

CRISMEIRE ISBAEX

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL NA PRODUÇÃO DE  
SILÍCIO METÁLICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

Isbaex, Crismeire, 1987-

I74i  
2014

Influência da densidade do carvão vegetal na produção de  
sílicio metálico / Crismeire Isbaex. – Viçosa, MG, 2014.  
viii, 48f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Sebastião Renato Valverde.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.43-48.

1. Carvão vegetal. 2. Silício metálico. 3. Energia elétrica  
- Consumo. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Florestal. Programa de Pós-graduação em Ciência  
Florestal. II. Título.

CDD 22. ed. 662.74

CRISMEIRE ISBAEX

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL NA PRODUÇÃO DE  
SILÍCIO METÁLICO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 19 de fevereiro de 2014.

---

Afonso Augusto Teixeira de Freitas  
de Carvalho de Lima

---

Márcio Lopes da Silva

---

Márcio Aredes Martins

---

Sebastião Renato Valverde  
(Orientador)

## ORAÇÃO DA MANHÃ

Senhor, no silêncio desse dia que amanhece,  
Venho pedir-te a paz, a sabedoria, a força, a saúde, a proteção e a fé.  
Quero ver hoje o mundo com os olhos cheios de amor,  
Ser paciente, compreensivo, manso e prudente.  
Ver além das aparências teus filhos como Tu mesmo os vê e assim,  
não ver senão o bem em cada um.  
Cerra meus ouvidos e toda calúnia.  
Guarda minha língua de toda maldade.  
Que só de bênçãos se encha o meu espírito  
e que eu seja tão bondosa e alegre,  
Que todos os que a mim se achegarem sintam Tua Presença.  
Reveste-me da Tua beleza senhor, e que no decurso deste dia,  
eu Te revele a todos.  
Senhor, Tu podes todas as coisas.  
Tu podes conceder-me a Graça que tanto almejo.  
Cria, Senhor, as possibilidades para a realização de meu desejo  
Em nome de Jesus, Amém!

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais esta conquista e por proporcionar tantas alegrias em minha vida!

Aos meus pais, Antônio Isbaex (*in memoriam*) e Aparecida Ana Zaroni Isbaex, por todo amor e apoio, e as minhas irmãs Crislaine Isbaex e Cristiana Isbaex, por todo o carinho.

Ao meu sobrinho Mateus Isbaex da Silva, pelos momentos de alegria.

Ao Felipe Alarcon Peres, por dividir comigo os momentos felizes e os difíceis da minha vida.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal, pela oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao meu orientador, Sebastião Renato Valverde, pela orientação, compreensão e ensinamentos durante todo este período de convivência.

A Professora Cassinha, pelo apoio e atenção na coorientação do trabalho.

A Dow Corning por fornecer todo o apoio para realização desta pesquisa.

Aos professores do Departamento de Engenharia Florestal e em especial ao Professor Hélio Garcia Leite e José Batuira de Assis que me aconselharam em todos os momentos durante a realização deste trabalho, ao qual serei eternamente grata.

Aos funcionários do DEF, em especial a Ritinha e ao Alexandre, pela atenção e auxílio prestado sempre com muita atenção.

As amigas Lyvia, Jú de Aracajú, Carol e amigos Marquinho e Gustavo pelos momentos de estudos, desabafos e viagens em Viçosa.

A todos aqueles que participaram e ajudaram, de forma direta ou indireta, na elaboração desta pesquisa.

OBRIGADA!

## **BIOGRAFIA**

CRISMEIRE ISBAEX, filha de Aparecida Ana Zanoni Isbaex e Antonio Isbaex, nasceu em 18 de janeiro de 1987, na cidade de Auriflora, São Paulo.

Ingressou no curso de Engenharia Florestal em março de 2008 pela Universidade Federal do Paraná, em Curitiba, concluindo-o em dezembro de 2011.

Em março de 2012, ingressou no programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde obteve o título de Mestre em Ciências Florestais em 19 de fevereiro de 2014.

## SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS.....	vi
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
3.1 Panorama do setor florestal e metal-siderúrgico a carvão vegetal de Minas Gerais...5	
3.2 O gênero <i>Eucalyptus</i> .....	7
3.3 Produção de carvão vegetal.....	9
3.3.1 Propriedades da madeira <i>versus</i> densidade do carvão.....	13
3.4 Panorama de produção das ferro-ligas e do Silício Metálico.....	16
3.4.1 Processo de produção de Si-met. a carvão vegetal.....	18
3.4.1.1 Matérias primas para produção de Si-met.....	20
a) Quartzo.....	22
b) Carvão vegetal e cavaco de madeira.....	23
c) Eletrodos.....	25
d) Energia elétrica.....	26
3.4.2 Características elétricas do forno a arco submerso.....	27
3.4.3As consequências do uso do carvão de baixa densidade na produção do Si-met....	29
4. METODOLOGIA.....	31
4.1 Fonte de dados.....	31
4.1.1 Literatura específica.....	31
4.1.2 Entrevista qualitativa.....	31
4.2 Cenários e simulações.....	32
4.3 Diretrizes para a política de remuneração.....	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
5.1Propriedades das matérias-primas para a produção do Si-met.....	34
5.1.1 Matérias-primas.....	34
5.2 Efeito da densidade do carvão vegetal na produção do Si-met.....	35
5.3 Simulações do impacto da densidade do carvão no custo de produção do Si-met....	37
5.4 Diretrizes para o estabelecer uma política de remuneração.....	39
6. CONCLUSÃO.....	42
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

## LISTA DE SIGLAS

ABRAF - Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas  
ABRAFE - Associação Brasileira dos Produtores de Ferro-ligas e Silício Metálico  
ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais  
 $Al_2O_3$  - Óxido de alumínio ou alumina  
AMS - Associação Mineira de Silvicultura  
BaO - Óxido de Bário  
C - Carbono  
Ca - Cálcio  
CaO - Óxido de Cálcio  
CaSi - Cálcio Silício  
CO<sub>2</sub> - Dióxido de Carbono  
CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais  
CVRD - Companhia Vale do Rio Doce  
CBCC - Companhia Brasileira de Carbureto de Cálcio  
CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais  
EPE - Empresa de Pesquisa Energética  
Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Óxido Férrico  
FeSi - Ferro Silício  
FEMA - Fundação Estadual do Meio Ambiente  
IPEF - Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais  
K - Potássio  
Mg - Magnésio  
MgO - Óxido de Magnésio  
MME - Ministério do Meio Ambiente  
Mdc - Metros de carvão  
MWh - Mega Watts hora (1.000.000 Wh)  
Na - Sódio  
Na<sub>2</sub>O - Óxido de Sódio  
NORMA PMQ 3-03 - Padrões Mínimos de Qualidade para Carvão Vegetal  
Si-met. - Silício Metálico; st - estéreo  
SINDEXTRA - Sindicato da Indústria Mineral do Estado de Minas Gerais  
t - Toneladas  
TiO<sub>2</sub> - Óxido de Titânio ou Titânia

## RESUMO

ISBAEX, Crismeire, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2014. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de Silício Metálico.** Orientador: Sebastião Renato Valverde. Coorientadora: Angélica de Cássia Oliveira.

