, especialmente adaptado para purificação de água (Twining, 1937).

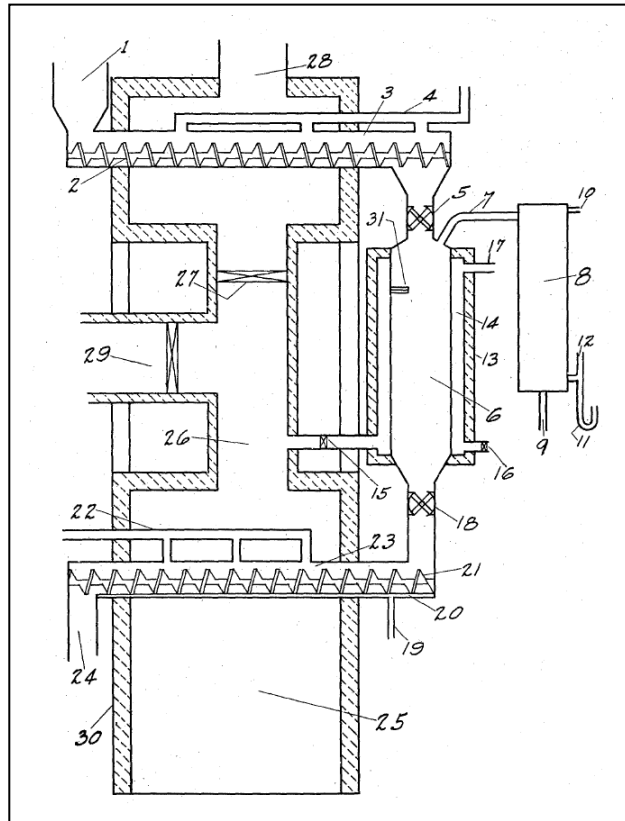


Figura 8.8 – Equipamento para produção ativado a partir da madeira (Twining, 1937)

1. Entrada de madeira úmida
2. Parafuso sem fim
3. Camada de pré-aquecimento
4. Saída de vapor
5. Válvula
6. Carbonizador
7. Saída de gases
8. Condensador
9. Entrada de água
10. Saída de água
11. Saída de gases ácidos condensados
12. Saída de ar (não condensado)
13. Parede de tijolo
14. Ar
15. Válvula de gás quente
16. Entrada de ar frio
17. Saída de ar
18. Válvula
19. Entrada de vapor
20. Camisa
21. Parafuso sem fim
22. Saída de gases utilizados na pré-secagem
23. Ativador
24. Saída do produto final
25. Câmara de combustão
26. Passagem de gases
27. Válvula
28. Saída de gases
29. Saída de gases remanescentes
30. Parede de tijolo
31. Termostato

8.2.9 - Patente Nº 4.935.099 – Processo de fabricação de carvão vegetal

Pedaço de madeira é carbonizada, em uma retorta, que é operada por meio de lavagem de gás quente. A madeira é carregada para a retorta em seu topo. Carvão vegetal é retirado na parte inferior da retorta. Gases de exaustão que contenham gases e vapores produzidos por carbonização são retirados do topo da retorta e são alimentados diretamente para uma câmara de combustão. Em uma primeira seção da câmara de combustão, os gases de exaustão são queimados com o ar a temperaturas de 800 ° a 1250 ° C. Parte do gás de combustão, que é retirado da primeira seção da câmara de combustão é resfriado a temperaturas de 450 ° a 900 ° C. e é alimentado como gás de lavagem para a retorta. Em uma segunda seção da câmara de combustão, os gases de exaustão são completamente queimados com o ar (Weiss et al., 1989).

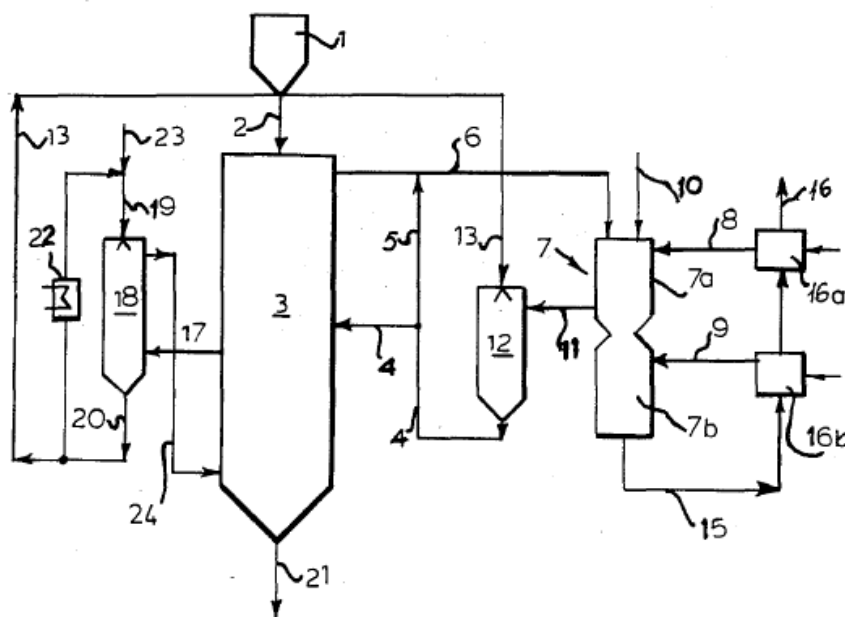


Figura 8.9 – Equipamento - retorta para fabricação de carvão vegetal (Weiss et al., 1989)

- | | |
|-------------------------------------|---|
| 1. Bandeja de alimentação | 13. Entrada de água |
| 2. Linha de alimentação | 15. Saída de gases de combustão |
| 3. Retorta de carbonização | 16. Gases de saída do trocador de calor |
| 4. Entrada de gases | 16a. Trocador de calor |
| 5. Passagem de gases | 16b. Trocador de calor |
| 6. Saída de gases | 17. Saída de gás de refrigeração |
| 7. Câmara de combustão | 18. Refrigeração |
| 7a. 1ª seção da câmara de combustão | 19. Entrada de água de resfriamento |
| 7b. 2ª seção da câmara de combustão | 20. Saída de água de resfriamento |
| 8. Entrada de ar | 21. Saída do produto |
| 9. Entrada de ar | 22. Refrigerador |
| 10. Entrada adicional de ar | 23. Entrada de água |
| 11. Saída de gases de combustão | 24. Saída de gás úmido |
| 12. Refrigeração | |

Tabela 8.6 – Coqueificadores de resíduos sólidos urbanos e rurais

PATENTE Nº	TÍTULO	MATÉRIA(S)-PRIMA(S)	CARACTERÍSTICAS DO(S) PRODUTO(S)	EQUIPAMENTO CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO COQUEIFICADOR	CONDIÇÕES OPERACIONAIS TERMOQUÍMICAS	ETAPAS DE PROCESSAMENTO E/OU CRITÉRIOS
4.123.332	Processo e equipamentos para carbonização de material carbonizável sólido cominuído	Rejeito urbano, aparas de madeira, serragem, carvão granulado, tira de pneus.	Vapor, gases, líquidos, alcatrões e resíduos sólidos (coque, carvão, etc)	- Retorta cilíndrica horizontal; - Sistema de palhetas.	Regime contínuo Pressão ambiente: $400 \leq T \leq 900^{\circ}\text{C}$	- cominuição dos sólidos carbonosos; - carbonização; - uso de palhetas internas para misturar os reagentes.
WO 2008/6081	Método para preparação de carvão usando combustíveis de resíduos orgânicos de alimentos	Combustíveis de resíduos orgânicos de alimentos, cascas, pó de coco carbonizado e aditivo aglutinante (amido vegetal)	- carvão com alto poder calorífico; - resistência térmica constante; - geração de cinzas; - perdas reduzidas de massa.	Forno túnel elétrico com esteira	Regime Contínuo Temperatura $500^{\circ}\text{C}-800^{\circ}\text{C}$; tempo: 1-3 horas; opera com vácuo	- pré-mistura da matéria-prima em ambiente com N_2 ; - mistura do material carbonizado com aglutinante; - extrusão e moldagem; - secagem.
4.937.223	Processo para preparação de carvão ativado	Lignina ou seu produto derivado	Carvão ativado com grande área superficial.	Forno rotativo	$400 \leq T \leq 650^{\circ}\text{C}$; Tempo de reação: 1 - 5 horas	- adição de solução aquosa de um álcali à lignina ou seus derivados; - lavagem e secagem do carvão ativado.
3.951.856	Processo para produção de carvão ativado a partir de carvão aglomerado	Cascas de coco, licores de cozinha usados em fábricas de papel e carvão	Carvão ativado granular	Reator de leito fluidizado	Regime Contínuo T de oxidação: $200 - 370^{\circ}\text{C}$; Tempo de oxidação: 2 horas; T do leito fluidizado: 290°C ; T de carbonização: $540 - 650^{\circ}\text{C}$; T de ativação: $900 - 1070^{\circ}\text{C}$	- prensa de rolo; - transportador parafuso; - controladores de temperatura; - moagem; - compactação; - esmagamento e classificação de tamanho; - oxidação para evitar acreção dentro do reator; - carbonização; - ativação; - adição de água através de bico posicionado acima do leito fluidizado, para controlar a temperatura da reação

8.2.10 - Patente Nº 4.123.332 – Processo e Equipamentos para tratamento de um material carbonizável sólido pulverizado.

Processo e equipamentos para tratamento de um material carbonizável sólido cominuído, tais como: rejeito urbano, serragem, carvão granulado, tiras de pneus e similares em que o material é conduzido para ser pirolísado em uma zona reacional alongada disposta horizontalmente, livre de quaisquer gases contendo O₂ a pressão ambiente e a uma temperatura de 400-900°C. O material é passado através da zona reacional por impulsores tipo pá acopladas em uma haste enquanto é submetido a uma transferência de calor indireta, via uma queima de mistura de ar combustível, agitada espiralmente dentro de uma zona de aquecimento. Durante a pirólise, o material é quimicamente transformado em gases valiosos, produtos líquidos e sólidos (Franz Rotter, Portland, Oreg, 1977).

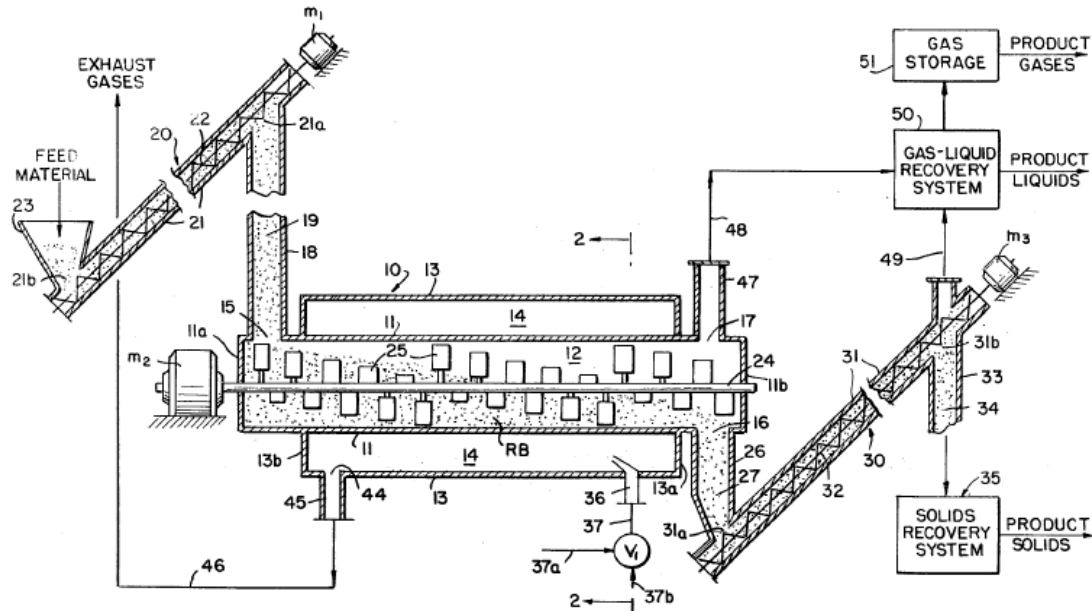


Figura 8.10 – Equipamento para tratamento de um material sólido pulverizado
(Franz Rotter, Portland, Oreg, 1977)

