

ATENÇÃO!

Este documento destina-se estritamente aos membros do Comitê de Acompanhamento do Projeto Siderurgia Sustentável (BRA/14/G31) e de sua assessoria técnica.

A leitura, exame, retransmissão, divulgação, distribuição, cópia ou outro uso deste arquivo, ou ainda a tomada de qualquer ação baseada nas informações aqui contidas, por pessoas ou entidades que não sejam o(s) destinatário(s), constitui obtenção de dados por meio ilícito e configura ofensa ao Art.5º, inciso XII, da Constituição Federal.

Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - PNUD

Projeto BRA/14/G31 – Produção de Carvão Vegetal de Biomassa Renovável para a Indústria Siderúrgica no Brasil

Cadeias de Produção de Carvão Vegetal para o Setor Siderúrgico

Resultados do Estudo sobre Cadeias de Produção de Carvão Vegetal para o Setor Siderúrgico

DATA: 30 de junho de 2018

Túlio Jardim Raad

Engenheiro Mecânico, Dr.

Sumário

1. Introdução	5
2. Contextualização	6
2.1. Uso do carvão vegetal na siderurgia.....	6
2.2. O processo de carbonização.....	7
2.3. Produtos da carbonização	10
2.4. Produção de carvão vegetal em Minas Gerais	12
2.5. Cadeias de produção de carvão vegetal	13
2.6. Tecnologias de produção de carvão vegetal	15
3. Metodologia proposta para avaliação da eficiência das cadeias de produção de carvão vegetal.....	23
3.1. Análise técnica.....	23
3.2. Análise ambiental	24
3.3 - Análise social	25
3.4 - Análise econômica	25
4. Diagnóstico do estado da arte das cadeias produtivas e tecnologias de carbonização	29
4.1 - Análise Técnica	29
4.2 - Análise Ambiental.....	30
4.3 - Análise social	30
4.4 - Análise Econômica	31

5. Propostas para a melhoria e o desempenho da produção de carvão vegetal renovável para o setor de ferro-gusa, aço e ferroligas no Brasil com especial foco no estado de Minas Gerais	37
6. Conclusão	40
7 - Referências bibliográficas	41

Resultados do Estudo sobre Cadeias de Produção de Carvão Vegetal para o Setor Siderúrgico

1. Introdução

O Projeto Produção Sustentável de carvão vegetal à base de biomassa renovável para a indústria siderúrgica no Brasil (Projeto Siderurgia Sustentável) é uma iniciativa que busca incentivar o desenvolvimento de uma cadeia de produção siderúrgica sustentável e de baixa emissão de gases de efeito estufa (GEE), implementado pelo Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA).

Participam do projeto :

- Ministério do Meio Ambiente (MMA).
- Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC).
- Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC).
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)
- Governo de Minas Gerais.

Um dos resultados esperados do Projeto Siderurgia Sustentável é a elaboração de uma estratégia para promover o uso do carvão vegetal sustentável na produção de ferro-gusa, ferroligas e aço.

Para que a referida estratégia fosse elaborada, o Projeto Siderurgia Sustentável contratou consultorias, a fim de desenvolverem uma série de estudos objetivando atualizar as informações sobre a temática do uso do carvão vegetal no setor siderúrgico, com especial foco em Minas Gerais.

Um dos estudos produzidos para o Projeto Siderurgia intitulou-se Cadeias de Produção de Carvão Vegetal para o Setor Siderúrgico. Esse estudo foi desenvolvido entre outubro de 2016 a junho de 2018, pelo presente autor, resultando em quatro produtos:

1. Avaliação de metodologias relevantes para análise e quantificação da eficiência das cadeias de produção de carvão vegetal para o setor de ferro-gusa, ferroligas e aço.
2. Análise do estado da arte das cadeias de produção de carvão vegetal para o setor de ferro-gusa, ferroligas e aço.
3. Análise comparativa do estado da arte das tecnologias para produção de carvão vegetal para o setor de ferro-gusa, ferroligas e aço.
4. Proposta para melhoria da sustentabilidade e do desempenho da produção de carvão vegetal para o setor de ferro-gusa, ferroligas e aço.

A presente publicação, denominada Resultados do Estudo Cadeias de Produção de Carvão Vegetal para o Setor Siderúrgico, sumariza as conclusões obtidas nos quatro produtos¹ referenciados acima e foi dividida nas seguintes seções:

1. Contextualização, na qual são feitas breves considerações sobre o uso do carvão vegetal na siderurgia e o processo de carbonização, detalhadas as tecnologias de produção de carvão vegetal e sumarizadas observações sobre os produtos da carbonização e a produção de carvão vegetal em Minas Gerais; finalmente, também é descrito de forma sintética as cadeias de produção de carvão vegetal.
2. Metodologia de análise para avaliação da eficiência das cadeias de produção de carvão vegetal registrando a proposição, por parte do autor, das metodologias selecionadas para análise e quantificação da eficiência das cadeias de produção de carvão vegetal para o setor de ferro-gusa, ferroligas e aço. No caso, as cadeias de produção de carvão vegetal foram avaliadas tendo como referencial a tecnologia de carbonização utilizada por cada uma delas e abrangeu quatro níveis de análise: técnico, ambiental, social e econômico.
3. Diagnóstico do estado da arte das cadeias produtivas e tecnologias de carbonização, elaborado a partir das conclusões obtidas nas análises específicas das cadeias de produção de carvão vegetal para o setor de ferro-gusa, ferroligas e aço. As análises foram desenvolvidas tendo em vista a metodologia proposta para avaliação da eficiência das cadeias da produção de carvão vegetal.
4. Propostas para melhoria do desempenho da produção de carvão vegetal renovável para o setor de ferro-gusa, ferroligas e aço no Brasil, com especial foco em Minas Gerais, na qual são sugeridas melhorias para que as tecnologias alcancem maior sustentabilidade ambiental, social e econômica, partindo das avaliações obtidas no diagnóstico do estado da arte das cadeias produtivas e tecnologias de carbonização.
5. Conclusão, na qual o autor faz considerações pontuais sobre a temática do uso do carvão vegetal no setor siderúrgico, com especial foco em Minas Gerais.

2. Contextualização

2.1. Uso do carvão vegetal na siderurgia

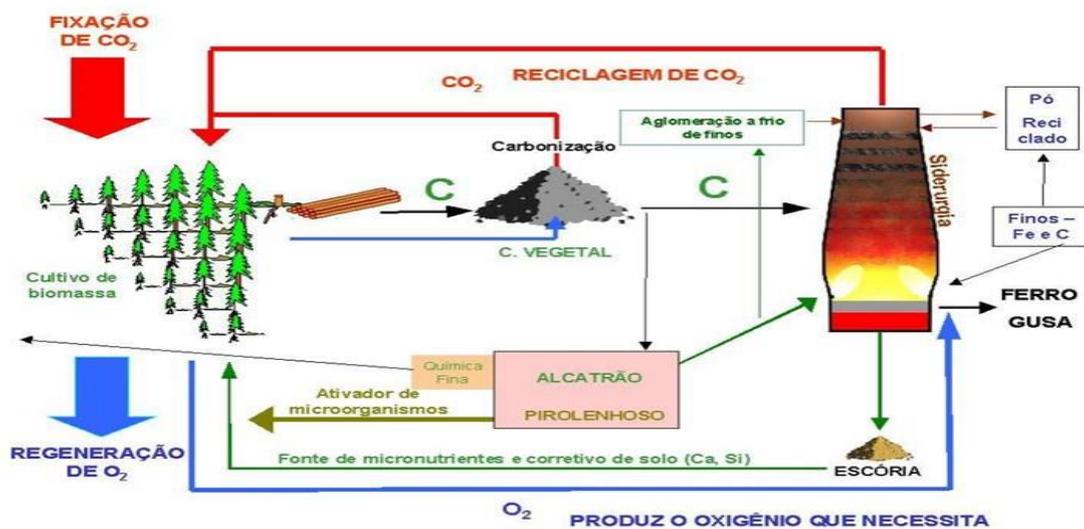
¹ Todos os quatro Produtos dessa consultoria estão disponíveis para acesso no seguinte link: <https://drive.google.com/open?id=1NVVVxZ7L3QIXVhH2FEZjmLJqE3Hfq2xk>

O setor siderúrgico produz ferro-gusa, ferroligas e aço através de uma reação química de termorredução do minério de ferro.

Dois insumos podem ser utilizados como termorreduzidor do minério de ferro para produção de ferro-gusa: o coque obtido a partir do carvão mineral e o carvão vegetal produzido a partir de biomassa (madeira).

A utilização do carvão vegetal possui a vantagem de autodepuração, por estar dentro da era atual do planeta Terra. A madeira provém de uma matéria viva, os reflorestamentos, e os coprodutos da carbonização a carvão vegetal (ácido pirolenhoso e alcatrão vegetal) podem ser reaproveitados, inclusive para serem usados como substitutos de combustíveis emissores de gases de efeito estufa (SAMPAIO e LOPES, 2001).

Figura 1 – Processo de reciclagem do CO₂ na produção de ferro-gusa a carvão vegetal.



Fonte: Sampaio e Lopes, 2001.

2.2. O processo de carbonização

A carbonização consiste em aquecer a madeira, em um ambiente fechado, ou seja, na ausência de oxigênio, até a decomposição térmica de seus componentes: hemicelulose, celulose e lignina².

² Hemicelulose é literalmente "meia celulose", são polissacarídeos. Junto com celulose, a pectina e as glicoproteínas, formam a Parede celular das células vegetais. A celulose é um polímero de cadeia longa composto de um só monômero (glicose), classificado como polissacarídeo ou carboidrato. É um dos principais constituintes das paredes celulares das plantas (cerca de 33% da massa da planta), em combinação com a lignina, com hemicelulose e pectina e não é digerível pelo homem, constituindo uma fibra dietética. Lignina é um polímero orgânico complexo que une as fibras celulósicas, aumentando a rigidez da parede celular vegetal, constituindo, juntamente com a celulose, a maior parte da madeira das árvores e arbustos; lenhina, lenhose. Informação disponível em <<https://pt.wikipedia.org>>.

O objetivo da carbonização é concentrar carbono (C), principal elemento químico utilizado na reação de termorredução do minério de ferro para produção de ferro-gusa.