Este estudo teve como objetivo avaliar e quantificar a influência da densidade do carvão vegetal nos custos de produção de Silício Metálico. Este estudo foi realizado em uma empresa de médio porte do segmento de Silício Metálico, localizada no município de Santos Dumont, Minas Gerais. Na primeira etapa, foi feita uma busca de literatura para identificar as influências da densidade do carvão vegetal no processo produtivo e sua participação nos custos de produção; na segunda, foram realizadas entrevistas com profissionais da empresa com delineamento descritivo e exploratório para compreender a importância do carvão vegetal dentro do processo produtivo. Na terceira etapa foi feito um levantamento de dados de custos de matéria prima, consumo de energia elétrica (MWh), consumo de cavaco (st), produção de silício (kg) e densidade à granel do carvão ( $\text{kg/m}^3$ ). Para identificar os efeitos da variação da densidade do carvão, foram construídos cenários e simulações, escolhidos dentro de um mesmo nível de consumo de energia elétrica, para captar prováveis custos de produção pela empresa. Na quarta etapa propôs-se diretrizes para o estabelecimento de uma política de remuneração para os produtores de carvão vegetal. Ao relacionar o consumo de energia elétrica com a quantidade produzida de silício ( $\text{kg/mês}$ ), obteve-se um gasto de 13,37 e 10,87 MWh/kg de Silício Metálico (Si-met.), ao usar uma densidade do carvão vegetal de 199 e 230  $\text{kg/m}^3$ , respectivamente. Considerando o consumo intensivo de energia e a variação no preço desta, o valor da ineficiência dado o uso de um carvão de menor densidade pode significar um custo de R\$6 milhões, quando há excesso de oferta de energia, e R\$61 milhões, em período de crise energética. Verificou-se que quanto mais denso possível for o carvão vegetal, melhor e mais eficiente o processo produtivo do Silício Metálico, pois, diminuí a ocorrência de segregação de carga e formação de vazios; melhora a estabilidade estequiométrica dentro do forno; gera menos escória; e reduz o consumo de eletrodo e de energia elétrica. A densidade do carvão vegetal tem uma parcela de influência nos custos de matéria-prima e principalmente nos custos com energia elétrica. Ao optar em utilizar um carvão de menor densidade a granel, a indústria pode deixar de ganhar em produtividade nos forno e em venda do excedente de energia elétrica e ainda, em oportunidade de estabelecer diretrizes para uma política de remuneração para o produtor florestal e carbonizador.

## ABSTRACT

ISBAEX, Crismeire, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2014. **Influence of density of charcoal in the production of Silicon Metal.** Adviser: Sebastião Renato Valverde. Co-adviser: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

This study had objective evaluate and quantify the influence of charcoal density in production costs of silicon metal. This study was conducted in a medium-sized company in the silicon metal industry, located in the municipality of Santos Dumont, Minas Gerais. In the first stage, was made a literature search to identify the influences of density of charcoal in the production process and their participation in production costs; the second, were made interviews of descriptive and exploratory character with the company professionals to understand the importance of charcoal in the production process. The third stage was made a survey of data from raw material costs, electricity consumption (MWh), chip consumption (st), silicon production (kg) and bulk charcoal density ( $\text{kg/m}^3$ ). To identify the effects the charcoal density was built scenarios and simulation, chosen within the same level of electricity consumption, to get possible cost production by the company's. In the fourth stage proposed guidelines for the establishment of a remuneration policy for charcoal forest producers. In relating the electricity consumption with the amount produced of silicon ( $\text{kg/month}$ ) was obtained a spend of 13.37 and 10.87 MWh/kg of Silicon Metal (Si-met.), by using the charcoal density of 199 and 230  $\text{kg/m}^3$ , respectively. Considering the consumption energy intensive and the variation in the price of this, the value of inefficiency due the using a lower density charcoal can mean a cost of R\$ 6 millions, when there is excess supply of energy, and R\$ 61 millions in the period of energy crisis. It was found that how much more dense is possible charcoal, better and more efficient the silicon metal production process, because, reduces the occurrence of segregation of cargo and formation of voids; improves the stoichiometric stability within the furnace; generates less slag; and reduces the consumption of electrode and electricity. The charcoal density has a parcel of influence in the costs of raw materials and especially in electricity costs. By opting to use a lower bulk charcoal density, the industry may fail to gain in furnace productivity and sale of excess electricity and still an opportunity to establish guidelines for a policy renumbering for forest producers and carbonizer.

## 1. INTRODUÇÃO

O Estado de Minas Gerais é privilegiado por possuir uma grande diversidade mineral e condições edafoclimáticas que favorecem o desenvolvimento de florestais de significativo crescimento e produção do País. Essa conjugação transformou o Estado no mais vigoroso parque minero-metalúrgico a carvão vegetal do mundo.

Apesar da vocação metal-siderúrgica e florestal e da importância destas para o desenvolvimento social, econômico e ambiental, o governo de Minas pouco tem feito para auxiliar a cadeia produtiva do carvão vegetal e superar a crise que permanece desde 2008.

O carvão vegetal tem uma importância significativa na formação de um mercado da madeira mais próxima da competição perfeita, dada a possibilidade do transporte a maiores distâncias, o que permite aos produtores terem alternativas de destino da madeira produzida.

Com a expressão da silvicultura na economia brasileira, muito se evoluiu em estudos florestais. Seleção de espécies e procedências para aumento da produtividade e qualidade da madeira, eficiência e qualidade das práticas silviculturais, ganhos no processamento da madeira, estudos de crescimento da floresta para maximização da produtividade, estudos econômicos para otimização dos lucros e outros tantos avanços que em muito contribuíram para o desenvolvimento do setor florestal brasileiro (FERNANDES, 2013).

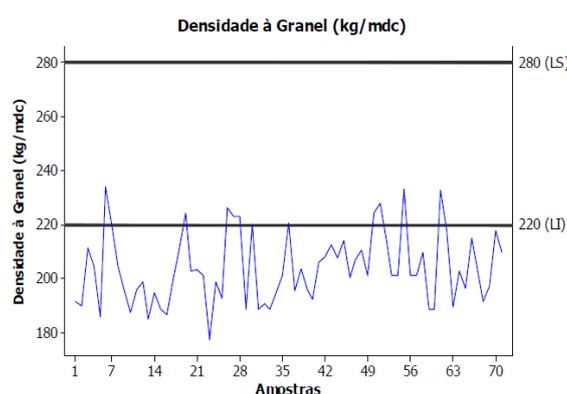
No que tange ao melhoramento genético do eucalipto, a clonagem foi um grande avanço, permitindo formação de plantios homogêneos, produtivos e resistentes a doenças em diferentes condições edafoclimáticas. Especula-se um crescimento em torno de 100% do incremento volumétrico dos plantios clonais em relação a plantios de semente realizados no início do século XX (ALFENAS et al., 2009).

Embora tenha havido evolução no incremento das plantações florestais, o melhoramento em alguns casos, tem privilegiado mais o ganho volumétrico que o gravimétrico, ou seja, têm-se plantações de rápido crescimento, porém constituída, na sua maioria, de madeira de baixa densidade, fibras com parede celular fina e baixo teor de lignina, não sendo a ideal para a produção de carvão vegetal ou para fins energéticos em geral.

Apesar da densidade básica da madeira ser um índice mais simples e usual para qualificar a madeira, essa propriedade acaba em segundo plano na fase de seleção de

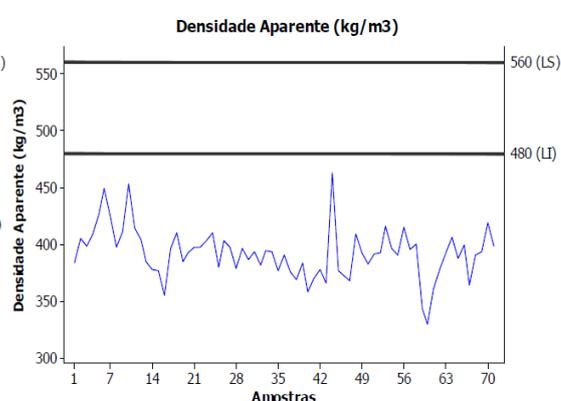
árvores superiores por ser uma característica de maior dificuldade de mensuração em relação a outras características como: crescimento volumétrico, forma de fuste, adaptabilidade e resistência a pragas e doenças (SHIMOYAMA e BARRICHELO, 1989).

