



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA METALÚRGICA

“PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL PARA
APLICAÇÃO NA SIDERÚRGICA E NA COCÇÃO DE ALIMENTOS:
ESTADO DA ARTE”

Felipe Luiz Ibrahim Oliveira

Ouro Preto, 16/12/2019

Felipe Luiz Ibrahim Oliveira

“Processos de produção de Carvão Vegetal para aplicação na Siderúrgica e na Cocção de Alimentos: Estado da Arte”

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. Dr. Claudio Batista Vieira

Ouro Preto, 16/12/2019

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O48p Oliveira, Felipe Luiz Ibrahim.
Processos de produção de carvão vegetal para aplicação na siderúrgica e na cocção de alimentos [manuscrito]: estado da arte. / Felipe Luiz Ibrahim Oliveira. - 2019.
33 f.: il.: color., gráf.. + Fluxograma.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Batista.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Metalúrgica .

1. Carvão Vegetal. 2. Siderurgia. 3. Carvão Vegetal - Cocção de Alimentos. I. Batista, Cláudio. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 669.01

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Felipe Luiz Ibraim Oliveira

Processos de Produção de Carvão Vegetal para Aplicação na Siderurgia e na Coccão de Alimentos: Estado da Arte

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico.

Aprovada em 18 de dezembro de 2019

Membros da banca

Prof. Cláudio Batista Vieira, Dr. - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Gilberto Henrique Tavares Alvares da Silva, Dr. (Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng. Sávio José de Oliveira, M.Sc.

Cláudio Batista Vieira, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 20/11/23



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Batista Vieira, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/11/2023, às 11:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0632052** e o código CRC **86B72231**.

RESUMO

O carvão vegetal consiste de uma das fontes energéticas renováveis mais importantes para a matriz energética brasileira. O uso na indústria siderúrgica e metalúrgica alavancou o Brasil como um dos maiores produtores e consumidores mundiais de carvão vegetal de *Eucalyptus* oriundo de florestas plantadas. Além do uso industrial, o emprego do carvão vegetal é importante para outros fins como cocção de alimentos, aquecimentos de lareiras, termoelétricas, cimenteiras, na purificação de água, em processos da indústria farmacêutica e outros. A qualidade intrínseca do carvão vegetal utilizado, principalmente, nas indústrias siderúrgicas e na cocção de alimentos consiste da análise dos parâmetros como: teores de umidade, de carbono fixo, de materiais voláteis, de cinzas assim como o poder calorífico. De modo geral, entende-se que, no Brasil, tem sido utilizada tecnologias de baixo rendimento energético para a produção desse tipo de biomassa o que leva a necessidade de desenvolvimento de estudos que contribuam para o aumento da eficiência produtiva. Dessa forma, este trabalho surgiu com a proposta de realizar, através de revisão de literatura, uma análise sobre os principais processos de produção do carvão vegetal utilizados no Brasil. Nos capítulos que seguem serão descritos de forma detalhada os fornos de alvenaria, fornos de superfície, fornos do tipo “Rabo Quente”, forno do tipo colmeia, forno retangular e forno metálicos de batelada. Ademais, será feita uma análise crítica a respeito de cada processo, apresentando as principais vantagens e desvantagens.

Palavras-chave: Carvão Vegetal. Siderurgia. Cocção de Alimentos.

ABSTRACT

Charcoal is a very important renewable energy source for Brazil. Use in the steel industry has boosted Brazil as one of the world's largest producers and consumers of eucalyptus charcoal from planted forests. Charcoal also has important use for other fins such as food cooking, fireplaces heaters, thermoelectric plants, cement plants, water purification, pharmaceutical industry and others. The main quality standards of charcoal intrinsic usually evaluated for use in steelmaking and cooking are: content, fixed carbon content, volatile materials content, ash content and calorific value. In general, low energy efficiency technologies were used in Brazil to manufacture this type of biomass. In this work, a literature review will be made about the main processes employed in Brazil for charcoal production. They will be cut in detail for masonry ovens, surface ovens, "Hot Tail" ovens, beehive ovens, rectangular and metallic batch ovens. In addition, a critical analysis will be made about each process, presenting its advantages and disadvantages.

Keywords: *Charcoal. Steel. Food Cooking.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Evolução da produção de ferro gusa nos estados dominantes.....	10
Figura 2 - Forno Meda.....	13
Figura 3 - Construção de um Forno tipo "Rabo Quente".	14
Figura 4 - Carregamento do Forno	15
Figura 5 - Ignição do Forno.....	16
Figura 6 - Descarga do Forno.....	16
Figura 7 - Carvão Vegetal	17
Figura 8 - Representação do Forno Colméia.....	18
Figura 9 - Representação do Forno Retangular.....	19
Figura 10 - Diagrama básico DPC-Utilização da Biomassa.....	21
Figura 11 - Planta DPC com 10 reatores interligados.	22
Figura 12 - Planta de carbonização UPEC-250	23
Figura 13 - Diagrama esquemático dos produtos obtidos com a pirólise no forno UPEC-250	24
Figura 14 - Fluxo simplificado do processo de carbonização Ondatec.	24

LISTA DE SIGLAS

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

DPC - *Drying Pyrolysis Cooling* (Secagem Pirólise Resfriamento)

IEA - *International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)

MG - Minas Gerais

PCI - *Pulverized Coal Injection* (Injeção de carvão pulverizado)

SP - São Paulo

UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto

UPEC - Unidade de Produção de Energia e Carvão

US\$ - Dólar Americano

VDL - VDL Siderurgia

SUMÁRIO

RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE SIGLAS	v
1 INTRODUÇÃO.....	7
2 OBJETIVOS.....	8
2.1. Objetivo Geral.....	8
2.2. Objetivos Específicos	8
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1. Histórico do uso do carvão vegetal no Brasil	9
3.2. Produção do Carvão Vegetal	10
3.3. Tecnologias convencionais para a produção do Carvão Vegetal.....	12
3.3.1. Forno de Terra ou Meda	12
3.3.2. Forno de Alvenaria	13
3.3.2.1. Fornos do tipo Rabo Quente e Encosta ou Barranco	14
3.3.2.2. Forno de Superfície ou Colmeia.....	17
3.3.2.3. Forno de Retangular	18
3.4. Tecnologias emergentes para a produção do Carvão Vegetal	20
3.4.1 Tecnologia de Forno de Metálico de Batelada	20
3.4.2. Forno DP	20
3.4.3 Forno de carbonização por micro-ondas (Tecnologia Ondatec)	22
3.5. Aplicação do carvão vegetal na Siderurgia.....	25
3.5.1 Carvão Vegetal na Sinterização do Minério de Ferro	25
3.5.2 Alto Forno à Carvão Vegetal.....	25
3.6. Aplicação do Carvão Vegetal na Cocção de Alimentos	26
4 CONCLUSÕES	26
5 SUSGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	27
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a EMBRAPA o carvão vegetal pode ser definido como uma fonte energética obtida a partir do processo termoquímico no qual a madeira é transformada em carvão por meio de reações químicas em altas temperaturas. Esse processo é realizado em fornos nos quais a disponibilidade de oxigênio é reduzida o que leva a uma queima incompleta da matéria orgânica, resultando apenas na modificação da estrutura da biomassa que é convertida em carvão, água e gases (CHIES & PICHELLI, 2022).

A *International Energy Agency* (IEA) destaca a importância dessa fonte energética ressaltando que sua aplicação pode ser empregada em diferentes áreas como a indústria siderúrgica, metalúrgicas, cimenteiras, cocção de alimentos e outros. Em virtude dessa ampla aplicação, é possível avaliar sua importância histórica e econômica no Brasil, sendo o mercado nacional o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal correspondendo a 30% da produção mundial, dos quais dois terços da produção são destinadas a indústrias siderúrgicas e metalúrgicas, principalmente na região de Minas Gerais (IEA, 2011; BRASIL, 2013).

