

Produção de Carvão Vegetal Utilizando Madeira de Florestas Plantadas de Eucalipto

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, tendo a madeira dos eucaliptos como sua principal matéria-prima. No Balanço Energético Nacional publicado em 2009 pelo Ministério de Minas e Energia do Brasil, no ano base de 2008, o carvão vegetal correspondeu a 2,75% do consumo de todos os energéticos no País, quando expressos em toneladas equivalentes de petróleo. A produção anual brasileira desse importante bioenergético está entre 8 a 11 milhões de toneladas, o que corresponde a volumes de 32 a 43 milhões de metros cúbicos. Essa variabilidade é muito função das instabilidades da economia, que afetam diretamente o consumo do aço e do ferro fundido, principais clientes do carvão vegetal brasileiro. A densidade a granel do carvão varia entre 0,22 a 0,30 t/m³, dependendo principalmente da densidade da madeira utilizada em sua produção, da presença ou não de casca nas toras e do estado tecnológico do processo de geração do carvão.

A produção mundial desse importante derivado florestal está na ordem de 40 a 45 milhões de toneladas ao ano. Isso significa que o Brasil detém cerca de 20 a 25% dessa produção mundial. Essa liderança incontestável do Brasil se deve ao fato do carvão vegetal ser aqui utilizado principalmente para fins siderúrgicos e metalúrgicos (produções de ferro gusa, aço, ligas metálicas de FeSi, FeCr; FeMo, FeMn, etc.). Há muita riqueza no subsolo brasileiro para minerais valiosos como os de ferro, magnésio, zinco, calcário, silício, etc. Entretanto, o Brasil carece de produção própria de coque siderúrgico (carvão mineral) de boa qualidade (baixos teores de cinzas e altos teores de carbono fixo). Isso obrigou que a crescente e vitoriosa indústria siderúrgica/metalúrgica brasileira buscasse outras alternativas para substituição do coque mineral. A opção pelo carvão vegetal foi absolutamente um sucesso frente às vantagens que ele apresenta em termos qualitativos e econômicos.

No ano de 2008, em função das estatísticas disponíveis, estima-se que aproximadamente um milhão de hectares de florestas plantadas de eucaliptos, em diferentes etapas e rotações, estavam abastecendo fornos de diversos níveis tecnológicos para gerar carvão vegetal para consumos industrial (principalmente siderúrgico e energético) e doméstico no Brasil. Isso correspondia naquele ano a cerca de 22% de toda a área plantada com esse gênero de árvores no País. Entretanto, essas estatísticas são dificultadas até mesmo porque há ainda muito carvão sendo ilegalmente produzido e também há apreciável quantidade obtida a partir de resíduos da colheita florestal, tanto de florestas plantadas como de florestas nativas. Por outro lado, com as restrições legais para redução do consumo de madeira nativa para carvão vegetal, a área plantada com eucaliptos deveria crescer no mínimo para o dobro em relação ao que hoje existe para essa finalidade. Também existe o crescimento esperado para a produção de ferro-gusa e de aço do País, o que demandará aproximadamente mais um milhão de hectares em uma década. Resultado, em uns 10 anos mais a partir de agora, há expectativas de que a área de florestas de eucalipto para produção de carvão vegetal atinja 3 milhões de hectares no Brasil.

Ainda dentro de mudanças esperadas, a tecnologia de fabricação do carvão vegetal, que por anos vinha sendo obsoleta e rudimentar, também está-se modernizando rapidamente. São tempos de fortes mudanças e de otimizações, como veremos ao longo desse nosso capítulo.

Há algumas décadas, a produção brasileira de carvão vegetal vem utilizando com muita rapinagem e de forma extrativista muitos dos próprios recursos naturais

florestais disponíveis no País. Em 1976, quando as estatísticas passaram a ocorrer com maior grau de fidelidade, cerca de 90% do carvão vegetal produzido no Brasil na época (15,5 milhões de metros cúbicos) era obtido da madeira de matas nativas de importantes biomas brasileiros. Os mais afetados nesse particular foram e têm ainda sido: Cerrado (estados de Minas Gerais, Bahia, São Paulo, Goiás e Mato Grosso do Sul); Caatinga (Bahia, Pernambuco); Mata Atlântica (Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul e Espírito Santo); Floresta Amazônica (Pará e Maranhão). Com o crescimento da oferta de madeira de reflorestamento para atender a siderurgia e com os incentivos colocados ao longo dos anos para o plantio de florestas, essa situação já está-se invertendo. Nos anos mais recentes, passou a haver uma predominância de origem de madeira de florestas plantadas (53%) sobre a madeira de matas naturais (47%). Entretanto, não restam dúvidas que a agressão aos biomas brasileiros ainda é algo a preocupar e a merecer ações fortes. As novas exigências legais, a mais rigorosa fiscalização pelo IBAMA, a obrigatoriedade de documentos ou certificados de origem das madeiras e a ameaça para a proibição quase que total para uso de madeiras nativas para produção de carvão vegetal a partir de 2018 em Minas Gerais, têm empurrado os usuários de carvão vegetal para utilizar as madeiras de plantações florestais, sendo as de eucalipto as mais indicadas para essa finalidade. No estado do Rio Grande do Sul, que produz 1,2% do carvão vegetal brasileiro, mas para outras finalidades (cocção, churrascos, aquecimento, biocombustível para cimento e secagem de grãos), a madeira de plantações florestais de acácia negra (*Acacia mearnsii*) tem sido também exemplo de muito sucesso.

Apesar da produção de carvão vegetal ser bastante fragmentada pelo mundo, no Brasil ela se concentra nos estados grandes abastecedores da siderurgia, a saber Minas Gerais, Pará, Maranhão, Bahia e Mato Grosso do Sul. Minas Gerais é o estado líder brasileiro na produção (60 a 65% do total do País), como no consumo (65 a 70% do total). Isso em função de sua vibrante produção de ferro gusa e aço. Em anos mais recentes, com o crescimento do complexo Carajás no norte do Brasil, os estados de Pará e Maranhão também passaram a ter destaque na produção e consumo desse biocombustível.

Frente à quase penúria em disponibilidades de madeiras energéticas em muitos estados brasileiros (quer seja de florestas naturais ou plantadas), a solução brasileira para atender sua siderurgia e seu potencial crescimento, bem como às exigências da legislação ambiental, será plantar novas florestas de eucaliptos, com adequados níveis de sustentabilidade. Estima-se que hoje exista pouco menos de um milhão de hectares de florestas plantadas de eucalipto oferecendo madeira para produção de carvão vegetal no Brasil, como já dissemos anteriormente. São florestas em diversos estágios de crescimento e rotações, com taxas de produtividade variando entre 25 a 45 metros cúbicos por hectare.ano. Os plantios melhorados das empresas florestais líderes em produção de carvão vegetal possuem as melhores produtividades, variando entre 35 a 50 m³/ha.ano. Importante aqui se ressaltar que as florestas de eucalipto para carvão vegetal são bastante distintas em termos de exigências na qualidade da madeira, comparativamente às florestas destinadas à produção de celulose e papel, painéis de madeira e produtos sólidos (madeira serrada, etc.). No caso do carvão vegetal interessa principalmente elevados teores de lignina e altas densidades básicas na madeira. Portanto, o objetivo é produção de massa por hectare, ou em uma extensão última, de carbono fixo ou de energia por hectare.

Com a obrigatoriedade imediata de implantação de novos povoamentos florestais para atender a essas novas demandas e para substituir o carvão originado de madeiras nativas, estima-se que deverão ser necessários pelo menos cerca de 600 a 800 mil hectares adicionais de novos plantios de eucaliptos, com florestas melhoradas mais produtivas e gerando por fotossíntese madeiras mais indicadas à

carbonização. Admitindo que também cresça a produção brasileira de ferro gusa, aço e ligas metálicas, é bem provável que as novas demandas em termos de áreas plantadas venham a duplicar em relação ao que se possui hoje. Somente o estado de Minas Gerais tem estimativas de planos de plantios anuais de 120 mil hectares ou mais de florestas energéticas de eucalipto até o final da segunda década dos anos 2000's para suprir seus déficits em madeira energética.