- | | | |
|--------------------------------------|--|--|
| 10. Sistema de reação de pirólise | 22. Transportador helicoidal | 40. Queimadores |
| 11. Retorta cilíndrica ou horizontal | 23. Tremonha | 41. Linha de ar-combustível |
| 11a. Parede de entrada | 24. Eixo rotativo | 41a. Entrada de combustível |
| 11b. Parede de saída | 25. Palhetas | 41b. Entrada de ar |
| 12. Zona de reação de pirólise | 26. Parede | 42. Linha de ar-combustível |
| 13. Revestimento externo | 27. Tubulação de saída de resíduo sólido | 42a. Entrada de combustível |
| 13a. Parede | 30. Transportador de saída do resíduo sólido | 42b. Entrada de ar |
| 13b. Parede | 31. Transportador de saída do resíduo sólido | 43. Linha de ar-combustível |
| 14. Zona de aquecimento | 31a. Extremidade inferior de saída do reator | 43a. Entrada de combustível |
| 15. Entrada de material | 31b. Extremidade superior | 43b. Entrada de ar |
| 16. Saída de resíduo sólido | 32. Transportador helicoidal | 44. Saída de gases |
| 17. Saída gás-vapor | 33. Parede | 45. Parede |
| 18. Tubo de alimentação | 34. Tubulação de saída de resíduo sólido | 46. Saída de gases |
| 19. Coluna de entrada de material | 35. Sistema de recuperação de sólidos | 47. Parede |
| 20. Transportador de alimentação | 36. Queimador | 48. Sistema de recuperação gás líquido |
| 21. Transportador de alimentação | 37. Linha de ar-combustível | 49. Sistema de recuperação gás líquido |
| 21a. Extremidade superior de saída | 37a. Entrada de combustível | 50. Sistema de recuperação gás líquido |
| 21b. Extremidade inferior de entrada | 37b. Entrada de ar | 51. Estocagem de gás |
| | 38. Queimadores | |
| | 39. Queimadores | |

8.3 – CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 8

1ª – As patentes tratam **de equipamentos e formas de processamento de carvão ativado** que utilizam resíduos sólidos e carvão vegetal como fonte de matéria prima.

2ª – Regime de **operação contínuo** denota a concepção de um equipamento voltado para **média grandes instalações industriais. Cooperativas de reciclagem e processamento de pequeno e médio porte** operam em **batelada**.

8.4 – CONCLUSÃO DO CAPÍTULO 8

As patentes estudadas nesse capítulo tem por finalidade auxiliar na concepção de um coqueificador de casca de coco verde para ser implementado em cooperativas.

8.5 – REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 8

ANTAL Jr. – **Process for Charcoal Production from Woody and Herbaceous Plant Material** – Jul. 25, 1995 – patent 5,435,983

AUVIL, S.R.; SCHORK, J.M.; SRINIVASAN, R. – **Air Separation by Pressure Swing Adsorption with a High Capacity Carbon Molecular Sieve** – Aug. 31, 1993 – patent 5,240,474

BAKER, F.S. – **Production of Highly Microporous Activated Carbon Products** – May 16, 1995 – patent 5,416,056

BAKER, F.S.; WANDO, S.C.; BECKLER R.K.; MILLER J.R.; JAN Z. Q. – **Highly Microporous Carbons and Processo of Manufacture** – Oct. 12, 1999 – patent 5,965,483

BAKER, M.E. – **Charcoal Activating Furnace** – Jan. 20, 1942 – patent 2,270,245

BENTO, J.C.S. – **Method and Inclined Chamber Furnace for Carbonizing Fluent Carbon-Containing Material** – Nov. 21, 1978 – patent 4,126,518

BUBEN, D.; ALDRIDGE, C.L. – **Process for the Production of a Carbon Monoxide Containing Gas** - Sept. 11, 1973 – patent 3,758,673

BULOW, M.; RIDGE, B.; DOUGILL, S.B.; PARKYNS, N.D.; SAJIK, W.M. – **Method and Vessel for the Storage of Gas** – Dec. 28, 1999 – patent 6,006,797

CARTER, J.D.; CARTER, E.M. – **Babassu Solid Fuel Process** – Oct. 8, 1970 – patent 3,756,792

CAUGHEY, R.A. – **Gasification Retort** – May 19, 1981 – patent 4,268,274

CORDIER, J.A.G.; DUSSART B.E.A.; ROLLOT P.H. – **Process and Apparatus for Producing Moulded Coke in a Vertical Furnace wich is at least partly electrically Heated** – Sep.19, 1989 – patent 4,867,848

DOMME, A. – **Process for the Manufacture of a Filter Unit** – Apr. 9, 1996 – patent 5,505,892

DU PLESSIS, C.J. – **Apparatus and Process for Carbonization ad Activation of Carbonaceous Materials** – Mar. 27, 2001 – patent US 6,206,941 B1

European Patent Office. Disponível em <http://ep.espacenet.com/> Acesso em 17 Ago. 2009

Google Patents. Disponível em <http://www.google.com/patents/> Acesso em 12 Ago. 2009

HAIK; STEPHEN; MICHEL – **Shell Internationale Research Maatschappij B.V.** – Mar.21,2002 – patent WO 02/22762 A2

HANSEN, T.L. – **Continuous Production Closed Retort Charcoal Reactor** – Aug. 30, 2001 patent US 2001/0017002 A1

HOBBS, J.F.; SMYSER, C. – **Incineration Apparatus** – Sept. 27, 1977 – patent 4,050,900

HOLOUATY, M.O.; JACKSON, C.R. – **Coking Process** – April 25, 1967 – patent 3316155

KIRKLAND, J.W. – **Processo e Instalação para Destilação Seca de Biomassa** – 10.08.1983 – patente nº. PI 8304300

KNAPPSTEIN, J.– **Free Fall Charging Apparatus for a Coking Furnace** – July 21, 1970 – patent 3,682,339

KNAPPSTEIN, J.; FRITZACHE, H.; STRATMANN, J. – **Apparatus for Ejecting coke from a Cooking Furnace** - Aug. 25, 1971 – patent 3,772,155

KNAPPSTEIN, J. – **Method and Apparatus for Charging Material into a Coking Furnace Unit** – Mar. 26, 1969 – patent 3623959

KOSLOW E.E. – **Process and Apparatus for the Production of Activated Carbon** – Aug. 31, 1999 – patent 5,946,342

LEE, W.S. – **Method for Preparing a Charcoal Using Combustible Organic Food Waste Matters** – 22 May 2008 – patent WO 2008/060081 A1

MAC DOWALL, J. D. – **Method of Producing Granular Activated Carbon** – Nov. 10, 1992 – patent 5,162,286

MANSFIELD, V. – **Coke and Heat Producing Method** – March 25, 1969 – patent 3,434,932

MARUMO, C.; HAYATA, E.; SHIOMI, N. – **Process for the Production of Molecular Sieving Carbon** – Oct. 22, 1991 – patent 5,059,578

METRAILER, W.J. – **Process for Activating Carbonaceous Materials** – Oct. 8, 1974 – patent 3,840,476

NAHM, J.J.W.; WYANT, R.E. – **Blast Furnace Slag Spacer** – May 31, 1994 – patent 5,316,083

OKAMURA, M.; TAKEUCHI, M. – **Carbon Material for Electric Double Layer Capacitor, Method of Producing Same, Electric Double Layer Capacitor and Method of Fabricating Same** – Oct. 30, 2001 – patent US 6,310,762 B1

OTOWA, Y. – **Production of High Quality Activated Carbon** – Nov. 12, 1991 – patent 5,064,805

Patentes on line. Disponível em <http://www.patentesonline.com.br/> Acesso em 17 Ago. 2009

PEZ, G.P.; STEYERT, W.A.; VALLEY, C. – **Method for Adsorbing and Storing Hydrogen at Cryogenic Temperatures** – Apr. 8, 1986 – patent 4,580,404

Portal INPI – Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Disponível em <http://www.inpi.gov.br/> Acesso em 12 Ago. 2009

REPIK, A.J.; MILLER, C.E.; JOHNSON, H.R. – **Process for Making Activated Carbon from Agglomerative Coal** – Apr. 20, 1976 – patent 3,951,856

ROTTER, F. – **Process and Apparatus for Carbonizing a Comminuted Solid Carbonizable Material** – Oct. 31, 1978 – patent 4,123,332

SPRENGER G.E. – **Structure and Process for Reclaiming Heat from Charcoal Production Facility** – Jul.28, 1981 – patent 4,280,878

SUTT, Jr. – **Carbon Molecular Sieves and a Process for their Preparation and Use** – Sep. 10, 1985 – patent 4,540,678

TWINING, R.H. – **Process and Apparatus for Preparing Activated Carbon** – April 2, 1937 – patent 2,166,225

WAGENER, D.; FLOCKENHAUS C.; MECKEL, J.F. – **Process for the Recovery of Coke Oven Waste Heat** – Jan. 20, 1981 – patent 4,246,071

WEISS, H.; SCHMALFELD, J. ; DRCHER, I.; ARNHOLD, J. – **Process for Making Wood Charcoal** – Jun. 19, 1990 – patent 4,935,099

WEMNERBERG, A.N.; O'GRADY, T.M. – **Active Carbon Process and Composition** – Apr. 4, 1978 – patent 4,082,694

WILBORN, D. W.; FITZGERALD C.I.; DIPADUA, R.R.; STEWART, G.D. – **Safe and Automatic Method for Preparation of Coke for Rmoval from a Coke Vessel** – Jun.24, 2004 – patent US 2004/0118746 A1

WOLFRUM, E. – **Method and Apparatus for Producing Active Coke** – Dec. 30, 1980 – patent 4,242,225

WORK, J.; JOSEPH, R.T.; BLAKE, J.H. – **Processes for Producing Carbonaceous Materials** – July 7, 1964 – patent 3,140,241

YAMAGUCHI, T. – **Process for Preparing Activated Carbon** – Jun. 26, 1990 – patent 4,937,223

CAPÍTULO 9

CUSTOS E MERCADO DA COQUEIFICAÇÃO DE CASCAS DE COCO E SUA ATIVAÇÃO

9.1 – As faces de uma empreitada para produzir carvão ativado de cascas de coco

9.2 – As matérias-primas residuais para uso energético

9.3 – O mercado de carvão vegetal

9.4 – O mercado de carvão ou carbono ativado

9.5 – Indicativos de viabilidade técnico econômica para produzir carbono ativado

9.5.1– Reator de leito fixo operando em baixas temperaturas

9.5.2 – Comparativo de custos a partir de fornos tipo rabo-quente e fornos cilíndricos verticais em uma unidade de pequeno porte

9.6 – Constatações do capítulo 9

9.7 – Conclusões do capítulo 9

9.8 – Referências do capítulo 9

CAPÍTULO 9

CUSTOS E MERCADO DA COQUEIFICAÇÃO DE CASCAS DE COCO E SUA ATIVAÇÃO

9.1 – AS FACES DE UMA EMPREITADA PARA PRODUIR CARVÃO ATIVADO DE CASCAS DE COCO

O desenvolvimento de uma unidade industrial para produzir carvão ativado a partir do mesocarpo do *coco verde* passa por diversas etapas. Antes da definição do equipamento utilizado na fabricação de carvão ativado é necessário definir a disponibilidade e preço da matéria prima, estimativa de custo de plantas coqueificadoras, mercado consumidor, produtores nacionais e algumas etapas iniciais de beneficiamento da casca de *coco verde*. Após esses levantamentos, é possível elaborar o estudo de viabilidade do uso deste resíduo sólido e definir as especificações técnicas dos equipamentos das etapas principais de pirólise e ativação da biomassa usada como matéria prima.

Se um empreendimento de carbonização de cascas de coco estiver sendo cogitado em bases industriais para receber investimentos, será possível avaliar as tecnologias e equipamentos existentes já conhecidas e comparar os seus respectivos custos de aquisição, para associá-los com os previsíveis custos de aquisição de matérias-primas ou resíduos recicláveis mais a contratação de pessoal e realizar os estudos de viabilidade econômica, incluindo-se os aspectos de venda e distribuição.