Por causa disso, o principal indicador de qualidade do carvão vegetal para o setor siderúrgico é o Teor de Carbono Fixo (Densidade, Umidade, Geração de Finos e Cinzas também são indicadores de qualidade do carvão vegetal).

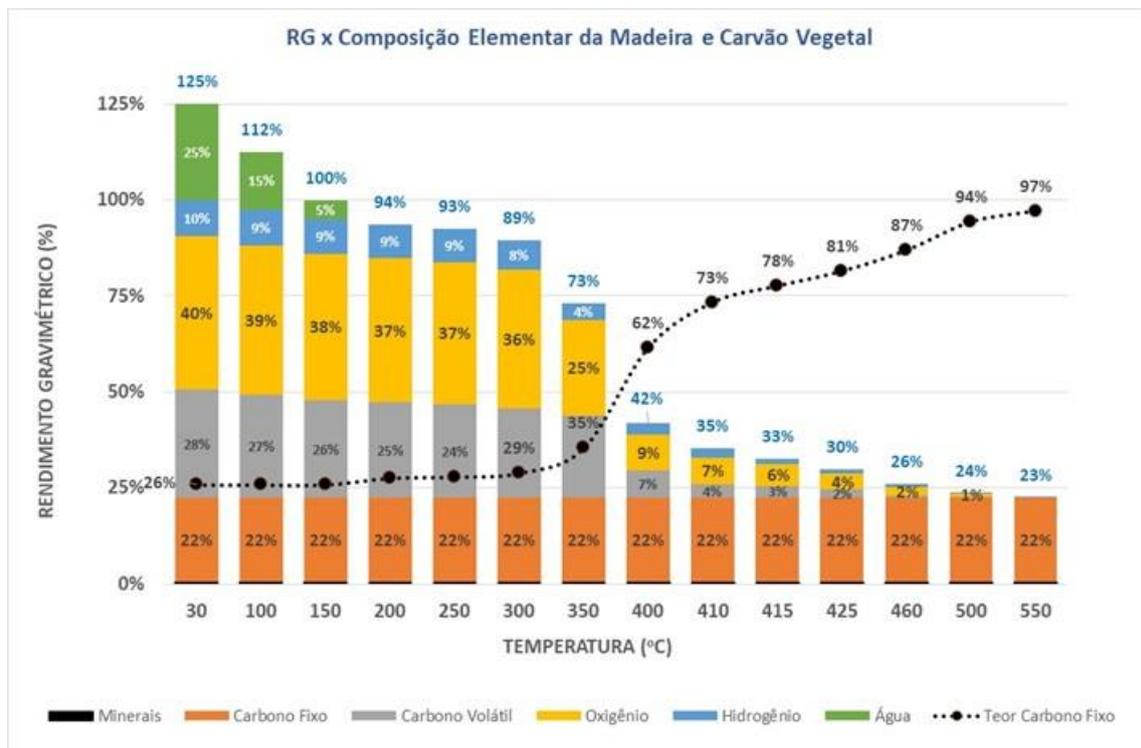
O ambiente fechado onde ocorre a carbonização é denominado forno, ou reator, o qual é o principal componente de uma tecnologia de carbonização.

Por sua vez, o principal indicador de eficiência de um forno de carbonização é o Rendimento Gravimétrico (RG), ou seja, o índice de conversão madeira/carvão.

2.2.1. Relação do indicador de eficiência Rendimento Gravimétrico (RG) com o indicador de qualidade do carvão vegetal, Teor de Carbono Fixo

A Figura 2 apresenta um gráfico esquemático com os dados de decomposição da madeira (RAAD, 2004).

Figura 2 – Composição química elementar da madeira/carvão vegetal em diferentes estágios da carbonização (temperaturas de processo), RG do processo e o carbono fixo correspondente.



Fonte: Raad, 2004.

No processo de carbonização, a massa de carbono elementar presente inicialmente na madeira situa-se em torno de 50%. No gráfico da Figura 2, essa massa é dividida de duas formas:

- Durante o processo de carbonização, parte dessa massa de carbono elementar sairá na forma de dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO) e metano (CH₄) e outros hidrocarbonetos (como o alcatrão vegetal). O carbono presente nesses compostos foi separado e nomeado pelo autor como Carbono Volátil (barra cinza) e valorizado inicialmente em 28%.
- Parte da massa do carbono elementar permanecerá constante no resíduo sólido (carvão vegetal) independente da temperatura de carbonização (em regimes sob pressão atmosférica), o chamado Carbono Fixo (barra laranja).

Cabe observar que outros elementos como o oxigênio (O) e o hidrogênio (H) são praticamente voláteis e saem junto com o Carbono Volátil, à medida que a temperatura de processo se eleva. Assim, o percentual de resíduo sólido é o Rendimento Gravimétrico (RG) .

A curva de teor percentual de carbono fixo (Figura 2) foi obtida pela divisão entre a massa de carbono residual constante (barra laranja) e o total de massa do resíduo sólido, carvão vegetal (soma das barras de hidrogênio (H), oxigênio (O), carbono volátil e minerais), nas diferentes temperaturas de processo.

Geralmente, o processo de concentração de carbono fixo durante a carbonização é o mesmo nas tecnologias de fornos de alvenaria, diferindo nos fornos metálicos que utilizam gases queimados e injetados no interior dos fornos para suprir a energia necessária ao invés da queima parcial da madeira enforada (CGEE, 2015).

O que difere as tecnologias entre si, do ponto de vista técnico, são a geometria, dimensão, produtividade e capacidade de controlar as temperaturas do processo, visando o maior RG possível, respeitando a qualidade exigida pelo consumidor final (siderúrgicas) quanto ao Teor de Carbono Fixo.

Pesquisa de campo feita pela presente consultoria, em diversas empresas do setor de produção de ferro-gusa independente de Minas Gerais, sobre a qualidade química desejada do carvão vegetal apresentou o seguinte resultado:

- mais de 90% das empresas consultadas deseja carbono fixo entre 70 e 78%, porém recebem, quase que na sua totalidade, valores entre 78 e 88%.

Existe uma explicação científica para o que ocorre atualmente na produção de carvão vegetal do setor, que corrobora o resultado desta pesquisa:

- Conforme levantamentos estatísticos feitos em estudo conduzido pelo CGEE (2015), a linha de base estimada para o RG médio nacional ficou em torno de 26%.
- Com RG em torno de 26%, a taxa de decomposição da madeira é bem reduzida e tendendo a valores próximos de zero, Figura 2.

- O principal indicador dos carbonizadores que operam visualmente os fornos de alvenaria é a fumaça que sai. Nesse exato momento, de baixa vazão de gases, eles encerram o processo. Por causa disso, obtêm baixos rendimentos e altos teores de carbono fixo.
- Em fornos equipados com controle de temperatura, é possível encerrar o processo em períodos de maiores rendimentos e conseqüentemente com menores teores de carbono fixo.

Essas afirmações foram confirmadas, pela presente consultoria, em pesquisa de campo realizada em produtores independentes de ferro-gusa e ferroligas (Minasligas e Metalsider) e produtores de carvão vegetal (Biocarbono), que utilizam sistemas de controle da carbonização.

2.3. Produtos da carbonização

Como resultado da decomposição da madeira, no forno de carbonização, surgem produtos gasosos e sólido.

Os produtos gasosos resultantes da carbonização da madeira são divididos em condensáveis e não condensáveis.

Os gases condensáveis são o alcatrão vegetal e o ácido pirolenhoso, os quais podem ser reaproveitados para produção dos chamados coprodutos da carbonização.

Os gases não condensáveis são o metano (CH_4), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), além de nitrogênio (N) (LOPES, 2010).

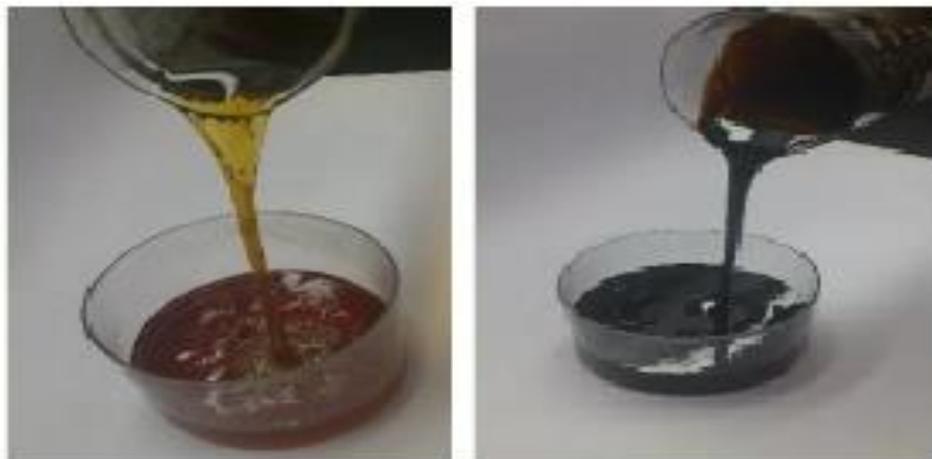
O produto sólido resultante do processo de carbonização de biomassa é o carvão vegetal (LOPES, 2010).

Figura 3 – Processo de carbonização da madeira.



Fonte: Acervo do autor.

Figura 4 – Produtos obtidos da condensação das fumaças da carbonização: líquido pirolenhoso e alcatrão vegetal.



Fonte: Acervo do autor.

A mais conhecida e abundante madeira para produção de carvão vegetal, no Brasil, especialmente em Minas Gerais, é originária de florestas plantadas de eucalipto. (IBGE, 2015).

Figura 5 – Maciço florestal de eucalipto.