Estima-se também que nas condições atuais de consumo são necessários cerca de 60 a 65 milhões de metros cúbicos de madeira por ano para atender a produção de carvão vegetal no País. Desse total, cerca de 25 a 30 milhões de m³ são de madeira de reflorestamentos e 35 de madeira de florestas nativas. Também é bastante elevada a participação de resíduos de madeira da colheita florestal, quer sejam de matas nativas ou de florestas plantadas. Há ainda casos de uso de resíduos madeireiros de outras cadeias produtivas da madeira, como serrarias, resinagem de árvores, etc.

De uma maneira geral, admite-se que se consomem entre 2.500 a 4.000 kg de madeira seca por tonelada de carvão vegetal. Essas diferenças são função do tipo de madeira (espécie, idade, densidade, presença de casca) e da tecnologia utilizada na conversão (rendimentos da carbonização variam entre 25 a 40%). Sendo a madeira do eucalipto mais uniforme e melhorada geneticamente para essa finalidade, com ela se conseguem consumos específicos bem melhores do que com as madeiras variáveis e desuniformes das matas nativas. Para o eucalipto se consomem cerca de 5 metros cúbicos sólidos de toras (com ou sem casca) e para madeiras nativas aproximadamente 7.

Como já vimos, o grande usuário para o carvão vegetal no Brasil é o setor industrial (cerca de 85% da produção). Só o setor siderúrgico/metalúrgico utiliza 75 a 80%, sendo que o setor de ferro gusa consome 8 a 9 vezes mais do que o setor de aço e ligas metálicas, incluindo-se nesses dados as produções integradas de gusa e aço). Também se utiliza carvão vegetal em outros tipos de fornos (produção de cimento, cal, gesso, refratários, carbetão de silício, etc.) e em caldeiras de força para geração de energia (briquetes de carvão ou carvão pulverizado). Interessante tem sido a crescente utilização de carvão briquetado ou pelletizado, usando como matéria prima o pó de carvão (moinha), até há pouco tempo considerado um resíduo problemático da produção de carvão vegetal. Outros usuários menores para o carvão vegetal são os próprios cidadãos (uso doméstico em cocção e aquecimento) e a agricultura (secagem de grãos e folhas, substrato para produção de mudas, etc.)

O sucesso para o uso energético da lenha e do carvão vegetal no Brasil está no preço desse biocombustível. Não há fonte de energia tão barata quanto a biomassa energética no País. Independentemente de seu preço, o carvão vegetal pode e deve ser considerado um biocombustível renovável, sustentável e limpo. Isso caso se resolvam dois de seus graves problemas: o uso de madeira de origem nativa ilegalmente colhida e a utilização do trabalho de muitos brasileiros de forma socialmente injusta e ilegal. Devido a essas duas gravíssimas mazelas, o carvão vegetal no Brasil teve por anos uma imagem muito ruim junto à sociedade mais esclarecida do País. Muitas ONGs sociais e ambientais se mobilizaram contra o carvão vegetal. Entretanto, não é o carvão vegetal o problema e sim a forma como ele está sendo ainda produzido em muitos locais no País, com ausência quase completa de sustentabilidade.

Atualmente, há disponível no Brasil muita tecnologia para produção de carvão com excelentes rendimentos e qualidade industrial, bem como através de processos que oferecem segurança e qualidade de vida aos trabalhadores. Falta entretanto área plantada de florestas energéticas para atender a essa demanda toda. Isso incentiva

a produção ilegal de carvão, porque existe mercado consumidor ávido para comprar. É um problema a ser resolvido não apenas pela indústria, mas também pelos produtores rurais que gostariam de oferecer madeira produzida em suas propriedades através programas de fomento ou parcerias. Com isso, alarga-se a oferta de madeira e reduzem-se as pressões sobre os biomas brasileiros ameaçados.

O desmatamento de florestas nativas naturais que deveriam estar sendo conservadas e protegidas pode ser considerado um problema tão ou mais grave do que a geração de gases de efeito estufa pelo uso de combustíveis fósseis. Até certo ponto, o problema é similar: a madeira de florestas naturais conservadas está seqüestrando e imobilizando carbono. Se as matas naturais forem usadas para carvão vegetal, que depois é queimado, corresponderá também a algo similar ao uso de um energético fóssil. Além de gerarem gás carbônico, esse uso reduz a biodiversidade e impacta a hidrologia e o solo também. Por outro lado, quando florestas plantadas de eucaliptos, que tenham sido melhoradas para produção de carvão vegetal, são utilizadas, substituindo o uso inapropriado de madeiras de matas naturais, temos inúmeras vantagens, a saber:

- são recursos naturais renováveis;
- evitam o uso de recursos naturais e reduzem as pressões sobre os biomas ameaçados;
- aumentam a conservação ambiental, já que para se plantá-las também se conservam muitas áreas de preservação permanente e de reserva legal. Para cada hectare de floresta plantada preserva-se ou reabilita-se cerca de 0,6 a 1 hectare de mata nativa.
- oferecem qualidades mais estáveis e com especificações mais atendidas para o processo de carbonização. Imaginem que as madeiras colhidas de matas naturais têm densidade básica média variando entre 0,2 a 0,8 t/m³, o que confere grande variabilidade na qualidade do carvão vegetal resultante (densidade a granel, teor de carbono fixo, teor de cinzas, etc.).
- permitem maior controle sobre toda a cadeia produtiva, otimizando-a e tornando-a mais sustentável;
- oferecem melhores qualidades ao trabalhador florestal e ao carvoejador, com condições laborais similares às oferecidas em outros tipos de indústria de conversão.

Sabemos então que os grandes problemas do carvão vegetal brasileiro têm sido a oferta de madeira como matéria-prima e o subemprego nas produções artesanais e semi-industrializadas de carvão. Esses problemas podem e devem ser resolvidos para se dar ao carvão vegetal a dignidade que ele merece como biocombustível renovável e de adequado nível de sustentabilidade. Tão logo disponhamos de mais florestas energéticas plantadas, poderemos passar a ter uma nova fase nessa história, entretanto há muito a se fazer ainda. Esses dois temas não se resolverão de um dia para o outro, há muito trabalho pela frente ainda.

Muitos ambientalistas, talvez por desconhecimento técnico-científico, continuam a bradar contra o carvão vegetal siderúrgico, tentando impedir tanto o avanço das florestas plantadas como do próprio uso do carvão vegetal. Entretanto, o carvão vegetal é definitivamente uma excelente opção que o Brasil possui para ter à sua disposição um bioenergético limpo e natural. Alguns desses ambientalistas questionam que o carvão vegetal não imobiliza o carbono, pois ele é imediatamente queimado, liberando então em curto espaço de tempo aquilo que a floresta plantada havia seqüestrado. Temos então um ciclo que corresponde ao seqüestro pela floresta plantada; uma liberação na carbonização, outra liberação na queima do carvão e nas caldeiras; uma nova absorção pela floresta plantada; sendo que o ciclo seqüestra/liberta continua indefinidamente. As outras alternativas para a siderurgia são a hulha e o coque mineral, que são combustíveis fósseis e só agravariam a geração de gases de efeito estufa (GEE). Portanto, o balanço em

termos de GEE é definitivamente favorável ao uso do carvão vegetal.

Um agravante no caso de emissões de GEE pelo carvão vegetal é a formação de metano durante o processo de carbonização. O metano tem um poder equivalente que é de 21 vezes maior do que o gás carbônico nos seus danos no aquecimento global. Estima-se que são liberados entre 10 a 50 kg de metano por tonelada de carvão vegetal produzido. Entretanto, as tecnologias mais modernas de carbonização utilizam esse metano e outros gases presentes nas fumaças da carbonização (metanol, hidrocarbonetos, etc.) em combustão para geração de energia a ser usada na secagem da madeira previamente à carbonização. Com isso, minimiza-se esse efeito negativo do metano e otimiza-se energeticamente o processo de carbonização. Na verdade dos fatos, essa possibilidade de recuperação de gases não condensáveis e com cerca de 1.500 a 2.500 kcal/kg, oferece não apenas uma economia energética no processo de carbonização, como também permite a obtenção de créditos de carbono para comercialização em mercados desse tipo de commodity ambiental.

A vantagem ambiental do carvão vegetal da floresta plantada de eucalipto estende-se também à floresta, nas áreas de preservação permanente e reserva legal. Também oferece a oportunidade de recuperação de importantes subprodutos da carbonização, que poderiam estar-se perdendo com as fumaças da carbonização. É o caso do alcatrão de madeira e do extrato pirolenhoso muito valiosos à nossa sociedade.