No caso de um empreendimento inovador em termos de concepção de equipamento de baixo custo e acessível à criação de cooperativas de mão-de-obra não-especializada, há que se considerar as questões econômicas de modo mais simples.

Sendo o intuito principal viabilizar uma atividade industrial capaz de agregar desempregados e reciclar resíduos urbanos ou industriais para fabricar um produto nobre, como é o caso do carvão ativado a partir de resíduos de cascas de coco, então, entende-se que o retorno do investimento social tem um valor agregado insubstituível.

Dessa forma, visou-se a fabricação de carvão vegetal ativação em usinas de pequeno porte, - semi-artesanal, semi-industrial ou piloto - que requerem, simplesmente, a comparação dos custos de fabricação e operação de equipamentos termoquímicos e o aporte dos custos de aquisição de cascas de coco residuais, e de coleta e transporte desses descartes até a fábrica, e do controle químico da qualidade e comercialização. O estudo dos fornos, retortas e processos de carbonização de biomassa e carvão mineral que precedeu o presente capítulo indica, também, que todos os itens abordados possibilitam desenvolver empreendimentos de qualquer escala de industrialização, inclusive artesanal.

9.2 - AS MATÉRIAS-PRIMAS RESIDUAIS PARA USO ENERGÉTICO

Todas as biomassas podem ser utilizadas, mesmo sendo misturas de substâncias originais. Porém, as biomassas contaminadas com substâncias conservantes; ou substâncias químicas empregadas em colagem e acabamento de peças ou agregadas aos plásticos são inconvenientes ou proibidas para finalidades de uso energético da lenha (Quirino, 2007).

Os seguintes tipos de biomassa no Brasil podem ser considerados como matérias-primas para processos de combustão, pirólise e gasificação com finalidades energéticas (Quirino, 2007):

- bagaço de cana-de-açúcar,
- resíduos de madeira,
- madeira para lenha,
- casca de arroz,
- bambu,
- casca de castanha de caju,
- casca de castanha do Pará,
- coco da Bahia,
- coco babaçu,
- dendê ou palma,
- lixo urbano e podas de árvores,
- outros: milho, fumo, sorgo, café, algodão, etc.

9.3 - O MERCADO DE CARVÃO VEGETAL

O carvão vegetal tem ampla utilização no mercado siderúrgico e para uso doméstico. A obtenção de carvão vegetal utilizando madeira como fonte matéria prima ao longo da história da humanidade gerou grandes devastações em áreas florestais ao longo do planeta.

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal. É uma produção anual de aproximadamente 10 milhões de toneladas, cujo destino principal é a indústria siderúrgica. O carvão é utilizado pela siderurgia nos altos fornos como termo-redutor para a produção de ferro gusa, e nos fornos elétricos, como redutor, para a produção de ferro-ligas. **Aproximadamente, 43% do ferro gusa produzido no Brasil resulta do consumo de carvão vegetal como redutor químico no alto-forno siderúrgico, e, apenas a metade dessa produção de matéria-prima sintética provém de florestas cultivadas de eucalipto** (DPC-Thermal Processing, 2010).

Tabela 9.1 - Estimativas de produção anual de alguns resíduos vegetais
(Quirino, 2009)

TIPO DE RESÍDUO	QUANTIDADE ESTIMADA, em milhões de toneladas
Bagaço de cana das usinas de açúcar e álcool	100
Cascas de arroz	10
Resíduos da indústria madeireira	60
Cascas de coco	0,5
Descartes do processamento da castanha do caju	0,9
Produtos da conversão de uso da terra (NO e CO)	90
Total	261,4

A preocupação com a preservação do meio ambiente nos últimos anos levou as entidades governamentais brasileiras, e, principalmente, as não-governamentais a incentivarem formas de regulamentação do uso da biomassa. Por consequência, as ações ambientalistas vêm cobrando a fiscalização mais rigorosa no uso das florestas, em termos do controle sobre a devastação da mata nativa decorrente da busca pela madeira para comercialização, tanto sob sua forma *in natura* quanto processada. A derrubada de florestas nativas para fins energéticos é uma atividade que não é mais permitida, restando apenas a produção do carvão vegetal em florestas energéticas.

A emissão descontrolada de gases que agravam o Efeito Estufa, em grande parte por empresas do setor siderúrgico que utilizam carvão mineral e vegetal, fomentou várias nações a elaborar e assinar um termos de compromisso com o objetivo de diminuir as emissões de gases poluentes, conhecido como "Tratado de Quioto". O primeiro projeto no Brasil - que ratificou o Protocolo de Quioto - é o Plantar, que visou diminuir a emissão de gases do setor siderúrgico por meio da substituição de carvão mineral por vegetal. Segundo o Banco Mundial, ele reduzirá em cerca de 13 milhões de toneladas a emissão de gás carbônico e metano (Chaer, 2004 - Citado por Barcellos e Couto, 2006).

Esse contexto envolve a pertinência da produção de carbono ativado a partir de biomassa (cascas de coco verde), ainda que voltado para um segmento de mercado menor do que o siderúrgico, porém, evitando o desmatamento adicional de áreas florestais.

Houve uma evolução apreciável na produção mundial de carvão vegetal entre 1995 e 2005, que atingiu 45 milhões de toneladas, conforme revelado na figura seguinte.

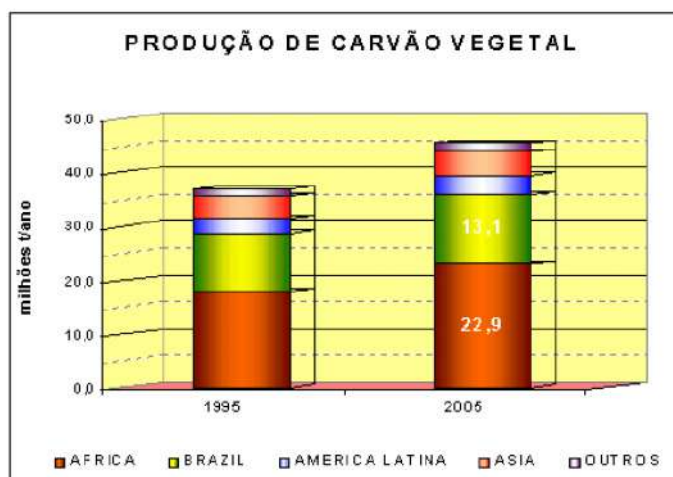


Figura 9.1 – Produção mundial de carvão vegetal (Pinheiro, 2009)

A África detém 50% da produção mundial e tem como principal mercado de carvão o uso doméstico. O Brasil representa 28% da produção mundial com 90% voltado para o uso siderúrgico. O consumo de biomassa no Brasil revela-se crescente, principalmente no setor industrial e energético. Para lenha para uso doméstico e agropecuário apresenta-se uma tendência decrescente de consumo. A participação do setor de biocombustíveis é promissora, pois cresce (vide gráficos seguintes) (Pinheiro, 2009)

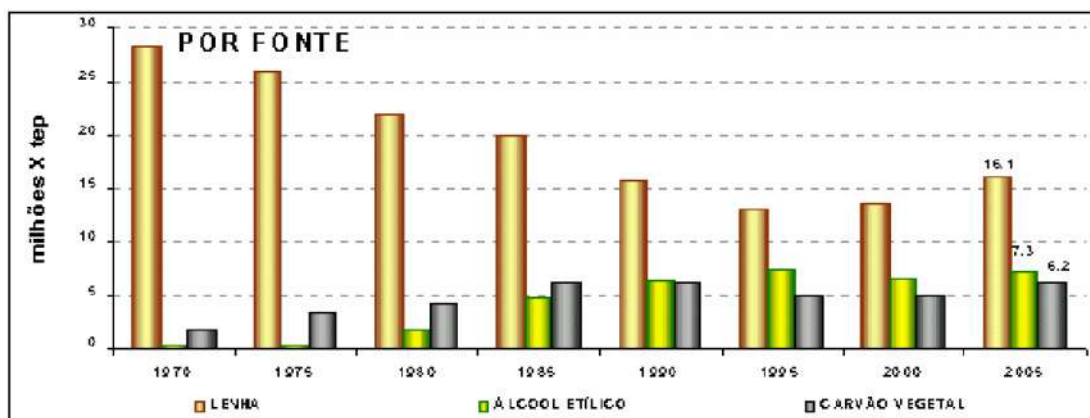


Figura 9.2 – Consumo de biomassa no Brasil por fonte (Pinheiro, 2009)

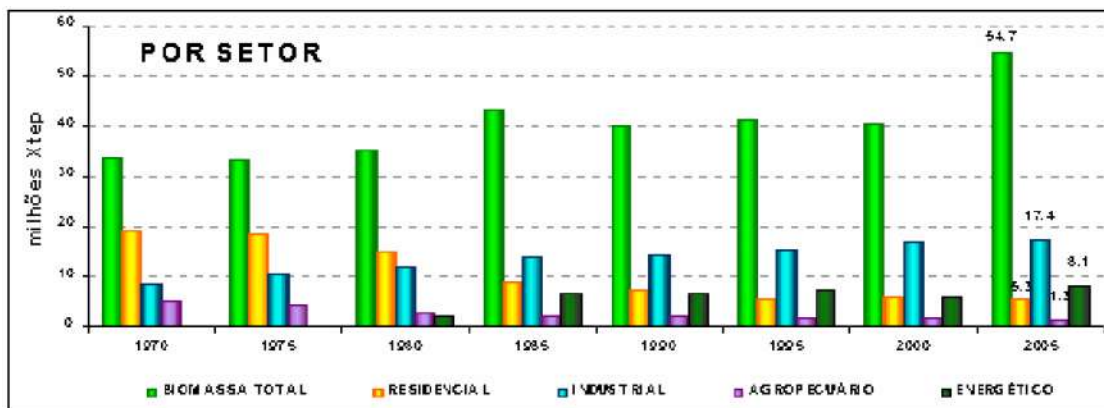


Figura 9.3 – Consumo de biomassa no Brasil por setor
(Pinheiro, 2009)

Apesar de ser uma prática proibida, a extração de madeira de matas nativas para a produção de carvão vegetal é comum e demonstra crescer.

O gráfico seguinte revela que grandes empresas do setor siderúrgico e produtoras de ferro-gusa aumentaram a participação de florestas nativas como fonte de matéria prima para obtenção de carvão vegetal.

Por 20 anos a participação de carvão de floresta nativa ficou em 30%. A partir de 2003 a demanda mundial por ferro-gusa e os altos preços induziram o mercado rápido aumento da produção elevando a participação da floresta nativa para 50%.

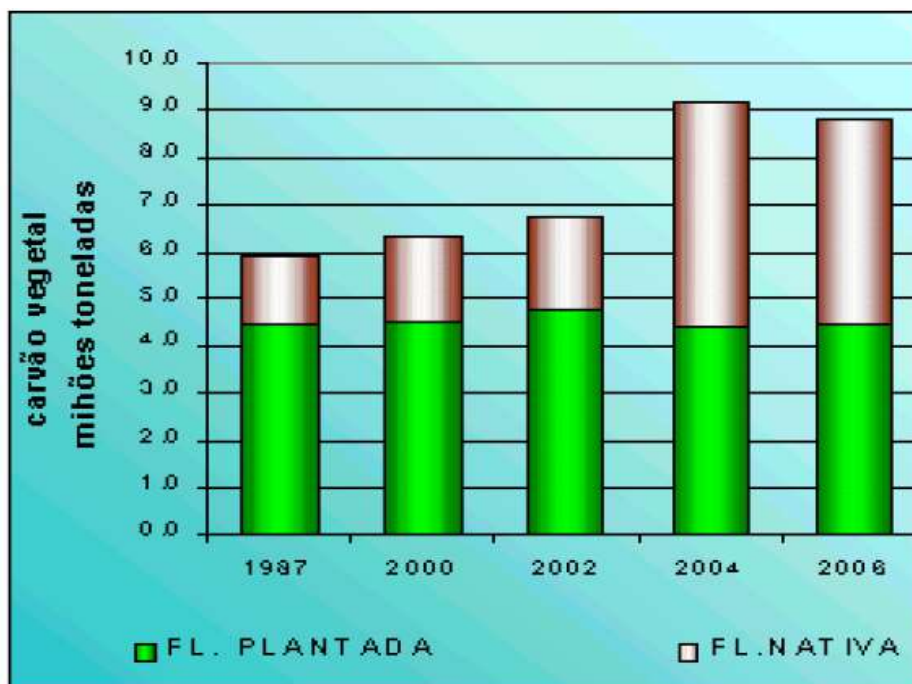


Figura 9.4 – Participação de florestas nativa e plantadas
(Pinheiro, 2009)

9.4 – O MERCADO DE CARVÃO OU CARBONO ATIVADO

O mercado de carvão ativado aparenta ser crescente. As aplicações do carvão ativado são variadas e incluem coques ou carvões ou carbonos de origens mineral, vegetal e animal para finalidades iguais ou similares. Por razões econômicas, linhito, carvão (outras formas), ossos, madeira, turfa e resíduos de fábricas de papel são as matérias-primas mais freqüentemente usadas para produzir os carbonos ativados descolorantes em fase líquida. Para produzir carbonos (ativados) adsorventes em fases gasosas, empregam-se cascas de coco, resíduos de carvão e petróleo (Softel, 1985).