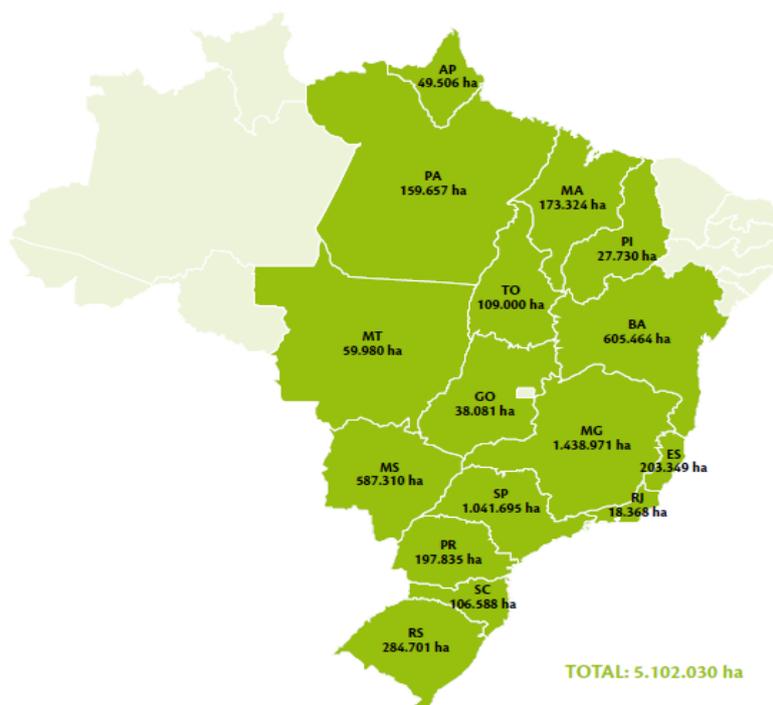


Fonte: Acervo do autor.

2.4. Produção de carvão vegetal em Minas Gerais

O Brasil possui cerca de 5,1 milhões de hectares (ha) de áreas plantadas de eucalipto, sendo que 1,3 milhões de hectares estão localizados em Minas Gerais (ABRAF, 2013 e SINDIFER, 2016), qualificando o estado como o maior do produtor nacional, o que justifica o foco do Projeto Siderurgia Sustentável.

Figura 6 – Área de florestas plantadas no Brasil (*Eucaliptus* e *Pinus*).



Fonte: ABRAF, 2013.

Em termos de áreas plantadas em Minas Gerais, cerca de metade é destinada ao setor siderúrgico para produção de carvão vegetal, sendo que os subsetores produtores de aço e ferro-gusa são os maiores consumidores de madeira de eucalipto (SINDIFER, 2016).

Tabela 1 – Florestas Plantadas em Minas Gerais por cadeia produtiva.

Siderurgia			Produtos Florestais			Produção Independente		
Ferro-gusa	Aço Integradas	Ferroligas	Madeira Tratada	Celulose	Painéis de Madeiras	Uso para Energia	Investidores TIMO ^(*)	Outros ^(**)
319.166	359.235	99.219	13.190	147.891	68.000	24.150	185.362	145.946
777.620			229.081			355.458		
1.362.159 há								

Fonte: SINDIFER, 2016.

(*) TIMO – *Timberland Investment Management Organization* (Fundos estrangeiros em florestas plantadas no Brasil).

(**) Pequenos e médios investidores, pessoas físicas e jurídicas, produtores rurais, fomento do Instituto Estadual de Florestas – IEF.

As florestas plantadas e as produções de carvão vegetal são encontradas em diversos municípios mineiros. As maiores produções concentram-se nas cidades de Itamarandiba, João Pinheiro, Três Marias e Curvelo (IBGE, 2015).

Tabela 2 – Produção de carvão vegetal (toneladas/ano) por município e unidade da federação.

PROCEDÊNCIA DA BIOMASSA	MUNICÍPIOS PRODUTORES	UNIDADES DA FEDERAÇÃO				%
		MG	MA	MS	Outros	
CARVÃO VEGETAL DE FLORESTAS PLANTADAS (t/ano)	Municípios Diversos	1079308				24,1%
	Itamarandiba	928478				20,7%
	João Pinheiro	354906				7,9%
	Três Marias	272614				6,1%
	Curvelo	195944				4,4%
	Itacambira	150500				3,4%
	Buritizeiro	133212				3,0%
	Carbonita	129984				2,9%
	Lassance	126253				2,8%
	Olhos d'Água	111990				2,5%
	São João do Paraíso	83125				1,9%
	Lagoa Grande	82456				1,8%
	Grão Mogol	82232				1,8%
	Bocaiúva	80990				1,8%
	Felixlândia	75199				1,7%
	Taiobeiras	68084				1,5%
	Sen. Modestino G.	64500				1,4%
	Turmalina	61017				1,4%
	Bom Jardim		173477			3,9%
	Açailândia		161728			3,6%
Ribas do Rio Pardo			62500		1,4%	
Total da Produção (t/ano)	4080792	335205	62500		100,0%	
CARVÃO VEGETAL DE FLORESTAS NATIVAS	Região Norte/Nordeste				1393756	98,6%
	Região Central/Sudeste				20506	1,4%
	Total da Produção (t/ano)				1414262	100,0%

Fonte: IBGE, 2015.

2.5. Cadeias de produção de carvão vegetal

Cadeia produtiva pode ser conceituada como sendo o conjunto de etapas consecutivas pelas quais passam e vão sendo transformados e transferidos os diversos insumos (PROCHNICK, 2002).

Em Minas Gerais, a transformação da biomassa em carvão vegetal é feita por:

- Produtores independentes de carvão vegetal.
- Produtores independentes de ferro-gusa.
- Produtores de ferroligas.
- Produtores de aço.

Os produtores independentes de carvão vegetal são empreendedores que possuem ou não florestas próprias e empresas associadas a grupos que investem na atividade florestal. Fornecem carvão vegetal principalmente para os produtores independentes de ferro-gusa, embora também possam complementar a demanda dos produtores de aço e ferroligas.

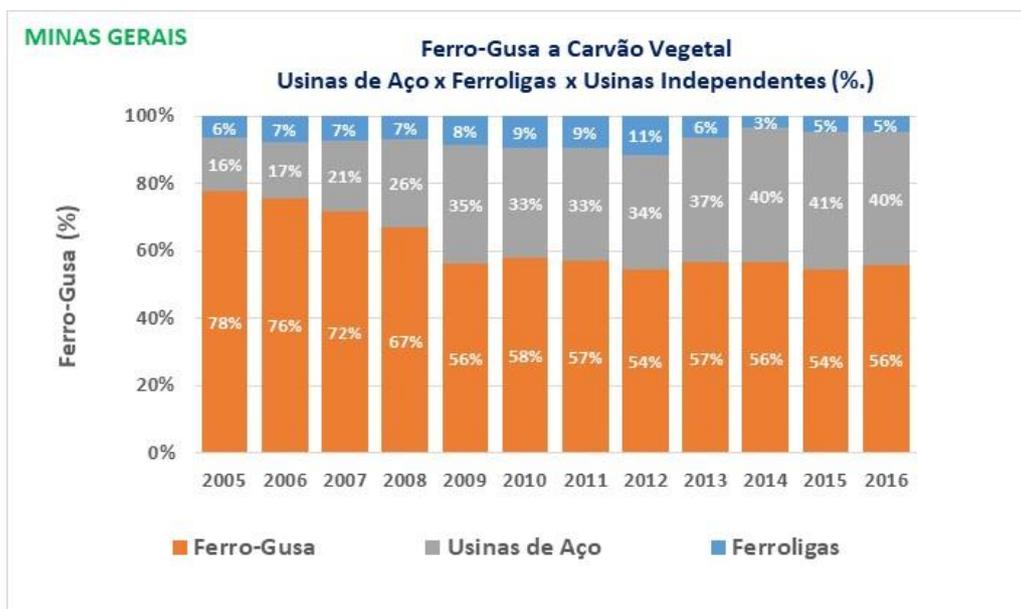
Cabe ressaltar que a maior parte da produção de carvão vegetal, em Minas Gerais, é feita por pequenos produtores independentes, ou seja, aqueles que operam plantas com capacidade de produção menor que 75.000 metros cúbicos de carvão vegetal/ano, o equivalente a 15.000 toneladas/ano (CGEE, 2015).

Os produtores independentes de ferro-gusa operam apenas a fase de termorredução do minério de ferro e vendem o ferro-gusa para os produtores de aço. Na maioria dos casos, adquirem o carvão vegetal, com o qual produzem o ferro-gusa, dos produtores independentes, cerca de 55% do insumo produzido em Minas Gerais, Figura 7.

Os produtores de ferroligas também utilizam o carvão vegetal para reduzir o minério de ferro. Na sequência, a partir do ferro-gusa e outros insumos, produzem as ligas de ferro (FEAM, 2010). Salvo exceções, produzem o carvão vegetal que utilizam, atualmente, o equivalente a 5% da produção do estado, Figura 7.

Os produtores de aço operam as usinas integradas, assim denominadas porque realizam as três fases do processo siderúrgico: redução, refino e laminação. São autossuficientes em termos de produção de carvão vegetal, em geral. Consomem 40% da produção de carvão vegetal em Minas Gerais, Figura 7.

Figura 7 – Distribuição percentual dos produtores de ferro gusa a carvão vegetal.



2.6. Tecnologias de produção de carvão vegetal

As tecnologias de produção de carvão vegetal utilizadas pelo setor siderúrgico em Minas Gerais podem ser agrupadas segundo o material com as quais são construídas:

- Alvenaria.
- Metálicas.
- Híbrida (alvenaria e metal).

Tecnologias de alvenaria

- Fornos de alvenaria do tipo circular sem mecanização (“rabo-quente”).
- Fornos de alvenaria circulares com descarga mecanizada.
- Fornos de alvenaria retangulares de pequeno, médio e grande porte.

Tecnologias metálicas

- Carboval.
- Forno Container Rima (FCR).
- *Drying Pyrolysis Cooling* (DPC).
- Ondatec.

Tecnologia híbrida

- Sistema Veredas de produção de carvão vegetal e bio-óleo (Veredas).

As tecnologias de produção de carvão vegetal podem vir equipadas de fábrica ou serem incrementadas com periféricos que objetivam a melhoria de desempenho e aquisição de funcionalidades, como aumento do rendimento gravimétrico, recuperação de gases condensáveis para produção de coprodutos ou queima dos gases.

2.6.1. Tecnologias de alvenaria

As tecnologias de alvenaria são representadas pelos fornos de alvenaria dos tipos circulares, sem ou com descarga e mecanização parcial, e pelos fornos de alvenaria do tipo retangular de pequeno, médio e grande portes.

Os fornos de alvenaria do tipo circular sem mecanização (“rabo-quente”) utilizam intensa mão de obra para carregamento da madeira e descarga do carvão vegetal, sendo os mais utilizados no Brasil. Estima-se que cerca de 50% da produção de carvão vegetal utiliza esse modelo (CGEE, 2015).