Enfim amigos, o carvão vegetal é um produto que merece mais consideração e atenção, inclusive pelos programas de políticas governamentais que se encantam com o etanol e praticamente se esquecem do carvão vegetal. O carvão vegetal é um dos produtos da natureza mais antigos em termos de seu conhecimento pelo homem. Com certeza, muito antes de dominar o fogo, nossos primitivos antepassados devem ter-se deparado e visto a vantagem do carvão vegetal originado de incêndios florestais naturais. Hoje, com os avanços das tecnologias de produção de carvão vegetal e das florestas plantadas de eucaliptos, com muita certeza vamos colocar esse produto de base florestal na posição que ele merece como biocombustível sustentável. Entretanto, para se produzir um carvão vegetal no tom de verde que se faz necessário há que:

- usar madeiras em forma de toras apenas de florestas plantadas e certificadas;
- usar cada vez mais resíduos lenhosos de outras cadeias produtivas que se valem da madeira;
- estudar e usar outras fontes alternativas de biomassa (capim elefante, capim cameroon, bambu, etc. - todas plantadas de forma sustentável e com certificação ambiental);
- trabalhar dentro da legalidade ambiental, trabalhista, tributária e social;
- ter responsabilidade ambiental e social para minimização dos impactos negativos e maximização dos benefícios que o carvão vegetal oportuniza.

Quando a madeira para produção de carvão vegetal provém de florestas plantadas e quando o carvão for todo produzido em condições de justiça social e com tecnologias estado-da-arte, estaremos favorecendo o meio ambiente e nossa sociedade, com geração de empregos e proteção de nossos biomas. A rede produtiva do carvão vegetal é grande geradora de empregos, frente à sua dimensão e fragmentação. São empregos oferecidos na floresta plantada, na carbonização, na distribuição e na venda desse biocombustível. Veja-se que o estado do Rio Grande do Sul, onde resido, produz apenas 1,2% do total de carvão vegetal do Brasil, sendo que as estatísticas do estado relatam que existem cerca de 30.000 pequenos e médios produtores cadastrados para produção desse tipo de carvão no estado. Imaginem o quanto temos de oportunidades sociais para o Brasil

como um todo.

Carvão vegetal: usos e subprodutos de valor econômico

São inúmeros os usos para o carvão vegetal e seus derivados. Dentre os subprodutos destacam-se o alcatrão de madeira e o extrato pirolenhoso. Esses dois subprodutos já foram intensamente apresentados para vocês pela nossa colega de redação Ester Foelkel. Na Eucalyptus Newsletter número 26 (http://www.eucalyptus.com.br/newspt_mar10.html#sete) ela nos contou sobre o ácido pirolenhoso e agora nessa número 27, ela nos conta sobre o alcatrão de madeira. Ambos produtos são cada vez mais utilizados pela agricultura, pela indústria alimentícia, indústria da madeira, na pavimentação de estradas rurais, etc., etc. Sugiro a atenção dos leitores para esses dois artigos da Ester, com muita riqueza de dados e informações para todos os interessados. Dentre os inúmeros subprodutos que se podem obter do processo de carbonização, existem outros a destacar, obtidos pela destilação dos extratos recolhidos das suas fumaças: ácido acético, metanol, ácido fórmico, ácido propiônico, guaiacóis, siringóis, etc. Todos eles estão permitindo o crescimento de uma nova ciência no Brasil: a biocarboquímica.

Por outro lado, o próprio carvão vegetal possibilita inúmeros usos, além da reconhecida importância para a siderurgia/metalurgia. Destacamos então as seguintes utilizações:

- biocombustível e redutor de óxidos minerais na metalurgia/siderurgia;
- gaseificação para produção de gás combustível renovável;
- combustão em fornos e caldeiras para gerar energia ou participar em outros processos industriais (cimento, cal, gesso, etc.);
- como carvão ativo com alta porosidade e superfície específica para despoluição de gases tóxicos e purificação da água por adsorção de toxinas;
- fins medicinais na fitoterapia, pois adsorve gases causadores de flatulência intestinal;
- para secagem de grãos e de folhas (erva-mate e fumo) na agricultura;
- uso como auxiliar de compostagem para enriquecer o composto em teor de ácidos húmicos;
- como substrato agrícola para fixação de umidade e nutrientes;
- etc., etc.

Os finos do carvão constituem um pó ou moinha rica em teor de cinzas. Esse pó é gerado tanto no manuseio do carvão, como no próprio processo de carbonização. As cinzas se devem tanto às contaminações com terra das toras e do carvão depositado em pátios sem pavimentação, como dos constituintes minerais das cascas e madeiras usadas na carbonização. Um carvão siderúrgico produzido com boas tecnologias e manejado com mínimas contaminações possui cerca de 0,8 a 1,5% de cinzas. Já os carvões de baixo nível tecnológico perdem entre 10 a 15% de seu peso, que se converte em moinha, em geral muito rica em cinzas. Com as contaminações com terra, areia, etc., essa moinha possui baixo poder calorífico e baixo teor de carbono fixo (cerca de 60 - 65%). Através de processos de purificação gravítica desse pó, pode-se reduzir o conteúdo em cinzas e obter-se um produto mais rico em carbono fixo (cerca de 70%) e poder calorífico próximo a 7.000 kcal/kg. Por técnicas de pelotização e briquetagem esse pó pode ser convertido em pelotes biocombustíveis, ideais para uso em fornos de combustão e caldeiras de força. Até mesmo pequenos usuários, como olarias, padarias, pizzarias, etc. podem-se valer desses briquetes bioenergéticos. A moinha de carvão também tem sido muito utilizada como auxiliar de compostagem para aumentar o teor de ácidos húmicos no composto ou para compor-se em substratos de produção de mudas agrícolas e florestais. Ela é rica em nutrientes como cálcio, magnésio,

potássio, bem como tem a capacidade de fixar e liberar nutrientes fertilizantes para as plantas. Por isso, seu uso também em técnicas de jardinagem e na horticultura.

O maior e mais importante uso que se dá ao carvão vegetal no Brasil é o de reduzir os óxidos de minérios, especialmente no caso do minério de ferro. O ferro apresenta-se nos minérios como Fe_2O_3 (óxido de ferro). Para se converter o minério de ferro em ferro metálico (ferro gusa) ou em aço, há que se extrair esses átomos de oxigênio, reduzindo-se o ferro de $\text{Fe}(+3)$ para ferro metálico (Fe zero). Isso é conseguido em altas temperaturas (cerca de 1.200°C), com o uso de um combustível rico em carbono fixo. O carvão vegetal, além de fornecer energia para fundir o minério de ferro, reage com o oxigênio formando gás carbônico, liberando assim o ferro metálico na forma de uma lava fundente. Esse material é purificado ("coado") e pode virar tanto ferro gusa / ferro fundido (com teor residual de carbono de cerca de 4%) ou aço (com teor de carbono de até 2%). O ferro gusa é a principal matéria-prima para a fabricação do aço.

Carbonização da madeira de eucalipto

O carvão vegetal é produzido por um processo conhecido como pirólise lenta da madeira, ou também denominado de carbonização ou destilação seca da madeira. Entretanto, o carvão pode ser fabricado também de outros tipos de biomassas, destacando-se algumas gramíneas (capins de crescimento vigoroso e bambus) e palmáceas (babaçu). Desde que o processo seja adequadamente conduzido, transforma-se a biomassa em carvão vegetal, evitando a combustão completa da biomassa. Trata-se de uma forma de concentrar o carbono na biomassa residual, em última instância. A madeira do eucalipto possui em geral 48% de carbono; 45% de oxigênio; 6% de hidrogênio e 0,5% de cinzas, com base em seu peso seco.