Um carvão ativado pode ser produzido a partir de madeira, ossos, carvão mineral, nozes, casca de cocos, de polímeros sintéticos, além de resíduos agrícolas como bagaço de cana-de-açúcar, sementes e cascas de frutas, ossos bovinos, serragem de tronco do coqueiro, mesocarpo e endocarpo de coco (BORGES e colaboradores, 2005).

Foi possível localizar algumas indústrias químicas no Brasil que produzem variedades de carvão ativado nas formas granuladas e pulverizadas com maior especificidade, cujas matérias-primas têm origem mineral, vegetal e animal, conforme revelado nas Tabelas 9.2, 9.3 e 9.4, onde cada símbolo corresponde ao espectro de atuação do produto comercial da empresa citada.

As leis protetoras do meio ambiente aumentaram a venda dos carvões ativados para evitar ou controlar a poluição da atmosfera e dos meios hídricos. As regulamentações dos processos de despoluição também afetam a produção do carbono ativado. ***Alguns reagentes químicos possuem um grande potencial de emissão de gases ácidos corrosivos durante o processo de sua ativação (química).*** Se as emissões de tais processos de ativação química forem economicamente controladas, os métodos alternativos de oxidação seletiva dominarão o mercado. A seleção de materiais com baixo teor de enxofre dependerá das normas padronizadoras regionais dos níveis aceitáveis de SO₂ (dióxido de enxofre) na atmosfera e nas emissões gasosas (Softel, 1985).

A regeneração do carbono ativado é um fator importante no custo do consumo de carvão ativo. Os carbonos ativados para fases gasosas usados para recuperar gases de processo valiosos e solventes são responsáveis pela rentabilidade continuada do custo de muitos processos industriais, particularmente na produção baseada em solventes de fibras e fitas, lavagem a seco e impressão por rotogravuras. Para evitar a contaminação e a possível perda de propriedades, o carbono ativado para fase gasosa não deve ser exposto, antes do seu uso, a vapores ou umidade. Embora o carbono ativado não seja um material facilmente combustível, deve permanecer estocado longe ou protegido contra calor, eletricidade e chamas de combustão (Softel, 1985).

Aproximadamente, 60% do carbono ativado fabricado para aplicações em fase líquida é usado na forma pulverizada. Os dois principais usos do carbono ativado pulverizado são a remoção de cor (descoloramento), odor (desodorização), sabor (gosto) de soluções e qualquer outra impureza questionável tais como as que formam espumas ou retardem processos de cristalização, ou que prejudiquem a concentração ou recuperação de um soluto a partir de uma solução. Os usos diversos para os carbonos ativados de fase líquida incluem atividades laboratoriais, catálise de reações e filtração de água de aquários (Softel, 1985).

A maior e mais simples aplicação do carbono ativado para fase gasosa consiste nos recipientes de controle das emissões de vapor de gasolina nos automóveis. Também é usado na purificação e separação de gases, em sistemas de ar condicionado para remover odores industriais e irritantes, assim como odores corporais, de fumaças de cigarros, charutos e cigarrilhas de ar dentro de edificações, em sistemas de reatores nucleares para adsorver gases radioativos nos transportadores ou gases refrigerantes e em sistemas emergenciais de exaustão, para recuperação de compostos orgânicos voláteis oriundos de correntes de ar, em filtros de cigarros para absorver alguns componentes venenosos do tabaco, e como catalisador na fabricação de fosgênio (Softel, 1985).

Algumas empresas brasileiras fabricantes de carvão ativado utilizam como fonte de matéria prima as cascas de *coco verde*. As tabelas abaixo mostram a origem das matérias-primas utilizadas, as aplicações do produto produzido e a forma (granulado ou pulverizado) como é comercializado o carvão ativado.

Tabela 9.2 – Aplicações de carvões ativados de origem mineral
(Alphacarbo^{1*}; Guaramex², 2010)

GRANULADO
<p>Fonte: Carvão betuminoso</p> <p>(1) ♣ tratamento de efluentes e desodorização;</p> <p>(2) ♥ remoção de impurezas que ocasionam gosto, odor ou cores indesejáveis no tratamento de água potável e em processos químicos e alimentícios; usado em colunas de adsorção de leito fixo ou leito móvel, com um mínimo de perdas durante a retrolavagem e regeneração, sendo é susceptível à reativação térmica.</p>

Tabela 9.3 - Aplicações de carvões ativados de origem animal
(Bonechar¹, 2010)

GRANULADO	PULVERIZADO
<p>Fonte: Ossos bovinos</p> <ul style="list-style-type: none"> √ clarear açúcar por remoção de moléculas corantes, sais metálicos, cinzas orgânicas e inorgânicas responsáveis pela coloração, refrigerantes, óleos, ácido orgânicos. √ tratar águas contaminadas por metais pesados. √ tratar vinhos, sucos de frutas, bebidas alcoólicas. √ em filtros de decoloração de águas domésticas e industriais, tratamento de efluentes. √ remover flúor e toxinas das algas. √ purificar o ar, ácidos orgânicos, adsorção de álcool. √ tratamento de águas em filtros domésticos e para produtos químicos. √ tratar águas municipais e despejos industriais. √ tratar água para remover compostos orgânicos, inorgânicos e metais pesados, pesticidas, herbicidas, inseticidas, fluoretos, cloro, sub-produtos de cloro 	<p>Fonte: Ossos bovinos</p> <ul style="list-style-type: none"> √ clareamento de açúcar na remoção de moléculas corantes, sais metálicos, cinzas orgânicas e inorgânicas responsáveis pela coloração, refrigerantes, óleos, ácido orgânicos. √ tratar águas contaminadas por metais pesados. √ tratar vinhos, sucos de frutas, bebidas alcoólicas. √ em filtros de decoloração de águas domésticas e industriais, tratamento de efluentes. √ remoção de flúor e toxinas das algas. √ purificar o ar, ácidos orgânicos, adsorção de álcool. √ tratamento de águas em filtros domésticos e para produtos químicos. √ tratar águas municipais e despejos industriais. √ tratar água para remover compostos orgânicos, inorgânicos e metais pesados, pesticidas, herbicidas, inseticidas, fluoretos, cloro, sub-produtos de cloro.

A empresa Guaramex é a única que importa e comercializa o carvão ativado peletizado (após extrusão e compactado) que é de origem vegetal (porém não especificada).

Tabela 9.4 - Aplicações de carvões ativados de origem vegetal
(Activbras^{1*}, Alphacarbo^{2*}; Bahiacarbon^{3*}, EIB^{4*}, Guaramex^{5*}, 2010)

GRANULADO	PULVERIZADO
<p>Fonte: Madeira pínus</p> <p>(1) tratamento e purificação em meio líquido incluindo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ remover colóides e substâncias orgânicas vivas ou mortas, eliminando cores, odores e sabores indesejáveis, e clarificação de óleos vegetais, óleos minerais, banhos de galvanoplastia, sulfato de alumínio, sulfato de níquel, STPP, solventes, rejeitos industriais, água para consumo humano ou industrial; ◆ remover cor, odor em glicerina animal, glutamato monossódico e dextrina; ◆ refino do açúcar e, principalmente, xarope de refrigerantes; eliminar impurezas como mucilagem, cores, odores e sabores indesejáveis ao remover colóides e substâncias orgânicas de grande peso molecular ◆ eliminar gomas e proteínas que turvam as bebidas sob temperaturas baixas, como as mais claras, tipo limão. 	<p>Fonte: Madeira pínus</p> <p>(1) ◆ tratamento de água e vinagre, em indústrias vinícolas, farmacêuticas e químicas para remover colóides e substâncias orgânicas de grande peso molecular e eliminar gostos indesejáveis, impurezas e matéria corante;</p> <p>(2).* tratar águas municipais e industriais, efluentes de indústrias e purificar soluções;</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ purificação de soluções coloridas e produtos químicos, tratamentos de açúcares e resíduos industriais; ◆ tratar água potável e purificar soluções coloridas e óleos, ciclamatos, glutamatos, alcoóis; clarificar glicose, glicerina nas indústrias de alimentos e químicas; ◆ tratar óleos vegetais, ciclamatos, glutamatos, álcoois e vinhos; purificar soluções coloridas, produtos químicos e farmacêuticos; <p>(5) ♥ tratamentos de águas e em indústrias vinícolas; para remover colóides e substâncias orgânicas de grande peso molecular, gostos indesejáveis, impurezas e matéria corante; tratar vinagre e produtos químicos e farmacêuticos</p> <ul style="list-style-type: none"> ♥ tratar produtos químicos e efluentes com teores residuais de cloro e orgânicos. ♥ eliminar cor original do açúcar líquido e o odor característico e desagradável no caso da glicerina animal. ♥ clarificar óleos vegetais, óleos minerais, banhos de galvanoplastia, sulfato de alumínio, sulfato de níquel, STPP, solventes, rejeitos industriais, água potável ou industrial; ♥ refinar açúcar e xarope de refrigerantes; eliminar impurezas como mucilagem, colóides e substâncias orgânicas de grande peso molecular, cores, odores e sabores indesejáveis; gomas e proteínas que turvam a bebida, quando em baixas temperaturas, principalmente as mais claras, tipo limão, dando-lhe um aspecto cristalino.
<p>Fonte: Casca de coco-da-baía (verde)</p> <p>(2).* tratamento de águas, efluentes e desodorização.</p> <p>(3) ▲ tratamento, purificação, desodorização, filtração e retirada de cloro da água, de produtos químicos, gases e ar atmosférico.</p>	<p>Fonte: Casca de coco-da- baía (verde)</p> <p>(3) ▲ tratamento, purificação, desodorização, filtração e retirada de cloro da água e de produtos químicos.</p>
<p>Fonte: Casca de coco babaçu</p> <p>(1) tratamento e clarificação em meio líquido para:</p> <ul style="list-style-type: none"> • remover colóides e substâncias orgânicas de grande peso molecular, eliminando cores, odores e sabores indesejáveis. • remover cloro da água tratada, purificação de ácidos orgânicos, redução de acidez, aldeídos, cetonas e álcoois superiores em bebidas destiladas, confecção de elementos filtrantes domésticos, retenção de gases e vapores. <p>(4) compor ou atuar em:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Filtros de uso doméstico, suporte catalítico, recuperação de solvente, tratamento de gases, recuperação de ouro, adsorção de álcool, adsorção de ácidos orgânicos, tratamento de efluentes. • Filtros de decoloração industrial, purificação de gás carbônico, purificação de ar, desodorização de geladeira e câmaras frigoríficas. • Isolante térmico, tratamento de águas, cobertura de banhos térmicos. <p>(5) ♥ tratar e clarificar meio líquido; remover: odores, colóides e substâncias orgânicas de grande peso molecular, cores e sabores indesejáveis; cloro da água tratada, purificar ácidos orgânicos, reduzir acidez, aldeídos, cetonas e álcoois superiores em bebidas destiladas, confecção de elementos filtrantes domésticos e reter gases e vapores;</p> <ul style="list-style-type: none"> ♥ impregnação com cobre e alto poder de redução de enxofre em gás natural 	<p>Fonte: Casca de coco babaçu</p> <p>(4) • Tratamento de água potável, efluentes industriais, banhos de galvanoplastia, sulfato de alumínio, gorduras.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Água potável, gorduras, ceras. • Refino de açúcar, refrigerantes, vinhos, bebidas alcólicas, óleos vegetais, ácidos orgânicos carbonato de sódio glicerina, produtos orgânicos, banhos galvânicos, éster glutamato monossódico, gelatina. • Cafeína, glucose, ácido láctico, plastificantes, antibióticos, dextrose e produtos farmacêuticos diversos

9.5 – INDICATIVOS DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA PRODUZIR CARBONO ATIVADO

9.5.1 - Reator de leito fixo operando em baixas temperaturas

De acordo com o estudo de viabilidade econômica realizado por SANTIAGO e SEIVAM, 2005 utilizando (Orc2004 por meio do Projeto Fácil vs 1.0) (PANNIRSELVAM et al., 1998) e o desenvolvimento do desenho inovador para o sistema de integração energética com base nos processos de pirólise e gasificação (Santiago, 2004 – Citado por SANTIAGO e SELVAM, 2005), com o uso de métodos inovadores de análise e síntese de processos (softwares simulador Super Pro-Designer 4.9).