Estudo realizado por Picancio (2011), mostrou que a densidade à granel do carvão vegetal especificada pela siderúrgica, com o limite superior (LS) de 280 kg/mdc e com limite inferior (LI) de 220 kg/mdc, 83% dos dados estavam fora dos limites de especificação (Figura 1). Por outro lado, a densidade aparente do carvão vegetal especificada pela siderúrgica, com limite superior (LS) de 560 kg/mdc e com limite inferior (LI) de 480 kg/mdc, 100% dos dados estavam fora dos limites de especificação do cliente (Figura 2).



Fonte: PICANCIO (2011)

**Figura 1:** Gráfico sequencial da densidade à granel (kg/mdc).



**Figura 2:** Gráfico sequencial da densidade aparente (kg/m³).

Para atender à qualidade do carvão vegetal requerida pela metal-siderúrgica, faz-se necessário o estudo da influência do material genético de origem com a qualidade do carvão produzido. No entanto, para que este estudo seja eficiente, é necessário fazer o caminho inverso da cadeia produtiva. Ao identificar os pontos positivos e negativos do carvão vegetal no processo metal-siderúrgico, é possível apontar respostas mais eficazes sobre as escolhas das espécies.

Para a siderurgia, deve-se pensar em uma floresta voltada para a produção de carvão de qualidade e densidade por hectare. Se a floresta é composta por espécies mais densa, logo, ter-se-á madeira mais densa, com maior teor de lignina, produzindo um carvão com maior resistência físico-mecânica (BRITO, 1993; ASSIS et al., 2012). Como consequência, é possível obter ganhos e redução dos custos de produção em toda

a cadeia, ou seja, desde a carbonização, transporte, consumo de energia até a produção de silício, etc.

Sendo assim, mudanças ocorrerão na silvicultura, principalmente no melhoramento genético, procurando não somente a produtividade, mas também a densidade básica da madeira, bem como outras propriedades que possam possibilitar um maior rendimento em carvão vegetal. Deste modo, será possível obter ganhos em todos os processos de produção, ou seja, desde a carbonização, transporte, redução na produção de escória e no consumo de energia, além de maior estabilidade nos fornos.

Vale salientar que, a pesquisa possui informações que envolvem o processo produtivo do Silício Metálico a carvão vegetal, podendo ser empregada para a produção de quaisquer ligas metálicas.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar e quantificar a influência da densidade do carvão vegetal nos custos de produção de Silício Metálico.

Foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar as propriedades desejáveis do carvão para a produção de Silício Metálico;
- Identificar e descrever as consequências operacionais da variação da densidade do carvão vegetal na produção do Silício Metálico;
- Realizar entrevistas com profissionais da área para identificar as influências da qualidade do carvão vegetal na produção de Silício Metálico;
- Em uma série histórica de produção, identificar e valorar a influência da densidade do carvão vegetal nos custos de matéria-prima de Silício Metálico;
- Simular relações de preços do carvão vegetal em unidade gravimétrica comparado com a volumétrica;
- Apontar diretrizes para a concepção de uma política de remuneração do produtor de carvão vegetal.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Panorama do setor florestal e metal-siderúrgico a carvão vegetal de Minas Gerais

A economia do setor florestal brasileiro era pouco expressiva até 1965, tanto que as atividades de manejo das florestas plantadas e nativas eram insignificantes e realizadas, na sua grande maioria, em pequena escala e em condições de baixo emprego de tecnologia e gestão. Na época, a produção de carvão vegetal tinha como fonte de matéria-prima as florestas nativas (VALVERDE et al., 2004).

Com a política de incentivos fiscais ao reflorestamento, que vigorou de 1965 a 1988, ocorreu um crescimento significativo da área reflorestada no Brasil. Os gêneros florestais que mais se destacaram foram *Pinus* e *Eucalyptus*, principalmente devido ao rápido crescimento, à boa qualidade da madeira e à adaptabilidade ao clima e ao solo das Regiões Sul e Sudeste (ANTONÂNGELO & BACHA, 1998).

Em 2011, a área ocupada por plantios florestais de *Eucalyptus* soma 74,8% do total de áreas plantadas no Brasil (4,87 milhões de hectares), sendo que 20,9% são destinados à siderurgia. O Brasil é o maior produtor de carvão vegetal do mundo e os principais consumidores são os setores de ferro-gusa, aço e ferro-liga. Os demais países utilizam predominantemente o carvão mineral nas siderúrgicas (ABRAF, 2012). Em 2012, foram produzidos 17,81 milhões de metros cúbicos de carvão vegetal a partir de florestas plantadas, dos quais 66,2% foram consumidos pelos “guseiros” independentes (ABRAF, 2013).

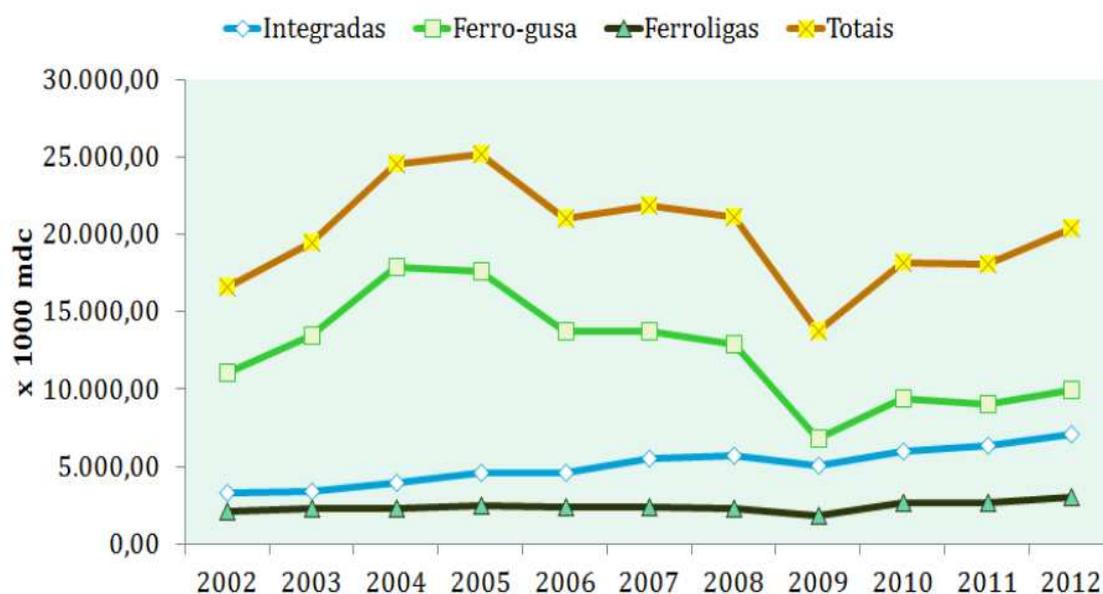
Minas Gerais é o estado que atualmente detém a maior área de florestas plantadas do Brasil. Essa situação decorre basicamente da existência de um grande parque metalsiderúrgico formado pelas indústrias de ferro-gusa, aço e ferro-ligas e, mais recentemente, pelas indústrias de celulose, chapas de fibra de madeira e lápis (AMS, 2011a), que são de suma importância para o desenvolvimento da economia regional. As principais plantas industriais, consumidora de carvão vegetal, estão localizadas em Belo Horizonte, Sete Lagoas, Divinópolis e Pirapora. No entanto, a localização se relaciona a vários fatores como fonte dos recursos naturais (minério de ferro), eficiência energética, escoamento da produção e mercado (REZENDE et al., 2005).

Historicamente, o Estado de Minas Gerais sempre possuiu uma maior porcentagem na participação do setor metal-siderúrgico em relação à média brasileira. Em 1940, o Estado de Minas já respondia por 90% da produção de ferro-gusa do país,

posição consolidada nos anos 50, com a implantação do pólo siderúrgico do Vale do Aço. Na década de 70, Minas Gerais tornou-se o maior pólo siderúrgico a carvão vegetal do mundo (DIAS et al., 2002).

