

Fotossíntese, um Processo Natural para Descarbonização da Indústria Siderúrgica

D. Calais¹, R. S. Sampaio²

¹Eng. Florestal UFV – 1969. Assistente Técnico do SINDIFER – Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais, Brasil. astec@sindifer.com.br

²Eng. Metalúrgico, M.Sc., Ph.D., CEO RSConsultants Ltda, Minas Gerais, Brasil. ronaldo.issbrazil@gmail.com

Palavras-chaves: ferro-gusa-verde, regeneração de oxigênio, captura e armazenamento natural de CO₂, sustentabilidade do uso da biomassa na siderurgia.

Abstract

A fotossíntese sustentável é a solução da Natureza para redução das emissões de CO₂. As florestas comerciais são implantadas e administradas sob as mais severas normas ambientais e das diretrizes da sustentabilidade. Da mesma forma são conduzidas as operações de carbonização da madeira e do transporte do carvão vegetal para as usinas que produzem gusa de mercado. Os benefícios sociais relacionados chegam a regiões onde as oportunidades de trabalho são escassas. A avançada tecnologia da silvicultura brasileira propicia o cultivo competitivo de florestas em solos pobres, em áreas de baixa pluviosidade, inadequadas para culturas anuais. Portanto, as plantações florestais nunca estão em competição com a produção de alimentos. Este trabalho concentra-se nos benefícios sociais e ambientais da siderurgia baseada na biomassa.

Introdução

O aquecimento global é, sem dúvida, uma das mais sérias preocupações da humanidade no mundo contemporâneo. Como é amplamente conhecido ou aceito, o dióxido de carbono é o principal gás do efeito estufa. Muitos esforços têm sido feitos para reduzir a concentração de CO₂ na atmosfera e controlar o aumento de temperatura. Nenhum deles demonstrou tanta eficiência quanto aquele elaborado pela própria Natureza: a fotossíntese. Essa miraculosa reação bioquímica acontece em todos os vegetais na fase de crescimento, porém, por causa da ampla superfície foliar e do seu longo ciclo de vida, as árvores são particularmente eficientes na captura de CO₂ e liberação de O₂. Uma vantagem adicional precisa ser reforçada. A fotossíntese é uma reação endotérmica que ocorre sob a energia solar. Durante a noite acontece a respiração, a qual, ao contrário da fotossíntese é uma reação exotérmica. A conclusão é clara; as árvores – estejam elas em florestas naturais ou plantadas - são também efetivas na redução da amplitude térmica, isto é, verões menos quentes e invernos menos frios. Numa simples avaliação pessoal, qualquer pessoa pode sentir que a sombra das árvores num pequeno bosque é mais agradável do que a sombra sob uma marquise.

Garantida pela fotossíntese, a biomassa em permanente crescimento é a máquina natural para captura e armazenamento de carbono e regeneração de oxigênio. Esses recursos naturais constituem as forças orientadoras para os produtores brasileiros de ferro primário.

O uso de pequenas e médias propriedades rurais no suprimento de uma parte expressiva da madeira de eucaliptos constitui também um aspecto que intensifica a biodiversidade. As plantações de eucalipto são apenas parte de uma vegetação diversificada. Pastagens, culturas anuais produtoras de alimentos e áreas de preservação nativa estão incluídas no uso do solo de pequenas e médias propriedades. Está claro, portanto, que o cultivo de árvores constitui uma alternativa viável e efetiva para fortalecer a luta contra o aquecimento e controlar as mudanças climáticas.

A Figura 1 ilustra um sistema baseado na fotossíntese onde vários fatores são envolvidos na produção do volume necessário de madeira. O carbono fixado no caule é apenas parte do carbono total fixado por esse complexo sistema vivo e natural.