A produção do carvão vegetal é desenvolvida em carvoarias de diversos tipos, desde as mais rudimentares compostas de fornos de alvenaria cuja criação remonta ao século passado, até as mais modernas e eficientes formas de produção como em fornos metálicos e até mesmo através de utilização de micro-ondas. Essas carvoarias, de uma forma geral podem ser definidas como os locais nos quais se desenvolvem a atividade de recebimento, enchimentos dos fornos, ignição, queimas, resfriamento e por fim o escoamento do carvão (PINHEIRO *et al.*, 2006).

A siderurgia Brasileira é a principal responsável pela demanda de carvão vegetal. Nessas indústrias essa fonte energética é utilizado basicamente em altos-fornos como agente termo redutor do minério de ferro para a produção de ferro-gusa, aços e ferro-ligas atuando com um substituto do coque nesse processo (ABRAF, 2012). Na maioria dos casos as empresas que utilizam o carvão vegetal em seus altos-fornos são empresas denominadas como guseiras, uma vez que são produzidos apenas um tipo de produto que é o ferro-gusa.

Devido à crescente demanda desse material que surgiu, principalmente, em virtude do aumento do consumo do carvão vegetal pelas empresas siderúrgicas, a cadeia produtiva buscou se modernizar, e através de melhorias da tecnologia de carbonização da madeira, tem sido possível produzir carvão com maior homogeneidade e qualidade agregada (REZENDE & SANTOS, 2010). Um dos fatores que contribui para os resultados apontado pelos autores, consiste da utilização de matéria prima padronizada, sendo ressaltado principalmente o uso do gênero *Eucalyptus* oriundas de florestas plantadas. É importante destacar ainda, que a utilização

dessas fontes em detrimento do uso de florestas nativas consiste de práticas sustentáveis que constituem as principais agendas para as empresas alinhadas com as questões ambientais nos dias atuais.

Além da ampla aplicação industrial, o carvão vegetal também possui significativa importância nos processos de cocção de alimentos, sendo que no Brasil é muito utilizado, pela população em aplicações domésticas necessárias como preparo de alimentos para o dia a dia ou mesmo para o lazer e interações sociais durante churrascos. Para que esse carvão seja melhor avaliado para essa aplicação é necessário que normas sejam seguidas. A qualidade adequada esperada para que esse carvão possibilite a efetiva cocção dos alimentos consiste da verificação de alta densidade relativa aparente, elevado poder calorífico, elevado teor de carbono fixo, baixo teor de voláteis e cinza e baixa umidade (RIBEIRO & VALE, 2006).

Portanto, tendo em vista que as questões como viabilidade econômica assim como a responsabilidade ambiental são fundamentais para as empresas se manterem no mercado comercial atual, é importante realizar profundas análises dos processos de produção do carvão vegetal, tendo em vista principalmente a necessidade de modernização e melhoria da tecnologia aplicada na carbonização da madeira.

2 OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Avaliar e comparar a produção do carvão vegetal no Brasil, a partir de florestas plantadas de *Eucalyptus* e as aplicações do carvão vegetal na siderurgia e no uso doméstico para a cocção dos alimentos.

2.2. Objetivos Específicos

- Analisar o desempenho e modos de produção do carvão vegetal em vários tipos de fornos;
- Revisar a literatura disponível sobre as técnicas de produção do carvão vegetal;
- Avaliar a aplicabilidade das técnicas à indústria siderúrgica e no uso doméstico.
- Realizar o levantamento de avaliações de especialistas da área.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Histórico do uso do carvão vegetal no Brasil

No Brasil, o carvão vegetal foi o grande propulsor do surgimento das indústrias siderúrgicas em razão, principalmente, da inexistência de boas reservas de carvão mineral bem como a abundância de florestas e vegetação nativa, dessa forma, esse material passou a ser usado como termo redutor na produção do ferro (BRITO, 1990). Graças a essas particularidades pode-se perceber que muitas usinas foram instaladas em locais com grande disponibilidade de florestas e minérios. Minas Gerais, por suas características naturais consiste do estado em que são encontrados grandes empreendimentos nessa área, nessa região do país e foi registrada a construção do primeiro alto-forno a carvão vegetal no ano de 1888, na cidade de Itabirito, local onde se localizava a antiga Usina Boa Esperança hoje pertencente à Siderúrgica Itabirito do grupo VDL. Posteriormente no ano de 1937, também em Minas Gerais entrou em atividade a primeira usina siderúrgica integrada da América Latina e a maior do mundo operando com carvão vegetal, a usina da Belgo Mineira na cidade de João Monlevade.

A partir da década de 1950 o carvão vegetal passou a ser utilizado em escala comercial em todo estado de Minas Gerais, chegando a responder por aproximadamente 90% da produção nacional de ferro-gusa. O crescimento da produção chegou ao patamar de se tornar na década de 1970 o maior polo siderúrgico do mundo gerado a carvão vegetal (REZENDE & SANTOS, 2010).

Com o aumento da produção de carvão vegetal, na década de 1960 o Governo Federal propôs incentivos fiscais para siderúrgicas que destinaram os recursos para a formação de florestas plantadas. Essa política foi incentivada em razão de grande parte de o carvão ser oriundo de desmatamento de matas nativas, que levava a impactos ambientais para a fauna e flora nacional. Com o cenário que se desenhava foi entendido que era preciso transformar o consumo de carvão a partir de florestas nativas por florestas plantadas. Com isso, entre os anos de 1966 e 1988 teve-se um elevado aumento na produção de carvão vegetal no país. Inicialmente foi estabelecido que 50% da receita oriunda do imposto de renda das siderúrgicas a carvão vegetal seria reembolsados e destinados para projetos de formação de plantações florestais. (MENDES, 2004; MONTEIRO, 2006; VITAL & PINTO, 2011).

Mesmo com o domínio do estado de Minas Gerais, com os polos de guseiros em Sete Lagoas e Divinópolis, verificou-se um grande crescimento do polo de Carajás no Pará, que tinha um consumo praticamente constante até a década de 80. A partir desta época essa região

apresentou um crescimento considerável, pela descoberta de jazidas de minério com alto teor de ferro e disponibilidade de carvão vegetal barato de origem de matas nativas proveniente de desmatamento para a pecuária e de indústrias madeireiras na região (CGEE, 2009). A figura 1 exemplifica de forma concisa a evolução da produção de ferro gusa nesses estados dominantes.