A evolução do consumo de carvão vegetal do estado, apontam que a maior parte do carvão foi destinada a indústria de ferro-gusa. Em 2012, o consumo representou cerca de 9,9 milhões de mdc, em seguida pelas usinas integradas com 7,1 milhões de mdc e ferro-ligas com 3,7 milhões de mdc (AMS, 2013) (Figura 3).

Mesmo com um mercado florestal vigoroso, a crise financeira internacional de 2008 atingiu fortemente essas indústrias, sobretudo a do ferro-gusa, e o mercado florestal. Desde então, o Estado tem sido penalizado com a permanência da crise nas guseiras. As indústrias produtoras independentes de ferro-gusa continuam produzindo com apenas 42,9% de sua capacidade instalada de 14,1 milhões de toneladas/ano, volume ainda inferior ao produzido no período 2008 – 2010 (ABRAF, 2012). O setor menos afetado pela crise foi o das ferro-ligas. Mesmo com a permanência da crise o consumo de carvão vegetal deste segmento permaneceu estável.



Fonte: AMS (2013)

**Figura 3:** Evolução do consumo de carvão vegetal pelas metal-siderúrgicas de Minas Gerais.

Em 2012, Minas Gerais possuía uma área total de 1,5 milhão de ha de florestas plantadas de Pinus e Eucalipto, totalizando 22,3% do território nacional, distribuídos em 698 municípios (ABRAF, 2013). Segundo o Governo de Minas (2013), as exportações mineiras de produtos derivados de florestas plantadas atingiram em 2011 o montante de

US\$ 680 milhões, correspondente a 7,1% das exportações totais mineiras. A indústria de base florestal participa com 7% do PIB mineiro e gera 565.328 empregos diretos e indiretos, arrecadam 333.069 mil reais em impostos; além de agregar 3,7 mil reais em divisas com exportações (ASSIS, 2003 *apud* CARVALHO, 2009).

Para melhorar a cadeia produtiva florestal do país é intolerável que Minas não tenha políticas públicas para o seu fortalecimento. O estado de Minas Gerais apresenta vantagens competitivas, devido à possibilidade da ocupação de terras antropizadas disponíveis, sobretudo aquelas localizadas em regiões montanhosas que estão ociosas ou subutilizadas pela agricultura e pecuária. Portanto, para fortalecer o mercado a carvão vegetal é necessário o estabelecimento de uma política de preços e de incentivos; financiamentos a juros e prazos compatíveis com o ciclo da silvicultura e também uma redução das excessivas operações de fiscalização via comando e controle que o Estado exerce sobre as plantações florestais (AMS, 2009).

### **3.2 O gênero *Eucalyptus***

O *Eucalyptus* é um dos gêneros mais estudados e cultivados no Brasil. Nesse sentido, institutos e escolas de Engenharia Florestal, vêm aprimorando as pesquisas de melhoramento genético, manejo do solo e nutrição de plantas para elevar as potencialidades desse gênero. Esses estudos proporcionaram aos materiais genéticos maior produtividade, melhores características da madeira, plasticidade quanto a adaptação aos diferentes sítios florestais e exigências edafoclimáticas (PEREIRA et al., 2000; BOTREL et al., 2010).

No Brasil, as principais espécies do gênero *Eucalyptus* plantados para produção de florestas energéticas são: *E. grandis* (FREDERICO, 2009), *E. urophylla* (ANDRADE, 2009), *E. camaldulensis* e *E. cloeziana* (PINHEIRO, et al., 2005), *E. pellita* (OLIVEIRA et al., 2010) e *E. saligna* e *Corymbia citriodora*, assim como Híbrido de *E. urophylla* (I 220), Híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* (I 042), Híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* (I 144), Híbrido de *E. urophylla* (I 224), Híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis* (GG100) e Híbrido de *E. urophylla* x *E. camaldulensis* (VM 1) (FERNANDES, 2013).

Em relação à maioria das espécies de eucaliptos, o *Eucalyptus urophylla* é a que apresenta maior estabilidade genética em todas as áreas onde foi testada (MOURA, 2004). No entanto, o *E. urophylla* o *E. grandis* e os seus híbridos adquiriram grande importância na indústria nacional de papel e celulose (CARVALHO, 2000).

Conseqüentemente, grande parte das empresas produtoras e consumidoras de carvão vegetal, utilizam esses materiais devido a inexistência de clones com melhores características que atendam as necessidades específicas para a produção de carvão vegetal (CASTRO, 2011).

O maior desafio para os programas de melhoramento está em aumentar a produtividade dos clones plantados, juntamente com a qualidade da madeira, a fim de obter uma produção adaptada às exigências tecnológicas da siderurgia (BRITO & BARRICHELO, 2006). A ArcelorMittal BioFlorestas é um exemplo disso, pois a empresa registrou, recentemente, no Registro Nacional de Cultivar (RNC) do Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), três novos materiais genéticos oriundos do seu Programa de Melhoramento Genético Florestal: AM01 (*Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill x *Corymbia torelliana* (F. Muell) K.D. Hill & L.A.S. Johnson, AM02 (*Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill x *Corymbia torelliana* (F. Muell) K.D. Hill & L.A.S. Johnson, e AM03 (*Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill x *Corymbia torelliana* (F. Muell) K.D. Hill & L.A.S. Johnson (IPEF, 2013).

Os novos clones são provenientes do processo de hibridação por polinização controlada de duas espécies do gênero *Corymbia*, o *Corymbia citriodora* e o *Corymbia torelliana*, e se destacam pela produtividade, densidade da madeira, resistência a determinadas pragas e doenças, e maior resistência do carvão a ensaios de compressão, fator relevante durante a produção de ferro-gusa no alto forno (IPEF, 2013).

Para uma melhor utilização das espécies ou clones de eucalipto visando à produção de energia, é importante que se avaliem algumas propriedades da madeira, a fim de se obter uma melhor matéria-prima para essa finalidade. Contudo, a qualidade da madeira para a utilização energética pode ser influenciada pela idade do material e pelas diferenças entre espécies e clones (NEVES et al., 2013).

Tem-se observado, nos últimos anos, um interesse na realização de trabalhos conjuntos entre os setores florestal e industrial na busca de matéria-prima que apresente elevada produtividade e qualidade. De modo geral, podem-se melhorar, modificar, controlar ou minimizar os fatores que afetam a qualidade da madeira, por meio de tratamentos silviculturais e de seleção e melhoramento genético (XAVIER et al., 1997).

No entanto, o desenvolvimento de sementes, híbridos e clones de eucalipto é preferencialmente direcionado para o setor de celulose, ficando em segundo plano o setor de biomassa para energia e carvão vegetal (ABM, 2008). O setor siderúrgico necessita caminhar no sentido próprio conforme suas especificidades em vez de seguir no caminho contrário da produção de celulose, pois, os custos adicionais por usar uma

matéria-prima de qualidade inferior podem ser significativos. As características indesejadas para celulose são desejadas para a siderurgia como o teor de lignina. Dessa maneira, os povoamentos florestais destinados à produção de carvão vegetal, devem ser quantificados em toneladas de carvão por hectare, ou toneladas de ferro-gusa, aço, ferro-ligas e Silício Metálico por hectare.

### **3.3 Produção de carvão vegetal**

O processo de carbonização ou pirólise lenta da madeira consiste no seu aquecimento, a temperaturas acima de 200°C, que promove modificações dos seus componentes, cujo objetivo é concentrar o teor de carbono na massa resultante do processo. A ocorrência desse processo está intimamente relacionada à composição química dos três principais componentes da madeira: a celulose, as hemiceluloses e a lignina, além de sofrer influência dos extrativos e das suas características físicas e anatômicas. Compreendendo o comportamento desses componentes é possível compreender como se realiza a carbonização (CARNEIRO et al., 2011).