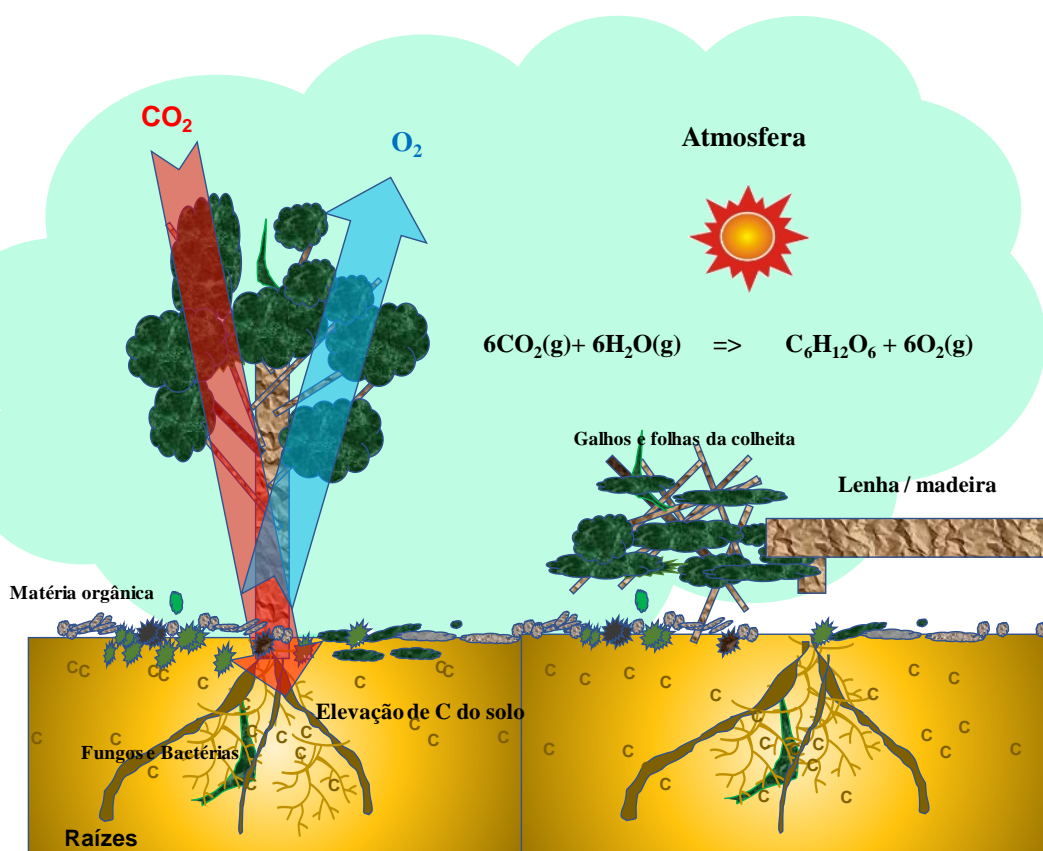


Figura 1. Ilustração da captura natural e armazenamento do carbono com regeneração do oxigênio promovidos pela energia solar.

Indústria do Ferro Primário Baseada em Carvão Vegetal

Carvão vegetal, produto resultante da destilação seca da madeira, é um importante insumo para as indústrias do ferro-gusa, aço e ferroligas.

A indústria siderúrgica brasileira baseada no carvão vegetal é única no mundo, e, como ela utiliza apenas carvão originário de florestas plantadas e comprovadamente sustentáveis, contribui decisivamente para o balanço ambiental, sendo também um fator chave para inclusão social, na medida em que gera empregos em todas as camadas da sociedade. É importante também destacar que as atividades florestais sempre trazem melhoria no IDH - Índice de Desenvolvimento Humano – já que as ofertas de emprego ocorrem em regiões onde as oportunidades de trabalho são normalmente escassas.

Conforme já foi mencionado, as plantações florestais são particularmente eficientes na captura de CO₂ e na liberação de oxigênio. Num sistema de rendimento sustentado, para cada hectare sendo colhido, há pelo menos 6 hectares em fase de crescimento, limpando o ar e amenizando as mudanças climáticas. Nunca é demais lembrar que o carvão vegetal é uma fonte renovável de energia. Em tempos de efeito estufa e aquecimento global, a siderurgia a carvão vegetal deveria receber apoio e incentivos das autoridades brasileiras e também das comunidades ambientalistas nacionais e internacionais. Essa é a única indústria capaz de produzir bens essenciais ao desenvolvimento ao mesmo tempo em que limpa a atmosfera. Portanto, é muito justo que o ferro-gusa produzido com carvão vegetal originário de florestas plantadas e sustentavelmente manejadas seja considerado ferro-gusa verde e único com capacidade de fixação negativa de CO₂ com produção de O₂ para a atmosfera.

Investimentos adicionais

Os enormes benefícios ambientais do ferro-gusa verde não vêm de graça. O carvão vegetal usado nessas usinas vem de florestas plantadas dentro dos critérios da sustentabilidade e isso envolve investimentos significativos e permanentes em terras, plantio e manutenção florestais. As florestas energéticas constituem, portanto, o sistema de suprimento de madeira/carvão. Os custos de investimento e manutenção não podem ser interrompidos quando o mercado de ferro-gusa está em baixa demanda. As usinas que utilizam carvão fóssil não têm esses custos adicionais. Considerando, portanto, os conhecidos benefícios do ferro-gusa verde, é justo pleitear para ele um preço mais alto quando comparado com o ferro-gusa de coque ou que seus predicados, como a produção do oxigênio, sejam remunerados como acontece quando se reduz CO₂ de fontes fósseis.

Silvicultura Brasileira

Nos dias atuais, ninguém imagina seriamente o desenvolvimento de um país se não for em bases sustentáveis. Essa premissa torna-se particularmente verdadeira quando aplicada a países em desenvolvimento. O Brasil se situa entre os poucos países com grande disponibilidade de terras antropizadas adequadas para silvicultura. Essa disponibilidade de terras associada aos maiores rendimentos florestais do mundo resulta numa combinação perfeita dos fatores de produção.

Apesar de ter o nome de uma árvore, o Brasil só percebeu seu imenso potencial florestal depois da Lei 5.106/1066¹ que concedia incentivos fiscais para reflorestamento. Esses incentivos terminaram no final do século vinte, quando as plantações florestais se tornaram competitivas. O período de aprendizagem com espécies exóticas já cultivadas foi relativamente curto. Uma perfeita sinergia entre melhoramento genético e fertilização florestal resultou em rendimentos competitivos, em solos de baixa fertilidade, em regiões de baixa pluviosidade. É importante destacar que os altos rendimentos florestais mencionados acima não resultaram apenas de condições naturais favoráveis, mas também de um persistente trabalho de pesquisadores e o indispensável apoio financeiro dos empreendedores florestais.