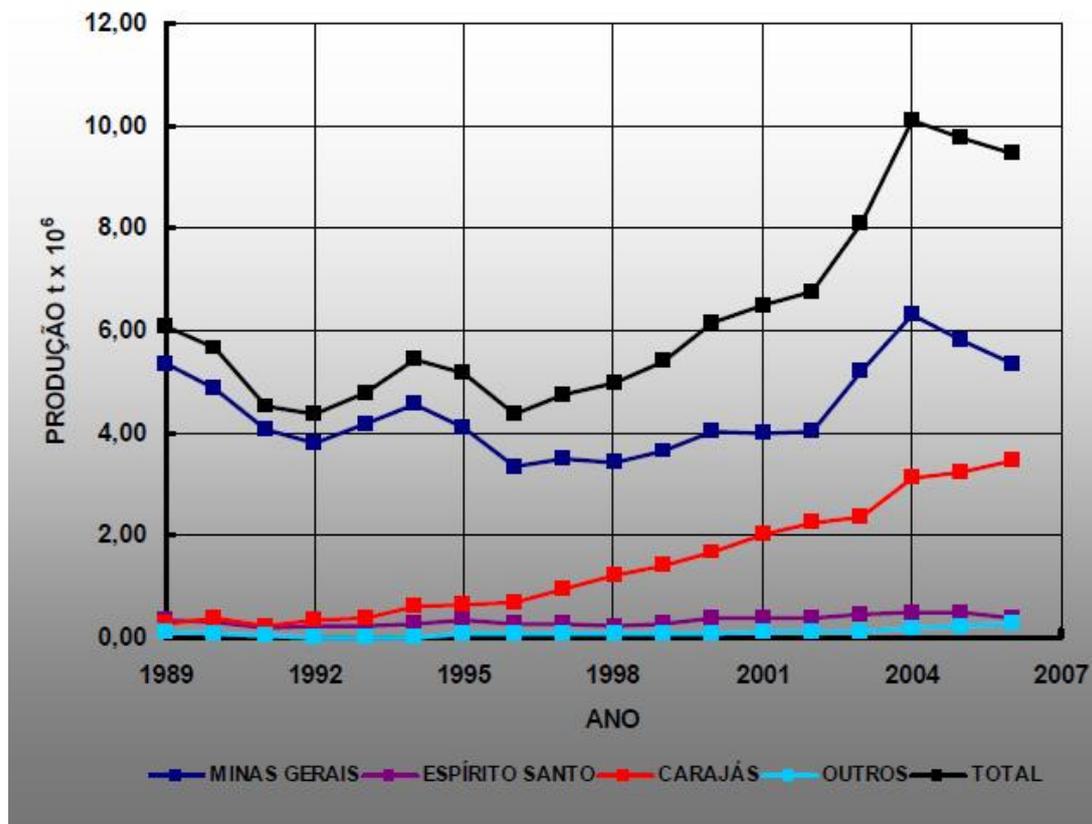


Figura 1- Evolução da produção de ferro gusa nos estados dominantes. (CGEE, 2009)

3.2. Produção do Carvão Vegetal

A produção do carvão vegetal se inicia com a preparação do terreno para o plantio das mudas das árvores das quais se produz a madeira. A espécie mais comum e adaptada ao clima e solo brasileiro pertence ao gênero *Eucalyptus*, essa espécie tem como principais vantagens a rusticidade e homogeneidade das árvores, além da facilidade de adaptação aos vários tipos de ecossistemas. Após o plantio é feito o corte das árvores com aproximadamente cinco a seis anos de idade, época na qual já apresentam alturas e densidades ideais para a extração. Outra vantagem da espécie eucalipto reside na capacidade de se rebrotar por até três vezes a cada seis

a sete anos. Para garantir uma produção homogênea e de qualidade é importante utilizar mudas com procedência, geralmente obtidas a partir de mudas de clones selecionados.

Normalmente o corte é feito de maneira mecanizada com o uso de motosserras ou mesmo máquinas de grande porte, que além do corte da árvore disponibilizam a madeira em tamanhos uniformes. Após as árvores serem derrubadas a madeira deve ser deixada com tamanho ideal exigido para cada tipo de forno e antes do uso passa pelo processo de secagem. Esse processo de secagem leva em torno de aproximadamente 70 dias sendo influenciada principalmente pela época do ano, nessa secagem a madeira perde a umidade relativa e passa a apresentar as condições para o efetivo processo de carbonização. A madeira cortada é juntada em local de fácil acesso para que haja o transporte correto para os fornos.

A produção do carvão vegetal ocorre em carvoarias, nesses locais onde se concentram os fornos de operação tem-se o recebimento da madeira seca que é levada aos fornos para a produção. Existem diferentes tipos de carvoarias para a produção de carvão, algumas com processos rudimentares que em sua maioria é caracterizada por grandes impactos sociais e ambientais e de baixa produtividade, e outras que já tem aplicações tecnológicas que aumentam a eficiência do processo e não geram impactos socioambientais significativos. A maior parte do carvão vegetal produzido no Brasil é obtido a partir de processos rudimentares e artesanais, cuja carga de madeira é levada no interior do forno geralmente construído a partir de chapas metálicas, alvenaria ou ambos. A pirólise desses processos são controlados pela combustão no interior a partir de orifícios no corpo do forno para a entrada de ar e os gases saem pela chaminé (DALLASTRA, 2010). A coloração dos gases e seu volume ajudam na operação do forno, os trabalhadores que atuam no cozimento do carvão observam essas características para avaliar o processo, quando o volume produzido diminui e os gases passam a apresentar uma coloração azulada são indicadores de que o processo está perto do fim.

O carvão vegetal é o resultado de um processo de pirólise ou carbonização, em que ocorre a decomposição térmica da biomassa sem a presença de oxigênio. Vários tipos de biomassas podem ser usados, mas a lenha é a principal matéria prima utilizada. Esse material além de ser empregado na cocção de alimentos e aquecimento, é amplamente utilizado na indústria de aço, ferro e de ferros-liga. O carvão produzido a partir da lenha tem a vantagem de ser muito mais puro que o coque, por apresentar baixo teor de enxofre e cinzas, que resulta em um ferro-gusa mais resistente, menos quebradiço e maleável para se forjar (CGEE, 2009).

3.3. Tecnologias convencionais para a produção do Carvão Vegetal

No Brasil a produção de carvão vegetal até a década de 1950 era realizada praticamente em fornos do tipo meda. A partir da década de 50 iniciou-se a produção em fornos do tipo “Rabo Quente”. Devido à rápida e fácil construção, alta produtividade e operação simples essa forma de produção se transformou na tecnologia mais utilizada desde aquele tempo até os dias de hoje, sendo que aproximadamente 80% da produção nacional de carvão vegetal é realizada nesses fornos. Na década de 60 com o aumento da demanda pelas siderúrgicas buscaram-se outras tecnologias que possibilitassem o aumento da produção, dessa forma, foram observados os primeiros relatos do uso de Fornos de Superfície Circulares de alvenaria nos quais eram produzidos até 20 m³ de carvão por fornada. Na década de 90 uma nova tecnologia surgiu proporcionando produtividades mais elevadas pela mecanização da produção com a utilização de Fornos Retangulares ou Forno Container, que possuem como característica a possibilidade do carregamento mecanizado e produção associada de até 100 m³ de carvão por batelada (CGEE, 2009).

3.3.1. Forno de Terra ou Meda

O forno de Terra ou Meda é a forma mais antiga de produção de carvão e a mais empregada pelo mundo, com relatos de uso que passam pelos persas, egípcios e chineses que já empregavam esse processo de carbonização no passado. Esse tipo de forno ainda é amplamente utilizado em países ainda em desenvolvimento (CGEE, 2009).

Ainda de acordo com os autores, essa tecnologia começou a ser utilizada em Fornos poço que eram escavados a partir de vala no solo. A vala era carregada com a madeira a ser carbonizada e coberta com uma camada de capim e terra. A ignição era realizada por uma chaminé que era deixada no topo para a circulação do ar. A partir desse início o método foi aperfeiçoado para o Forno do tipo Meda, que é acima do solo e permite um maior controle da carbonização e da combustão do que o forno poço.

No estágio inicial de construção do forno meda, é hasteado um mastro central que atua como chaminé, em volta deste mastro é feita a arrumação da madeira em pilha na forma circular em um terreno limpo e plano denominado praça. No segundo estágio são colocadas camadas de palhas e capim sobre a madeira e em cima dessa camada de palha é adicionada uma camada de terra com espessura de aproximadamente 10 a 25 cm, na base é feita abertura para a circulação da corrente de ar, a figura 2 exemplifica o processo descrito. O acendimento é

realizado a partir da entrada deixada pelo mastro na chaminé. Quando a madeira pega fogo esta abertura é tampada e a queima é regulada pelas aberturas laterais na base do forno. O processo tem duração variada que gira em torno de 10 a 12 dias até a conclusão (CGEE, 2009).