Na carbonização, procura-se extrair o oxigênio e o hidrogênio, com a mínima perda de carbono. Ao término do processo, tem-se um resíduo sólido que é o carvão vegetal que possui entre 70 a 85% de carbono fixo. Esse combustível sólido assim produzido possui poder calorífico superior que varia entre 7.200 a 8.100 kcal/kg base seca, quando o poder calorífico da madeira varia entre 4.200 a 4.400 kcal/kg. Entretanto, essa concentração de carbono fixo se faz às custas de enormes sacrifícios de madeira. Nas produções artesanais de carvão, com fornos primitivos de alvenaria e barro, o processo mostra rendimentos tão baixos como 20 a 25%. Já nos fornos de alvenaria artesanais ainda, mas melhorados tecnicamente, conseguem-se até mesmo 30 a 33%. Para os fornos de maior grau tecnológico, os rendimentos estão entre 35 a 40%. De maneira geral, podem ser encontrados rendimentos que variam entre 33 a 38%, com teores de carbono fixo finais entre 75 a 80%. No caso de uma madeira de eucalipto com 48% de carbono que tenha sido carbonizada com 35% de rendimento e resultando em um carvão com 75% de carbono fixo, significa que o processo "desperdiçou" para as fumaças cerca de 217,5 kg de carbono elementar por tonelada de madeira. Ou seja, o rendimento em carbono fixo foi de apenas 54,7%. Por essa razão, a importância vital de se aproveitar os produtos da fumaça, para aumentar a ecoeficiência da operação de carbonização.

Em geral, para se produzir uma tonelada de carvão vegetal, consomem-se cerca de 2.500 (melhores situações) a 4.000 (piores) quilogramas de madeira seca. A diferença de peso seco entre o adicionado ao forno e o carvão vegetal que sai consiste em gases e produtos condensáveis com variados níveis de oxidação presentes nas fumaças. Os fornos mais modernos têm buscado não apenas recuperar os valiosos subprodutos já mencionados, como também os gases energéticos não condensáveis capazes de serem queimados para gerar energia. Mesmo que o carvoeiro não recupere o alcatrão e extrato pirolenhoso como

produtos químicos para venda, mas sim os queimem para gerar energia para secar a madeira, ele estará praticando uma operação mais ecoeficiente do que apenas liberar tudo para a atmosfera.

A pirólise ou carbonização da madeira consiste em uma decomposição térmica da madeira sob uma atmosfera controlada com baixíssimo teor de oxigênio. Caso o forno de carbonização esteja com problemas e deixe entrar mais oxigênio do que deveria, perde-se mais madeira, que acaba sendo consumida por processo de combustão. Na verdade, o que se quer é desconstruir a madeira, permitindo que o oxigênio e o hidrogênio de sua constituição sejam extraídos, permanecendo ao final um resíduo sólido mais rico em carbono. Quanto mais alta for a temperatura de carbonização, mais acelerado é o processo, mas as perdas em carbono aumentam muito. Por isso, chama-se o processo de carbonização de pirólise lenta, para se evitar auto-degradação da madeira por excesso de temperatura. O carvão vegetal final produzido deve ser denso, pouco friável, resistente ao manuseio, com teor de carbono fixo acima de 75% e teor de cinzas menor que 2%.

Conforme ocorre a carbonização, a madeira perde tanto umidade livre e adsorvida aos constituintes da madeira, como perde moléculas de água formadas pela "extração a quente" do hidrogênio e oxigênio. Na fase endotérmica inicial da carbonização deseja-se secar a madeira o máximo possível, removendo por aquecimento a sua umidade. Deve-se fornecer então energia para essa secagem. Em fornos de menor agregação tecnológica, essa fase de secagem endotérmica se faz com a queima/sacrifício de alguma (ou de muita) madeira alimentada ao forno. Isso corresponde a cerca de 10 a 20% da madeira, que vai-se traduzir em grandes perdas de rendimento ao final. Um grande desperdício. Afinal, os fornos de carbonização estão longe de serem considerados tão eficientes como estufas de secagem de madeira. Caso a madeira seja previamente secada com os gases quentes oriundos do próprio processo (ou incinerados para fornecer calor), o rendimento final da carbonização é melhorado. Pode-se assim produzir mais carvão por cada fornada. Fácil de se entender, mas foram necessários anos para que essa coisa tão simples passasse a ser adotada pelos carvoeiros. Enquanto a madeira era barata, de livre acesso e colheita nas matas nativas, não houve maiores preocupações para se melhorar tecnologias e rendimentos. Agora que a situação de oferta de madeira é cada vez mais escassa e o preço subiu, passaram a ser notadas fortes mudanças tecnológicas na carbonização da madeira no Brasil. Isso tudo passou a ocorrer mais intensamente no início desse atual século. Ou seja, a mudança de milênio está ajudando na modernização da produção de carvão vegetal no País. Existem fornos muito bem desenhados, capazes de oferecer 40% ou mais de rendimento e carvões com 80% ou mais de carbono fixo. Nesses casos, o consumo de madeira por tonelada de carvão pode ser tão baixo como 2500 kg madeira base seca/tonelada seca de carvão.

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

- Fase 01: até 200°C (endotérmica), sem perda de peso seco de madeira, apenas secagem e desidratação.
- Fase 02: entre 200 a 250°C (endotérmica), mas com início de liberação de extrativos voláteis, e alguma decomposição de carboidratos, gerando-se algum extrato pirolenhoso e alcatrão.
- Fase 03: entre 250 a 370°C (exotérmica), com mais intensa decomposição dos constituintes da madeira, iniciando-se a carbonização propriamente dita, com perda de massa seca da madeira, decomposição das hemiceluloses, celulose e lignina.
- Fase 04: entre 350 a 500°C (exotérmica), com a complementação da carbonização, em uma fase completamente auto-sustentada, já que as reações de decomposição liberam também muito calor. Há que se monitorar muito bem os fluxos de gases, o tempo e a temperatura, para evitar perda excessiva de

rendimento. Nessa fase liberam-se grandes quantidades de CO₂, CO, CH₄ e hidrocarbonetos pela degradação da madeira. Deve-se evitar que a temperatura ultrapasse 500°C, pois a perda de rendimento é significativa, embora o teor de carbono fixo aumente no carvão resultante. A carbonização ideal procura não apenas aumentar o teor de carbono fixo do carvão, mas em otimizar o rendimento em carbono fixo, compondo uma equação de ótimo entre teor de carbono fixo no carvão e rendimento da carbonização.

- Fase 05: Resfriamento do forno, abertura e retirada do carvão.

O ciclo total da carbonização pode variar de alguns dias (5 a 10) a horas (12 a 20), dependendo das tecnologias empregadas. Caso uma fonte externa de calor seja utilizada para pré-secagem da madeira para umidades entre 4 a 8%, pode-se abreviar o processo e aumentar rendimentos. Um grande problema da operação de carbonização são as perdas térmicas que podem acontecer pelas paredes do forno e pelos gases de exaustão. Uma forma muito fácil de se ganhar tempo nesse processo todo é se valer de maneiras mecânicas para alimentar e retirar o carvão: o sistema de vagonetas sob trilhos está sendo uma boa alternativa. Tudo isso amigos são oportunidades notáveis e simples para melhorias adicionais em termos de inovações tecnológicas.

Quanto mais seca estiver a madeira que entra no forno de carbonização, melhor se dará o processo. Por essa razão, as toras e resíduos de madeira que vão ao forno ficam no campo por volta de 90 a 120 dias para secagem natural. Nesse momento, estarão com umidade entre 20 a 30%. Como a maioria das empresas que carvoejam eucaliptos usam madeiras com casca, essa casca restringe bastante a perda de umidade pelas toras, dificultando a secagem natural. Toras de grande diâmetro também secam mais dificilmente. Por essas e outras razões, a secagem dentro do forno de carbonização por sacrifício de madeira é bastante ineficiente. Uma tonelada de madeira absolutamente seca com umidade entre 20 a 30% possui entre 250 a 430 kg de água para ser evaporada por secagem. O consumo teórico de calor para evaporar essa água corresponderia a cerca de 200 a 380 kcal/tonelada absolutamente seca de madeira, respectivamente a cada caso. Entretanto, pelas perdas e ineficiência térmica desse forno para atuar como estufa secadora, o consumo de calor chega a ser entre 3 a 4 vezes maior. Logo, a pré-secagem e aquecimento indireto da madeira pode ser uma alternativa bem vantajosa sob a ótica da eficiência energética.