Plantações Florestais no Estado de Minas Gerais

Minas Gerais é o estado que tem a maior área de florestas plantadas no Brasil com um total de 2,24 milhões de hectares de eucaliptos², compostos dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, aqui indistintamente chamados eucaliptos. Num estado com variados índices de qualidade do terreno, é claro que os rendimentos não podem ser os mesmos em toda as regiões. Um extenso levantamento conduzido pela *Canopy Remote Sensing Solutions* indicou que a produtividade variou de 20 a 40 m³.ha⁻¹.ano⁻¹. Na coleta de dados para sua tese de M.Sc., Pereira (2012)³ encontrou um rendimento médio de 35,9 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ e uma densidade média de 0,558 g.cm⁻³ para 6 clones estudados no Norte de Minas Gerais. Como se sabe, os rendimentos em plantios comerciais nunca são tão altos quanto aqueles encontrados em parcelas experimentais. Portanto, 35 m³.ha⁻¹.ano⁻¹, equivalentes a 19,5 toneladas de madeira seca por hectare por ano pode ser considerada uma média razoável para o estado todo. A madeira dessas plantações é usada para celulose, chapa de aglomerados, mobiliário, madeira tratada (estacas de cerca, postes de eletrificação, construções rurais) lenha, pellets, serrarias e para produção de carvão vegetal. De acordo com os dados do Instituto Estadual de Florestas⁴, em 2021, cerca de 35,7 milhões de metros cúbicos de madeira de eucaliptos foram utilizados para produção de aproximadamente 24,6 milhões de metros cúbicos ou 5,4 milhões de toneladas de carvão vegetal em Minas Gerais. A densidade do carvão vegetal varia principalmente com a qualidade da madeira; 220 kg por m³ é uma densidade a granel geralmente aceita como a média. Fora o que vai para churrasco e pequenas forjas artesanais, esse carvão é consumido pelas indústrias de ferro-gusa, aciarias e ferroligas.

Normalmente, as florestas de eucaliptos são colhidas em duas rotações, eventualmente em três. Quando não há investimentos em fertilizações, o rendimento médio cai no segundo e terceiro cortes. Com adequada fertilização o rendimento se mantém e pode até se elevar.

Unidades: Em princípio o setor florestal trabalha com volumes. A mudança de volume para massa requer o conceito de densidade, e a densidade da madeira é muito variável. *Eucalyptus* e *Corymbia* são dois gêneros de plantas com centenas de espécies cada. A densidade de suas espécies varia entre elas e até entre clones de uma mesma espécie.

Um esclarecimento sobre a transformação de volume em massa será devidamente abordado mais adiante.

Licenciamento Ambiental: Plantações Florestais

Como qualquer outro empreendimento, uma plantação florestal não pode ser implantada sem o licenciamento ambiental prévio. Em Minas Gerais, esse licenciamento é concedido pelo Estado através do Conselho Estadual de Política Ambiental -Copam, o qual, por sua vez, compõe-se de representantes de governo, associações empresariais e organizações não governamentais- ONGs. As exigências para o licenciamento variam conforme a área a ser plantada, e, em qualquer caso, o empreendedor deve estar em conformidade com todas as restrições legais sobre o uso da terra. As principais restrições são a Reserva Legal -RL e as Áreas de Preservação Permanente -APPs. No Brasil, a área de RL varia de acordo com o bioma onde a floresta comercial será implantada. Em Minas Gerais, a percentagem de RL é de 20% para o estado todo. As APPs têm a finalidade de preservar os recursos hídricos, a paisagem natural, estabilidade geológica, proteção do solo e assegurar o bem-estar da população. Em geral, a RL mais as APPs ocupam cerca de 45% da área total da propriedade. Considerando que a percentagem padrão das áreas de serviço é de 5%, pode-se afirmar que a floresta comercial não ocupa mais do que 50% da área total da propriedade. A conclusão é bem clara: pelo menos 45% da terra é mantida em seu estado natural e adicionalmente protegida contra fogo e caçadores.

A Figura 2 ilustra uma típica plantação de eucalipto e a vegetação nativa vizinha. Como já foi mencionado, a Reserva Legal e as Áreas de Preservação Permanente cobrem, em média, 45% da área total. Portanto, o negócio de floresta sustentável constitui também uma máquina permanente e renovável para capturar carbono e liberar oxigênio. O ciclo longo de colheita e a necessária fertilização garantem fixação extra de carbono e no solo e nas raízes. Nunca é demais lembrar que florestas plantadas protegem indiretamente as florestas nativas.

A madeira utilizada na produção de carvão representa menos de 30% do carbono total fixado na biomassa produzida. Isso significa que folhas e galhos permanecem no chão onde eles se decompõem e são incorporados ao solo. Juntos com as raízes, eles representam 40% da biomassa que permanece indefinidamente no solo. A planta é uma máquina CUC (Captura e Utilização de Carbono) e uma porção considerável serve para aumentar a biodiversidade do solo pela ação de fungos e bactérias produzindo carbono orgânico.

Esses benefícios adicionais para o meio ambiente, que contribuem para contrabalançar as emissões de GHG têm que ser considerados na contabilidade de emissão/redução de CO₂. O oxigênio devolvido para a atmosfera deve também tornar-se parte da contabilidade do CO₂ equivalente. Essa falha aritmética e termodinâmica do IPCC, na contabilidade do CO₂ equivalente, tem que ser corrigida para dar um valor justo à fotossíntese sustentável como uma ferramenta eficiente na Captura e Armazenamento do Carbono. *Sampaio et al. (2022)*⁵.