Figura 8 – Fornos tipo “Rabo quente”



Fonte: AMS, 2017.

Os fornos de alvenaria circulares com mecanização parcial são uma versão maior do tipo “rabo-quente”. A carga da madeira é manual, a descarga do carvão vegetal é mecanizada e feita através de pás carregadeiras.

Os fornos de alvenaria circulares, sem mecanização ou com mecanização parcial, constituem as tecnologias dominantes na produção de carvão vegetal em Minas Gerais e estão presentes em todas as cadeias produtivas. Esse tipo de forno predomina entre os produtores independentes de carvão vegetal.

A condução dos fornos de alvenaria circulares é feita de forma empírica pelo carbonizador, que se baseia na vazão e na cor da fumaça que sai do forno. A condução trata-se de fechar ou manter abertos os orifícios e a chaminé do forno, de modo a impedir ou permitir a entrada de oxigênio.

Figura 9 – Fornos de alvenaria circulares com mecanização parcial.



Fonte: AMS, 2017.

Os fornos de alvenaria retangulares de pequeno, médio e grande porte são totalmente mecanizados e com maior capacidade de processamento de madeira do que os fornos de alvenaria circulares. A condução dos fornos de alvenaria retangulares, quando esses não são equipados com controle de temperatura do processo de carbonização, também é feita de forma empírica pelo carbonizador.

Figura 10 – Fornos de alvenaria retangulares.



Fonte: AMS, 2017.

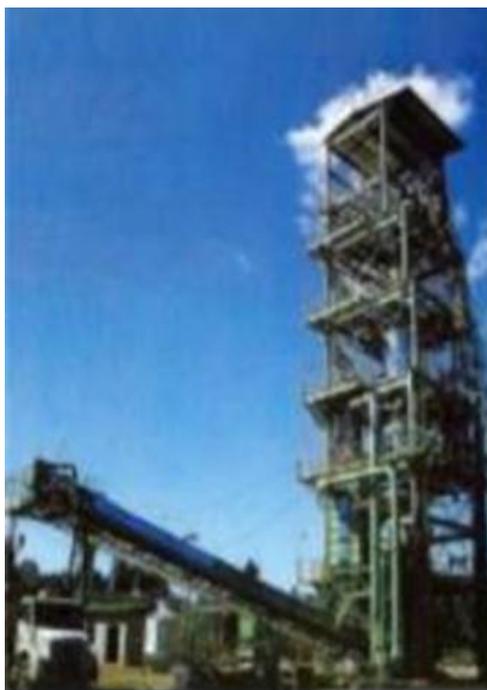
2.6.2. Tecnologias metálicas

Carboval

A Carboval é uma tecnologia totalmente metálica, considerada uma das mais modernas na produção de carvão vegetal. Utiliza a fumaça do processo, em um queimador, para suprir a energia necessária para secagem e carbonização da madeira, em um ciclo contínuo.

O carregamento da madeira e o descarregamento do carvão vegetal produzido são mecanizados.

Figura 11 – Carboval.



Fonte: AMS, 2017.

A tecnologia Carboval vem equipada de fábrica com sistema periférico para controle da temperatura do processo de carbonização e queimador de gases. A ênfase da tecnologia é o máximo de rendimento gravimétrico possível, associado a queima dos gases para aproveitamento térmico na secagem da madeira e na produção de energia elétrica.

Tecnologia RIMA

O forno *container* Rima (FCR) é equipada com sistema de sucção forçada dos gases resultantes do processo de carbonização. Parte dos gases é utilizado na condução do processo de carbonização e o restante é queimado, podendo ser usado para fins de produção de energia elétrica.

Figura 12 – FCR.





Fonte: Acervo do Autor.

O carregamento da madeira e o descarregamento do carvão vegetal produzido são mecanizados.

A tecnologia FCR é equipada de fábrica com sistema periférico para controle da temperatura do processo de carbonização e queimador de gases. A ênfase da tecnologia é o máximo de rendimento gravimétrico possível, associado a queima dos gases para aproveitamento térmico na secagem da madeira e na produção de energia elétrica.

As tecnologias Carboval e FCR são utilizadas por um produtor de aço e um produtor de ferroligas, respectivamente.

Tecnologia DPC

O processo DPC (*Drying, pyrolysis, cooling*) é equipado com sistema de válvulas para condução do fluxo de gases resultantes do processo de carbonização.

Figura 13 – Tecnologia DPC



Fonte: Acervo do Autor

O carregamento da madeira e o descarregamento do carvão vegetal produzido são mecanizados.

A tecnologia DPC é equipada de fábrica com sistema periférico para controle da temperatura do processo de carbonização e queimador de gases. A ênfase da tecnologia é o rendimento gravimétrico.

Tecnologia ONDATEC

O processo Ondatec utiliza micro-ondas como fonte de energia para o processo de carbonização.

Figura 14 – Tencnologia Ondatec



Fonte: Acervo do Autor.

O processo de produção é contínuo e a descarga do carvão é feita em containers metálicos que poderão ser transportados diretamente para o consumidor final ou serem transferidos, via transbordo, para as carretas convencionais.

A tecnologia Ondatec é equipada de fábrica com sistema periférico para controle da temperatura do processo de carbonização e queimador de gases. A ênfase da tecnologia é o rendimento gravimétrico.

Os fornos DPC e Ondatec não estão operando, atualmente, na cadeia de produção de carvão vegetal para uso siderúrgico, em Minas Gerais.

2.6.3. Tecnologia híbrida

Tecnologia SISTEMA VEREDAS

Os fornos do Sistema Veredas de produção de carvão vegetal e bio-óleo apresentam paredes de alvenaria e teto metálico removível e são interligados entre si, de modo a permitir a transferência de gases, que queimam parcialmente contribuindo para melhor eficiência da secagem e carbonização da madeira.

Figura 15 – Veredas.



Fonte: Acervo do Autor.

O carregamento da madeira e o descarregamento do carvão vegetal produzido são mecanizados.

A tecnologia Veredas é equipada de fábrica com sistema periférico para controle da temperatura do processo de carbonização e para condensação dos gases. A ênfase da tecnologia é o rendimento gravimétrico associado a condensação dos gases para produção de coprodutos da carbonização, como o bio-óleo.

É a mais recente das tecnologias de produção de carvão vegetal, está atuando junto aos produtores independentes de carvão vegetal e produtores independentes de ferro-gusa.

3. Metodologia proposta para avaliação da eficiência das cadeias de produção de carvão vegetal

Conforme registrado na introdução da presente publicação, a primeira fase do estudo “Cadeias de Produção de Carvão Vegetal para o Setor Siderúrgico” constou da proposição, por parte do autor, de metodologias relevantes para análise e quantificação da eficiência das cadeias de produção de carvão vegetal para o setor de ferro-gusa, ferroligas e aço.

O autor propôs que a análise e quantificação da eficiência das cadeias de produção de carvão vegetal incidisse sobre a tecnologia de carbonização utilizada por cada uma delas, abrangendo quatro níveis: técnico, ambiental, econômico e social, conforme será detalhado abaixo.

3.1. Análise técnica

Em termos técnicos, avaliou-se a quantidade e a qualidade do carvão vegetal produzido, em termos de Rendimento Gravimétrico (RG) e Teor de Carbono Fixo.

3.1.1. Rendimento Gravimétrico

O Rendimento Gravimétrico (RG) do processo de carbonização é a massa de carvão produzido durante a carbonização dividida pela massa de madeira usada na produção de carvão, ambas na base seca, ou seja, “sem umidade” (UNFCCC, 2012).

O RG é o índice técnico mais importante no processo de carbonização (CGEE, 2008). O seu aumento impacta positivamente a sustentabilidade financeira (CGEE, 2015) e ambiental da tecnologia de produção de carvão vegetal, contribuindo para a redução de emissões de gás metano (CH₄) (UNFCCC, 2012).

Valor de referência: quanto maior o Rendimento Gravimétrico, melhor; sendo que a faixa a ser alcançada situa-se entre 30% a 40%. Para quaisquer valores, dentro da faixa, a referência do Teor de Carbono fixo deve ser entre 70% a 80%.

3.1.2. Teor de carbono fixo

O carbono fixo presente no carvão vegetal é responsável pela eficiência do processo de redução do minério de ferro no alto-forno. Quanto maior o teor de carbono fixo, menor o consumo de carvão vegetal (BRITO, 1993; SANTOS, 2008 ; SANTOS *et al.*, 2012; SEYE, 1998).

O teor de carbono fixo é limitado pela resistência mecânica do carvão vegetal. Teores entre 80% e 85% resultam em menor resistência mecânica. Por isso, o teor de carbono fixo ideal é entre 70% a 80%.

Valor de referência: entre 70% a 80%.

3.2. Análise ambiental

Em termos ambientais, avaliou-se as capacidades de redução de emissão de gás metano (CH₄) e de recuperação de coprodutos, apresentadas pelas tecnologias de carbonização.

3.2.1. Capacidade de redução de emissão de gás metano (CH₄)

A carbonização produz carvão vegetal e fumaças, compostas por gases condensáveis e não condensáveis. Os gases não condensáveis são o metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), gases de efeito estufa, e o monóxido de carbono (CO).

Valor de referência: quanto maior o Rendimento Gravimétrico, menor a emissão de gás metano.

3.2.2. Capacidade de recuperação de coprodutos

Os gases condensáveis gerados no processo de carbonização, quando recuperados, resultam no líquido pirolenhoso e no alcatrão vegetal (LOPES, 2010), os quais podem ser processados e transformados em bio-óleo, combustível substituto de óleos de origem fóssil e emissores de gases de efeito estufa.

A viabilidade financeira de algumas tecnologias depende da capacidade de recuperação de coprodutos (CGEE, 2015), associada ao potencial de mercado dos produtos gerados.

A maioria das plantas de carbonização que utiliza fornos de alvenaria, em Minas Gerais, não apresenta *lay-out* que possibilite a efetiva canalização dos gases condensáveis e o posicionamento central do condensador.

O *lay-out* paralelo das plantas de carbonização é uma barreira para a condensação, devido à distância a ser percorrida pelos gases, entre a saída dos fornos e a entrada no condensador. Os gases ricos em ácido pirolenhoso e alcatrão vegetal não chegam ao destino, o que resulta em um líquido pirolenhoso de baixo poder calorífico, que não tem qualidade como matéria-prima para produção de bio-óleo capaz de substituir o óleo de origem fóssil.