Os picos de decomposição da celulose e hemiceluloses ocorrem entre 310 e 350°C. Nessa fase e nessas temperaturas, praticamente 50% do peso seco da madeira já se perdeu. Entre 350 e 450°C ocorre a finalização da carbonização, quando se consegue atingir 70% ou mais de carbono fixo no carvão. O pico de decomposição da lignina ocorre por volta de 450°C. A lignina é muito mais rica em carbono do que os carboidratos da madeira. Enquanto a lignina possui 65% de carbono em sua molécula, a celulose e as hemiceluloses possuem 45%. Por essa razão, ao término da carbonização, as hemiceluloses e a celulose perdem entre 70 a 80% do seu peso inicial, enquanto a lignina apenas 30 a 40%. Portanto, quanto maior for o teor de lignina na madeira, maior será o potencial de se alcançarem altos teores de carbono fixo e mais altos rendimentos na carbonização. Uma tonelada de madeira seca contendo 48% de celulose, 25% de hemiceluloses, 25% de lignina e 0,5% de cinzas dará ao final do processo de carbonização um provável rendimento de cerca de 350 kg de carvão vegetal seco, sendo que nesse carvão 125 gramas serão originados da celulose; 62,5 gramas devido às hemiceluloses e 162,5 gramas de origem da lignina. Estão abstraídos aqui desses cálculos simples os efeitos das cinzas da madeira e dos seus extrativos, que também agregarão peso no carvão após a carbonização. As cinzas da madeira têm o potencial de se concentrarem de cerca de 0,5% na madeira para até 1,5 - 2% no carvão vegetal seco e pronto. Entretanto, como durante a carbonização uma parte dos óxidos das cinzas também

de perdem, esse teor pode ser ligeiramente menor.

Já vimos que o rendimento total da carbonização pode variar entre 25 a 40%, influenciando nesses valores tanto os fatores da madeira como da carbonização em si. O estágio tecnológico do forno, o teor de lignina e a densidade básica da madeira, as perdas térmicas do forno, os controles de temperatura e taxa de aquecimento, bem como o tempo de carbonização são fatores determinantes para os resultados em rendimentos. O controle e domínio desses fatores é portanto vital. Por isso, fica fácil se explicar o porque de rendimentos de menos de 25% em fornos rudimentares, sem controle algum, ou apenas se monitorando com as mãos a temperatura externa do forno. Uma grande eco-ineficiência para esses fornos conhecidos como "rabo quente".

A pirólise lenta também provoca uma contração da madeira em sua rota a carvão vegetal. Tem-se como regra geral que são precisos entre 1,8 a 2,5 metros cúbicos de madeira empilhada (estéreis) para se gerar um metro cúbico de carvão. Ou ainda, que a cada 4,5 a 5 m³ sólidos de madeira de eucalipto (com ou sem casca) são produzidos 1.000 kg de carvão vegetal 100% seco.

No Brasil, a unidade mais usual para comercialização do carvão não é seu peso, mas seu volume. Essa unidade de volume de carvão é referida como mdc (fala-se metro de carvão, mas significando metro cúbico de carvão a granel). Isso acabou sendo uma necessidade resultante do fato de que os produtores artesanais de carvão tinham o hábito de molhar o mesmo para aumentar seu peso, quando a comercialização se dava pelo peso. Infelizmente, essa forma de se medir carvão transformou-se em um retrocesso tecnológico, pois não permite se quantificar e otimizar a qualidade do carvão. Interessa a quem vende o carvão vegetal por volume, ter o máximo de volume, o que significa menores densidades a granel. Por outro lado, a densidade a granel do carvão oferece a vantagem de se otimizar a quantidade de carbono fixo que se tem por volume de alto-forno na siderurgia. Um grande prejuízo se estabelece no processo de melhoria tecnológica do carvão, quando os produtores buscam carvões volumosos, quando deveriam buscar carvões densos e compactos.

Os valores de densidade a granel do carvão variam entre 0,22 a 0,30 t/m³. Quanto maior for essa densidade, melhor será a operação e a produtividade dos alto-fornos da siderurgia. Para carvões densos, menores volumes dos alto-fornos serão ocupados por carvão vegetal, sobrando então mais espaço para se adicionar mais minério de ferro - muito simples e muito lógico.

Os objetivos fundamentais para um bom processo de carbonização são os seguintes:

- trabalhar com madeira a mais seca possível;
- aumentar ao máximo o rendimento da carbonização por unidade de peso ou de volume de madeira carregada;
- aumentar o teor de carbono fixo no carvão sem perder rendimentos de carbonização;
- aumentar a densidade a granel do carvão produzido;
- ter flexibilidade e versatilidade para uso do forno de carbonização em condições de diferentes qualidades de matérias-primas lenhosas;
- permitir adequada recuperação de subprodutos que podem ser extraídos das fumaças da carbonização;
- reduzir as emissões dos gases de efeito estufa;
- etc., etc.

Em condições de adequados níveis tecnológicos para a carbonização, consegue-se

ao final do processo, por cada tonelada de madeira seca alimentada ao forno, as seguintes potenciais produções:

- 350 a 380 kg de carvão vegetal seco;
- 80 a 120 kg de alcatrão (solúvel e insolúvel);
- 30 a 50 kg de ácido acético;
- 10 a 25 kg de metanol;
- 100 a 180 kg de gases não-condensáveis energéticos, com poder calorífico variando entre 1.500 a 2.000 kcal/kg.

Durante a carbonização, além da água liberada devido à própria umidade da madeira (250 a 400 kg de água por tonelada de madeira seca), tem-se também a água formada pela decomposição térmica e pela combustão parcial da madeira. Essa água é formada durante a extração do hidrogênio e do oxigênio da constituição química da madeira e também da queima parcial de matéria orgânica. Seus valores correspondem a cerca de 250 kg de água por tonelada de madeira seca. Essa água se soma à água da umidade da madeira e será condensada, saindo junto ao extrato pirolenhoso e alcatrão solúvel.

O objetivo último da carbonização é concentrar o teor de carbono no carvão, aumentando com isso seu poder calorífico e sua performance como redutor do minério de ferro (ou de outros minérios). Para se conseguir isso, temos perdas que podem ser maiores ou menores. Caso se dispusessem de mais estudos sobre a cinética das reações químicas dos diversos constituintes da madeira do eucalipto ao longo do processo de pirólise, poder-se-iam otimizar ainda mais os rendimentos, a qualidade do carvão e a recuperação dos valiosos subprodutos da carbonização.

Qualidade do carvão vegetal para fins siderúrgicos

Um carvão vegetal para ser considerado de adequada qualidade siderúrgica deve possuir no mínimo as seguintes características: teor de carbono fixo superior a 75%; teor de umidade inferior a 5%; poder calorífico superior acima de 7.400 kcal/kg; densidade a granel superior a 0,25 t/m³; dimensões médias de partículas acima de 40 mm; teor de cinzas inferior a 2%. Além disso, deve ter boas resistências mecânicas, baixa nível de friabilidade e baixo teor de finos (moinha). As impurezas (cinzas, areias, pedras) são definitivamente indesejadas na produção do aço e do ferro gusa. Elas estão em geral na parte fina do carvão, devendo por essa razão serem separadas e removidas. Utilizam-se para isso técnicas baseadas na classificação granulométrica ou gravimétrica (por sopragem). Em situações de baixo nível tecnológico, tem-se uma geração de pó na ordem de 5 a 15% base peso de carvão. Essa quantidade é maior quando o carvão é produzido com madeiras de baixa densidade básica, que originam carvões mais fracos e mais friáveis. Também o diâmetro das toras afeta a geração de finos. Toras de árvores velhas, apesar de mais densas, possuem grande diâmetro e muito cerne. Para que essas toras percam a água interna durante a carbonização elas acabam "explodindo" e fendilhando o carvão, aumentando a quantidade de pó formado. Por inúmeras razões que veremos adiante, há uma altíssima dependência da qualidade do carvão vegetal em relação à qualidade da madeira. Essa interdependência se associa também à própria operação de carbonização. Imaginem então amigos, como deve ser variável e inapropriada a qualidade do carvão produzido em fornos do tipo "rabo quente", com madeiras das mais variadas procedências, espécies, idades e com controles processuais inexistentes ou precários.

Dentre as inúmeras propriedades do carvão vegetal siderúrgico, as mais importantes são: teor de carbono fixo e densidade a granel do carvão. Uma propriedade pouco medida, mas que coloca essas duas em uma só, seria a densidade energética do carvão, que pode ser expressa em toneladas de carbono fixo por metro cúbico de carvão. Outra alternativa interessante para densidade

energética seria se medir Mcal/m³ de carvão.