Figura 2. Uma típica plantação florestal e a respectiva Reserva Legal– *Foto: Cortesia da Plantar Reflorestamentos S/A.*

Produção de Carvão Vegetal

Assim como a implantação de florestas comerciais, as unidades para produção de carvão também precisam de licenciamento para iniciarem suas operações. As exigências do licenciamento dependem da produção anual prevista. Uma produção anual de 50.000 m³ (11.000 toneladas) a 70.000 m³ (15.400 toneladas) é classificada como de pequeno porte; de 70.000m³ (15.400 toneladas) a 100,000 m³ (22.000 toneladas), de médio porte, e acima de 100.000 m³ (22.000 toneladas), de grande porte.

Independentemente da quantidade produzida e com vistas a reduzir as emissões atmosféricas e melhorar os rendimentos do processo, alguns procedimentos devem ser observados na Unidade de Produção de Carvão (UPC).

- Manter o teor de umidade da madeira a ser enforada abaixo de 40% .
- Assegurar a integridade estrutural dos fornos, evitando vazamentos indesejáveis.
- A madeira deve estar livre de resíduos como óleo, detritos e galhos.
- Manter o piso limpo e as “baianas” livres antes de encher o forno.
- Manter um rendimento volumétrico médio que pode variar de acordo com a produção mensal que que nunca seja inferior a 1,75 m³ de madeira para 1,0 mdc de carvão.
- Implantar (caso não exista) uma cortina arbórea no entorno da UPC.
- Prover sistemas de incineração dos voláteis da carbonização e/ou capturar parte dos voláteis como licor pirolenhoso e alcatrão vegetal para eliminar fontes de metano e melhor ambiente nas UPC.

Em Minas Gerais, somente madeira de florestas plantadas é usada na produção de carvão, e a Figura 3 mostra uma típica Unidade de Produção de Carvão. Para produzir carvão vegetal sem emissões de metano, o setor desenvolveu um sistema simples e prático, utilizando o tradicional forno cilíndrico de alvenaria conectado a uma chaminé central (uma chaminé para 4 fornos) onde são queimados todos os voláteis resultantes da carbonização.

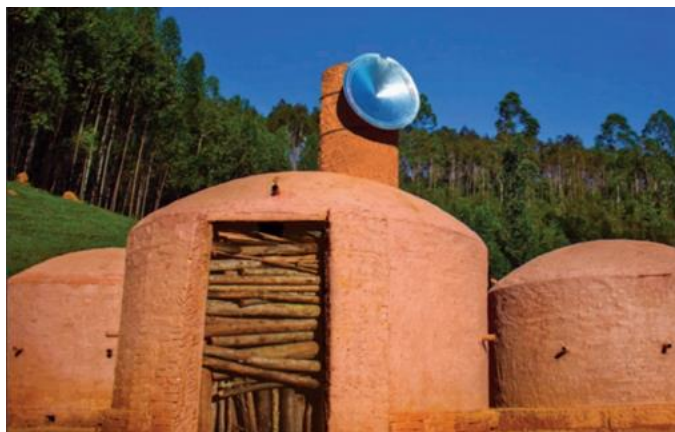


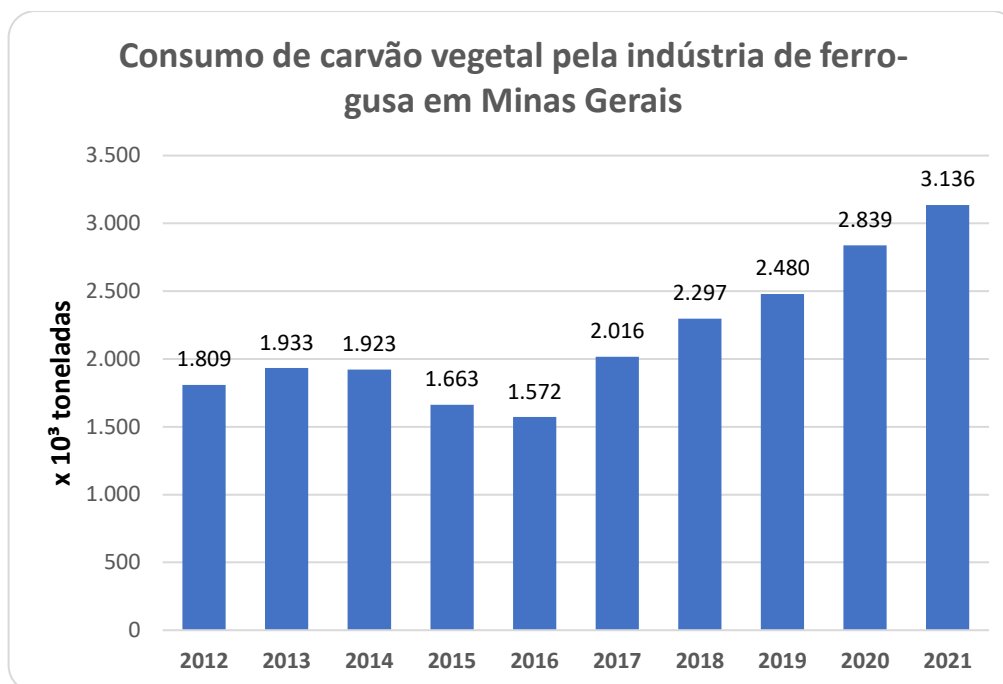
Figura 3. Uma típica Unidade de Produção de Carvão – UPC.⁶

Benefícios Sociais

Pelas características de suas operações industriais, as indústrias de ferro-gusa e aço requerem intensiva força de trabalho, sendo, portanto, grandes geradoras de oportunidades de trabalho. Utilizando carvão vegetal como termo redutor, essas empresas triplicam sua capacidade de gerar empregos na implantação e manutenção de florestas comerciais, nas operações de colheita e transporte de madeira, e, por fim, na fabricação e transporte de carvão.