No processo de carbonização, os principais fatores que afetam o rendimento e as propriedades físicas e químicas do carvão obtido são: o tipo de forno, densidade da madeira que lhe deu origem, dimensão das peças, temperatura final de carbonização, velocidade de aquecimento, pressão e fluxos de gases (MENDES et al., 1982; CARNEIRO, 2013).

No Brasil há diversas tecnologias nos sistemas de conversão de madeira em carvão. Em geral, mais de 80% do carvão vegetal produzido, são oriundos de pequenos e médios produtores. A maior parte ainda é produzida em fornos de alvenaria rudimentar e de baixo rendimento, os quais não há controle da temperatura de carbonização e nem das emissões atmosféricas. Dentre estes fornos os que mais se destacam são do tipo “rabo-quente”, superfície e encosta (CARNEIRO et al., 2011). Segundo Brito (2010), atualmente 60% dos fornos utilizados são do tipo “rabo-quente”, 10% são fornos de superfície; 20% da produção ocorrem em fornos retangulares (grandes produtores e siderúrgicas a carvão vegetal) e os 10% restantes são realizadas por outras tecnologias.

Apesar de o país produzir a maior parte do carvão em fornos rudimentares, os grandes produtores e metal-siderúrgicos estão adotando o modelo de fornos retangulares devido à escassez de mão-de-obra e melhores condições de trabalho. De acordo com

Carneiro et al., (2011) existem disponíveis no mercado forno retangular que pode chegar até 700 st de madeira de enformamento, atingindo uma produção média em carvão de 350 mdc. Esses fornos apresentam rendimentos gravimétricos em carvão vegetal de 30 a 35%, em média, e são os mais avançados em uso atualmente no país. Segundo os autores, esse tipo de forno carboniza grandes volumes de madeira, possuem carregamento e descarregamento mecanizado, possibilidade de recuperação de alcatrão e queima de gases. Apesar da evolução nas dimensões e alta produtividade, o controle da carbonização em fornos retangulares, na maioria das vezes, ainda é feita de forma precária, baseando-se no empirismo, tais como: coloração da fumaça, temperaturas externas das paredes do forno, observação visuais das entradas de ar.

O diâmetro da madeira tem grande influência no tempo de secagem e de carbonização. O processo de secagem da madeira até um teor de umidade adequado (~30%) é uma das operações mais importantes na utilização da mesma. O tempo gasto para a secagem natural da madeira a ser carbonizada é muito variável, depende de fatores externo e inerentes à madeira. Tanto o tempo de secagem quanto o tempo de carbonização, serão processos mais demorados para madeiras com maiores diâmetros e mais rápido quando utilizar madeiras de menores diâmetros. Por razões de qualidade do carvão produzido o diâmetro ideal para carbonização é entre 10 a 20 cm. (CARNEIRO et al., 2011).

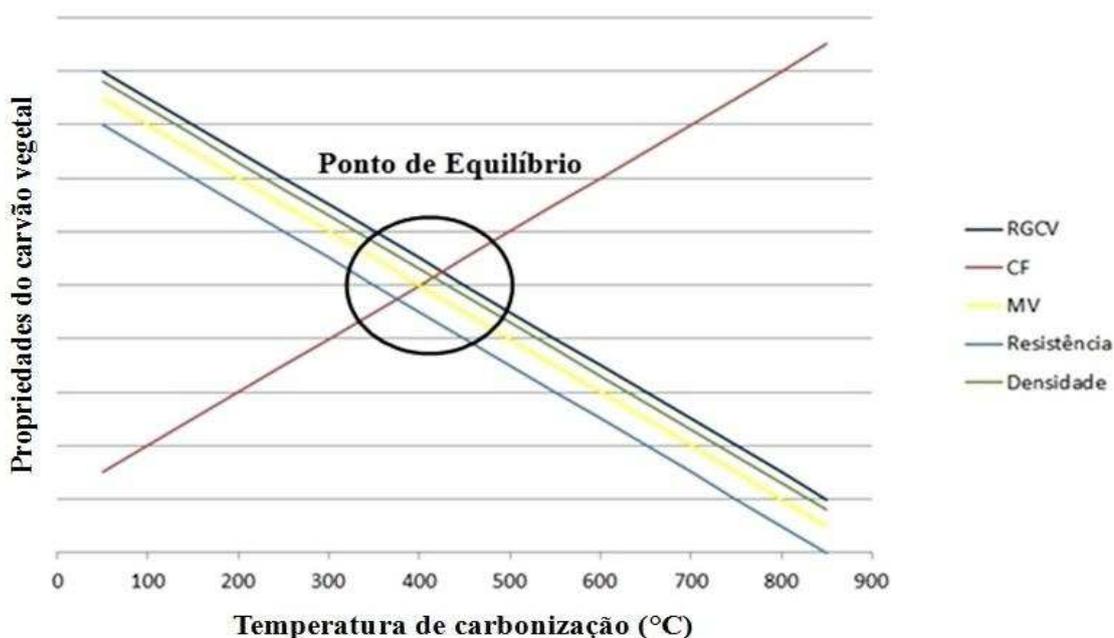
Em relação à temperatura de carbonização, o ideal seria entre 300 e 500°C. Nessa faixa ocorre uma perda de massa, devido à liberação de voláteis, sem, entretanto, ocorrer uma redução significativa nas dimensões do carvão. Portanto, um carvão produzido a 300°C é mais denso que um carvão produzido a 500°C. De 500 a 700°C ocorre uma maior perda de massa, porém ocorre uma contração bastante significativa nas dimensões do carvão vegetal. O efeito no volume é maior do que em perda de massa (OLIVEIRA et al., 1982 apud CARNEIRO et al., 2011). Portanto, a temperatura ideal ou temperatura máxima de carbonização seria em torno de 400°C, para manter um equilíbrio entre as propriedades do carvão.

De acordo com Raad et al. (2006) e Yang et al. (2007), a madeira quando é submetida a altas temperaturas, sofre diversas reações químicas e ocorrem uma decomposição térmica dos seus componentes (hemiceluloses, celulose e lignina), passando por um processo de carbonização, sob atmosfera inerte. Cada componente da madeira volatiliza mais intensamente em distintas faixas de temperatura. Segundo os autores, em relação a estes três componentes da madeira, a lignina possui a decomposição térmica mais difícil, ocorrendo de 160-900°C, com pouca perda de

massa, sendo o principal responsável pelo resíduo sólido gerado pelo processo de pirólise (OLIVEIRA et al., 1982). Segundo VITAL et al., (1986), a lignina é responsável por 55 a 60% do carvão produzido a uma temperatura máxima de carbonização de 500°C.

No processo de concentração de carbono a propriedades da madeira e a velocidade de aquecimento do processo de carbonização possuem grande influência nos rendimentos gravimétricos dos produtos e também no teor de carbono fixo do carvão vegetal (MENDES et al., 1982). O rendimento, em peso, do carbono fixo tende a cair quando a velocidade de aquecimento aumenta (OLIVEIRA et. al., 1982). Taxas mais elevada de aquecimento tendem a produzir um carvão mais friável. Isso é facilmente explicável pelo fato de a cinética de aquecimento ser mais intensa promovendo assim fissuras e trincas no carvão.

Para amenizar os efeitos da temperatura máxima de carbonização nas propriedades do carvão vegetal, Carneiro (2013), sugere estabelecer um ponto de equilíbrio. Neste ponto, é possível alterar e atender determinada propriedade para uma mesma temperatura, sendo necessário, melhorar a qualidade da madeira e controle de processo. Quanto maior a temperatura, maior o teor de carbono fixo (CF) e menor rendimento gravimétrico em carvão (RGCV), materiais voláteis (MV), resistência e densidade a granel (Figura 4). Salienta que a densidade básica da madeira é um dos parâmetros que permite atuar na densidade do carvão vegetal, pois, quanto maior a densidade da madeira, maior será a densidade do carvão produzido (BRITO E BARRICHELO 1979; MENDES et al., 1982).