Em termos de desenvolvimento de mercado, o bio-óleo ainda não é um produto conhecido como substituto do óleo fóssil.

Ademais, para que o líquido pirolenhoso se transforme em bio-óleo é necessário esforços do produtor de carvão vegetal no desenvolvimento de um produto de qualidade e do mercado. No entanto, ainda não existem padrões de qualidade para normatizar a produção e comercialização do bio-óleo, em larga escala.

Valor de Referência: não há. Depende da eficiência de recuperação da tecnologia adotada, padrões de qualidade da produção e desenvolvimento de mercado para o produto.

3.3 - Análise social

Em termos sociais, avaliou-se o impacto da tecnologia de carbonização sobre a inclusão social e a geração de renda das pessoas envolvidas, além das possibilidades oferecidas quanto à redução da desigualdade de gênero.

O estado da arte dos fornos de alvenaria circulares sem mecanização sinaliza inclusão, no que se refere a oportunidades de emprego para trabalhadores rurais, homens e sem educação formal, inclusive não alfabetizados (Dias *et al.* 2012).

Cabe acrescentar que os trabalhadores com algum grau de educação formal, ainda que apenas de nível fundamental, salvo exceções, não se interessam pelo trabalho de forneiro. O desinteresse tem causado, inclusive, restrição de mão de obra para ocupar a função, principalmente em Minas Gerais.

Também não há inserção de gênero. Muito ocorre devido ao fato de que as funções são consideradas mais sensíveis às mulheres do que aos homens, como o fato de cobrir o corpo com pó quando executada a descarga do carvão vegetal, ao trabalho braçal e o contato com altas temperaturas.

Do mesmo modo, no setor siderúrgico as mulheres ocupam apenas 7% da força de trabalho. A justificativa também é relacionada ao fato de que as funções industriais exigem, em sua maioria, esforço físico e apresentam periculosidade, situações mais sensíveis ao gênero feminino.

No pagamento aos forneiros prevalece o pagamento do salário mínimo mais produção. A remuneração recebida pelos carbonizadores é, em média, de um salário mínimo e meio mais produção. Os dados foram levantados por meio de pesquisa junto ao setor.

3.4 - Análise econômica

Em termos econômicos, utilizou-se o Método do Fluxo de Caixa Descontado (FCD) para avaliar as tecnologias de produção de carvão vegetal.

O FCD é a diferença entre o volume de recursos que entrou no caixa e o volume de recursos que saiu, isto é, igual aos lucros operacionais após impostos, mais encargo não caixa, menos investimentos em capital de giro operacional, instalações, equipamentos e outros ativos (FELIPETTO, 2007).

Abaixo, é demonstrada tabela a ser usada para a avaliação da viabilidade econômica das tecnologias de carbonização.

Tabela 3 – Esquema da metodologia FCD

FLUXO DE CAIXA PROJETADO
Total de Produção Anual de Carvão Vegetal da Tecnologia de Carbonização
Preço do Carvão Vegetal (R\$/t.cv)
Receita Bruta (R\$/ano)
(-) Impostos sobre a Receita (R\$/ano)
Receita Líquida (R\$/ano)
(-) Custo da Matéria-prima Carbonizada
Custos Operacionais (R\$/ano)
(-) Operação e Manutenção da Tecnologia
(-) Custos Administrativos (Overhead)
(-) Outros Custos
Total de Custos Operacionais (OPEX) – (R\$/ano)
Margem Bruta - (R\$/ano)
(-) Investimento na Implantação do Projeto – (CAPEX)
Fluxo de Caixa Livre – FCL (R\$/ano)

3.3.1. Indicadores econômicos:

- Taxa mínima de atratividade (TMA): maior que a TIR.
- Valor presente líquido (VPL): tender a 0 para obtenção da TMA.
- Taxa interna de retorno (TIR): 7.5 % ao ano.
- Tempo de retorno de investimento (*Payback*): quanto menor, melhor.

Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

Define a base de referência para avaliar a atratividade do projeto.

- Valor de referência: A TMA para análise econômica das tecnologias foi adotada como sendo 7,5%. O valor corresponde à taxa máxima de juros cobrada pelo Programa Fundo Clima, dentro do subprograma Carvão Vegetal.

Valor Presente Líquido (VPL)

É igual ao valor presente do fluxo de caixa líquido [- FCL] do projeto em análise, descontado pelo custo médio ponderado de capital (Portal de Contabilidade, 2017).

Taxa Interna de Retorno (TIR)

É a taxa 'i' que se iguala as entradas e saídas periódicas de caixa ao valor a ser investido em um projeto. Em outras palavras, é a taxa que iguala o VPL de um projeto a zero (Portal de Contabilidade, 2017).

O valor da **TIR** obtida foi comparado à **TMA**, a fim de subsidiar a viabilidade do investimento, sendo:

- **TIR maior do que a Taxa Mínima de Atratividade:** significa que o investimento é economicamente atrativo.
- **TIR igual à Taxa Mínima de Atratividade:** o investimento está economicamente numa situação de indiferença.
- **TIR menor do que a Taxa Mínima de Atratividade:** o investimento não é economicamente atrativo, pois seu retorno é superado pelo retorno de um investimento sem risco.

Tempo de Retorno de Investimento (Payback)

Período de tempo necessário para que as entradas de caixa do projeto se igualem ao valor a ser investido, ou seja, o tempo de recuperação do investimento realizado (Portal de Contabilidade, 2017).

- Na presente análise quanto menor o *payback*, menor risco econômico terá a tecnologia.

Tabela 4 – Quadro Resumo da Metodologia de Avaliação das Cadeias de Produção de Carvão Vegetal

Análise Técnica		Análise Ambiental		Análise Econômica		Análise Social		
Obtenção do Rendimento do Processo via metodologia ACM0021	Obtenção da Qualidade do Carvão Vegetal	Capacidade de redução de gás metano (CH ₄)	Capacidade de recuperação de coprodutos	Metodologia: Método do Fluxo de Caixa Descontado - FCD	Indicadores Econômicos	Identificação de Mudanças, positivas ou negativas, que afetem indivíduos ou comunidade devido à implantação das tecnologias de produção de carvão vegetal	Avaliação Inicial de Impactos Sociais - AIIS	
Valores maiores que 25% e que atendam a qualidade química do carvão vegetal: Carbono Fixo entre 70 a 80%	Carbono fixo: de 70 a 80%	Associado ao valor do rendimento gravimétrico (RG): quanto maior o RG, maior a redução de emissão do gás metano	Valores obtidos dependentes da tecnologia utilizada para recuperação das fumaças	Produção Anual de Carvão Vegetal	Taxa Mínima de Atratividade - TMA = 7,5%		Visitas, entrevistas à comunidade e atores onde a tecnologia estiver inserida	
	Densidade a granel: maior que 180 kg/m ³			Preço do Carvão Vegetal	Valor Presente Líquido - VPL			Qual será o impacto do projeto sobre a inclusão social e a geração de renda das pessoas envolvidas?
	Umidade: menor que 8%			Impostos	Taxa Interna de Retorno - TIR			
Finos de Carvão Vegeal: menor que 25%				Custo da Matéria Prima	Comparação entre TIR e TMA. Projeto Viável Economicamente para TIR > TMA	Quais as possibilidades oferecidas pela tecnologia quanto à redução da desigualdade de gênero?		
				Custos Operacionais - OPEX	Tempo de Retorno de Investimento - Payback: quanto menor, melhor e menos risco do empreendimento			
				Investimento na implantação do projeto - CAPEX				

4. Diagnóstico do estado da arte das cadeias produtivas e tecnologias de carbonização

O diagnóstico do estado da arte das cadeias produtivas e tecnologias de carbonização, sumarizado na presente publicação, foi elaborado a partir das conclusões obtidas nas seguintes fases do estudo Cadeias de Produção de Carvão Vegetal para o Setor Siderúrgico:

- Análise do estado da arte de cadeias eficiência das cadeias de produção de carvão vegetal para o setor de ferro-gusa, ferroligas e aço.
- Análise comparativa do estado da arte das tecnologias para produção de carvão vegetal para o setor de ferro-gusa, ferroligas e aço.

Ambas as análises foram desenvolvidas tendo em vista a metodologia proposta na primeira fase do estudo Cadeias de Produção de Carvão Vegetal para o Setor Siderúrgico.

4.1 - Análise Técnica

A descrição técnica dos fornos de alvenaria sinalizou rendimento gravimétrico de 26%, o que é o ponto de maior atenção, destacado pelo autor, uma vez que, do ponto de vista de viabilidade econômica, o índice mínimo recomendado é de 33%. O fato do controle da temperatura dos fornos de alvenaria ser feito de forma empírica pelos carbonizadores é fator crítico para o baixo rendimento.

Portanto, o uso de periféricos para controle da temperatura dos fornos de alvenaria é ponto decisivo para o aumento do rendimento gravimétrico, índice mais importante do processo de carbonização.

Ainda existe barreira de ordem cultural que impedem a adoção dos periféricos, que está ligada a resistência dos carbonizadores e dos próprios empreendedores na adoção desse tipo de sistema, uma vez que esses não aceitam ou não acreditam no consenso científico sobre como aumentar o rendimento da produção de carvão vegetal.

A descrição técnica dos fornos metálicos e híbrido sinaliza rendimento gravimétrico entre 33% a 38%, pelo fato dessas tecnologias possuírem sistemas periféricos para controle da temperatura do processo de carbonização.

4.2 - Análise Ambiental

A descrição ambiental dos fornos de alvenaria, tanto circulares, quanto retangulares, sinaliza que esses apresentam alto percentual de emissões de gás metano, em consequência de possuírem baixo rendimento gravimétrico.

No sentido contrário, a descrição ambiental dos fornos metálicos e híbrido sinaliza que esses apresentam baixo percentual de emissões de gás metano, pelo fato de possuírem alto rendimento gravimétrico.

Portanto, o aumento do rendimento gravimétrico e capacidade de redução de emissão de gás metano é um desafio superado para as tecnologias metálicas e híbrida, conforme metodologia proposta já apresentada pelo autor.

As restrições e barreiras para a adoção das tecnologias metálicas se relacionam principalmente a fatores de ordem técnica, uma vez que não existem unidades de larga escala em funcionamento que possam validar os resultados apresentados.