As reações foram realizadas em um reator de leito fixo (FONTES, 2003- Citado por SANTIAGO e SELVAM, 2005) com o objetivo de simular uma pirólise lenta, o experimento contou, também, com controlador de temperatura; distribuidor de gases, para ativação; borbulhador, para recuperação de co-produtos; e válvulas de segurança. A tabela 9.8 abaixo mostra os resultados dos parâmetros econômicos para unidade de produção industrial de carvão ativo -1 t por dia.

Tabela 9.5– Resultados econômicos para unidade de produção industrial de carvão ativo (Santiago e Selvam, 2005)

Parâmetro econômico	Valor
Investimentos (R\$)	99.954,58
Preço Produto (R\$ Kg ⁻¹)	5,00
Receita (Anual)	1.560.000,00
Custo (Anual)	445.016,46
Custo do Processo (R\$ kg ⁻¹)	1,43
Lucro Bruto (Anual)	1.114.983,54
Tempo de Retorno(Anos)	0,09
Taxa de Retorno (%)	11,15

O projeto de sistema integrado proposto permitiu a valorização da biomassa residual do coco, a partir de processo de pirólise com rendimentos de carvão ativado superiores a 70%, permitindo também a recuperação de gás e co-produtos. Uma das alternativas viáveis para maximizar o processo de carbonização seria a utilização de co-produtos (gases) no próprio processo, para suprir a demanda energética do sistema. A valorização de "subprodutos" e a redução de emissões foram conseguidas, com base na síntese de processos que usam inovações. A simulação de bioprocessos (SPD vs 4.9) industriais modernos, nos setores de energia e meio ambiente, favorece a ampliação de pequena para grande escala, com objetivo econômico e produção mais limpa (Santiago E Selvam, 2005).

9.5.2 - Comparativo de custos a partir de fornos tipo rabo-quente e fornos cilíndricos verticais em uma unidade de pequeno porte

A partir do estudo de caso de duas empresas paranaenses, uma situada no município de Ipiranga-PR, com sistema de carbonização tradicional utilizando fornos tipo "rabo quente" de superfície e outra situada no município de Jaguaíva-PR, considerada planta piloto em escala industrial no Estado utilizando fornos cilíndricos verticais, Foi feita a comparação de dois sistemas de produção de carvão vegetal – de um lado o sistema de carbonização tradicional e de outro o sistema de carbonização em fornos cilíndricos verticais, quanto aos aspectos técnicos e econômicos.

Os dados que serviram de base para análise de custo do sistema de fornos de rabo-quente foram os coletados na empresa e proporcionalmente adaptados elevando a quantidade de fornos até 20, para que as capacidades de geração de carvão em MDC (unidade de medida para o carvão vegetal que equivale à quantidade de carvão que cabe em um metro cúbico) fossem equivalentes ao do sistema de carbonização em fornos cilíndricos verticais a que foi comparado.

Os dados do processo de produção do carvão vegetal a partir do forno cilíndrico vertical foram compostos por uma carvoaria com quatro fornos com capacidade produtiva de 432 MDC por mês.

Tabela 9.6 – Comparativo de custos envolvidos e resultados operacionais nos sistemas de produção tradicional e no sistema de produção em fornos cilíndricos verticais.
(Colombo, Pimenta, Hatakeyama, 2006)

Descrição	Sistema Fornos Cilíndricos Verticais - Unidade de Pequeno Porte	Sistema Fornos tipo "Rabo Quente"
Resultados Técnicos		
Consumo de lenha em estéreo/dia	21,6	28,8
Consumo de lenha em estéreo/mês	648	864
Consumo de lenha em estéreo/ano	7.776	10.368
Capacidade produtiva do sistema em MDC/dia	14,4	14,4
Capacidade produtiva do sistema em MDC/mês	432	432
Capacidade produtiva do sistema em MDC/ano	5.184	5.184
Resultados Financeiros Anuais		
Faturamento previsto em R\$	518.400,00	518.400,00
Custo Operacional Total	414.944,64	477.120,00
Custo da lenha	311.040,00	414.720,00
Custo da mão de obra	47.088,00	50.400,00
Custo da energia elétrica	30.896,64	0,00
Custo da manutenção	25.920,00	12.000,00
Custo Operacional Unitário (R\$/MDC)	80,04	92,04
Parâmetros de Análise		
Lucratividade Estimada	19,96%	7,96%
Pay-back Simples (anos)	1,45	0,74

As capacidades para o sistema "rabo quente" foram calculadas proporcionalmente ao levantado na empresa, de forma a tornar mais visual a comparação entre os dois sistemas em termos de capacidade produtiva e de faturamento. Desta forma, a análise e conclusões ficam visuais e de fácil interpretação. Analisando o quadro, verifica-se que na comparação entre os sistemas, o sistema de carbonização em fornos cilíndricos verticais, em contraposição ao sistema de carbonização tradicional, apresenta substancial economia em matéria-prima (25%), redução do custo operacional (13%), aumento da lucratividade (151%) e o retorno do investimento medido pelo "pay-back" simples acontece em menos de 1 ½ anos.

Colombo, Pimenta, Hatakeyama (2006) concluíram que a implantação do sistema de carbonização em fornos cilíndricos verticais se mostra importante para o setor e conseqüentemente para a sociedade brasileira como um todo.

9.6 – CONSTATAÇÕES DO CAPÍTULO 9

1ª - No Brasil há grande variedade e disponibilidade de biomassa para fabricar carvão ativado e a produção de coco verde no país concentra-se nas regiões nordeste e sudeste do Brasil.

2ª - Para definir o equipamento para produção de carbono ativado a partir da casca de coco verde é necessário avaliar a disponibilidade e preço da matéria-prima, estimativa de custo de plantas coqueificadoras, mercado consumidor, produtores nacionais e algumas etapas iniciais de beneficiamento.

3ª - *Tendo em vista que o presente trabalho envolve o âmbito de cooperativas populares, a seleção e o dimensionamento de equipamentos, e dos critérios econômicos inerentes, é mais simples.*

4ª - Segundo a empresa *DPC-Thermal Processing*, aproximadamente, 43% do ferro gusa produzido no Brasil resulta do consumo de carvão vegetal como redutor químico no alto-forno siderúrgico, e, apenas a metade dessa produção de matéria-prima sintética provém de florestas cultivadas de eucalipto.

5ª - O segmento de produção de carbono ativado a partir de cascas de coco verde apresenta um mercado menor que o siderúrgico.

6ª - Devido à implementação de novas leis ambientais, a demanda por carbonos ativados aumentou, pois assim tem-se um controle maior da poluição atmosférica e dos meios hídricos.

7ª - O desenvolvimento de novas técnicas de irrigação possibilitou que Brasil se tornasse um dos maiores produtores mundiais de coco verde, o que amplia as possibilidades da fabricação de carbono ativado.

9.7 – CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 9

1ª - O uso de biomassa em processos de combustão, pirólise e gaseificação para fins energéticos possibilita converter resíduos sólidos urbanos em produtos industriais consagrados – via processos físicos e químicos de reciclagem – e permite, ainda, co-gerar energia limpa ou sustentável, inclusive para abrir novas oportunidades de trabalho para pessoas marginalizadas.

2ª - Os mercados de carvão vegetal e de carbono ativado no Brasil e no mundo cresce, pois existem várias justificativas tecnológicas para seu consumo conforme abordado nos capítulos anteriores.

3ª - O consumo de produtos vegetais no Brasil é mais acentuado nas regiões litorâneas sudeste, nordeste e sul do país, que constituem centros acumuladores de cascas de coco verde, que constituem o ponto de partida do presente projeto de produção de carbono ativado para finalidades diversas.

9.8 - REFERÊNCIAS CAPÍTULO 9

Anuário estatístico do Brasil 2008 v. 68

CHAER, M. - **Protocolo de Quito quer converter carbono em dólares** - Disponível em: <http://www.romeroconsultores.com.br/artigo13.htm> - citado por Barcellos, D. C. e Couto, L.

COLOMBO, S.F.O.; PIMENTA, A.S.; HATAKEYAMA, K. - **Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo Sustentável** - XIII SIMPEP, 6 a 8 de Novembro de 2006, SP, Brasil.

PINHEIRO, P.C.C. - **Produção de Carvão Vegetal no Brasil** - Seminário "Encuentro Regional sobre Biocombustibles y Energias Renovables" - UDELAR, Montevideo, Uruguay, 23 de Abril de 2009

Rosa, M. de F., Abreu F. A. P. de, Furtado, A. A. L., Brígido, A. K. L., Norões, E. R. de V., **Processo agroindustrial: Obtenção de pó de casca de coco verde - Comunicado Técnico 61**, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2001.

SAMPAIO, R., PINHEIRO, P. C. C., REZENDE, M. E. - **Carvoejamento – Aumentando o rendimento dos fornos- Possibilidades a curto e longos prazos** – Workshop Madeira Energética, BNDES, maio de 2007.

SANTIAGO, B. H. S., SELVAM, P. V. P., **Estudo de viabilidade técnica-econômica preliminar para a produção de carvão ativado no Brasil a partir de resíduos do coco: Estudo comparativo dos cenários de produção** – Renabio- Biomassa e Energia ,V.2,n.3, p. 225-230,2005. Disponível em: http://www.renabio.org.br/arquivos/p_estudo_producao_23783.pdf

RENABIO - **Siderurgia a carvão vegetal: Passado, presente e futuro** – Informativo Técnico Renabio Rede Nacional de Biomassa para energia, 2006, disponível em http://www.renabio.org.br/arquivos/p_siderurgia_futuro_3290.pdf

Couto, L. - **Siderurgia a carvão vegetal: Passado, presente e futuro – Informativo Técnico Renabio** (Rede Nacional de Biomassa para energia), 2006, Disponível em: http://www.renabio.org.br/arquivos/p_siderurgia_futuro_3290.pdf

CAPÍTULO 10

PROJETO DO PROCESSO INTEGRADO DE COQUEIFICAÇÃO DE CASCAS DE COCO VERDE E ATIVAÇÃO DO CARVÃO

10.1 – Premissas das concepções do coqueificador e das retortas de ativação

10.2 – A importância da secagem solar da lenha antes de alimentar a retorta

10.3 – Sobre o desperdício de dióxido de carbono e energia térmica em chaminés

10.4 – Pirólise das cascas de coco verde e ativação do carvão vegetal

10.5 - O despulpador das cascas de coco verde

10.6 – Túnel de secagem solar das fibras liberadas da polpa

10.7 – Carrinhos transportadores de casca de coco na secagem solar

10.8 – As retortas verticais de carbonização e ativação

10.9 – Conclusões do capítulo 10 e do projeto

10.10 – Referências do capítulo 10

CAPÍTULO 10

PROJETO DO PROCESSO INTEGRADO DE COQUEIFICAÇÃO DE CASCAS DE COCO VERDE E ATIVAÇÃO DO CARVÃO

10.1 – PREMISSAS DAS CONCEPÇÕES DO COQUEIFICADOR E DAS RETORTAS DE ATIVAÇÃO

Os objetivos iniciais do presente projeto final de curso incluíam as seguintes hipóteses:

1ª – *coletar e destinar as cascas de coco verde para uma atividade industrial valorizada* no mercado de consumo doméstico industrial: a produção de carvão ativado.