Fonte: CARNEIRO (2013)

**Figura 4:** Efeito da temperatura nas propriedades do carvão vegetal.

Após a carbonização uma das técnicas mais utilizadas para avaliar a densidade do carvão são a densidade a granel e a densidade aparente. A densidade a granel do carvão vegetal é determinada de acordo com a norma ABNT NBR 6922/1981. A densidade a granel (bulk density) é o peso do carvão contido em uma caixa de 1 m<sup>3</sup>. O peso total subtraído do peso da caixa consiste no peso do carvão, por m<sup>3</sup>. O valor normalmente varia entre 160 a 300 Kg/m<sup>3</sup> (CARNEIRO et al., 2011). Esse método é mais simples e mais utilizado pelas siderurgias, porém, o seu valor pode ser afetado em função da granulometria do carvão, umidade do carvão e dimensões do recipiente utilizado na determinação do volume (MENDES et al., 1982).

A outra técnica de medição é determinada de acordo com a norma ABNT NBR 9165/1985. A densidade aparente do carvão vegetal consiste em medir o volume e peso de várias peças de carvão considerando os poros internos como ocupados pelo material carvão (CARNEIRO et al., 2011). Segundo a EMBRAPA FLORESTA (2000), madeira com maior densidade produz carvão com densidade aparente maior. Essa característica confere ao carvão maior resistência mecânica e maior capacidade calorífica por unidade de volume.

Para atingir maiores produtividades das indústrias metal-siderúrgicas a carvão vegetal é necessário utilizar matérias-primas florestais que apresentam elevados valores de densidade básica, baixo teor de minerais e altos teores de lignina, além de fibras com parede celular mais espessa (TRUGILHO et al., 1997; TRUGILHO et al., 2001; entre

outros *apud* REIS et al., 2012). Segundo Protásio et al. (2012), o rendimento gravimétrico em carvão vegetal está relacionado negativamente com o teor de holocelulose e positivamente com os teores de lignina, extrativos totais e com a densidade básica da madeira. No entanto, a densidade da madeira é influenciada por outros fatores como: quantidade de vasos e de parênquima, dimensão da fibra, da espécie e das condições ambientais (FOELKEL et al., 1990; *apud* RAAD, 2004).

Segundo Trugilho et al. (1997), as características mencionadas anteriormente são consideradas índices de qualidade da madeira para a produção de carvão vegetal, pois, quando destinado à siderurgia, este deve atender a um conjunto de parâmetros de qualidade, como teores de carbono fixo acima de 75% e de cinzas abaixo de 1,5%, conforme descrito na norma PMQ 3-03 (SÃO PAULO, 2003).

As características essenciais, destacadas pelas metal-siderúrgicas, são resistência mecânica, porcentagem de carbono fixo, densidade, granulometria, umidade, teor de cinzas, fração fina, voláteis, etc. Os percentuais de carbono fixo variam entre 75 a 80%, com granulometria variando entre 12 a 80 mm, quantidade de finos abaixo de 10% e de cinzas inferior a 2%. Além disso, é importante que o material seja de alta densidade (acima de 250 kg/m<sup>3</sup>) e que apresente baixa umidade (inferior a 8%) (GOMES, 2006; MME, 2008).

Na indústria siderúrgica, um dos problemas relacionado à utilização do carvão vegetal é sua alta variabilidade em qualidade, uma vez que o rendimento e a qualidade deste produto dependem da qualidade da madeira que lhe deu origem, do equipamento e das condições operacionais da carbonização (TRUGILHO et al., 2001; VIEIRA et al., 2013). Essa variabilidade ocasiona grande desperdício de matéria-prima, pois dificulta a operação dos altos fornos e também dos fornos a arco submerso.

### **3.3.1 Propriedades da madeira *versus* densidade do carvão**

Embora a madeira possa ter diversas destinações, cada uma delas exigindo propriedades específicas, o carvão vegetal requer como característica fundamental a densidade da madeira. Esta propriedade possui relação direta com a anatomia, proporção cerne/alburno (C/A), lenho inicial e tardio, posição na árvore, dentre outros.

A densidade básica da madeira constitui-se em uma das mais importantes características para identificar espécies produtoras de carvão de boa qualidade. Esta propriedade física é obtida a partir da relação entre massa absolutamente seca da madeira e o volume saturado, sendo expressa em g/cm<sup>3</sup> ou kg/m<sup>3</sup> (SANTOS, 2010).

Ainda que as madeiras das diversas espécies de *Eucalyptus* apresentem propriedades anatômicas semelhantes, Paula (2005) recomenda para a produção de carvão, madeiras caracterizadas pela presença de fibras com fração parede espessa acima de 60%, pois, essa característica que está aliada a ocorrência de alta densidade básica. Segundo Santos (2010), a espessura de parede das fibras influencia diretamente a densidade e indiretamente na conversão da madeira em carvão, pois, fibras de parede celular espessas apresenta maior volume de biomassa para sustentar a degradação térmica da madeira. Além da espessura, a densidade da madeira depende da proporção e quantidade de vasos e parênquimas radial e axial (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980 apud PEREIRA, 2012).

A lignina é um dos três polímeros básicos que constituem a madeira e tem função de rigidez e dureza que confere às paredes celulares onde está localizada, ou seja, é a lignina que dá rigidez e dureza ao conjunto de cadeia de celulose, conferindo coesão à madeira (BRITO & BARRICHELO, 1977). As ligninas possuem elevada resistência à degradação térmica, quando comparadas à celulose e às hemiceluloses, devido ao seu alto nível de aromaticidade, ao tamanho e ao arranjo de sua estrutura (HAYKIRI-ACMA et al., 2010 apud PEREIRA, 2012).

Por outro lado, a relação C/A contribui para a geração de finos, pois a carbonização ocorre da superfície para o interior da tora e a liberação dos gases originários durante o processo, rompem as células parenquimáticas, que possuem paredes menores e menos rígidas. Assim, quanto maior a porcentagem de cerne maior o caminho obstruído a ser percorrido e conseqüentemente, maior número de células rompidas. Vale salientar que essa diferença na densidade da madeira de cerne a albúrnio geralmente é verificada em árvores que possuem madeira adulta (PEREIRA, 2012).

De modo geral, recomenda-se o uso de madeiras com densidade básica superior a  $500 \text{ kg/m}^3$ , pois a partir da carbonização, geralmente, para as temperaturas finais de processo normalmente utilizada ( $450^\circ\text{C}$ ) tem-se uma perda de massa de 60%, e sendo a densidade uma relação entre massa e volume, obtém-se a exemplo de uma madeira com densidade de  $500 \text{ kg/m}^3$ , um carvão com densidade aparente de  $200 \text{ kg/mdc}$  (CARNEIRO et al., 2011).

De acordo com Brito (1993), quanto maior a densidade básica da madeira, maior será a produção em massa em carvão vegetal, para um determinado volume de madeira enforada. Além disso, maior densidade da madeira resultará em maior densidade de carvão vegetal apresentando maior resistência mecânica, propriedades estas almejadas na maioria do uso aos quais se prestam esse insumo.

Trabalho desenvolvido por Oliveira (1988), citado por Carneiro (2008), procurando correlacionar a densidade da madeira de *Eucalyptus* e outros parâmetros químicos e anatômicos para a produção de carvão mostra que as madeiras de maior densidade produzem carvão mais denso e que o aumento de extrativos e de lignina resulta em aumento proporcional na densidade da madeira.

O carvão vegetal destinado a metal-siderúrgica deve possuir maior teor de materiais voláteis, alto teor de carbono fixo, baixo teores de cinzas e enxofre. Todavia, os teores desses constituintes são influenciados principalmente pelo processo de carbonização da madeira. Nesse sentido, a temperatura e o tempo de carbonização são os principais parâmetros que regulam as propriedades químicas do carvão vegetal (RAAD, 2004).