No caso da tecnologia híbrida, o ponto crítico a ser superado é o fato de ser uma inovação, uma vez que o setor siderúrgico é defensivo em termos de investimentos em novas tecnologias de produção de carvão vegetal.

4.3 - Análise social

Do ponto de vista social, cabe observar que, por um lado, os fornos de alvenaria circulares são os que mais oferecem oportunidades de trabalho nas cadeias de produção de carvão vegetal, pois apresentam inclusão social de trabalhadores rurais, homens, sem alfabetização, os quais ocupam as funções de forneiro e carbonizador.

Todavia, por outro lado, os fornos de alvenaria circulares também apresentam exclusão social de mulheres, quadro que pode ser modificado, caso as cadeias de produção venham a adotar fornos retangulares com controle da temperatura do processo de carbonização ou tecnologias metálicas e híbrida.

Como a adoção de novas tecnologias de carbonização, na avaliação do autor, tende a se consolidar, por questões de ordem ambiental e econômica, recomenda-se que os trabalhadores que hoje ocupam as funções de forneiro e carbonizador, nos fornos de alvenaria circulares, e retangulares, venham a ser inseridos em programas de alfabetização e ensino fundamental, a fim de se habilitarem a novas funções.

4.4 - Análise Econômica

O estudo de viabilidade econômica de produção de carvão vegetal é de alta complexidade devido ao fato da análise envolver um grande número de variáveis, desde a matéria prima até o preço de venda do carvão vegetal no mercado. Assim, uma série de premissas foram pré-estabelecidas pelo Autor para a análise econômica.

Tabela 5 = Premissas utilizadas na análise de viabilidade econômica das tecnologias de produção de carvão vegetal em Minas Gerais.

PREMISSA	DESCRIÇÃO		unid	Mínimo	Médio	Máximo	Referencial da faixa de valores adotada	Fonte
1 ^a	A	FE = Fator de empilhamento da madeira nos fornos (% de volume nominal)	%	68,50%			Valor para quantificar a madeira enfiada em volume sólido a partir do volume do forno	Consultoria
2 ^a	B	Capacidade de processamento de madeira	m ³ /mês	3000			Ponto de partida para dimensionamento da quantidade de fornos da tecnologia avaliada	Consultoria
3 ^a	C	Densidade básica da madeira	kg/m ³	450	500	550	Qualidade da floresta plantada (Tipo de Clone)	MDIC
4 ^a	D	Rendimento Gravimétrico do Processo	%	28%	33%	38%	Dependente da tecnologia de produção de carvão vegetal adotada	MDIC
5 ^a	E	Preço da Madeira em pé	R\$/m ³	32,00	36,00	40,00	Médias de mercado em diferentes regiões de Minas Gerais	Mercado
	F	Preço da colheita florestal	R\$/m ³	12,00	15,00	18,00	Manual, semi-mecanizada e mecanizada	Mercado
	G	Preço do transporte de madeira	R\$/m ³	6,00	9,00	12,00	Médias de mercado variando em função das distâncias de transporte	Mercado
6 ^a	H	Preço do carvão vegetal na UPC	R\$/t	450,00	500,00	550,00	Valor variável do mercado em diferentes períodos dos últimos anos	Mercado
	I	Preço do frete do carvão vegetal	R\$/t	100			Distância média de 300 km de raio das UPCs até as usinas siderúrgicas de Minas Gerais	Mercado
CÁLCULOS DAS CAPACIDADES PRODUTIVAS DE CARVÃO VEGETAL	J	Produção de carvão vegetal em massa	t/mês	378	495	627	$I = (B \times C \times D) / 1000$	Equação
	K	Densidade a granel do carvão vegetal	kg/mdc	200			Média de mercado	Consultoria
	L	Produção de carvão vegetal em volume	mdc/mês	1890	2475	3135	$L = J / (K/1000)$	Equação

Nota: Valor médio = (Valor mínimo + Valor máximo)/2

Tendo em vista as premissas adotadas, as quais foram utilizadas para compor o Fluxo de Caixa Descontado – FCD de cada uma das tecnologias, foram obtidos os seguintes resultados sumarizados:

Tabela 6 – Resultado das análises econômicas das tecnologias estudadas

ITEM	Tecnologia Avaliada	RG	Preço de Venda do CV	Tempo de Retorno (Payback)	Resultado VPL	Sucesso na Viabilidade Econômica	Análise dos resultados de viabilidade econômica	
		%	R\$/t.cv	(anos)	KR\$	Probabilidade		
3.2.4.1	Forno tipo circular com carga e descarga feitos de forma manual	26%	550	10,0	-6562	Inviável	Fornos controlados apenas pelo fluxo das fumaças sempre irão tender para rendimentos baixos (<28%), pois o processo só se encerra quando as reações químicas de decomposição térmica da madeira forem desprezíveis. Dessa forma e nas premissas atuais esses modelos não se viabilizam se não forem dotados de controles de processo de carbonização (temperatura e fluxos de entrada de ar)	
			600	10,0	-4985	Inviável		
			650	10,0	-3379	Inviável		
3.2.4.2	Forno Tipo Circular – Semi-Mecanizado (carga manual e descarga mecanizada)	26%	550	10,0	-5786	Inviável		
			600	10,0	-4180	Inviável		
			650	10,0	-2573	Inviável		
3.2.4.3	Forno Retangular Pequeno com carga e descarga mecanizada	33%	550	10,0	-3313	Inviável	Mesmo com controle de processo, que permite chegar a RG=33%, só se torna viável para preços do CV acima de R\$650/t e mesmo assim com alto tempo de retorno. As Tecnologias apresentaram um alto risco nas premissas econômicas adotadas no presente estudo.	
			600	10,0	-1274	Inviável		
			650	7,2	765	Baixa		
3.2.4.4	Forno Retangular Médio com carga e descarga mecanizada	33%	550	10,0	-2915	Inviável		
			600	10,0	-876	Inviável		
			650	6,3	1163	Média		
3.2.4.5	Forno Retangular Grande com carga e descarga mecanizada	33%	550	10,0	-2572	Inviável	Tecnologia apresentou uma TIR de 21% (quase 3 vezes a TMA de 7,5%), o que é bem positivo. O risco continua sendo a dependência do preço mínimo do carvão em torno de R\$650/t.	
			600	10,0	-190	Inviável		
			650	5,0	1848	Alta		
3.2.4.6	Forno DCP com carga e descarga mecanizada	38%	550	9,0	299	Baixa		Com TIR atingindo de 20 a 30% e para os cenários de payback menores que 6 anos, a tecnologia se torna bem atrativa do ponto do vista econômico. O risco nesse caso é a sua validação técnica da performance em escala industrial
			600	5,3	2647	Média		
			650	3,6	4994	Alta		
3.2.4.7	Forno ONDATEC com carga e descarga mecanizada	38%	550	10,0	-1149	Inviável	Com TIR atingindo 22% e para o cenário de payback menores que 5 anos, a tecnologia se torna bem atrativa do ponto do vista econômico. O risco nesse caso é a sua validação técnica da performance e a dependência do preço acima de R\$650/t.	
			600	7,3	1199	Baixa		
			650	4,8	3547	Alta		
3.2.4.8	Forno SISTEMA VEREDAS com carga e descarga mecanizada	33%	550	10,0	-1087	Inviável		Com TIR atingindo de 18 a 36% e para os cenários de payback menores que 6 anos, a tecnologia se torna bem atrativa do ponto do vista econômico. O risco nesse caso é a sua validação técnica da performance em escala industrial
			600	5,8	952	Média		
			650	3,3	2991	Alta		

4.4.1 - Análise de sensibilidade

A fim de se comparar os resultados das análises econômicas entre as diversas tecnologias de produção de carvão vegetal, foi elaborado o seguinte estudo de sensibilidade, no qual variou-se a densidade da madeira, o rendimento gravimétrico e o preço do carvão vegetal.

Foram simulados os valores de remuneração da madeira colocada na unidade de produção de carvão vegetal (R\$/m³), via iteração matemática, para cada um dos cenários, de modo a atingir o VPL = 0 para TIR = TMA = 7,5%. Os cenários combinaram os seguintes parâmetros:

- Preço do carvão vegetal: R\$ 550 /t.cv, R\$ 600 /t.cv e R\$ 650 /t.cv;
- Densidade da madeira: 450 kg/m³, 500 kg/m³ e 550 kg/m³;
- Rendimento gravimétrico: RG = 28%, 33% e 38%;

A presente consultoria classificou os resultados dos cenários como segue:

Tabela 7 – Faixa de riscos do empreendimento

Faixa de valores do preço da madeira obtido na simulação dos Cenários			
< R\$ 50,00	R\$ 50,00 <= PM < R\$ 60	R\$ 60,00 <= PM < R\$ 70	>= R\$ 70,00
Inviável	Alto Risco	Médio Risco	Baixo Risco

Tabela 8 – Cenários para simulação de análises de sensibilidade econômica para cada tecnologia e variando-se o preço do carvão em R\$550/t.cv, R\$600/t.cv, R\$650/t.cv.

Densidade Madeira Kg/m ³	RG – Rendimento Gravimétrico		
	28%	33%	38%
450	Cenário A1	Cenário A2	Cenário A3
500	Cenário B1	Cenário B2	Cenário B3
550	Cenário C1	Cenário C2	Cenário C3

Do ponto de vista quantitativo os resultados das análises econômicas entre as diversas tecnologias de produção de carvão vegetal foram enquadrados na seguinte formulação matemática proposta pelo autor:

- **Objetivo:** obter **um valor provável médio do preço de remuneração da madeira**, entre os valores simulados na análise econômica de sensibilidade, onde variou-se: densidade da madeira, rendimento do processo e preço do carvão vegetal.