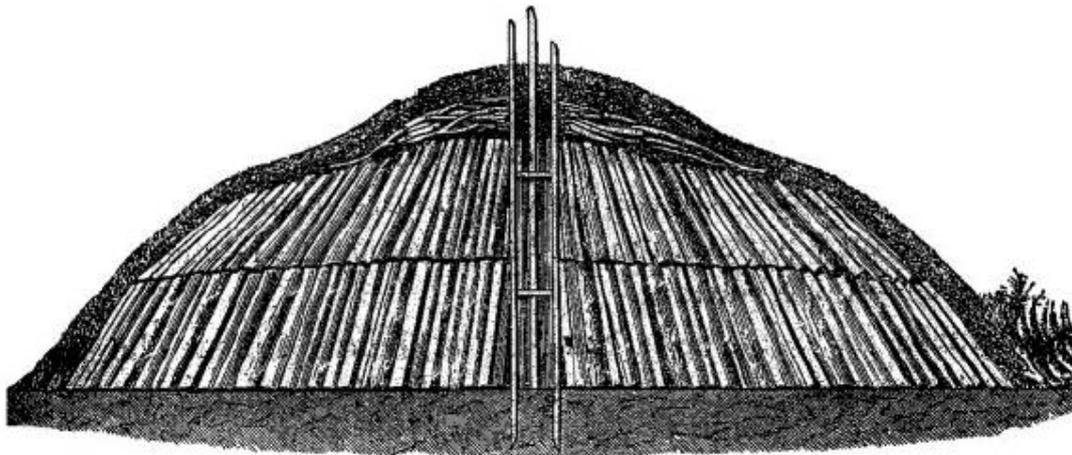


Figura 2 - Forno Meda.
Fonte: CGEE (2009)

Entre as vantagens desse processo tem-se o fato de os fornos serem construídos no mesmo local da retirada da madeira e não exige de investimentos em matérias como tijolos, cimentos e metais. Porém, a operação desses fornos exige mão-de-obra intensiva para cobrir a lenha com a terra e a limpeza do carvão com a camada de terra sobre ele, além da necessidade de acompanhamento com reparos da estrutura nas primeiras 24 horas do processo, uma vez que após o início da queima a estrutura está condicionada ao surgimento de algum tipo de colapso. Outras desvantagens consistem do longo tempo de carbonização, além da qualidade e rendimento aleatórios do carvão. Além disso, ainda existe a vulnerabilidade por chuvas e outras condições ambientais. A literatura aponta que a utilização de fornos do tipo meda concentra-se principalmente em regiões mais carentes (CGEE, 2009).

3.3.2. Forno de Alvenaria

A construção de fornos de alvenaria é feita a partir de tijolos de barro e variam de formas, tamanho e quantidade de chaminés. Existem várias formas de construção desses fornos de alvenaria e esses podem ser classificados como fornos tipo Rabo Quente, Colmeia e de Encosta. Entre suas principais características destaca-se o sistema de carbonização descontínuo da madeira que é mais utilizado principalmente em razão do custo de construção mais baixo, rendimento aceitável e fácil operação.

3.3.2.1. Fornos do tipo Rabo Quente e Encosta ou Barranco

Estima-se que aproximadamente 80% do carvão vegetal produzido no Brasil é obtido a partir de pequenos e médios produtores em fornos de alvenaria. A maior parte dessa produção ocorre em fornos do tipo “Rabo Quente” e de “Encosta” sendo que a principal distinção entre eles consiste do local onde é realizada a queima (CGEE, 2009). De acordo com os autores, os fornos do tipo “Rabo Quente” são construídos em locais planos e o de “Encosta” geralmente é construído aproveitando algum barranco próximo. A construção desses fornos é feita com tijolos de barro cozido, argamassa de barro (combinado de terra, areia e água) e areia, como pode ser observado na figura 3. A utilização de areia tem como objetivo reduzir o surgimento de trincas que podem surgir devido à variação de temperatura que o forno sofre durante a carbonização. Como característica construtiva destaca-se a presença de uma porta na parte da frente do forno por onde é realizado o carregamento da madeira e a descarga do carvão, ambos de forma manual.

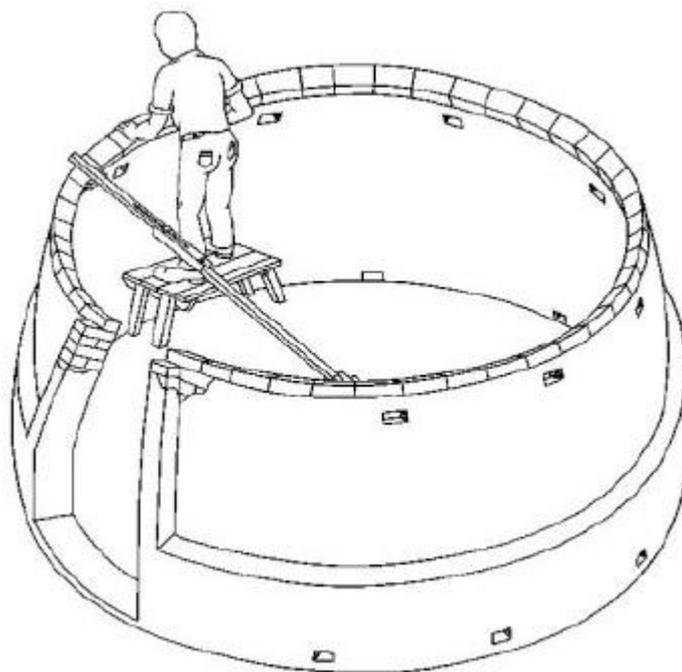


Figura 3 - Construção de um Forno tipo "Rabo Quente".
Fonte: CGEE (2009)

Os fornos tipo “Rabo Quente” e “Encosta” geralmente não possuem chaminés e a entrada de ar ocorre a partir de orifícios distribuídos ao longo de sua circunferência denominados tatus. A saída dos gases que são gerados é ocorre a partir dos orifícios distribuídos

por sua superfície denominados ventaneiras ou baianas. Esses fornos têm dimensões que variam de 2,90 a 3,80 m de diâmetro na base e 2,20 a 2,50 m de altura máxima. Os custos de fabricação dos fornos variam em torno de R\$800,00 a R\$1000,00 e tem capacidade de operação por 5 anos ou até mais dependendo da manutenção.

A operação desses fornos possui basicamente três estágios, que consistem do carregamento do forno, carbonização e descarga do carvão produzido. O carregamento deve ser feito com a madeira seca e tamanho da lenha controlados (com no máximo 1,30 m de comprimento), além disso, o arranjo da madeira no interior do forno também deve ser controlado. A madeira deve ser arranjada de forma que a primeira camada seja disposta na vertical, a segunda camada de lenha na horizontal e a lenha de menor espessura devem ser colocadas entre os toletes mais espessos. O surgimento de camadas vazias entre a lenha carregada além de não permitir o uso do volume total do forno também prejudica o processo de carbonização, afetando negativamente o rendimento do forno. O acendimento do forno é feito em orifícios deixados na parte superior, usando algum material que se inflame facilmente. O controle é feito empiricamente, através da análise cor da fumaça que sai durante o processo, a fumaça de cor esbranquiçada significa o início da carbonização e a fumaça de cor azulada significa que a carbonização está em seu ápice. A temperatura de carbonização varia em torno de 450°C a 500°C em um ciclo total de 10 dias. Quando a fumaça azulada diminui a quantidade entende-se que se trata do momento de fechar as baianas e aguardar os fornos se resfriem até uma temperatura de 60°C aproximadamente, para que seja possível realizar o descarregamento do forno, as figuras 4-6 ilustram o processo descrito.