Os carvões de melhor qualidade são obtidos com densidades a granel entre 0,27 a 0,32 t/m³ e teores de carbono fixo entre 75 a 83%. Isso corresponde a poderes caloríficos entre 7.500 a 8.000 kcal/kg seco de carvão. Em termos de densidade energética poder-se-iam calcular valores entre 0,21 a 0,26 toneladas de carbono fixo por m³ de carvão, ou então de 2.000 a 2.500 Mcal/m³ de carvão.

Tecnologias de produção de carvão vegetal siderúrgico

As tecnologias que passaram a ser desenvolvidas e introduzidas no Brasil para carbonização a partir do início do século XXI têm como principais objetivos:

- aumento do rendimento da carbonização;
- aumento da eficiência térmica do processo, valendo-se de recursos energéticos gerados pelo próprio processo de carbonização;
- redução das perdas térmicas em todo o processo;
- favorecimento das reações exotérmicas e redução de desperdícios com reações endotérmicas;
- aumento da oferta de subprodutos valiosos que podem ser recuperados ao longo do processo; desenvolvendo-se uma nova atividade no País denominada biocarboquímica;
- controle melhor de todas as fases relevantes da operação de carbonização;
- melhor controle e qualidade da madeira utilizada (constituição química, teor de lignina, densidade básica e teor de umidade);
- melhor qualidade do carvão final resultante;
- desenvolvimento de medições rápidas e efetivas para controle de processo e de qualidade do processo, produto e matérias-primas;
- otimização de variáveis importantes da carbonização como: temperaturas e fluxos dos gases de exaustão; temperatura de carbonização; taxa de aquecimento; temperaturas e pressões internas no forno; extração de gases; etc.;
- mecanização das operações de carga e descarga do forno;
- redução de emissões de GEE;
- etc.

Além dos aspectos meramente técnicos, a otimização das tecnologias se envolveu também com os aspectos sociais, procurando garantir qualidades ergonômicas e laborais mais decentes e dignas, igualando em qualidade de vida o carvoeiro a outras profissões de maior reconhecimento pela sociedade.

Além dos tradicionais fornos retangulares de alvenaria, temos fornos construídos em aço (tipos cilíndricos e "containers"), bem como mais amplos processos de fechamento de circuitos de gases. Mesmo os rudimentares fornos tipo "rabo quente" foram otimizados para que o produtor artesanal de carvão vegetal pudesse trabalhar com melhores técnicas, qualidade e segurança. Dessa forma, o produtor artesanal já pode trabalhar com rendimentos em carvão de 30 a 33%, enquanto os grandes produtores industriais chegam facilmente a 36 a 40% (ou mesmo maiores, como apregoam os desenvolvedores dessas novas tecnologias).

Em dois estudos de caso muito simples logo a seguir apresentados, pode-se facilmente descobrir as vantagens de se mudar de patamares tecnológicos. Em ambas as situações estaremos falando de carvões com 74% de carbono fixo e poder calorífico de 7.400 kcal/kg. Entretanto, eles foram obtidos de madeiras de densidades básicas muito distintas e tinham por isso mesmo, densidades a granel diferentes.

- **Estudo de caso 01:** densidade básica média da madeira = 0,45 t/m³; densidade a granel do carvão = 0,22 t/m³; rendimento da carbonização = 28%. Essas

condições resultam em um consumo de madeira de 7,94 m³ madeira por tonelada de carvão ou de 1,75 m³ madeira/m³ de carvão.

• **Estudo de caso 02:** densidade básica média da madeira = 0,55 t/m³; densidade a granel do carvão = 0,28 t/m³; rendimento da carbonização = 36%. Essas condições resultam em um consumo de madeira de 5 m³ madeira por tonelada de carvão ou de 1,4 m³ madeira/m³ de carvão.

Esses dois tipos de carvão também irão apresentar comportamentos bem distintos na produção de ferro gusa, mesmo apresentando teores de carbono fixo e poderes caloríficos exatamente iguais. Isso porque apresentam diferentes densidades energéticas. Para se produzir 1.000 toneladas de ferro gusa demandam-se em média 440 toneladas de carbono fixo. Para o estudo de caso 01, o carvão vegetal apresenta uma densidade energética de 0,163 toneladas de carbono fixo por metro cúbico de carvão. Já o carvão vegetal do estudo de caso 02 possuía uma densidade energética de 0,207 toneladas de carbono fixo por m³ de carvão. Dessa forma, para a produção de 1.000 toneladas de ferro gusa, serão necessários 2.700 m³ do carvão do estudo de caso 01 ou de 2.125 m³ do carvão do estudo de caso 02. Uma diferença de 575 m³, que se refletirá tanto em maiores custos em carvão (que é comprado base volume), como em uma redução de produtividade do alto-forno que estará consumindo o carvão tipo 01. O uso de carvões com maior densidade energética (ou em carbono fixo) reflete-se em menores consumos volumétricos de carvão, o que abre espaço para maiores quantidades de minério de ferro por carga do alto-forno. Muito simples de se calcular, não é mesmo? Imaginem então amigos as centenas de combinações que se podem otimizar em termos de poder calorífico, carbono fixo e densidade a granel do carvão, densidade básica da madeira, rendimentos de carbonização, etc., etc.

Outro grande avanço que as tecnologias mais modernas estão oferecendo é a possibilidade de redução do ciclo de carbonização. Os fornos tipo "rabo quente" possuem ciclos totais muito longos desde a carga até a descarga completa. Chega a durar entre 5 a 10 dias. Já os fornos mais modernos apresentam ciclo total de horas, menos de um dia entre início de uma carbonização e o início da próxima. Isso significa mais cargas por forno, maiores produções e produtividades, menores custos e menores investimentos.

Outro ganho muito importante foi conseguido na redução do teor de finos no carvão. Temos tecnologias em operação gerando menos de 1,5%, até mesmo próximos a 1%. Isso porque se minimizaram os danos mecânicos no carvão pronto, através mecanização de seu manuseio, com o uso de vagonetas movidas sobre trilhos para alimentar a madeira e retirar o carvão pronto de dentro dos fornos de carbonização.

Tudo o que relatamos nessa seção estamos encarando como avanços notáveis, sendo aplicados em diferentes intensidades ainda pelo setor de produção de carvão vegetal no Brasil. Por outro lado, são realidades incontestáveis, que vão alavancar o setor e reduzir inclusive as demandas futuras por madeiras e por áreas plantadas para atender o setor siderúrgico (por unidade de aço ou de ferro gusa produzido). Enfim, as tecnologias evoluíram rápida e eficientemente, fazendo com que o setor de carvão vegetal para fins siderúrgicos esteja entrando em uma nova era tecnológica de produção no Brasil.

Qualidade da madeira de eucalipto para carvão vegetal

As grandes vantagens que as florestas plantadas de eucalipto oferecem para a produção de carvão vegetal são as seguintes:

- produtividades florestais excepcionais, tanto em m³/ha.ano, como em toneladas

de madeira seca/ha.ano, ou ainda em toneladas de carbono fixo/ha.ano;

- maior homogeneidade na qualidade da madeira (especialmente as madeiras de clones de eucaliptos);
- maior homogeneidade na forma dos troncos das árvores, que permitem melhor manuseio, carga e descarga das toras aos fornos;
- possibilidades de rápido e eficiente melhoramento genético para as principais qualidades demandadas nas árvores e madeiras para carbonização (teor de casca, teor de umidade na árvore em pé, teor de lignina e densidade básica da madeira, etc.);
- possibilidades de melhorias notáveis na performance, operação e produtividade da carbonização e na qualidade do carvão vegetal final;
- redução de custos de produção do carvão vegetal;
- redução de consumo de carvão vegetal por unidade de peso de ferro gusa e aço produzidos pela melhor qualidade do carvão;
- etc.

A qualidade da madeira interfere diretamente na produtividade da carbonização, na qualidade do carvão e no processo de redução do minério de ferro para ferro gusa ou aço. Em resumo, melhorar as florestas de eucalipto para se aumentar ainda mais as performances nas empresas siderúrgicas é uma obrigatoriedade para qualquer bom entendedor de carvão vegetal e de florestas plantadas. Os objetivos gerais desse melhoramento envolvem parâmetros tanto florestais como de

qualidade da madeira do eucalipto, sendo que os principais deles são os seguintes:

- produtividade florestal em toneladas de madeira por hectare e por ano (quanto maior for a produção de massa seca, maior terá sido a quantidade de energia estocada pela fotossíntese na madeiras);
- produtividade florestal em toneladas de carbono fixo equivalente por hectare.ano, e por extensão, em poder calorífico por hectare.ano;
- consumo específico de madeira por m³ ou por tonelada de carvão vegetal;
- densidade aparente do carvão vegetal;
- consumo específico de carvão vegetal por tonelada de ferro gusa ou de aço produzidas;
- resistência, teor de finos, teor de impurezas do carvão vegetal;
- etc.