- **Pontuação da combinação de resultados simulados para cada tecnologia**

$$PTS_{TEC} = \sum_{S=1}^{S=27} (PMI_S \times PROB_{RG}) \quad (7)$$

Onde:

- **PTS_{TEC}** = Pontuação da combinação de resultados simulados de cada tecnologia;
- **PMI_S** = Preço da madeira para cada simulação individual (R\$/m³);
- **S** = Índice da simulação correspondente;
- **PROB_{RG}** = Probabilidade qualitativa de obtenção do rendimento gravimétrico RG;

Tabela 9 – Faixa de probabilidades de de obtenção de eficiência das tecnologias avaliadas

Probabilidade de obtenção do RG pela tecnologia avaliada			
ALTA	MÉDIA	BAIXA	DESPREZÍVEL
3	2	1	0

- **Obtenção do percentual do PTS obtido por cada tecnologia**

$$\%PER_{TEC} = \left(\frac{PTS}{PTS_{MAX}} \right) \times 100\% \quad (8)$$

Onde:

- **%PER_{TEC}** = Percentual obtido de cada tecnologia em relação à pontuação máxima;
- **PTS_{MAX}** = Pontuação máxima = somatório dos pontos obtidos de cada tecnologia (PTS);

- **Obtenção do valor provável médio do preço de remuneração da madeira**

$$VPM_{TEC} = PER_{TEC} \times VPM_{MAX} \quad (9)$$

Onde:

- **VPM_{TEC}** = Valor provável médio do preço de remuneração da madeira (R\$/m³);
- **VPM_{MAX}** = Valor provável médio máximo do preço de remuneração da madeira entre as tecnologias avaliadas (R\$/m³);

Cabe ressaltar que o detalhamento das análises, como custos operacionais, dimensionamento de equipes e equipamentos, investimentos entre outros, podem ser consultados no link a seguir:

<https://drive.google.com/open?id=1NVVVvxZ7L3QIXVhH2FEZjmLJqE3Hfq2xk>

Tabela 10 – Resultado das análises econômicas combinadas das tecnologias avaliadas

TECNOLOGIA	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DO RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO			PREÇO DO CARVÃO VEGETAL DENSIDADE DA MADEIRA (kg/m³)	R\$ 550 /t.cv			R\$ 600 /t.cv			R\$ 650 /t.cv			PONTUAÇÃO		Valor Provável Madeira
	28%	33%	38%		RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO			RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO			RENDIMENTO GRAVIMÉTRICO			PTS	%PER	
	28%	33%	38%		28%	33%	38%	28%	33%	38%	28%	33%	38%			
Tipo Rabo Quente	3	1	0	450	32	45	57	38	51	65	44	59	73	1804	57%	48
				500	40	54	67	46	61	76	53	69	85			
				550	48	63	78	55	71	88	62	80	98			
Circulares de 5M	3	1	0	450	35	47	59	41	54	68	47	62	77	1910	61%	50
				500	42	56	70	49	64	79	56	72	88			
				550	50	65	80	58	74	91	65	83	101			
Retangulares Grandes	2	3	0	450	30	42	55	36	50	63	42	57	72	2405	76%	64
				500	37	51	65	44	59	74	51	67	84			
				550	45	60	75	53	69	86	61	79	96			
Retangulares Médios	2	3	0	450	27	39	52	33	47	60	40	54	69	2280	72%	60
				500	35	48	62	42	56	71	49	65	81			
				550	42	58	73	50	67	83	58	76	94			
Retangulares Pequenos	2	3	0	450	25	38	50	32	45	59	38	53	67	2208	70%	58
				500	33	47	60	40	55	70	47	63	79			
				550	41	56	71	49	65	82	56	74	92			
Fornos DPC	1	3	2	450	26	39	51	33	46	60	39	54	68	3154	100%	83
				500	34	48	61	41	56	71	48	64	80			
				550	42	57	72	49	66	82	57	75	93			
Fornos ONDATEC	1	3	2	450	20	33	45	27	40	54	33	48	62	2839	90%	75
				500	28	42	55	35	50	65	42	58	74			
				550	36	51	66	44	60	77	51	69	87			
Fornos VEREDAS	2	3	0	450	34	47	59	41	54	68	47	62	76	2613	83%	69
				500	42	56	69	49	64	79	56	72	88			
				550	50	65	80	58	74	91	65	83	101			

Fonte: elaboração própria

- As tecnologias DPC e ONDATEC se destacaram com resultados de **baixo risco econômico** principalmente pela boa probabilidade de obterem rendimentos gravimétricos (RG) entre 33 e 38%;
- Na faixa de **risco econômico médio** situaram-se as tecnologias de Fornos Retangulares (de grande e médio porte), devido ao ganho de escala, em relação aos fornos circulares e fornos tipo Rabo Quente, e o forno VEREDAS devido ao seu baixo investimento em relação aos fornos Retangulares;
- Fornos retangulares pequenos e Circulares 5M situaram-se na faixa de **alto risco econômico**, enquanto que os fornos tipo rabo quente se mostraram **inviáveis**, principalmente, devido à alta probabilidade de obtenção de baixo RG.

4.4.2. Análises complementares

Também foram analisadas, do ponto de vista qualitativo, as tecnologias de produção de carvão vegetal observando os seguintes tópicos:

Condições operacionais dos fornos e segurança do trabalho :

- Operação dos fornos – controle do processo de carbonização
- Risco de explosão
- Contato dos trabalhadores com gases tóxicos – monóxido de carbono (CO)

Qualidade do produto carvão vegetal:

- Teor de carbono fixo, Umidade do Carvão Vegetal, Geração de finos e Cinzas

Sistema de queima das fumaças da carbonização ou recuperação das fumaças:

- Sincronismo dos fornos x queima estável das fumaças
- Dutos de condensação das fumaças
- Conjunto coletor/queimador/chaminé

Para cada um dos tópicos foi definido um sistema de pontuação como segue:

Tabela 11 – Análise Qualitativa das tecnologias avaliadas

CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DA ANÁLISE QUALITATIVA - AQ				
Qualificação	Ótimo	Bom	Regular	Ponto de Atenção
Pontuação Individual	3	2	1	0
Resultado %	AQ > 90 %	70 % <= AQ < 90 %	50 % <= AQ < 70 %	<= 50 %

QUADRO RESUMO - ANÁLISE QUALITATIVA						
Item de Avaliação	Fornos de Alvenaria			Fornos Metálicos e Híbridos		
	Tipo Rabo Quente e Circulares	Retangulares Médio e Grande Porte	Retangulares de Pequeno Porte	DPC	ONDATEC	VEREDAS
Condições Operacionais e Segurança do Trabalho	7	10	10	13	13	13
Qualidade do Carvão Vegetal	8	5	6	12	12	10
Sistema de queima das fumaças ou condensação de pirolenhoso e alcatrão	1	3	3	9	9	8
Resultado qualitativo	16	18	19	34	34	31
Condições Operacionais e Segurança do Trabalho	47%	67%	67%	87%	87%	87%
Qualidade do Carvão Vegetal	67%	42%	50%	100%	100%	83%
Sistema de queima das fumaças ou condensação de pirolenhoso e alcatrão	11%	33%	33%	100%	100%	89%
% em relação ao Máximo de 36 pts	44%	50%	53%	94%	94%	86%

Total de pontos possíveis: 36 pts. – Fonte: elaboração própria

O detalhamento das análises qualitativas que geraram as pontuações da tabela XXX, podem ser consultados no link a seguir:

<https://drive.google.com/open?id=1NVVVxZ7L3QIXVhH2FEZjmLJqE3Hfq2xk>

5. Propostas para a melhoria e o desempenho da produção de carvão vegetal renovável para o setor de ferro-gusa, aço e ferroligas no Brasil com especial foco no estado de Minas Gerais

Em se tratando dos fornos de alvenaria circulares para grandes produções (acima de 1000 mdc/mês), a presente consultoria não considera promissora nenhuma proposta de melhoria, recomendando a substituição de tais fornos por outros que possibilitem mecanização da carga da madeira e da descarga do carvão vegetal. Para pequenas produções (em média abaixo de 500 mdc/mês), caso não seja viável uso de mecanização recomenda-se no mínimo a implantação de controles de temperatura.

O motivo para recomendar a substituição dos fornos de alvenaria circulares é o uso intensivo de mão de obra, a qual oferece resistência à implantação de sistemas de controle da temperatura do processo, além do que imprime uma imagem negativa à cadeia de produção do carvão vegetal, historicamente associada ao uso de mão de obra análoga à escravidão.

Os fornos de alvenaria retangulares são opções aos fornos de alvenaria circulares, desde que sejam observadas melhorias no que diz respeito, principalmente, à adesão dos empreendedores aos sistemas de controle do processo de carbonização.

Ainda nessa direção, foram propostas recomendações no sentido de que as plantas de carbonização sejam gerenciadas por engenheiros e que haja maior interesse dos empreendedores em diversificar a cadeia de produção do carvão vegetal, a fim de criar independência em relação ao mercado siderúrgico, transformando as fumaças em produtos como o bio-óleo produzido através da recuperação do alcatrão vegetal.

A diversificação da cadeia produtiva do carvão vegetal é o caminho para a valorização do negócio e conseqüente interesse dos empreendedores em aportar investimentos em tecnologia, maquinário e mão de obra qualificada, o que não ocorre hoje, uma vez que a maior parte da cadeia produz um único produto, cujo valor é muito pressionado pelo alto preço a ser pago pela madeira e pelo baixo preço a ser recebido pelo ferro-gusa.

Em relação as questões ambientais, as melhorias propostas para aumentar a capacidade de redução de emissão de gás metano, em fornos de alvenaria retangular, envolvem a adoção do uso de sistemas para controle do processo da temperatura. Conforme observado, essa adoção vai depender, principalmente, da própria adesão dos empreendedores.

No que se refere ao aumento da capacidade de recuperação de gases condensáveis, foram propostas melhorias que possibilitem a instalação de sistema de condensação. Essas melhorias se referem à substituição do *layout* paralelo, observado na maioria das plantas de carbonização, por outros que possibilitem a canalização dos gases e o posicionamento central do condensador.

Também é imprescindível que haja energia para o funcionamento dos sistemas de condensação e, no caso, a presente consultoria recomenda a instalação de placas solares fotovoltaicas, nas localidades onde não existir rede elétrica.

No que se refere às tecnologias metálicas e híbrida, em termos de rendimento gravimétrico não foram propostas melhorias, pelo fato de que os fornos são equipados de fábrica com sistema para controle da temperatura do processo de carbonização e, portanto, já alcançam maior rendimento gravimétrico.

Exatamente por alcançarem maior rendimento gravimétrico, os fornos metálicos e híbrido apresentam aumento da capacidade de redução de gás metano, o que dispensou, igualmente, recomendações de melhorias para esse fim.