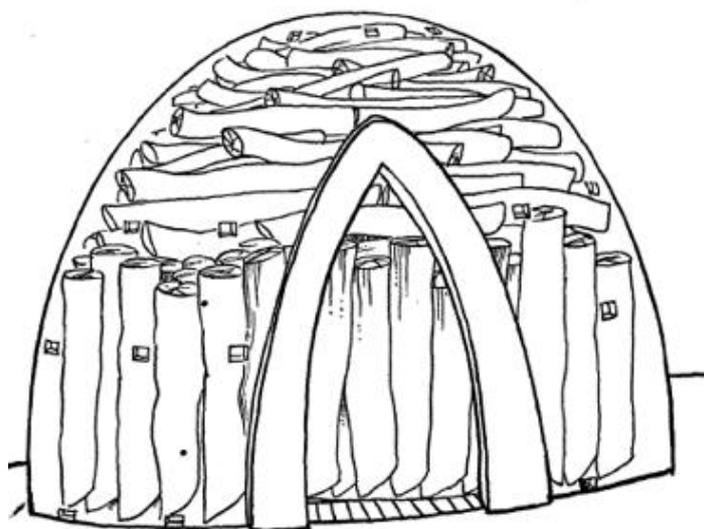


Figura 4 - Carregamento do Forno
Fonte: CGEE (2009)



Figura 5 - Ignição do Forno.
Fonte: CGEE (2009)



Figura 6 - Descarga do Forno.
Fonte: CGEE (2009)

É importante ressaltar que nos processos convencionais de produção de carvão vegetal em fornos “Rabo Quente” e “Encosta”, tanto o rendimento quanto as qualidades físicas e químicas do carvão não dependem só das características da lenha, mas também da habilidade dos carbonizadores (carvoeiros). Um forno “Rabo Quente” e de “Encosta” que suporta entre 8 e 9 estéreos (pilha de madeira com 1 metro de comprimento, 1 metro de largura e 1 metro de altura) tem a capacidade de produzir entre três e quatro toneladas/mês de carvão. É considerado um processo de baixa produtividade devido ao reduzido rendimento gravimétrico (massa de carvão final em relação à massa de madeira) e ao excesso de queima da madeira e suas características rudimentares (CGEE, 2009).



Figura 7 - Carvão Vegetal

3.3.2.2. Forno de Superfície ou Colmeia

O forno colmeia é um forno de superfície cilíndrico, feito de tijolos maciços, fechado no topo com uma cúpula semiesférica e rejuntado com argamassa de barro, areia e água. É um forno muito utilizado nas medias e grandes empresas siderúrgicas integradas que tem produção própria, pois consiste de um forno que tem dimensões maiores que os fornos convencionais do tipo “Rabo Quente” e “Encosta”. Possuem dimensões entre 3 a 8 metros de diâmetro da base e altura de 3,2 a 5,0 metros. Pode ter uma ou duas portas de acesso onde são realizados o carregamento da lenha e a descarga do carvão. É um forno de dimensões robustas com baixos investimentos de instalação, operação e manutenção simples. Mão-de-obra não precisa ser especializada e apresenta bom rendimento gravimétrico, a figura 8 apresenta uma ilustração desse tipo de forno (CGEE, 2009).

O carregamento do forno colmeia é feito de forma semelhante ao do forno do tipo “Rabo Quente”, depois de carregado o acendimento do forno é feito pelo topo. Nos orifícios abertos na cúpula e nas entradas nas soleiras o ar penetra no seu interior. Quando a combustão chega a estes orifícios da cúpula os mesmos são fechados com barro e a tiragem continua em chaminés construídas em torno de sua circunferência. A carbonização completa dura em torno de quatro

a cinco dias, etapa na qual o forno é totalmente tampado e vedado com barro, iniciando o processo de resfriamento que leva em torno de três a quatro dias. Este processo geralmente consiste do uso de baterias de 20 a 40 fornos em que dois trabalhadores conseguem operá-los facilmente, desde a carga, carbonização e descarga. O forno apresenta um custo de instalação que varia entre US\$ 700,00 a US\$1200,00 e tem uma durabilidade de cinco anos ou mais dependendo de sua manutenção (CGEE, 2009).

Ainda de acordo com os autores, comparado com o Forno “Rabo Quente”, o Forno Colmeia tem as vantagens de obter uma carbonização mais homogênea e resfriamento mais rápido devido à ventilação externa em torno de suas paredes. Esses fornos também possuem maior facilidade de vedação de suas entradas de ar, fáceis controle de operação e da carbonização, baixo custo e fácil construção. Além disso, o tempo médio de um ciclo de carbonização dura entre 8 a 12 dias dependendo de seu diâmetro.

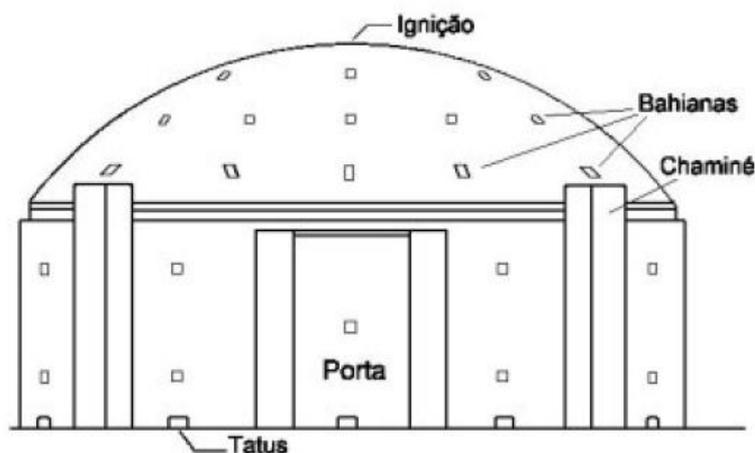


Figura 8 - Representação do Forno Colmeia.
Fonte: CGEE (2009)

3.3.2.3. Forno de Retangular

A tecnologia dos fornos retangulares chegou no Brasil em 1988 pela Mannesmann, figura 9. São fornos construídos com tijolos maciços, e uma estrutura de concreto capaz de suportar a abóbada. Uma vantagem importante associada a esse tipo de tecnologia consiste do fato de se ter uma porta com dimensões grandes feitas a partir de material metálico com duas seções, revestida com argila expandida ou fibra cerâmica que permitem o carregamento da lenha e descarga do carvão a partir do uso de máquinas. Esses fornos possuem até duas entradas de ar e uma chaminé. Como mencionado, todo o processo de enchimento e descarga é realizado mecanicamente por tratores e caminhões, e o processo geralmente dura em torno de um dia. A carbonização completa pode durar até seis dias e o resfriamento até 14 dias (CGEE, 2009).