Apesar das propriedades da madeira exercerem influência sobre a qualidade do carvão vegetal em aspectos como porosidade, composição química, densidade, poder calorífico, entre outros, muitas vezes elas não são consideradas na determinação da idade de corte e na seleção de materiais para o melhoramento genético (VIEIRA et al., 2013). Estudo realizado por Alencar (2002) verificou que a densidade da madeira de híbrido *E. grandis* x *E. urophylla* nas idades de um a sete anos, também é influenciada pela idade. De modo geral, os estudos concluíram que madeira mais jovem apresenta menores valores de massa específica básica em relação a madeiras adultas, o que é amplamente abordado na literatura.

O carvão vegetal é um insumo energético com propriedades físicas e químicas extremamente variáveis e, conseqüentemente, deve ser rotineiramente submetido a testes avaliativos de qualidade. No entanto, é necessário ressaltar que o termo “carvão de boa qualidade” é muito genérico, ou seja, para determinar a qualidade do carvão vegetal para fins siderúrgicos, é necessário determinar a resistência a compressão, haja vista que, quanto menor for a resistência, maior será a geração de finos e de pó (moinha) durante o manuseio, no transporte e na utilização do carvão. (ANDRADE e DELLA LUCIA, 1995). De modo geral, um carvão vegetal para uso siderúrgico deve ser fisicamente denso, pouco friável, de granulometria uniforme e suficientemente resistente à compressão.

Ressalva-se que a densidade da madeira é uma propriedade que afeta a capacidade de produção das plantas de carbonização, ou seja, é responsável por armazenar maior energia por unidade de volume, reduzir os custos de colheita e transporte em função do menor volume, aumentar a capacidade de produção dos fornos e reduzir a demanda por mão-de-obra (CARNEIRO, 2013).

### 3.4 Panorama da produção das ferro-ligas e do Silício Metálico

As ligas metálicas são materiais com propriedades metálicas que contêm dois ou mais elementos químicos, sendo que pelo menos um deles é metal. Há ligas formadas somente por metais e outras formadas por metais e semimetais (boro, silício, arsênio, antimônio). Apesar da grande variedade de metais existentes e variações de tipos de ligas, a maioria não é empregada em estado puro (LEITE et al., 2010).

As ferro-ligas, como o próprio nome diz, são ligas de ferro com outros elementos químicos, como manganês, silício, cromo, níquel, nióbio, entre outros. Na siderurgia, são matérias-primas fundamentais e sua falta impossibilitaria a produção de vários produtos siderúrgicos (LEITE et al., 2010; ABRAFE, 2013). Na maior parte das vezes recorre-se à liga para proporcionar aos metais determinadas propriedades mecânicas, térmicas, elétricas, magnéticas ou anticorrosivas (FEMA, 2010). Segundo a CVRD (1995), as ferro-ligas são ligas que contem alta porcentagem de um ou mais metais, além de ferro (Fe), obtida pela fusão e redução de minérios contendo estes metais e são amplamente utilizadas pelas indústrias siderúrgicas para melhorar a qualidade do aço.

O Silício Metálico (Si-met.) é um semimetal que usualmente é classificado no grupo de ferro-ligas, apesar de não ser uma liga, por ter processo industrial e aplicações semelhantes (FEMA, 2010). O Silício Metálico é produzido a partir de quartzo (ametal ou semicondutor) preferencialmente de alta pureza, fundindo com agentes carbonáceos redutores e que possuem uma quantidade de silício em torno de 96 a 99% (MORALES, 2003; SEO, 1997; FEMA, 2010).

Segundo Mendes (2003), o Silício Metálico é classificado como silício grau metalúrgico (Si-GM) que é obtido a partir da redução carbotérmica de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) em altas temperaturas em fornos de arco submerso, onde, a demanda por energia elétrica está em torno de 13 a 15 kWh/Kg de Silício Metálico produzido. A pureza do Si-GM comercial varia de 98 a 99,5%. Neste nível de pureza, o uso é limitado e utilizado apenas como elemento de adição em ligas de aço e alumínio.

O silício é utilizado como elemento de liga nas indústrias siderúrgicas e metalúrgicas (Si-GM), e para que possa atingir aplicações mais “nobres”, de maior valor agregado, o Si-GM deve passar por um processo de refinamento e purificação para a obtenção de outras formas de Si (MENDES, 2003).

Dessa maneira, o silício de grau químico (Si-GQ) é direcionado para produção de silanos de onde deriva a família de silicones, lubrificantes, plastômeros, agentes

antiespumantes e compostos repelentes a água. Os silícios mais purificados são: o de grau solar (Si-GS), que é fonte primária de silício para painéis solares e o silício grau eletrônico (Si-GE), para componentes eletrônicos como chips para computadores (SEO, 1997; MME, 2009; SINDIEXTRA, 2012).

O Si-GM produzido no Brasil é de ótima qualidade, ao nível de ser considerado um dos melhores do mundo, devido a alta qualidade da matéria-prima nacional (quartzo e carvão vegetal) (MENDES, 2003).

A capacidade instalada da produção de ferro ligas no País gira em torno de 1,4 milhões de toneladas anuais e é composta por diversos tipos de ligas. São cerca de 0,5 milhões t/ano de ligas à base de manganês, 0,2 milhões t/ano de ligas à base de silício, 0,3 milhões t/ano de Silício Metálico, 0,2 milhões t/ano de ligas à base de cromo, e 0,2 milhões t/ano de outras ligas (incluindo o níquel) (EPE, 2011).

Apesar de o Brasil produzir diversos tipos de ferro-ligas como Ferro-Manganês (FeMn); Ferro-Nióbio (FeNb); Ferro-Níquel (FeNi), Ferro-Silício-Manganês (FeSiMn) entre outras, o país é o terceiro maior produtor mundial de Silício Metálico. O estado de Minas Gerais é o maior produtor brasileiro, sendo responsável por 78% da produção nacional. Os maiores produtores mundiais são pela ordem China, Noruega, Brasil e Rússia (SINDIEXTRA, 2012).

A produção brasileira de Silício Metálico em 2010 cresceu 20% sobre o ano anterior e atingiu 184 mil toneladas. Apesar deste crescimento a produção de 2010 foi 16% menor que a de 2008. O consumo aparente brasileiro é apenas 6,5% da produção brasileira e reduziu mais de 70% em relação a 2008. Já as exportações foram o destino de 97% da produção nacional de Silício Metálico, sendo os Estados Unidos o maior comprador do Brasil. O setor de alumínio e a indústria química são os principais mercados para o Silício Metálico (SINDIEXTRA, 2012).

Os principais produtores de Silício Metálico no Brasil são: Dow Corning, Liasa e Minas Ligas no estado de Minas Gerais e a Dow Corning do Pará; A Dow Corning destina 85% da sua produção de Silício Metálico para a produção de silicone (SINDIEXTRA, 2012).

Segundo a FEMA (2010) a produção mensal do silício no país destaca-se em torno de 15.320 t/mês e o consumo específico de energia elétrica para sua produção correspondeu a 16,6 MWh/t de Silício Metálico. Em termos percentuais, cerca de 90% de toda a produção deste metal é voltada para o mercado externo.