Consumo de carvão vegetal pela indústria de ferro-gusa em Minas Gerais

A Figura 4 mostra as estatísticas do SINDIFER sobre o consumo de carvão pelas usinas produtoras de ferro-gusa em Minas Gerais. Observa-se aqui um crescimento constante a partir de 2016.



Fontes: IEF, Empresas e SINDIFER

Figuras 4. Consumo de Carvão vegetal pela indústria de ferro-gusa independente em Minas Gerais, Brasil.

Oportunidades de Emprego

Os empregos gerados pela produção de ferro-gusa com carvão vegetal e pelo respectivo setor florestal estão indicados na Tabela 1, para os anos de 2020 e 2021; mais de 118 mil postos em 2021. Deve-se reafirmar que essas ofertas de emprego no setor florestal ocorrem em regiões onde as oportunidades de trabalho são escassas.

2020			
NAS USINAS	Número de Empregos		
	Diretos	Indiretos	TOTALS
Produção de Ferro Gusa	9.550	23.875	33.425
NO SETOR FLORESTAL	Número de Empregos		
	Diretos	Indiretos	TOTALS
Implantação e Manutenção de Florestas	2.397	7.191	9.588
Produção e Transporte de Carvão Vegetal	17.410	52.230	69.640
Total - Setor Florestal	19.807	59.421	79.228
TOTAL - Usinas + Setor Florestal	29.357	83.296	112.653
2021			
NAS USINAS	Número de Empregos		
	Diretos	Indiretos	TOTALS
Produção de Ferro-Gusa	9.940	23.856	33.796
SETOR FLORESTAL	Número de Empregos		
	Diretos	Indiretos	TOTALS

Implantação e Manutenção de Florestas	2.056	6.168	8.224
Produção e Transporte de Carvão Vegetal	19.150	57.450	76.600
Total Setor Florestal	21.206	63.618	84.824
TOTAL (Usinas + Setor Florestal)	31.146	87.474	118.620

Fontes: SINDIFER e Empresas.

Tabela1. Força de trabalho empregada no setor de produção de ferro gusa independente de Minas Gerais, para os anos de 2020 e 2021.⁷

Exemplo para 1.000 Toneladas de Ferro-Gusa produzida

Como já foi dito acima, $35 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ é considerado um rendimento médio razoável para os eucaliptos no estado de Minas Gerais como um todo. Esse rendimento é uma boa referência, mas não é suficiente. A densidade da madeira é o principal indicador da sua qualidade para produção de carvão. Embora essa densidade seja amplamente variável de uma espécie para outra e mesmo entre clones, $0,558 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ é considerada uma média representativa de seis (6) clones de eucalipto estudado por Pereira (2012) in sua tese de mestrado³. Essa densidade equivale a 0,558 tonelada de madeira seca por metro cúbico. Transformando esse volume de $35 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ em massa, esse rendimento equivale a 19,53 toneladas de madeira seca por hectares por ano. O rendimento gravimétrico médio na transformação de madeira seca em carvão é de 33%. Portanto, 19,53 toneladas de madeira seca equivalem a 6,44 toneladas de carvão. Em resumo: $35 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1} = 19,53 \text{ toneladas de madeira seca} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1} = 6,44 \text{ toneladas de carvão} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$. Na idade de rotação de 7 anos, haverá 45,1 toneladas de carvão $\cdot \text{ha}^{-1}$.

A produção de 1.000 toneladas de ferro-gusa consome 750 toneladas de carvão vegetal, ou seja, uma área colhida de 16,63 hectares. A produção média de ferro-gusa em Minas Gerais foi nos últimos 4 anos foi de 3,66 milhões de toneladas por ano. Portanto, foram consumidas 2,745 milhões de toneladas de carvão e 60.865 hectares de florestas plantadas foram colhidos anualmente. Sete anos é a rotação adequada para uma floresta energética. Portanto, a área de florestas energéticas para suprimento das indústrias de ferro-gusa em bases sustentáveis deve ser equivalente a sete vezes a área de consumo anual. Conclusivamente, a produção anual de 3,66 milhões de toneladas de ferro-gusa em bases sustentáveis requer uma área de 426.055 hectares de florestas energéticas. Ressalte-se que, nesse caso, para cada hectare em fase de colheita, haverá 6 hectares em fase de crescimento, capturando CO_2 da atmosfera e liberando O_2 .

O balanço de oxigênio e carbono (CO_2) apresentado na Figura 6, começando com plantio de eucalipto e colheita da madeira, inclui também galhos que são levados para a UPC. Parte desses galhos é usada para produção de carvão, e os mais finos são usados como combustíveis para queima de emissões (voláteis) resultantes da carbonização da madeira. Dessa forma, o metano (CH_4) e o monóxido de carbono (CO) são queimados e, portanto, não são lançados na atmosfera. O carvão é então enviado para o alto forno para produzir ferro-gusa. Os detalhes desses cálculos podem ser vistos na referência 9. Esses dados não constituem um ACV (Análise do Ciclo de Vida = LCA) para a

produção de ferro gusa com carvão vegetal porque eles não consideram escopo 1 e escopo 2 e outras emissões que podem estar presentes no sistema. Entre as outras emissões podem ser citadas as emissões de diesel do maquinário florestal e do transporte e outras emissões do plantio como N₂O de fertilizantes nitrogenados e todas aquelas similares até e dentro das siderúrgicas. Norgate *et alii*¹⁰ publicaram um ACV (LCA) para um sistema similar onde as emissões vindas do combustível, fertilizantes e maquinários utilizados em plantação florestal e colheita, além da eletricidade (Australia) e demais até o ponto de produção de ferro gusa, totalizam 240 kg de CO₂ por tonelada de carvão vegetal.