Dentre os principais fatores qualitativos da madeira que estão relacionados a esses objetivos podemos citar: densidade básica da madeira, espessura da parede celular, teor de extrativos, teor de lignina, teor de carbono da própria madeira, teor de cinzas, teor de umidade, facilidade de secagem natural, porosidade para facilitar fluxos de gases dentro da madeira em secagem ou carbonização, resistência ao fendilhamento e a rachaduras, etc. Por todas essas exigências qualitativas, não apenas a química da madeira interfere na qualidade do carvão vegetal produzido, mas também os aspectos físicos e anatômicos da madeira. Todas as práticas silviculturais e de melhoramento genético que afetarem essas propriedades da madeira, estarão interferindo também na operação de carbonização e na qualidade do carvão. Por exemplo, temos influências significativas de fertilização, irrigação, ataques de pragas e doenças, espaçamentos de plantio, material genético, desbastes, etc., etc.

Outro fator que está sendo motivo de muitas avaliações tem sido a presença ou remoção da casca da madeira para se fazer carbonização. Até o presente momento, a maioria das operações de carbonização no Brasil utilizam madeira com casca. Entretanto, a casca deixada no campo após a colheita oferece grandes ganhos ambientais para o solo e para o ecossistema florestal. Sua retirada na colheita também ajuda a melhorar a secagem da madeira e a qualidade e performance da carbonização. Os longos períodos de secagem no campo podem ser abreviados com a retirada da casca. Também o manuseio das toras depois de secas no campo é muito facilitada. As cascas secas tendem a se soltar na forma de fitas que

atrapalham todas as operações subseqüentes. A casca das árvores também é muito mais rica em cinzas minerais (cerca de 10 vezes mais) do que a madeira. O alto teor de alguns elementos da casca, como o caso do fósforo, costuma também influenciar negativamente o desempenho do carvão vegetal com casca carbonizada em alguns tipos de produção de aços especiais, sendo por isso indesejável essa presença. Evidentemente, até hoje a casca tem sido considerada como uma matéria-prima obtida como um presente gratuito das árvores, por isso seu uso. Entretanto, para operações florestais mais sustentáveis e de melhor qualidade tecnológica, é bem possível que em poucos anos mais as carbonizações de madeiras de eucalipto não mais incluam as cascas das árvores em pirólise conjunta. Às cascas serão destinadas funções mais nobres de proteção do solo, da microvida do mesmo e de resgate de nutrientes para as novas gerações de árvores que utilizarão esses solos florestais.

Os minerais da madeira não geram calor na queima do carvão, pelo contrário, eles consomem energia na carbonização e nos altos-fornos para seu próprio aquecimento. Eles também reduzem o teor de carbono fixo e o poder calorífico do carvão, apesar de ilusoriamente aumentarem o rendimento da carbonização base madeira seca. Por essas razões, o teor de cinzas na madeira (e casca) para produção de carvão vegetal deve ser o menor possível.

As empresas líderes que plantam eucaliptos para produção de carvão vegetal estão interessadas em florestas que produzam mais de 45 metros cúbicos sólidos de madeira com casca por hectare por ano. Para as densidades básicas das madeiras, exigem um mínimo de $0,55 \text{ t/m}^3$, preferencialmente próxima a $0,6 \text{ t/m}^3$, ou mesmo maiores. Os mais recentes indicadores da pesquisa florestal têm mostrado que não apenas a média de densidade básica é importante, mas também sua variabilidade nos sentidos longitudinal e radial. Quanto mais alta for a densidade da madeira e mais uniforme a sua distribuição, melhor é a qualidade da madeira para produção de carvão vegetal. Isso favorece rendimentos e os fluxos de gases no interior da madeira, tanto na secagem da madeira como na pirólise. A própria resistência do carvão ao fendilhamento e friabilidade será melhorada.

Outra exigência para a qualidade da madeira tem sido a menor cernificação na madeira, nas idades próximas à colheita. Isso porque o cerne, com seus extrativos e tiloses, dificulta a secagem da madeira e também a expulsão dos gases formados durante a carbonização. Apesar dos extrativos da madeira serem bons energéticos na lenha, no caso do carvão eles podem em parte se volatilizar durante a carbonização, saindo uma parte como compostos presentes nas fumaças. Por essa razão, as pressões para madeiras com cernes ainda pouco desenvolvidos.

O teor de lignina é bastante influenciado pela espécie de eucalipto sendo plantada. Há indicações de que seja possível se conjugar boas produtividades florestais com teores totais de lignina na madeira acima de 28% ou mesmo de 30%. Há estudos mostrando que para cada 2% de ganho no teor de lignina na madeira, corresponderá um maior rendimento na carbonização de 0,8% (ou mais) base madeira seca inicial. Para mesmo ganho em lignina, o teor de carbono fixo aumenta em média 0,65% (ou mais). A relação siringila/guaiacila na molécula de lignina também é muito importante ser melhorada. A guaiacila possui maior teor de carbono que a siringila; portanto, para carbonização interessa madeiras com baixas relações siringila/guaiacila.

Existe comprovadamente uma grande correlação entre a densidade básica da madeira e a densidade a granel do carvão correspondente. Por exemplo, madeiras com densidade básica próximas a $0,5 \text{ t/m}^3$ conferem ao carvão uma densidade a granel próxima a $0,25 \text{ t/m}^3$. Já as madeiras com densidades acima de $0,6 \text{ t/m}^3$ chegam a produzir carvões com densidades maiores que $0,3 \text{ t/m}^3$.

A densidade básica das madeiras também mostra relação com o teor de células de parênquima na anatomia da mesma. Menor densidade pode significar aumento da presença de células de parênquimas radial e/ou longitudinal. Esse tipo de células de paredes finas e frágeis é pouco recomendável para o carvão vegetal, pois são friáveis após carbonização e aumentam o teor de finos do carvão.

As madeiras de maior densidade básica também possuem menores umidades no abate das árvores. Nada mais natural, pois com mais paredes celulares em sua estrutura, sobram menos espaços vazios na madeira para serem ocupados por água.

É ainda muito importante que todas essas metas para qualidade da madeira para carvão siderúrgico sejam buscadas concomitantemente nos programas de melhoramento florestal. Não basta apenas se ter uma madeira com densidade básica de $0,65 \text{ t/m}^3$, mas com teor de lignina de 20% e teor de extrativos de 5%. Portanto, cabe ao melhorista florestal do eucalipto buscar a melhor combinação de espécies, clones, híbridos inter e intra-específicos para o atendimento da qualidade ideal da madeira para carbonização.

Os eucaliptos para produção de carvão vegetal

Uma coisa é absolutamente certa quando se fala em produção de carvão vegetal a partir de madeira de eucalipto: a madeira a ser engenheirada é única em sua qualidade e essa deve ser especificamente construída para a finalidade energética. Há definitivamente efeitos comprovados de espécie, de idade, de híbridos e clones e de posição na árvore. Uma madeira com excelente qualidade para produção de móveis ou para celulose e papel, necessariamente não deve ser ideal para carbonização ou para fins energéticos. Tampouco o que se deseja para lenha ou biomassa energética é o que se valoriza para qualidade de madeira para finalidades de produção de carvão vegetal. Já comentamos sobre isso antes, mas é sempre bom se reforçar esse conceito.

No início das plantações de eucaliptos para produção de carvão vegetal, lá pelos anos 70's, objetivavam-se plantios de espécies com madeiras de altas densidades básicas: *E.paniculata*, *E.camaldulensis*, *E.microcorys*, *E.tereticornis*, *Corymbia citriodora* e *C.maculata*. Algumas espécies completamente inadequadas para produção de carvão, como *E.grandis* e *E.saligna*, foram também intensamente e erroneamente plantadas em Minas Gerais, Bahia, Mato Grosso do Sul, Espírito Santo, etc. Além de pouco adaptadas às condições dos estados brasileiros de clima mais tropical, essas espécies inadequadas conduzem a baixa densidade básica da madeira e a carvões com baixas qualidades também, principalmente na densidade a granel. Carvões com baixas densidades a granel são volumosos, ocupam muito espaço nos alto-fornos siderúrgicos e se consomem em pouco tempo. Como se diz em linguagem de usuário de carvão vegetal: carvões de baixa densidade possuem baixa capacidade de sustentar a chama, são consumidos em pouco tempo, virando cinzas com facilidade.