2ª – *desenvolver um coqueificador – que seria um forno de pirólise ou uma retorta – para converter diretamente as cascas de coco em carvão ativo ou carbono ativado.*

3ª – *realizar um levantamento do estado da arte tecnológica da produção de carvão ativo para situar as possibilidades de criar um novo tipo de retorta adequado ao cenário brasileiro.*

4ª – *realizar uma busca de patentes de equipamentos e processos afins para preservar a possibilidade de projetar uma concepção original e passível de proteção adequada.*

As diversas constatações sobre a produção de carvão vegetal revelaram que:

1º - os fornos utilizados para produzir carvão vegetal no Brasil são predominantemente descontínuos.

2º - é possível encontrar fornos primitivos ou artesanais ou tradicionais de terra, argila e alvenaria, produzindo carvão vegetal para siderurgia e consumo diversificado.

3º - vários pesquisadores universitários criaram fornos incluindo câmaras de carbonização metálicas.

4º - muitos fornos “industriais” de terra, argila, alvenaria e metálicos liberam os gases da destilação seca da madeira - intitulados até mesmo como “fumaça” – para o ambiente e desperdiçam energia térmica.

5º - vários pesquisadores universitários e indústrias produtoras de carvão vegetal iniciaram a coleta e a queima parcial ou total dos gases condensáveis e não-condensáveis.

6º - vários processos industriais de origem estrangeira para carbonização de biomassa indicavam que havia desperdício de excesso de energia térmica e de emissões gasosas quentes e etapas de resfriamento de carvão para atender ao mercado da fabricação de ferro-gusa.

As diversas abordagens sobre a fabricação de carbono ativado mostravam que:

1º - aceita-se no Brasil a expressão “carvão ativo” ou “carvão ativado” para o que é “carbono ativado”, pois ***o carvão tanto mineral quanto de origem vegetal ou animal é o produto que ainda incorpora na sua estrutura carbonosa algumas frações alcatroadas.***

2º - há quem considere que o “carvão ativo era inerte” quando pretendiam dizer que seria “estável”, pois, pelo menos, estaria liberado das frações alcatroadas.

3º - existem fornos de ativação de carvão vegetal e mineral em modelos rotatórios horizontais (de câmara única) e verticais (de câmaras ou soleiras múltiplas).

4º - houve quem denominasse “ativação física” aos processos de arraste físico-químico de frações alcatroadas com o uso de vapor d’água ou dióxido de carbono, o que revela um amplo desconhecimento dos conceitos e princípios científicos e tecnológicos de Química Fundamental ou Industrial.

5º - ***nenhuma rota de produção integrada de carvão vegetal e carbono ativado foi encontrada.***

6º - ***embora fosse enfatizada pela FAO (1985) a recomendação de pré-secar a lenha antes da sua carbonização num forno ou retorta, não foi encontrada alguma proposta para uso de uma estufa de secagem solar.***

10.2 – A IMPORTÂNCIA DA SECAGEM SOLAR DA LENHA ANTES DE ALIMENTAR A RETORTA

Nenhuma lenha irá carbonizar-se até que esteja praticamente seca. A água da madeira verde constitui aproximadamente 59% do seu peso original e deve ser totalmente evaporada antes do início da pirólise formadora de carvão vegetal (dentro de uma retorta). ***É mais econômico maximizar a secagem da lenha usando energia solar antes de pirolisá-la,*** sendo viável em clareiras florestais e áreas de matagais e pequenas árvores, onde podem secar durante meses sem o receio de ataques de insetos ou apodrecimento. Convém avaliar a perda de rendimento em carvão vegetal devido ao teor excessivo de umidade perante a resultante da deterioração biológica da madeira (FAO, 1985).

As grandes retortas nas siderúrgicas de Wundowie na Austrália queimavam os gases contendo alcatrão para gerar energia elétrica e usavam o gás limpo do alto-forno como agente de resfriamento e aquecimento das retortas. O melhor método para uso em determinada instalação fabril depende de fatores locais. ***Mas, é necessário pagar pela energia térmica consumida, e a eficiência desse consumo depende, a longo prazo, da secagem da madeira de forma tão eficaz quanto possível antes que seja carregada na retorta*** (FAO, 1985).

Um sistema de leito fluidizado de carbonização requer uma unidade de pré-secagem ao ar livre e briquetagem, para que a temperatura operacional seja elevada ao seu ponto de decomposição espontânea para formar carvão vegetal, e, posteriormente, ser aquecido para reduzir o teor de alcatrão até um valor aceitável. Dessa forma, entende-se ser possível gerar um saldo positivo de energia térmica para sustentar o processo, que demanda um projeto cuidadoso de um sistema de instrumentação e controle para garantir tais benefícios (FAO, 1985).

A matéria-prima é picada ou peletizada para se obter a granulometria adequada ao seu processamento e, então, enviada ao secador para redução do seu teor de umidade até quase 10%. ***A energia térmica consumida na secagem é fornecida pelo contato direto dos gases quentes provenientes da combustão de parte dos gases não-condensáveis gerados na pirólise*** (Almeida e Rezende, 1982).

A secagem da madeira é feita para atingir até 18% de umidade, considerado um valor que não prejudica a produtividade da retorta Reichert-Lurgi. Se a secagem for feita na retorta, demandará o aumento do número de fornos por planta ou do volume individual de cada retorta em 50%, além de aumentar o tempo de duração do ciclo de carbonização em cerca de 6 horas. ***Em condições normais ou usuais, com a umidade original da madeira em torno de 20 a 25%, um grupo de 6 retortas poderá operar com autosuficiência energética. Na prática, quase sempre é necessário adicionar um suplemento de energia*** (Almeida e Rezende, 1982).

A secagem solar é adotada para grãos vegetais, em muitas ocasiões, a descoberto e são conhecidas várias concepções de estufas agropecuárias para cultivo e desidratação de produtos da agricultura.

No verão, a incidência solar é maior do que o aquecimento ocorrido no inverno. No entanto, uma estufa de secagem solar é capaz de receber radiação térmica mesmo em dias nublados e o calor se acumula no interior do equipamento, porque ao penetrar pelas placas de vidro transparente, seu comprimento de onda é pequeno. Ao aquecer o material que sofre a secagem, a radiação luminosa emitida pelo corpo quente possuirá um comprimento de onda maior e ficará impossibilitada de atravessar as placas de vidro da estufa, o que explica a eficiência das estufas de secagem solar e dos aquecedores solares de água, adotados pelo mundo.

10.3 – SOBRE O DESPERDÍCIO DE DIÓXIDO DE CARBONO E ENERGIA TÉRMICA

A corrente de vapores e gases quentes emitidos na retorta Lambiotte é dividida em duas. A primeira fração é queimada diretamente na fornalha para aquecer a carga. *A segunda corrente gasosa é resfriada e lavada para remover o alcatrão* e, em seguida, é injetada na base da coluna para esfriar o carvão descendente. *A corrente gasosa que sai do lavador é misturada com o resto da primeira corrente gasosa, sendo queimada para gerar gases quentes isentos de oxigênio livre, que será injetado na coluna Lambiotte. Qualquer deficiência térmica causada pela utilização da madeira úmida, etc., tem que ser compensada com a queima de combustível extra no forno, tal como petróleo ou gás natural* (FAO, 1985), *o que acarreta o aumento da vazão de gases da combustão numa chaminé.*

Durante os anos 60 do século XX, surgiu nos EUA a necessidade de converter em carvão vegetal as serragens de cortiça e madeira de pinus e briquetá-las para um mercado recreativo urbano crescente. *Desenvolveu-se a tecnologia de carbonização do forno de câmaras múltiplas de Herreshoff para a conversão de finos de biomassa, na qual a recuperação de sub-produtos químicos era menos importante e adotou-se a queima de gases e vapores para descarte em chaminés* ou para co-geração de energia em caldeiras de usinas termoelétricas (FAO, 1985).

Embora seja teoricamente possível recuperar os condensáveis pirolenhosos das emissões gasosas *da coluna do forno Herreshoff*, alguns fatores econômicos parecem desfavoráveis, e, assim, *os gases emitidos são queimados para produzir energia ou simplesmente para descarte* (FAO, 1985).

Na retorta contínua de câmaras múltiplas a operação da fornalha é iniciada utilizando-se queimadores a gás ou petróleo em cada câmara para elevar a temperatura para cerca de 600 °C, causando a ignição da matéria-prima. Quando a fornalha atinge a temperatura normal de operação de 900 a 1000 °C, os queimadores são desligados. Uma vez que a fornalha é acesa, ela deve funcionar continuamente 24 h/dia. A vazão de admissão do ar é regulada de modo que haja a carbonização da madeira e que o carvão saia do forno na forma de finos. Os gases e vapores produzidos são uma mistura altamente poluente de gases e vapores condensáveis da madeira: alcatrão, ácido pirolenhoso e vapor de água. Após a sua remoção do topo do forno podem ser queimados diretamente em caldeiras para gerar vapor ou energia. *Caso contrário, os gases devem ser queimados para evitar poluição ambiental, e transportados numa tubulação até chaminés altas para serem lançados na atmosfera, porque instalações desse tipo, por razões econômicas, são quase sempre localizadas em áreas densamente habitadas* (FAO, 1985).

Quando se emitem os gases e vapores oriundos da destilação seca da madeira e de sua carbonização diretamente para a atmosfera, como ocorre nas tecnologias simples, ocorre o desperdício de energia térmica e química dessas frações. E isso se reflete na eficiência e no custo do processo de fabricação do carvão vegetal (FAO, 1985).

Alternativamente para o processo da retorta Lambiotte-SIFIC, toda a corrente gasosa quente efluente pode ser queimada para co-gerar vapor e energia elétrica. O calor necessário para operar a retorta pode ser obtido pela queima de outro combustível (petróleo, carvão ou gás natural). A vantagem desse procedimento é que evita o manuseio de gases de saída da retorta e do alcatrão associado e outros líquidos biocarboquímicos. Algumas das vantagens são perdidas se esses combustíveis alternativos forem caros, o que geralmente é o caso nos dias atuais (anos 80 do século XX) (FAO, 1985).

Quando os sistemas complexos de retorta são usados para fazer carvão vegetal, é mais simples utilizar suas emissões gasosas como fonte de calor para a carbonização, pois se houver um excesso, este pode ser utilizado para queimar e co-gerar energia termoelétrica ou calor de processo. Dentre as vantagens, destacam-se (FAO, 1985): 1º - o custo de capital é relativamente baixo; 2º - os requisitos tecnológicos e a poluição do meio ambiente são minimizados; 3º - a economia de madeira combustível permite que mais carvão seja produzido com a mesma quantidade de lenha.

Em geral, os fornos e retortas eram construídos com material metálico ou de tijolos refratários sem qualquer preocupação de acrescentar materiais isolantes térmicos às paredes das câmaras de destilação e carbonização.

Se o dióxido de carbono dos gases de combustão for aproveitado para ativar parte do carvão vegetal fabricado, então deixará de ser desperdiçado para ser, pelo menos, empregado como insumo nobre reciclável no próprio processo.

10.4 – PIRÓLISE DAS CASCAS DE COCO VERDE E ATIVAÇÃO DO CARVÃO VEGETAL

Os fluxogramas descritos nos capítulos anteriores revelam que os processos e as retortas de carbonização de biomassa e ativação de carvão vegetal operam em unidades ou plantas ou fábricas distintas, o que possibilita inovar em termos de equipamentos e processo..

Os textos anteriores justificaram a ampliação da intenção original de projetar um coqueificador de cascas de coco verde para o nível de um processo incluindo um túnel de secagem solar.

Ao invés de usar parte da energia térmica para secar as cascas é possível utilizar um túnel de secagem solar de cascas de coco e investir os excessos de energia térmica para empregar tantas retortas verticais de ativação por vapor d'água e dióxido de carbono quantas forem viáveis economicamente.