Na Figura 5 há dois blocos de dados; de carbono sob a forma de CO₂ e de oxigênio O₂. A sustentabilidade da fixação de CO₂ e regeneração de oxigênio são os dados que representam a captura, o armazenamento e o uso do carbono e liberação de oxigênio. O sistema florestal, de captura e regeneração de O₂, exporta madeira, inclusive galhos, para produção de carvão (carbono fixado e O₂ liberado para atmosfera. O CO₂ negativo, ficado, nessa biomassa é de 5.271 kg de CO₂ e 12.369 kg de oxigênio liberado para atmosfera por tonelada de ferro-gusa. O valor elevado para o O₂ regenerado resulta do carbono fixado na biomassa e no solo além daquele exportado com a madeira e galhos. No caso do CO₂, considera-se somente a fração fixada que vai com a madeira colhida e os galhos e folhas desse momento. Os detalhes desses balanços de carbono e oxigênio estão referência 9. Desta figura, na fase de carbonização, 409 kg de CO₂ é gerado pela queima de galhos e folhas e 326 kg de O₂ por tonelada de ferro-gusa são removidos da atmosfera. Outros 1.718 kg de CO₂ por tonelada de ferro-gusa são emitidos pela combustão completa de todos os voláteis da carbonização e 1.436 kg de O₂ são removidos da atmosfera nessa operação. No alto forno, são emitidos 2013 kg de CO₂ por tonelada de ferro-gusa ao mesmo tempo em que se removem 1.632 kg de O₂ da atmosfera. O resultado líquido, partindo da madeira até o gusa, por tonelada de ferro-gusa, é a fixação negativa de 1.130 kg de CO₂ e a regeneração positiva de quase 9 toneladas (8.951 kg) de O₂ para a atmosfera diluindo todos os outros gases que lá se encontram, em especial os causadores do aquecimento global.

O valor relativo à adicionalidade é de 1.584 kg de CO₂ por tonelada de ferro-gusa fixado além daquele que já se encontrava no solo antes de a floresta ser implantada (comparado com a fixação de carbono da vegetação nativa que estava lá antes da plantação florestal). Os detalhes disso podem ser vistos na referência 9. A adicionalidade pode ser favorável ou desfavorável aos objetivos de fixação. Se nas áreas onde foram inseridas as florestas plantadas antes havia um estoque de carbono fixado e uma taxa anual de fixação, esses valores medidos são deduzidos do estoque e taxa de fixação do plantio que foi colocado nessas mesmas áreas. No caso real mostrado na referência 9, essa diferença foi em mais fixação, adicional, àquela que lá antes existia. Se fosse menor o valor terá que ser abatido daquele fixado (referência 8). Nas áreas de Cerrado onde a floresta de eucaliptos deste trabalho foi implantada⁸ o estoque de carbono existente no solo e a taxa anual de fixação forma inferiores aos da floresta plantada, gerando adicionalidade positiva para mais fixação.

A madeira utilizada para produção de carvão representa não mais do que 30% do carbono total capturado num sistema de floresta plantada. Enquanto a floresta está em sua fase de crescimento, folhas e galhos caem no chão onde se decompõem e lá permanecem indefinidamente, a menos que sejam carregados pela erosão¹¹. Bactérias e fungos necessários ao desenvolvimento da vegetação incorporam grande quantidade de carbono no solo, representando mais de 60 % do total de CO₂ retirado da atmosfera.

Na Figura 5 as quantidades de CO₂ e O₂ mostradas na coluna a esquerda representam o sistema de captura de CO₂, uso do mesmo (C no solo, e nas biomassas) e regeneração de O₂ com base na fotossíntese sustentável (*CCSU = Carbon Capture, Storage and Use*). Esses valores, calculados com base em medições reais (vide referência 9), são bem maiores do que aqueles efetivamente retirados do sistema como madeira e galhos. Ou seja, além da manutenção de praticamente 45 % das áreas de plantio “intocadas”, ou seja, fixações naturais protegidas, o sistema de plantios sustentáveis precisa de fixar 17 t de CO₂ para cada 5,3 t de CO₂ a serem exportadas para fabricação de carvão vegetal e outros produtos por tonelada de ferro gusa produzida. Nesse estágio são também enviados para a atmosfera 12,4 t de O₂.

Também na Figura 5, a direita temos o fluxo de C (CO₂) e O₂ iniciado com a madeira, passando pela carbonização com incineração dos voláteis da carbonização até se chegar ao alto-forno onde o gusa é produzido. Os valores mostrados são por tonelada de ferro gusa. Temos como resultado uma fixação de 1130 kg de CO₂/t de gusa, emissão negativa, e a liberação líquida para a atmosfera de 8052 kg de O₂/ t de gusa. Esse oxigênio ao entrar na atmosfera dilui os demais gases de efeito estufa que lá se encontram. Não existe forma mais eficaz e benéfica do que está para a produção de metais.