A partir dos anos 80's passaram-se a buscar outras espécies de *Eucalyptus* e *Corymbia*, que aliassem alguns quesitos importantes: adaptação aos climas locais, boa produtividade mássica e alta densidade básica da madeira. Foram testados: *E.urophylla*, *E.cloeziana*, *E.pellita*, *E.pyrocarpa*, *E.camaldulensis*, *E.tereticornis*, bem como algumas espécies de *Corymbia*, como *C.maculata* e *C.torelliana*. Algumas espécies se mostraram muito potenciais, especialmente para programas de hibridação e clonagem. Foi o caso de *E.urophylla*, espécie muito adaptada a climas quentes e úmidos, com

razoável densidade básica e alto teor de lignina. As primeiras tentativas de hibridação vitoriosas envolveram a produção do híbrido *E.grandis* x *E.urophylla* ("*E.urograndis*"), frente à sua excelente produtividade florestal, resistência a pragas e doenças e qualidade da madeira. Devemos muito no caso desse melhoramento genético ao grande amigo dos eucaliptos, o engenheiro florestal Teotônio Francisco de Assis, que até hoje trabalha nesse tipo de aperfeiçoamento contínuo dos eucaliptos pela genética e silvicultura. Com ele, estamos sempre aprendendo muito, como o que aconteceu comigo na troca de mensagens que tive com o Téo para escrever um pouco sobre essa parte de nosso capítulo do livro virtual sobre os eucaliptos.

Além do melhoramento florestal associado aos híbridos de *E.urograndis*, está-se também retornando com intensidade ao programa de busca de híbridos com espécies de alta densidade básica de madeira: *Eucalyptus paniculata*, *E.camaldulensis*, *E.brassiana*, *E.tereticornis*, *Corymbia citriodora*, *C.torelliana*, *C.maculata*, *C.variegata* e *C.henryi*. A hibridação dentro de cada um desses gêneros tem sido a tecnologia mais utilizada. Certamente, os pesquisadores conhecem o enorme potencial do *E.urograndis* para esse tipo de programa. Por isso, a busca por introdução de material de outras espécies em materiais básicos já melhorados e mais conhecidos de *E.urograndis*. Já para o gênero *Corymbia*, que infelizmente não hibrida com *Eucalyptus*, a busca está concentrada em híbridos de *C.torelliana*, um eucalipto tropical de muito sucesso em muitas regiões brasileiras.

No caso de outras regiões mais temperadas no Brasil e que também possuem produção de carvão vegetal para fins não apenas siderúrgicos, existem também espécies e híbridos sendo avaliados, além do híbrido *E.urograndis*, tais como envolvendo *E.dunnii*, *E.viminalis*, *E.benthamii*, *C. citriodora*, *C.maculata*, etc.

Dessa forma, com determinação, criatividade e cautela, os pesquisadores buscam novos degraus tecnológicos que possam representar segurança fitossanitária, qualidade de florestas e de madeira e capacidade de boa carbonização, bem como produção de carvão com qualidade cada vez mais indicada para carbonização.

Considerações finais

O carvão vegetal brasileiro produzido a partir da madeira de eucalipto é definitivamente um biocombustível sólido de enorme sucesso e com grande potencial de crescimento. Sua tecnologia de produção se fortaleceu vigorosa e sustentavelmente em anos recentes, frente às inovações no processo de carbonização e na área florestal em relação à qualidade e produtividade em termos das madeiras dos eucaliptos. A qualidade da madeira é ainda passível de melhorias significativas, bem como está sendo possível se produzir florestas plantadas de eucaliptos com cada vez melhores níveis de sustentabilidade. Em um mundo com recursos energéticos mais e mais escassos, dispor-se de um biocombustível renovável como é o carvão vegetal de florestas plantadas de eucaliptos pode representar um relevante papel para nossa sociedade.

Entretanto, há desafios a serem vencidos pelo Brasil, tais como:

- equacionar o problema de falta de madeira reflorestada nas quantidades demandadas e com a maior proporção possível com certificação florestal FSC ou CERFLOR;
- equacionar a troca de modelo tecnológico no processo de carbonização, pois já se dispõem de tecnologias mais ecoeficientes e performantes;
- equacionar o problema social de muitos brasileiros trabalhadores na produção de carvão vegetal, os conhecidos "carvoeiros", oferecendo a eles todos melhores

qualidades no trabalho, empregos justos e legais e felicidade e qualidade de vida às suas famílias;

- criar e revisar normas técnicas para o carvão vegetal ao longo de toda a cadeia produtiva;
- desenvolver e difundir sistemas para gerenciamento da atividade de carvoejamento, privilegiando a profissionalização dos pequenos e médios produtores;
- desenvolver com mais intensidade a biocarboquímica, seus produtos, tecnologias e mercados;
- desenvolver e criar um modelo de gestão ecoeficiente para as empresas que produzem carvão vegetal, reduzindo desperdícios em matérias-primas, perdas térmicas, fluxos mássicos de gases e de águas, poluição aérea com gases de efeito estufa, etc., etc.;
- integrar mais efetivamente a cadeia produtiva envolvendo floresta plantada/carbonização/ consumidores de carvão vegetal;
- intensificar pesquisa e desenvolvimento em áreas prioritárias tais como tecnologias de carbonização, biocarboquímica e qualidade ideal da madeira para carbonização;
- integrar a cadeia produtiva do carvão vegetal com cadeias produtivas de outros produtos da madeira e de outras biomassas (bagaço de cana-de-açúcar, capins e palhas, bambu, palmáceas, etc.);
- desenvolver arranjos produtivos mais eficientes e ecoeficientes em todos seus aspectos e interações;
- inserir definitivamente o carvão vegetal, suas florestas plantadas e maneiras de produção nos mercados de créditos de carbono criados pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo;
- etc., etc.

A realidade do carvão vegetal é bem conhecida no Brasil: suas vantagens, suas mazelas, seus pontos fracos e suas fortalezas. O trabalho que ainda temos pela frente é enorme. Entretanto, nada melhor do que se ter um fator tão alavancador e motivador como a possibilidade de se produzir um biocombustível limpo e natural, renovável e ecoeficiente. Certamente, temos um longo caminho em direção ao futuro e à sustentabilidade. Trabalho e desafios não faltarão ao setor. Vamos então mergulhar com determinação nesse trabalho. Não faltarão críticas, sugestões, opiniões favoráveis e outras contrárias. Todas são parte do processo de melhoria contínua e do próprio crescimento da sociedade. Com determinação, estudos e muitos conhecimentos científicos e tecnológicos será possível se consolidar definitivamente o carvão vegetal do eucalipto como um dos mais bem sucedidos biocombustíveis gerados e consumidos pela sociedade humana. Isso tanto no Brasil, como a nível mundial. Acreditamos muito nisso, vocês devem ter percebido meu entusiasmo com as sugestões e reflexões para se ter um mundo melhor em termos de bioenergias cada vez mais limpas. Esperamos ter ajudado a que vocês também tenham-se motivado e aprendido um pouco mais sobre essa riqueza ímpar do Brasil que é a sua enorme capacidade de produzir carvão vegetal com os eucaliptos.

Referências da literatura

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, sendo também o que mais usa a madeira dos eucaliptos para essa finalidade. Também o Brasil é quem mais utiliza esse carvão para fins industriais, sendo sua siderurgia e metalurgia altamente dependentes dessa fonte de energia renovável e limpa (quando executada em condições de adequada sustentabilidade). Como era de se esperar, essa atividade cresceu e se desenvolveu no País, primeiro de forma empírica e primitiva, mas hoje temos adequados níveis de tecnologia em contínua evolução, graças a muita pesquisa científica e tecnológica. Portanto, se existe atualmente no

mundo um local a se buscar conhecimentos e tecnologias para se produzir carvão vegetal a partir de madeira, esse País é o Brasil.

Fonte: Eucalyptus