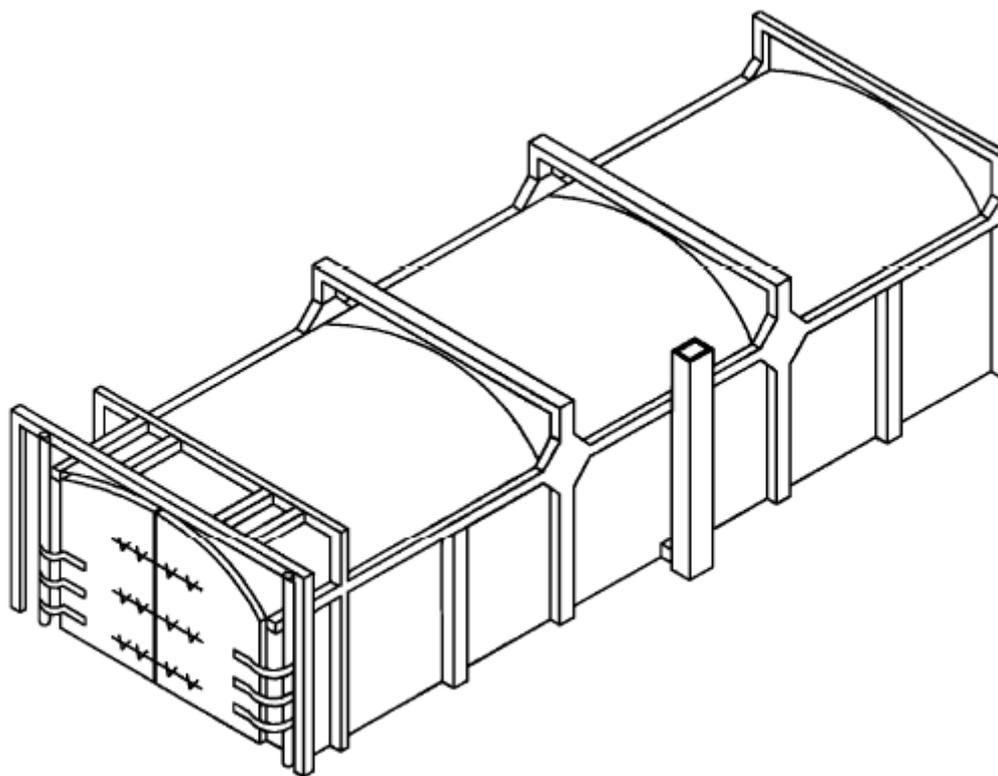


Figura 9 - Representação do Forno Retangular. (CGEE, 2009)

A principal vantagem do forno retangular em comparação com os fornos de superfície circulares (Colmeia) consiste da maior capacidade de produção, além da possibilidade do uso de máquinas para sua carga e descarga, que torna o processo mais rápido. Essa questão geralmente é levada em conta e aplicada em plantas que tenham um grande número de fornos, para que o processo possa ser contínuo (CGEE, 2009). Para os autores, entre as desvantagens desse dos fornos retangulares destacam-se o alto custo de implantação e por serem fixos, não podem ser demolidos e construídos em outros lugares sendo necessário transportar a madeira até eles para a queima e produção do carvão. Outra importante desvantagem reside na característica construtiva associada às grandes dimensões que, por sua vez resultam em um processo de carbonização não homogênea, dessa forma pode ser produzido carvão vegetal com diferentes características depende de sua posição dentro do forno, gerando tiços e teores de cinzas elevados.

3.4. Tecnologias emergentes para a produção do Carvão Vegetal

3.4.1 Tecnologia de Forno de Metálico de Batelada

Os fornos metálicos de batelada são fornos de carbonização pequenos que podem ser transportados até a área próxima da extração da lenha, com isso, diminui o custo de transporte da madeira. São fornos que possuem certa facilidade de operação, a partir de um ciclo de carbonização curto em relação aos modos mais usuais e um rendimento gravimétrico entre 15% a 20%. A esses fornos podem ser associados um alto custo de implementação e uma elevada perda de calor nas suas paredes, sendo essas algumas desvantagens desse processo, mas ainda sim, para grandes produtores consiste de um processo viável e lucrativo, por exemplo, no Brasil o sistema que obteve sucesso foi o do forno DPC (*Drying Pyrolysis Cooling*) (CGEE, 2009).

3.4.2. Forno DP

O processo do forno DPC, figura 10, se baseia em um sistema de queima de gases e transmissão de calor, fazendo a secagem, carbonização e resfriamento do carvão. O princípio básico de funcionamento deste tipo de forno consiste do processo de carbonização em que são os gerados gases condensáveis e não condensáveis com alto poder calorífico. Esses gases por sua vez, são reaproveitados pela queima na câmara central de combustão gerando gases quentes que agem como fluidos de transporte de calor para a etapa endotérmica na secagem da madeira. Como não há entrada de ar nesse tipo de reator, os gases de carbonização têm o poder calorífico suficiente para sua queima, evitando-se assim, a queima de biomassa. A utilização desse tipo de forno pode levar a um rendimento gravimétrico de até 42% (CGEE, 2009).

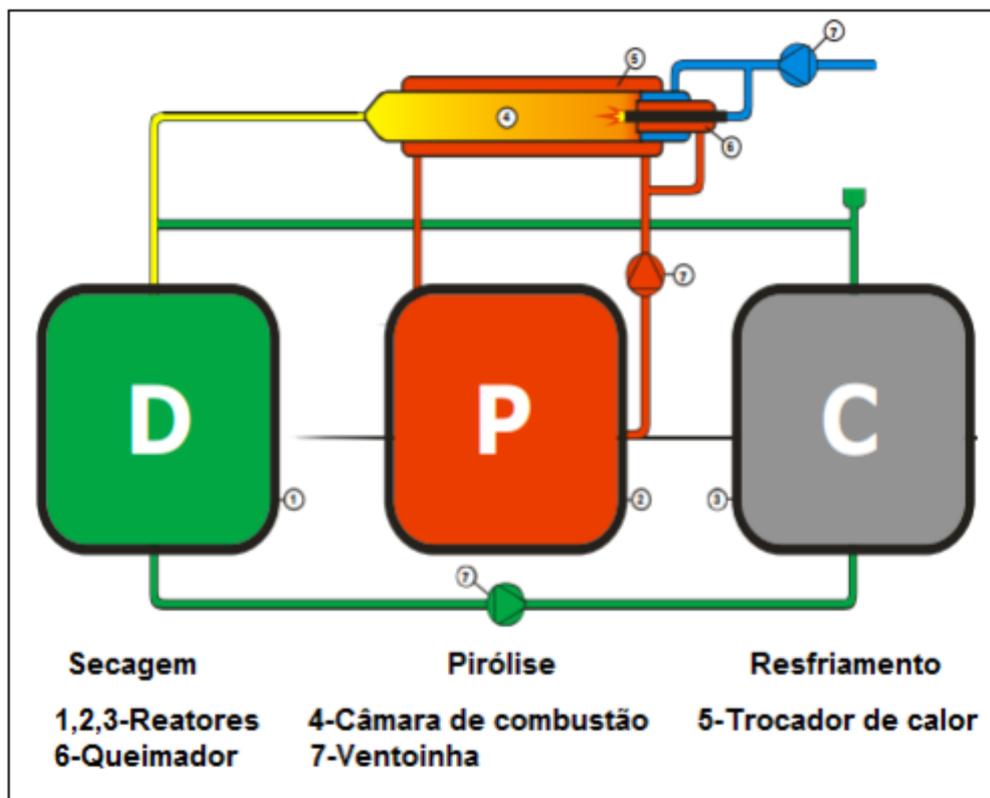


Figura 10 - Diagrama básico DPC-Utilização da Biomassa. (LÚCIO, 2011)

Ainda de acordo com CGEE (2009), os fornos DPC, figura 11 utilizam em sua produção o processo conhecido como “roll-on” para colocar a madeira no reator e retirar o carvão, que consiste de um sistema que se desloca até o local da retirada da madeira, carrega e leva ao reator e após a carbonização faz a retirada direta do carvão produzido para o consumo. Esse processo possui vantagens como a madeira utilizada como matéria-prima pode ser colocada no interior do reator com qualquer comprimento, não sendo necessário, portanto, uniformidade. Além disso, como não se consome parte da carga para sustentar energeticamente o forno, tem-se o aumento do rendimento gravimétrico do processo, não existem limitações quanto ao teor de umidade contido na madeira e também é possível associar ao processo um alto grau de mecanização e automação. Em relação ao controle de umidade neste processo os gases gerados são capazes de secar até 50% de umidade, sendo o valor máximo que uma árvore pode conter após o corte. O rendimento gravimétrico é superior aos outros processos, principalmente em função da utilização dos gases obtidos na carbonização como fonte energética e devido ao fato de consumir parte da carga. Os autores também destacam como uma vantagem a não emissão de gases nocivos à atmosfera, pois os mesmos são queimados.