O setor de biomassa sustentável ainda não foi à luta para que o oxigênio, definitivamente retirado da atmosfera, com o uso de combustíveis fosseis passe a ser considerado no cálculo do CO₂ equivalente. A referência 6 é uma TESE que demonstra essa omissão / falha do IPCC no cálculo do CO₂ equivalente. Essa falha prejudica a sustentabilidade dos processos naturais de CCSU, e a necessária correção dele irá impulsionar e viabilizar a intensificação do uso de processos de fotossíntese sustentável como forma de recuperação da atmosfera que tínhamos a uns 100 anos atrás. A TESE apresentada no artigo “*Atmospheric Profit & Loss — Oxygen Depletion as the Remaining Piece for a Proper CO₂ Emissions Assessment*”⁵. Comprova a importância e inicia a mostrar metodologias para como considerar o O₂ no CO₂ equivalente.

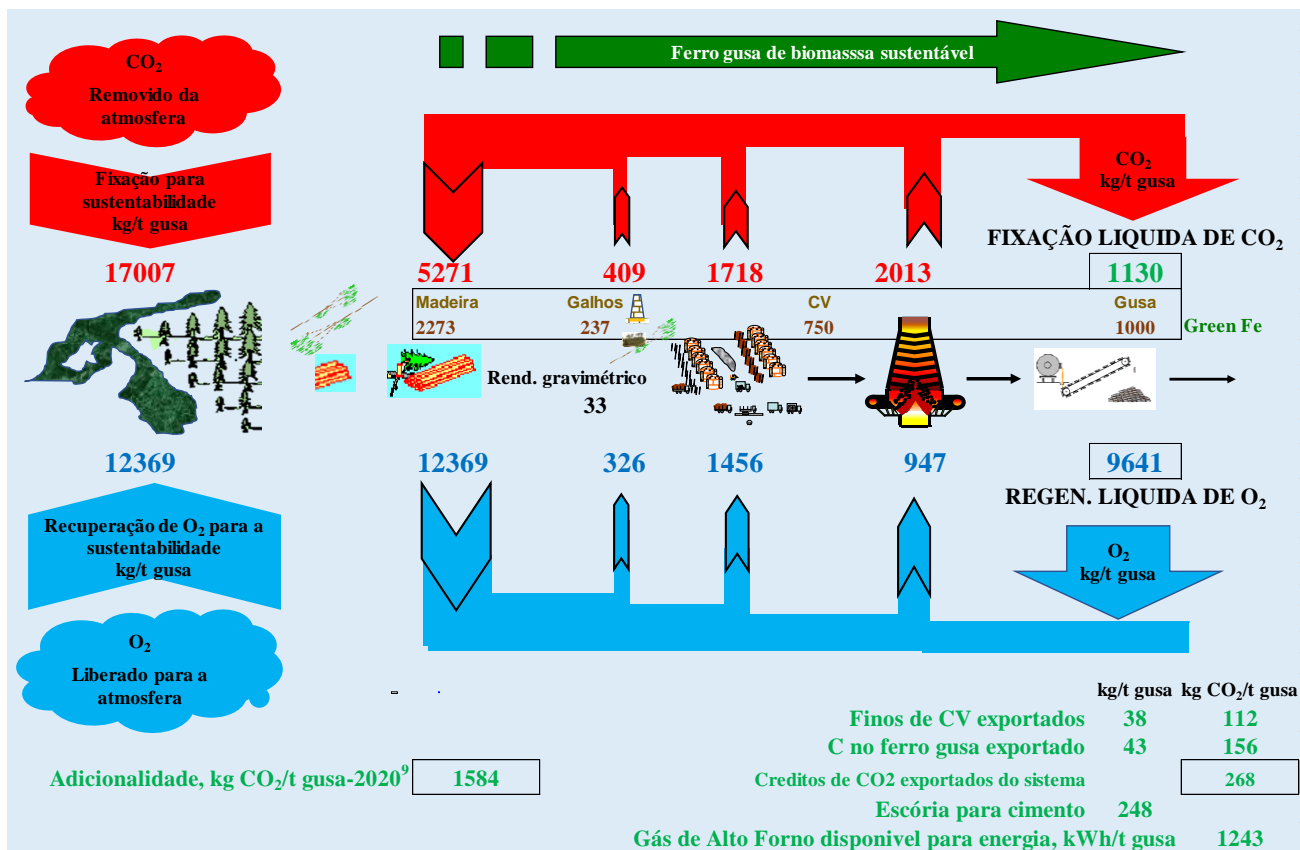


Figura 5- Ilustração do exemplo real do sistema de CCSU&O₂ (*Carbon Capture, Storage and Use & O₂ regeneration*) natural para produzir ferro primário, gusa, com emissões negativas de CO₂ e regeneração de O₂ ⁹.

A Figura 5 também apresenta o valor da adicionalidade do CO₂ para o exemplo real e mostra as quantias exportadas de energia e carbono renováveis para outros setores. Contribuindo para a redução das emissões de CO₂ na fabricação de cimento com o uso de escória e dos finos de CV, na produção de eletricidade com o uso de gás de topo do alto forno.