Vislumbrou-se a possibilidade de integrar duas etapas em paralelo de ativação de carvão vegetal: uma delas pelo uso de vapor d'água e outra pelo consumo de dióxido de carbono quente, ambas oriundas de uma caldeira e percolando leitos paralelos fixos ou móveis de carvão vegetal produzido previa e continuamente numa retorta de destilação e carbonização.

Assim, o projeto original de um coqueificador - concebido para carbonizar lenha e ativar o carvão vegetal num mesmo forno ou retorta - foi ampliado para incorporar quatro ambientes termoquímicos distintos:

1º - retorta de destilação e carbonização de lenha seca;

2º - retorta de ativação de carvão vegetal pelo emprego de vapor d'água como agente ativador;

3º - retorta de ativação de carvão vegetal pelo emprego de fumos da combustão como agente ativador;

4º - uma caldeira de produção de vapor d'água e dióxido de carbono contido nos fumos da combustão.

Decidiu-se integrar a fabricação de carvão vegetal e carvão ativo através da queima das frações condensáveis e não condensáveis do "gás da madeira" numa caldeira, que resultaria na existência de dois circuitos de correntes gasosas no processo, ambos para finalidades de ativação de biomassa carbonizada:

1º - produção de fumos de combustão, composto predominantemente de dióxido de carbono;

2º - produção de vapor d'água superaquecido.

As duas figuras seguintes ilustram as etapas consideradas para um novo processo integrado de carbonização de biomassa e ativação do carvão vegetal resultante.

Os valores indicados preliminarmente para as temperaturas de operação e processamento foram inspiradas nos valores encontrados na literatura técnica. Entende-se que servirão de base para a execução de um projeto posterior de detalhamento dos equipamentos após o estudo conveniente de modelagem e simulação computacional de todo o processo.

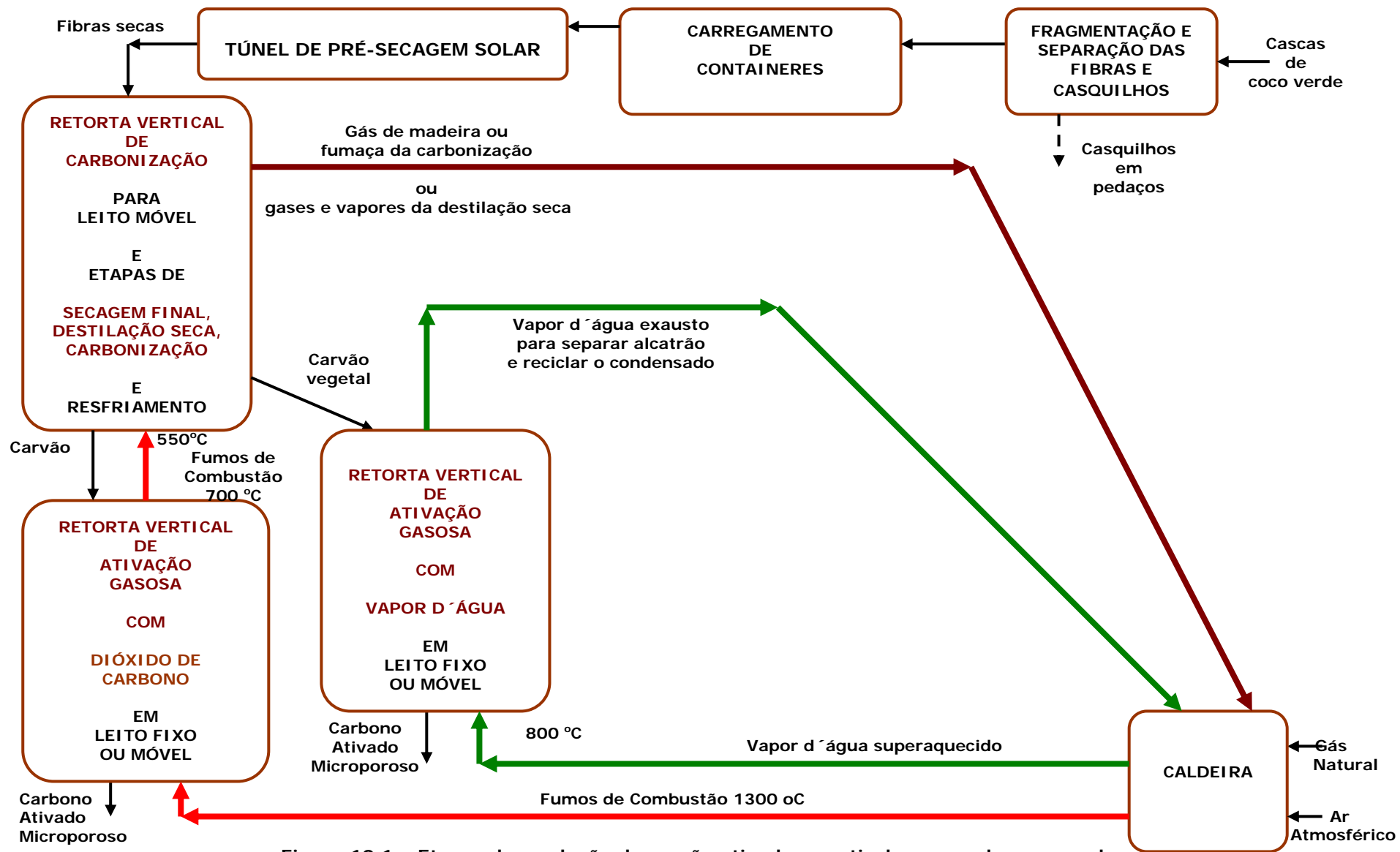


Figura 10.1 – Etapas da produção de carvão ativado a partir de cascas de coco verde

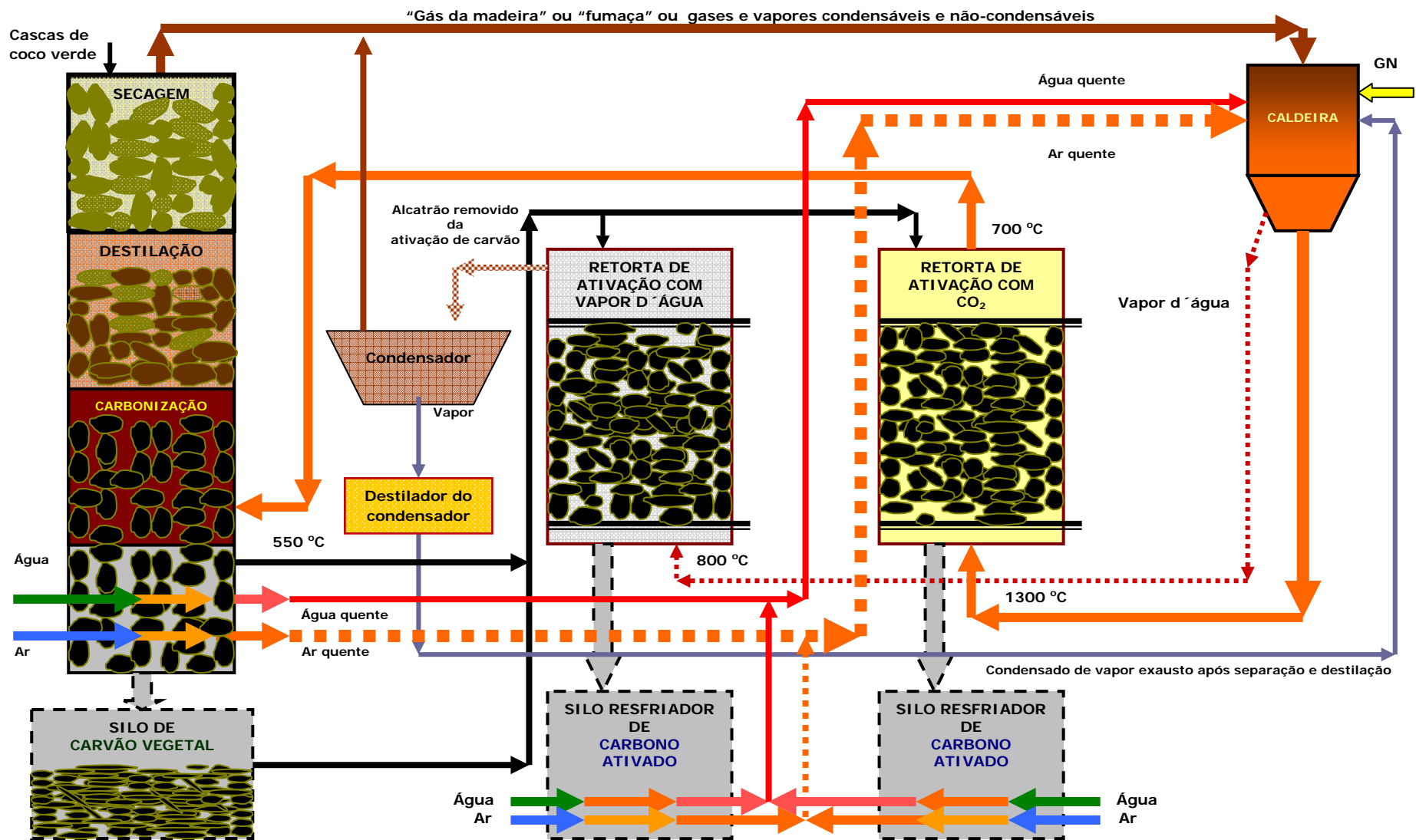


Figura 10.2 – Processo de carbonização de cascas de coco verde e ativação do carvão vegetal com temperaturas sugeridas

10.5 - O DESPOLPADOR DAS CASCAS DE COCO VERDE

As cascas de coco verde residuais do consumo de água da fruta fresca - habitualmente destinadas à coleta de lixo de uma empresa municipal - poderão ser separadas e entregues para caminhões que as transportarão para as instalações fabris de uma indústria ou cooperativa produtora de carvão vegetal ativado.

Deve-se considerar que uma pessoa pode ingerir a água do coco vertida para copos ou jarras e, ainda, tomar diretamente utilizando-se de um canudo plástico, o que torna impossível realizar um controle da assepsia popular e garantir um mínimo de higienização na coleta das cascas de coco aberto e parcialmente consumido. Assim sendo, um processamento industrial ainda é possível, pelo menos, para garantir o aproveitamento econômico de parte das cascas residuais de coco verde, deixando-se em aberto o estudo do aproveitamento asséptico da polpa branca dos mesmos ainda não consumidos, porém expostos à possíveis contaminações microbianas.

É conveniente separar os componentes das cascas residuais de coco verde original: o exocarpo (tecido verde), o mesocarpo fibroso e o endocarpo lenhoso (casquilho) do endosperma sólido (polpa branca e alimentícia) para destinar esses componentes a etapas distintas de aproveitamento industrial, ou de conversão física e química. Essa separação denomina-se convencionalmente de ***despoldamento***. É possível utilizar a máquina ilustrada pela figura seguinte.

Essa máquina separa as fibras do casquilho e da polpa, possibilitando secá-las antes de serem dilaceradas com maior facilidade.