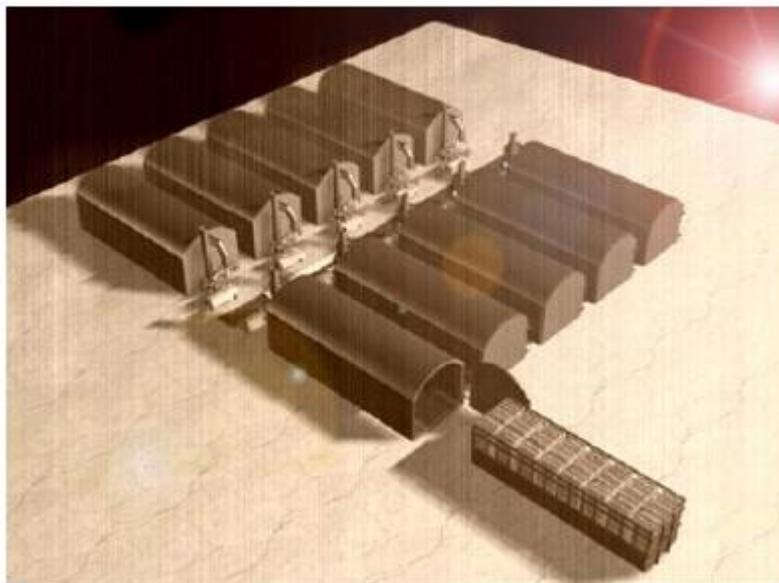


Figura 11 - Planta DPC com 10 reatores interligados. (CGEE, 2009)

3.4.3 Forno de carbonização por micro-ondas (Tecnologia Ondatec)

A tecnologia da Ondatec vem sendo desenvolvida ao longo dos últimos quinze anos, e consiste da carbonização da madeira por meio de micro-ondas. Esse forno foi denominado como Unidade de Produção de Energia e Carvão (UPEC-250), figura 12, e é caracterizado por ser uma unidade de desenvolvimento de tecnologia de micro-ondas capaz de promover a carbonização da madeira de forma mais sustentável que os outros processos já conhecidos. Esse processo inovador da Ondatec tem um aproveitamento de até 100% da matéria prima utilizada uma vez que os gases eliminados durante o processo são reaproveitados na geração de energia elétrica. (CGEE, 2015).

Os autores destacam ainda que o primeiro protótipo conhecido foi instalado na cidade de Tietê (SP) em 2011 e após várias versões em que foi necessário realizar as validações técnicas de engenharia e de processo teve um modelo industrial que funcionou até 2013. No final de 2013, esse protótipo, que consistia de uma forma inovadora de produzir carvão vegetal e energia elétrica via a queima das fumaças condensáveis e dos gases não condensáveis provenientes do processo de carbonização, foi transferido para a cidade de Uberaba (MG), onde foi feita uma parceria com a Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig) e a Universidade de Ouro Preto (UFOP). Ainda que essa planta seja dependente de energia elétrica com a geração de sua própria energia ela consiste de um sistema autossuficiente que pode até mesmo ser viabilizada como uma instalação em escala industrial.

Durante a combustão nesse forno, a lenha de eucalipto é introduzida no secador a gás, que tem atmosfera controlada e temperatura elevada, com o intuito de obter a umidade final de 5%. A madeira seca passa pelo toletamento através de um equipamento especialmente desenvolvido para este fim, com elevada capacidade de produção, para a obtenção de peças com altura máxima de 20 centímetros. Os toletes são inseridos no forno por meio de um alimentador pneumático e então seguem pela esteira através da cavidade pirolítica, até sua transformação em carvão. Na saída do carbonizador, o carvão é depositado em containers projetados para o seu resfriamento e logo em seguida encaminhado para o setor de expedição. Vale ressaltar que durante todo o processo, o carvão não entra em contato com o solo (o que evita qualquer tipo de contaminação). A fumaça gerada no processo é subdividida em duas frações: gases não condensáveis e bio-óleo, que são aproveitados na secagem de madeira, no sistema de cogeração de energia elétrica (caldeira a vapor ou motogerador) e/ou em biorredutores) figura 13 e 14.



Figura 12 - Planta de carbonização UPEC-250 (ONDATEC, 2013)

O aquecimento é feito basicamente por dois mecanismos que é rotação de dipolo e condução iônica. A rotação de dipolo, quando irradiados com micro-ondas, os dipolos ou íons da amostra alinham em função do campo elétrico aplicado. À medida que o campo elétrico oscila, ou até mesmo devido a sua remoção, os dipolos ou íons tentam realinhar-se (voltar a um estado desordenado), dessa forma a energia absorvida para a orientação dos dipolos ou íons é convertida e dissipada na forma de calor. O segundo modo de aquecimento por micro-ondas é denominado condução iônica, neste método o calor é gerado através de perdas por fricção, que acontecem por meio da migração de íons dissolvidos quando sob a ação de um campo eletromagnético.

Entre as vantagens desse processo tem-se o baixo tempo de processo, não há emissão de poluentes, é possível um aproveitamento de 100% da matéria-prima, é possível oferecer melhores condições de trabalho, é processo estável e com controle inteligente, utiliza-se apenas madeira de reflorestamento. No entanto esse processo possui algumas limitações como a inexistência de uma planta operando em larga escala que possa ter um custo benefício competitivo com o mercado atual de carvão vegetal. Além disso, também falta um mercado consumidor do bio-óleo (líquido pirolenhoso e alcatrão), produzido nesse processo.

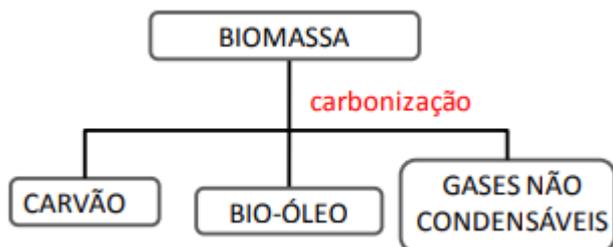


Figura 13 - Diagrama esquemático dos produtos obtidos com a pirólise no forno UPEC-250 (ONDATEC, 2013)



Figura 14 - Fluxo simplificado do processo de carbonização Ondatec. (ONDATEC, 2013)

3.5. Aplicação do carvão vegetal na Siderurgia

3.5.1 Carvão Vegetal na Sinterização do Minério de Ferro

A sinterização é o processo de aglomeração dos finos de minério de ferro, os quais são utilizados finos de minério, de calcário, de dolomita, de quartzito e de carvão que são misturados e adicionados um nível de umidade pré-estabelecidos e então colocados em uma esteira contínua e submetidos a um tratamento térmico de alta temperatura. O calcário a dolomita e o quartzito são utilizados com o fim de obter um composto de baixo ponto de fusão para permitir a aglomeração de toda a mistura. O resultado dessa aglomeração é resfriado e levado para o alto forno sendo denominado como sinter. As sinterizações são instaladas dentro de siderúrgicas visando o aproveitamento de todos os finos gerados (CGEE, 2009).

Os autores ressaltam ainda que os finos de carvão depois da ignição do processo têm como papel principal manter elevadas as temperaturas no interior das camadas de misturas, assim, sustentando as exigências térmicas da carga a ser sinterizada. Esses finos de carvão substituem finos de coque no processo, diminuindo o custo de produção ainda que a utilização do carvão seja pequena, em torno de 5 a 8% na mistura a ser sinterizada.