REGIÃO NOROESTE		
Município	Número de Usinas (*)	Capacidade Instalada (t/mês)
Sete Lagoas	21	235.000
Matozinhos	3	20.000
Curvelo	1	11.000
Pedro Leopoldo	1	6.000
Total Noroeste	26	272.000

REGIÃO OESTE		
Município	Número de Usinas (*)	Capacidade Instalada (t/mês)

Divinópolis	7	46.000
Itaúna	2	36.000
Pará de Minas	2	21.700
São Gonçalo do Pará	2	8.000
Conceição do Pará	1	6.000
Nova Serrana	1	7.000
Pitangui	1	20.000
Maravilhas	1	4.000
Itaguara	1	4.000
Itatiaiuçu	1	4.800
Bom Despacho	1	4.500
Lagoa da Prata	1	5.000
Total Oeste	21	167.000

OUTRAS		
Município	Número de Usinas (*)	Capacidade Instalada (t/mês)
Betim	1	28.000
Itabirito	1	6.000
Cons. Lafaiete (Gagé)	1	8.000
Itabira	1	6.000
Total Outros Municípios	4	48.000

TOTAL MINAS GERAIS	51	487.000 t/mês
---------------------------	-----------	----------------------

Fonte: Empresas - (*) Em operação parcial ou total em 2021

Tabela 2 . Localizações das plantas de ferro gusa independente de Minas Gerais.⁷

A Tabela 2 mostra as regiões e municípios em Minas Gerais onde os produtores independentes de ferro-gusa estão localizados bem como suas respectivas capacidades instalada. A maioria está próxima das fontes de minério. Nos últimos dez anos, a qualidade do minério granulada piorou, principalmente na redução do teor de ferro nos finos gerados. Esforços de aglomeração de finos ricos de minérios de ferro e seus rejeitos finos estão acontecendo como sinterizações pequenas e uso de aglomerados a frio na forma de briquetes e pelotas.

Conclusões.

A fotossíntese é, de longe, a maior indústria química no planeta e não é provável que haverá uma maneira mais viável para reduzir dióxido de carbono da atmosfera e liberar oxigênio. Além disso, a existência de massa vegetal arbórea - seja ela comercial ou protetiva – em qualquer região sempre trará benefícios adicionais, entre eles a redução da amplitude térmica. Esse raciocínio traz a ideia de que a arborização urbana deve ser seriamente considerada como parte significativa de um extenso

programa florestal, principalmente num país tropical como o Brasil. Além de todos os benefícios já mencionados, as árvores vão trazer um clima ameno e bem-estar às pessoas caminhando pelas ruas.

Os investimentos adicionais em terra e despesas em recuperação de solo, implantação de florestas, proteção à vegetação nativa, recuperação de bacias hidrográficas e ainda a geração de novos bons empregos são custos expressivos incluídos nessa maneira mais limpa, socialmente justa e ambientalmente correta de se produzir um metal.

E ainda, a regeneração de oxigênio promovida por essas atividades constitui uma consideração justa (matemática e termodinamicamente) desse benefício real e mensurável para ser considerada / incluída nos cálculos do CO₂ equivalente.

Os dados considerados são reais e demonstram que as emissões líquidas de processos que utilizam fotossíntese sustentável são negativas para a produção do ferro gusa em MG. Os demais valores de emissões dos Escopos 2 e 3 e aquelas do Escopo 1, aqui não considerados (eletricidade, diesel, ...), são bem menores que as mais de uma tonelada negativa do ciclo integrado floresta até o gusa.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Engenheiro Químico, M.Sc. Thiago André de Oliveira pela assistência e discussões relativas a esse trabalho.

Referências bibliográficas.

1. *Incentivos Fiscais Concedidos a Empreendimentos Florestais.*; 1966. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/15106.htm
2. Instituto Brasileiro de Economia (IBRE), Fundação Getúlio Vargas (FGV). *IBA – Annual Report. Indústria Brasileira de Árvores*; 2022. <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>
3. Pereira BLC. *Wood Quality of Eucalyptus for Charcoal Production*. Universidade Federal de Viçosa; 2012. <https://locus.ufv.br/handle/123456789/3101>
4. Instituto Estadual de Florestas - IEF. Published 2022. <http://www.ief.mg.gov.br/>
5. Sampaio RS, Assis AN, de Oliveira TA. Atmospheric Profit & Loss — Oxygen Depletion as the Remaining Piece for a Proper CO₂ Emissions Assessment. *Carbon Capture Science & Technology*. 2022;2:100032. doi:10.1016/j.ccst.2022.100032
6. Siderurgia Sustentável. Produção Sustentável de Carvão Vegetal – Sistema Fornos-Fornalha: Manual de Operação. Published online 2019.

<https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/br/c95597811905d3f965dc363cc589a9e9b3f47d50f710108f0d611de44fe2605a.pdf>

7. Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. *Statistical Yearbook*. SINDIFER; 2021. <http://sindifer.com.br/sndfr/anuario-estatistico/>
8. Sampaio RS, Resende MEA, de Freitas GD, Branco MAC, Althoff P. Pig Iron from Mannesmann Brazil – Metallic with CO₂ Fixation Credit: An Environmental Favorable Solution for the New Millenium. In: ; 1999.
9. Sampaio RS, de Oliveira TA. Decarbonization Based on Sustainable Biomass in Iron, Steel, and Ferrous Alloys Making: a Continuous Improvement of a Centenary Experience in Brazil. In: Vol Steel Decarbonization. ; 2023.
10. Norgate T, Haque N, Somerville M, Jahanshahi S. The Greenhouse Gas Footprint of Charcoal Production and of Some Applications in Steelmaking. Published online March 2011. <https://publications.csiro.au/publications>
11. Monbiot G. The Secret World Beneath Our Feet Is Mind-Blowing – and the Key to Our Planet’s Future. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/environment/2022/may/07/secret-world-beneath-our-feet-mind-blowing-key-to-planets-future>. Published May 7, 2022.