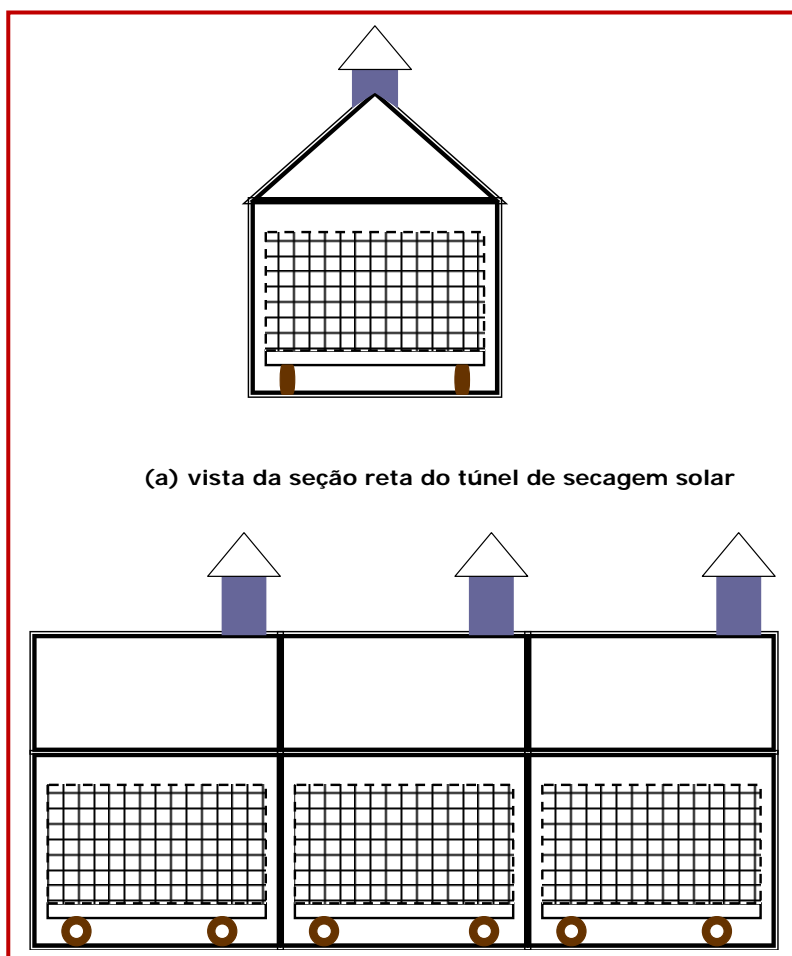
Figura 10.3 – Fragmentadora-separadora de fibras e casquilho – Method Machine Works Sdn Bhd – modelo COM 11A

10.6 – TÚNEL DE SECAGEM SOLAR DAS FIBRAS LIBERADAS DA POLPA

Esta etapa do processo de obtenção de carvão vegetal ativado a partir de resíduos de coco verde apresenta-se como um grande modificador nos processos convencionais encontrados na literatura, uma vez que será utilizada como fonte de energia para secagem, a luz solar, energia limpa e em abundância em países tropicais como o Brasil.

Esse tipo de processo já usado na indústria de alimentos na obtenção de alimentos desidratados e mostra-se muito eficiente reduzindo a umidade em torno de 70% - 85% (IAPAR). Com esta etapa o material que entrará na retorta vertical para carbonização terá o teor de umidade ideal para minimizar os gastos com substituição de componentes da retorta e com uso das correntes que deixam a etapa de ativação.

Este sistema de secagem pode ser complementado usando os gases que deixam a parte superior da retorta vertical oriundos da etapa de carbonização. Este procedimento poderá ser empregado em períodos chuvosos e com baixa luminosidade solar. As figuras 10.3 (a) e (b) representam as vistas da seção reta do túnel de pré-secagem solar. A figura seguinte mostra o carrinho transportador que será interno ao túnel de pré-secagem solar e a tabela 10.1 indica as características destes carrinhos.



(a) vista da seção reta do túnel de secagem solar

(b) vista lateral do túnel de secagem solar com três seções

Figura 10.4 – Túnel de secagem solar para cascas de coco verde fragmentadas, contendo paredes e teto de molduras com 2 placas de vidro comum separadas entre si com tubos de plástico de 1 cm de diâmetro, chaminés de chapa metálica galvanizada, que abrigarão a passagem de carrinhos com base e laterais metálicos galvanizados e rodinhas de borracha

10.7 – CARRINHOS TRANSPORTADORES DE CASCA DE COCO NA SECAGEM SOLAR

Os carrinhos transportadores poderão ser do tipo container para armazenagem de carga até 1000 kg com rodas de borracha 6" (desmontáveis) de acordo com a figura seguinte.



Figura 10.5 - Carrinhos transportadores que compõem o túnel de secagem solar (INARCAN)

Tabela 10.1 – Características dos carrinhos transportadores (INARCAN)

Características	
Comprimento	1000 mm
Largura	840 mm
Altura	800 mm
Capacidade	1000 Kg

10.8 – AS RETORTAS VERTICAIS DE CARBONIZAÇÃO E ATIVAÇÃO

As concepções preliminares expostas não possibilitaram em curto prazo detalhar os modelos de retortas de carbonização e ativação. Porém, admite-se que seja possível empregar paredes encamisadas em todas as unidades de carbonização e ativação para possibilitar o aproveitamento de energia na co-geração de vapor superaquecido para o processo.

Diversos materiais são empregados na construção de fornos e retortas, conforme a tabela 10.2 e servirão de base para futuros projetos de detalhamento.

Tabela 10.2 - Lista de materiais para fornos e retortas de carbonização

EQUIPAMENTO	MATERIAL	COMPONENTES	REFERÊNCIA
Tambor cilíndrico de óleo	Aço carbono		Quirino, 2002
Forno transportável TPI	Folha de aço	Cantoneiras - ferro	FAO, 1985
Forno container	Chapa metálica preta	Câmara de combustão - Alvenaria; Poço isolante - tijolo de argila, cimento, ferragens e areia; Fornalha - tijolos comum e refratários, areia lavada, terra, melaço, brita, cimento, ferragem e chapas metálicas	Barcellos, 2002
Forno container	Cilindro de aço com tampa de ferro fundido	Queimador de fumaça - tijolos comum e refratários, areia lavada, terra, brita, cimento, ferragem e trihos metálicos	Guimarães Neto, 2005
Forno JG-SCC	Folha de aço com cantoneiras de ferro		Pimenta, 2007
Forno com Caçamba	Chapa metálica SAE 1012	Unidade de isolamento - estrutura de alvenaria, porta metálica revestida com lâ de vidro; Câmara de combustão externa - Porta metálica revestida com lâ de vidro	Assis, 2007
Retorta Vertical Lambiotte	Aço / Aço inoxidável		FAO, 1985
Retorta de câmaras múltiplas	Cilindro horizontal de aço	Reservatório cilíndrico - material refratário	FAO, 1985
Retorta de vagões	Aço	Trilho - aço	FAO, 1985
Forno túnel horizontal		Vagonetes de aço	Gronli, 2005
Forno colméia	Tijolos, argamassa (argila, areia, melaço de cana de açúcar)		Moreira, 1964
Forno de encosta ou barranco	Tijolos comuns maciços, argamassa		Moreira, 1964
Colméia de barranco	Tijolos e argamassa		Moreira, 1964

10.9 – CONCLUSÕES DO CAPÍTULO 10 E DO PROJETO

1ª - Pretendeu-se projetar um coqueificador de cascas de coco verde incluindo as etapas dos processos de carbonização e ativação num só equipamento. A ampla literatura tecnológica consultada revela que essas duas etapas ocorrem em reatores químicos distintos.

2ª – Em geral, a ativação de carvões vegetais é promovida com a participação de agentes químicos ou de ação físico-química. Decidiu-se separar as retortas de carbonização e de obtenção do carbono ativado.

3ª - Foi proposto um processo de produção integrada de carvão vegetal e carbono ativado a partir da coqueificação dos resíduos das cascas de coco verde, que incluiu a sua pré-secagem solar e, duas rotas paralelas de ativação de carvão vegetal, em duas retortas adicionais, com os gases da combustão e do vapor produzido por uma caldeira.

4ª - Para realizar a pré-secagem solar foi concebido um equipamento de construção simples denominado “túnel de secagem solar” com módulos constituídos com paredes, telhados de vidro e chaminé individuais em cada segmento tridimensional, capaz de acolher containeres móveis com carga úmida de cascas de coco verde por vários dias.

5ª - No estágio atual das concepções entende-se que os dados reunidos servirão de base para projetos de detalhamento das retortas envolvidas, as quais serão construídas com paredes encamisadas para que possam minimizar as perdas térmicas e produzir vapor superaquecido ou saturado.

6ª – A concepção do processo básico de coqueificação e ativação envolve a queima do gás da madeira ou emissões gasosas e vapores pirolenhosos e alcatroados nas retortas de carbonização e ativação, porém, pode ser flexibilizada para separar esses compostos biocarboquímicos com vistas à sua comercialização.

7ª – A concepção do processo básico de coqueificação e ativação , também, possibilita que mais de uma retorta de ativação por vapor d'água ou por gases da combustão na caldeira seja incorporada no conjunto para maximizar o aproveitamento da energia térmica disponibilizada na queima das emissões da coluna de carbonização ou nas retortas de ativação.

10.10 - REFERÊNCIAS DO CAPÍTULO 10

ALMEIDA, M.R. e REZENDE, M.E. – **O processo de carbonização contínua da madeira** –in: PENEDO, W.R. (Ed.) - **Uso da Madeira para Fins Energéticos** – p. 141 – 156, CETEC, Belo Horizonte, 1982.

ASSIS, C.O. – **Sistema Alternativo para Carbonização de Madeira** - Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia da Madeiras, Universidade Federal de Viçosa, Orientador: Dr. Paulo Fernando Trugilho, Minas Gerais, 2007.

BARCELLOS, D.C. – **Forno Container para produção de carvão vegetal: desempenho, perfil térmico e controle da poluição** – Tese de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Orientador: Dr. Alexandre Santos Pimenta, Minas Gerais, 2002.

BRICARBRAS – **Inovação Tecnológica para Produção Limpa de Carvão Vegetal: Briquetagem e Carbonização do Brasil Ltda.** - *Biomassa & Energia*, v. 3, n. 1, 2006.

Comunicado Técnico 61 da EBRAPA - **Processo agroindustrial: obtenção de pó de casca de coco verde** - Fortaleza, CE, Dezembro de 2001

DPC – **Processo Drying-Pyrolysis-Cooling** – DPC Thermal Processing, acessado e extraído de www.dpcbiomassa.com.br em 05 de junho de 2010.

FAO - **Industrial Charcoal Making** - FAO Forestry Paper 63 – Forestry Department, FAO Corporate Document Repository, 1985 - Extraído de <http://www.fao.org/docrep/x5555e/x5555e03.htm>

GRONLI, M. - **Industrial production of charcoal** - Seminar on Energy Carriers and Energy Systems in Developing Countries held by Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Research Trondheim at Makerere and Uganda Universities, SINTEF Energy Reserch, N-7465 Trondheim, Norway, 2005 - extraído de <http://terrapreta.bioenergylists.org/files/Gronli.pdf> em 5 de agosto de 2010.

GUIMARÃES NETO – **Avaliação técnica e econômica de um forno container em escala industrial** – Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Orientador: Prof. Dr. Alexandre Santos Pimenta, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2005.

IAPAR – **Secador solar IAPAR** – Instituto Agrônomo do Paraná- extraído de http://www.iapar.br/arquivos/File/zip_pdf/secadorsolar_iapar.pdf em agosto de 2010.

INARCAN INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE ARAMADOS LTDA - **site de vendas**, disponível em: <http://www.inarcan.com.br/pages.php?CID=3&PID=3>, acessado em 15/08/2010.

MOREIRA, C.S. – **Contribuição ao estudo da eficiência de pequenos fornos na produção de carvão vegetal desinado a alto forno** – Tese de Doutorado apresentada à escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo – Piracicaba, SP, 1964.

PIMENTA, A.S. - **Comunicação privada – citada por Sueli de Fátima de Oliveira Miranda Santos** - setembro, 2007

QUIRINO, W.F. – **Utilização Energética de Resíduos Vegetais** – Laboratório de Produtos Florestais – LPF IBAMA – Convênio MMA/IBAMA/2001-06, ISBN 85-7300-131-3, 2002- cópia acessada e extraída de www.mundoflorestal.com.br em 15 de maio de 2010.

REZENDE, M.E. e CARAZZA, F. – **Pirólise e Biocarboquímica no Brasil - Bases para desenvolver uma nova indústria** – Forum Nacional sobre Carvão Vegetal, 2008, acessado e extraído de <http://painelflorestal.com.br/upload/biocarbo.pdf> em 08 de junho de 2010.

SANTOS, S.F.O.M. - **Produção de carvão vegetal em cilindros metálicos verticais: alguns aspectos referentes à sustentabilidade** – Dissertação de Mestrado, Orientador: Kazuo Hatakeyama, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2007.

ZAKON, A.; LAUS, A.C.O.; PIRES, A.L.A.C.; AZEVEDO, A.C.G. - **Secagem de Duas Turfas Fluminenses - Mineração e Metalurgia**, 50 (481), novembro, 1986