Em termos de capacidade de recuperação dos gases condensáveis foi reiterada a necessidade de energia e sinalizadas recomendações de melhorias envolvendo o desenvolvimento do produto e do mercado referentes aos coprodutos da carbonização, principalmente do bio-óleo, o qual é potencial substituto de óleos de origem fóssil.

No âmbito social, foram apontadas melhorias que envolvem o aumento da inclusão social das mulheres e consequente diminuição da desigualdade de gênero na cadeia produtiva do carvão vegetal.

As melhorias sociais envolvem sobretudo a adoção de fornos que possibilitem a mecanização da carga e da descarga e a utilização de sistemas para controle do processo de carbonização, uma vez que nesses casos as mulheres são incluídas nas oportunidades de trabalho.

Em termos econômicos, recomenda-se a adoção de melhorias técnicas, visando o aumento do rendimento gravimétrico e a recuperação das fumaças para produção de coprodutos, conforme demonstrado na tabela 12.

Tabela 12 – Resultados financeiros comparativos entre o estado da arte das tecnologias e a aplicação de melhorias nas cadeias de produção do carvão vegetal

Tecnologia Avaliada	RG	Preço de Venda do Carvão Vegetal R\$/t.cv	ESTADO DA ARTE			MELHORIAS TECNOLÓGICAS			Tipo de Melhoria Adotada	Análise dos resultados de viabilidade econômica		
			Tempo de Retorno (Payback) (anos)	Resultado VPL KR\$	Sucesso na Viabilidade Econômica PROBABILIDADE	Tempo de Retorno (Payback) (anos)	Resultado VPL KR\$	Sucesso na Viabilidade Econômica PROBABILIDADE				
											%	
Forno tipo circular com carga e descarga feitos de forma manual	28% p/ 33%	550	10	-6562	Inviável	10,0	-1599	Inviável	Controle de Processo RG de 28% para 33%	A implantação de sistemas de controle de processo (temperatura) melhorou significativamente os resultados desse tipo de tecnologia, que antes eram totalmente inviáveis.		
		600	10	-4985	Inviável	6,7	440	Baixa				
		650	10	-3379	Inviável	1,7	2478	Alta				
Forno Tipo Circular – Semi-Mecanizado (carga manual e descarga mecanizada)	28% p/ 33%	550	10	-5786	Inviável	10,0	-1029	Inviável				
		600	10	-4180	Inviável	4,8	1009	Média				
		650	10	-2573	Inviável	1,8	3048	Alta				
Forno Retangular Pequeno com carga e descarga mecanizada	33%	550	10	-3313	Inviável	10,0	-1364	Inviável			Implantação de cadeia de produção de Bioóleo	A implantação de cadeia de produção de bioóleo melhorou significativamente os resultados desse tipo de tecnologia, reduzindo muito a dependência do preço do carvão vegetal
		600	10	-1274	Inviável	7,7	674	Baixa				
		650	7,24	765	Baixa	4,6	2713	Alta				
Forno Retangular Médio com carga e descarga mecanizada	33%	550	10	-2915	Inviável	10,0	-966	Inviável				
		600	10	-876	Inviável	6,8	1073	Baixa				
		650	6,3	1163	Média	4,2	3111	Alta				
Forno Retangular Grande com carga e descarga mecanizada	33%	550	10	-2572	Inviável	10,0	-281	Inviável				
		600	10	-190	Inviável	5,5	1758	Média				
		650	5	1848	Alta	3,6	3797	Alta				
Forno DCP com carga e descarga mecanizada	38%	550	9	299	Baixa	9,0	299	Baixa	Sem alteração do projeto original	Não foi sugerido mudanças do projeto original por serem tecnologias que já atingem altas performances de RG		
		600	5,3	2647	Média	5,3	2647	Média				
		650	3,6	4994	Alta	3,6	4994	Alta				
Forno ONDATEC com carga e descarga mecanizada	38%	550	10	-1149	Inviável	10,0	-1149	Inviável				
		600	7,3	1199	Baixa	7,3	1199	Baixa				
		650	4,8	3547	Alta	4,8	3547	Alta				
Forno SISTEMA VEREDAS com carga e descarga mecanizada	33%	550	10	-1087	Inviável	6,5	862	Baixa	Cadeia de Produção de Bioóleo	A implantação de cadeia de produção de bioóleo melhorou significativamente os resultados desse tipo de tecnologia praticamente a viabilizando para todas as faixas de preço de carvão vegetal simuladas		
		600	5,8	952	Média	3,6	2900	Alta				
		650	3,3	2991	Alta	2,5	4939	Alta				

6. Conclusão

Ao longo dos estudos desenvolvidos, demonstrou-se a fundamental importância em se valorizar os diversos fatores que impactam nos resultados de sustentabilidade do setor de produção de carvão vegetal no Brasil. Dos parâmetros de maior impacto têm-se: a mecanização da carga de madeira e descarga de carvão vegetal, o rendimento do processo e o uso dos coprodutos.

Assim, a presente consultoria considera que o primeiro passo a ser dado em direção a uma estratégia para promover o uso do carvão vegetal no setor siderúrgico é a mecanização da produção, uma vez que o uso intensivo de mão de obra contribui para manter o setor de carbonização em um estágio pré-industrial com as consequências que lhe são próprias, especialmente as que dizem respeito à imagem negativa, em termos sociais.

Os fornos de alvenaria retangulares e os fornos metálicos e híbrido são totalmente mecanizados e devem ser apoiados como opção aos fornos de alvenaria circulares para grandes produções (acima de 1000 mdc/mês).

Após a promoção da mecanização, em maior escala possível, a estratégia para promover o uso do carvão vegetal no setor siderúrgico deve focar no aumento do rendimento gravimétrico, o que é possível através do uso de sistemas periféricos para controle da temperatura do processo de carbonização.

Os fornos de alvenaria retangulares desde que contem com sistemas periféricos para controle da temperatura do processo de carbonização e os fornos metálicos e híbrido, devem ser apoiados como opção aos fornos que são monitorados pelo carbonizador.

Uma terceira recomendação para a estratégia de promover o uso do carvão vegetal no setor siderúrgico deve focar em projetos que pesquisem e desenvolvam a recuperação dos gases condensáveis e potencial produção de coprodutos da carbonização, a fim de que a cadeia seja diversificada e passe a depender menos das variações do mercado da madeira e do ferro-gusa.

Reitera-se a necessidade de que sejam construídas e compartilhadas informações atualizadas sobre o consenso científico existente sobre o uso do carvão vegetal no setor siderúrgico, de modo a subsidiar os empreendedores, da necessidade de modernização da cadeia produtiva; e a sociedade, da relevância do uso do carvão vegetal.

Finalmente, cabe destacar que o Projeto Siderurgia Sustentável é uma ação, em curso, que está respondendo ou objetiva responder às melhorias propostas pela presente consultoria, contribuindo para a diminuição das restrições e barreiras que impedem a melhoria da sustentabilidade ambiental, social e econômica do desempenho das cadeias produtivas do carvão vegetal no Brasil e especialmente em Minas Gerais.

7 - Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013** – Ano base 2012/ABRAF. Brasília, 2013.

Associação Mineira de Silvicultura - AMS. **Anuário estatístico: 2012**. Belo Horizonte, 2013.

Associação Mineira de Silvicultura - AMS. **Palestra**. 1º Seminário do Projeto Siderurgia Sustentável. Belo Horizonte, 2016. Disponível em <<http://silviminas.com.br/wp-content/uploads/2016/06/SIDERURGIA-SUSTENT%C3%81VEL-palestra-do-Presidente-AMS-Maur%C3%ADcio-B.-Melo-I-Semin%C3%A1rio-de-Siderurgia-Sustent%C3%A1vel-BH-23-6-2016-1.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2017.

BRITO, J.O. Reflexões sobre o carvão vegetal para uso siderúrgico. **Circular Técnica**. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF). Piracicaba, fev. 1993.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS – CGEE. **Modernização da produção de carvão vegetal: Subsídios para revisão do Plano Siderurgia** – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015.

_____. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: Caderno de Informações de Base** – Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2008.

FELIPETTO A.V.M. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, aplicado a resíduos sólidos**. Conceito, planejamento e oportunidades. Rio de Janeiro: IBAM, 2007.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. **Levantamento da situação ambiental e energética de ferroligas e silício metálico no Estado de Minas Gerais, prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade**/Gerência de Desenvolvimento e Apoio Técnico às Atividades Industriais – Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura**. 2015.

LOPES, C.R. **Caracterização física, química e energética de biomassa e seus carvões para injeção em altos-fornos**. Tese. Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 2010.

PORTAL DE CONTABILIDADE. Disponível em:
<http://www.portaldecontabilidade.com.br/tematicas/analiseinvestimentos.htm>.
Acesso em: mar. 2017.

PROCHNICK, V. e HAGUENAUER, L. Cadeias produtivas e oportunidades de investimento no Nordeste Brasileiro. **Análise Econômica**. Faculdade de Ciências Econômicas da UFRGS. Ano 20, nº 38, set. 2002.

RAAD, T.J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do *Eucalyptus spp.*** Tese. Departamento de Engenharia de Mecânica da UFMG, Belo Horizonte. 2004.

SAMPAIO, R.S. e LOPES, L.E.F. O ferro primário mais limpo do planeta – a produção de ferro-gusa com uso de biomassa plantada. **Anais do 1º Congresso Internacional de uso da biomassa plantada para a produção de metais e geração de eletricidade**. Belo Horizonte, Brasil, 8-11 out. 2001.

SANTOS, I.D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do cerrado carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. Dissertação. Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2008.

SANTOS, R.C.; CARNEIRO, A.C.O.; TRUGILHO.; P.F.; MENDES, L.M.; CARVALHO, A.M.M.L. Análise termogravimétrica em clones de eucalipto como subsídio para a produção de carvão vegetal. **Cerne**. V. 18, nº 1. Lavras. Jan/mar.2012.

SÊYE, O. **Influência da temperatura de carbonização do eucalipto nas propriedades do carvão vegetal produzido**. Dissertação. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 1998.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO FERRO NO ESTADO DE MINAS GERAIS – SINDIFER. **Anuário Estatístico**: Belo Horizonte, 2016.

UNITED NATION FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE - UNFCCC.
ACM0021: *Reduction of emission from charcoal production by improved kiln design and/or abatement of methane: version 01.0.0. 2012.* Disponível em cdm.unfccc.int/methodologies/PAmethodologies/approved. Acesso em: fev. 2017.