3.5.2 Alto Forno à Carvão Vegetal

No alto forno a substituição do coque pelo carvão vegetal é natural. O coque e o carvão têm o mesmo papel na produção do ferro gusa no alto-forno, mas com algumas modificações da qualidade do ferro gusa, produtividade, métodos operacionais dentre outros. A literatura aponta que recentemente outra alternativa de aproveitamento dos finos de carvão que são gerados nos processos de fabricação pode ser associada com a tecnologia de injeção de finos de carvão nas ventaneiras do alto-forno o PCI, método utilizado para reduzir o consumo de coque e carvão vegetal nas cagas do alto-forno (CGEE, 2009).

Segundo os autores, as vantagens no uso de carvão vegetal no alto-forno comparado ao coque de carvão mineral pode ocasionar, consiste da operação com níveis térmicos de 100°C a 150°C inferiores com a operação à coque, que geram menor perda térmica por tonelada de gusa produzido e menos desgaste de refratário no processo. Também tem-se a geração de uma quantidade inferior de escória no processo, que conseqüentemente irá reduzir o consumo de energia para a fusão da escória, o impacto ambiental causado com os resíduos da escória elimina a necessidade de dessulfurar o gusa. E por ter resistência mecânica inferior que o coque, o

carvão vegetal tem limitações no seu uso depende do tamanho do alto-forno, principalmente por não conseguir suportar uma carga tão alta como o coque suporta. Mas os estudos assim como a aplicação prática desse material demonstram que o potencial do carvão vegetal é grande na siderurgia e deve ser explorado (CGEE, 2009).

3.6. Aplicação do Carvão Vegetal na Cocção de Alimentos

No Brasil o carvão vegetal além de ser utilizado na siderurgia também é muito usado na cocção dos alimentos como o típico churrasco. Para a comercialização de um carvão de boa qualidade para este fim, é necessário que ele tenha alta densidade, teores altos de carbono fixo, alto poder calorífico, baixa umidade, baixo teor de materiais voláteis e um baixo teor de cinza.

A produção do carvão vegetal para a cocção de alimentos na sua maior parte, é realizada por pequenos produtores em fornos de alvenaria, principalmente em detrimento do alto investimento. Após a produção do carvão, o mesmo é empacotado em sacos de papel do tipo *kraft* natural e comercializado. É comum a utilização de peneiras vibratórias para empacotar o carvão, em que é realizada a separação entre os finos e o carvão de tamanho desejável para a venda. Após a seleção do tamanho do carvão e empacotamento os sacos são pesados e costurados e em seguida são levados para serem vendidos em diversos tipos de comércios, chegando assim para os consumidores finais, em suas residências.

4 CONCLUSÕES

Com base no trabalho desenvolvido por meio de revisão da literatura narrativa, foi possível observar que se podem dividir os diversos processos analisados em dois subgrupos os processos descontínuos (convencionais) e contínuos.

Os fornos descontínuos são os mais utilizados no Brasil, tanto para produzir carvão para siderúrgicas quanto para a cocção de alimentos. Mesmo sendo a forma mais rudimentar de produção de carvão vegetal, esse tipo de forno se destaca por não precisar de um investimento alto de implantação e o seu processo de produção é bem simples. A baixa eficiência dos sistemas descontínuos (alvenaria) resulta em uma margem de lucro menor, o que deixa o pequeno produtor vulnerável a variação de preço do carvão no mercado.

Para que possa aumentar a produtividade e melhorar a rentabilidade dos pequenos produtores alguns aspectos podem ser tomados. Como por exemplo, investimento em maquinário para que o transporte e corte seja feito de maneira mais rápida e eficaz,

reaproveitamento dos gases que são gerados sendo tomadas medidas simples de processo, melhora da qualidade da matéria prima a partir do cultivo de mudas selecionadas.

Os fornos contínuos são os mais utilizados pelas grandes siderúrgicas no Brasil, pois é um sistema que produz carvão vegetal com agilidade para poder atender a grande demanda dentro da empresa. Mas se conclui que o rendimento dos fornos mais modernos como, retangular de alvenaria, o forno DPC e o forno micro-ondas precisa de melhorias no rendimento de carvão para que a rentabilidade do sistema também melhore. Entende-se que para isso, precisa-se de investimentos em pesquisas para que seja possível ajustar o dimensionamento dos processos e tornar essas tecnologias mais acessíveis para os pequenos produtores.

Dessa forma, pode-se concluir, com a finalização desse trabalho que os processos contínuos mesmo sendo mais eficientes na produção de carvão e recuperação dos gases, são ainda pouco utilizados pelos produtores, principalmente por ser um sistema que demanda um investimento alto e um retorno ainda não tão elevado. Entende-se que uma possibilidade que permite um aumento da rentabilidade consiste da inserção de incentivos do governo para que as tecnologias modernas se tornem mais acessíveis para todos, uma vez que com a implementação de sistemas modernos as emissões de gases poluentes para atmosfera tendem a diminuir e tornar a produção de carvão mais sustentável.

5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização de estudos mais aprofundados voltados para o desenvolvimento de metodologias de recuperação dos gases e do calor gerado processo;
- Extração do líquido pirolenhoso nos processos rudimentares como alternativa de aumento de renda para os pequenos produtores; e
- Desenvolvimento de novas técnicas que possibilitem melhorias no aproveitamento do bio-óleo gerado no processo do forno micro-ondas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF. Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. **Anuário estatístico da ABRAF 2010**. Brasília, 2010.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional**. Brasília. 2013. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf>. Acessos em 05 de outubro de 2022.
- BRITO, J.O. **Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira**. Documentos Florestais. Piracicaba. 1990. v. 9.
- CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Estudo Incremento do Carvão Vegetal Renovável na Siderurgia Brasileira**. Brasília. 2009.
- CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil**. Brasília. 2015.
- CHIES, V.; PICHELLI, K. **Carvão vegetal: de problema a solução sob holofotes negativos por casos de produção em condições inadequadas, biocombustível pode conferir sustentabilidade à produção de aço**. Agroenergia em Revista. 2022. Disponível em <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1048179/1/AgroenergiaEmRevistaed09121520151.pdf>>. Acessos em 05 de Outubro de 2022
- DALLASTRA, E. C. **Sistemas de produção de carvão vegetal existentes no brasil: uma análise de viabilidade econômica**. Fundação Getúlio Vargas – FGV. São Paulo. 2010.
- IEA - International Energy Agency. **Statistics & Balances**. Paris: OECD/IEA, 2011.
- PINHEIRO, P.C.C.; *et al.* **A produção de carvão vegetal: teoria e prática**. Belo Horizonte. 2006. 1. ed.
- REZENDE, J.B.; SANTOS, A.C.D. **A cadeia produtiva do carvão vegetal em Minas Gerais: pontos críticos e potencialidades**. Boletim Técnico - EPAMIG. Viçosa. 2010.
- RIBEIRO, P.G.; VALE, A.T. **Qualidade do carvão vegetal de resíduos de serraria para o uso doméstico**. Anais da Reunião Anual da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2006.
- LÚCIO. A. **Utilização da Biomassa na Indústria Siderúrgica**. 2006. Disponível em: <<http://www.sindicarv.com.br/arquivos/anexos/13.pdf>> Acesso em de junho de 2011.

- MENDES, J.B. **Incentivos e Mecanismos financeiros para o Manejo Florestal Sustentável na Região Sul do Brasil.** Food and Agricultural Organization of the United Nations. Curitiba: 2004.
- MONTEIRO, M.D.A. **Em busca de carvão vegetal barato: o deslocamento de siderúrgicas para a Amazônia.** Novos Caderno NAEA - Núcleo de Altos Estudos da Amazônia. Belém. 2006. v. 9, n. 2.
- ONDATEC. **Tecnologia Industrial em Micro-ondas.** 2013.
- VITAL, M.H.F.; PINTO, M.A.C. **Condições para a sustentabilidade da produção de Carvão Vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil.** BNDS setorial 30. 2011