### 3.4.1 O Processo de produção de Si-met. a carvão vegetal

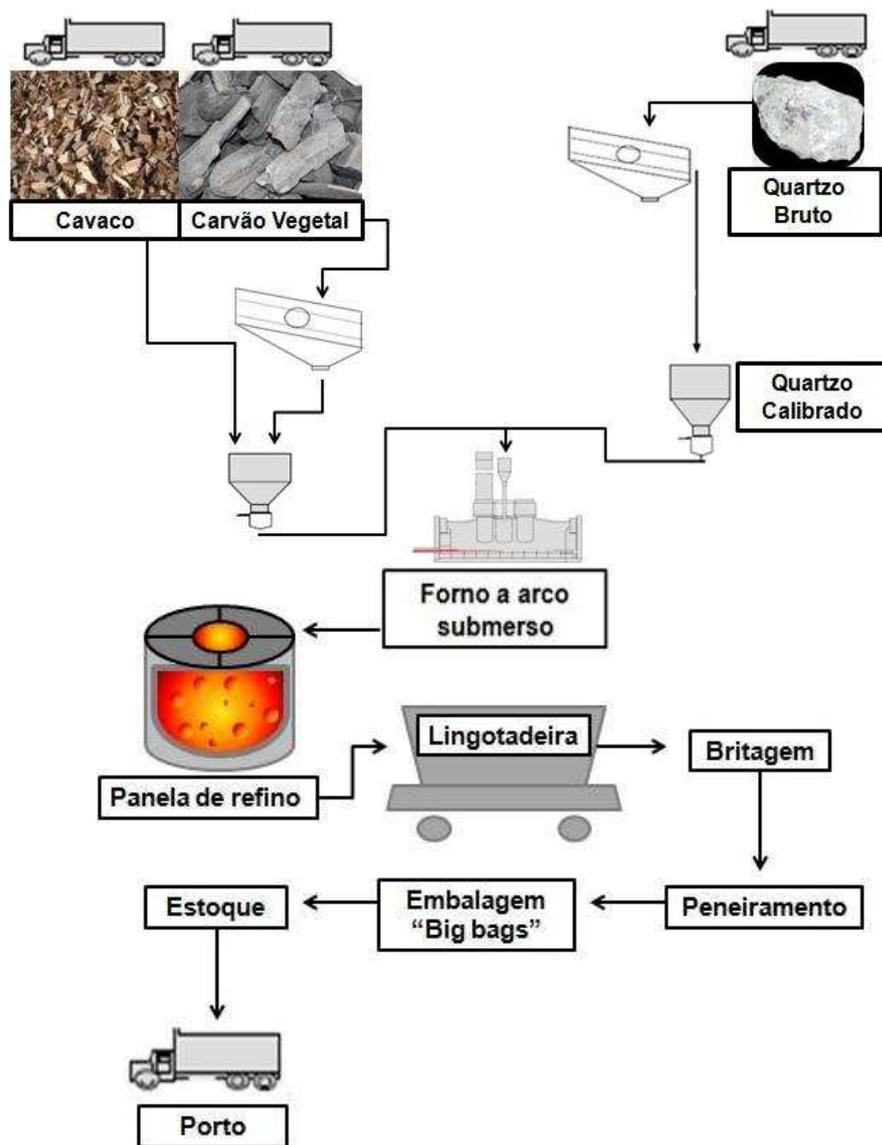
Como o uso do carvão vegetal na fabricação do Silício Metálico ainda não é abordado na literatura foi esquematizado um fluxograma geral de produção para melhor entendimento do processo (Figura 5).

De acordo com os profissionais do setor, na produção de Si-Met as matérias-primas chegam em caminhões e passam por processo de lavagem e classificação. O quartzo (fonte de silício) é lavado, peneirado e classificado em granulometria em torno de 10 cm. O carvão vegetal (reductor) é peneirado e classificado com granulometria entre 10-15 cm e o cavaco de madeira (porosidade da carga e fluidez dos gases de redução) é utilizado com umidade acima de 30%.

No sistema de alimentação do forno há um sistema de dosagem que deposita a mistura em um silo. De acordo com cada proporção de matéria-prima, a mistura é transportada por um conjunto de caçambas que abastece o forno. Cada caçamba possui uma capacidade de carga de 140 kg.

Durante o processo de produção do silício, o material é escoado do forno de redução e transferido para as vasilhas de transferências ou painelas de refino que são ligeiramente cônicas. A panela é equipada com uma tampa removível, a fim de reduzir as perdas de calor através de radiação, porém ela possui uma abertura elíptica onde o material fundido é vazado na panela (MENDES, 2003). Ao contrário da escória do gusa, que flutua sobre o gusa líquido, a escória do silício composta de quartzo fundido e óxidos, é depositada no fundo da panela por diferença de densidade.

Ao final do processo de refino, a tampa da panela é removida e o conteúdo líquido é escoado para as lingoteiras para o resfriamento e solidificação. A fase de escamento é muito dependente da experiência do operador. Caso, o operador incline a panela rapidamente, a escória que está no fundo pode vir a escoar junto com o silício, prejudicando o produto principal. Em seguida, o material passa pela britagem, peneiramento, embalagem e estocagem para ser expedido. O tempo necessário para produzir o Si-Met. é de aproximadamente quatro minutos. Em 24 horas um forno, recebe 360 cargas distribuídas em quatro turnos de seis horas.



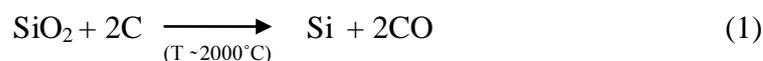
Fonte: ISBAEX (2014)

**Figura 5:** Fluxograma geral de produção do Silício Metálico.

O silício comercial (grau metalúrgico (Si-GM)) é obtido a partir do processo de redução conhecido como carbotérmico. Este método é mais usual em função do redutor utilizado que caracteriza pela redução do quartzo (sílica) pelo carbono, proveniente do carvão vegetal. O emprego dos agentes redutores carbonáceos tem a finalidade de condutor de corrente elétrica, garantindo a passagem da corrente através da carga, ou seja, proporcionar um leito poroso para facilitar as reações desejadas e fonte de carbono ativo para a reação de redução (MENDES, 2003).

No processo carbotérmico, a absorção de calor exige que seja realizado com aporte de calor externo. Este aporte é feito com energia elétrica, empregado no equipamento conhecido como forno arco voltaico submerso que atinge temperatura

superior a 1900°C. A reação global da redução do dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>) a Silício Metálico (Si), pode ser representada pela reação 1 (MENDES, 2003; MORALES, 2003; MORI et al., 2007; MME, 2009).



Contudo, há dezenas de reações intermediárias acontecendo simultaneamente no banho que compõem a reação 1 acima. Entre elas ressaltam-se aquelas mais favoráveis às formações gasosas de SiO (óxido de silício) e CO (monóxido de carbono) (FILSINGER et al. 1990; NAYAK et al. 1996 apud MORALES, 2003) que constituem os produtos intermediários do processo de carboredução, a saber:

Segundo o mesmo autor, a relação estequiométrica básica de formação de SiO:



Gases ricos em SiO interagindo com o carbono redutor para formar SiC (Carbeto de Silício):



#### **3.4.1.1 Matérias-primas para produção de Si-met.**

As principais matérias-primas utilizadas na produção de Silício Metálico são os minerais de quartzo, redutores (carvão vegetal), eletrodos e energia elétrica.

Para compor uma carga dentro de um forno, a matéria-prima recebe uma classificação eficiente dos componentes individuais da carga. Uma carga bem classificada apresenta reduzida tendência de segregação. Além disso, outro fator avaliado é a resistência à degradação, que permite obter uma distribuição uniforme do fluxo de gás em qualquer seção transversal do forno, o que proporciona melhor pré-aquecimento da carga pelo gás ascendente, assim como, um maior contato gás-sólido (FEMA, 2010). Para produzir ferro-ligas e Si-met., com vistas à homogeneidade química do produto final, exige uma rígida classificação química e granulométrica das matérias-primas empregadas (LEITE, et al.; 2010).

Tipicamente, para cada 1 kg de silício grau metalúrgico produzido, se utilizam em média 0,1-0,12 kg de eletrodo, com demanda energética estimada em 13 KWh/kg. Os valores obtidos neste trabalho foram próximos aos geralmente citados na literatura.

O rendimento máximo em Si-GM em relação à massa de quartzo alimentado no forno é de aproximadamente 80%, já incluso o silício retido nas escórias, que pode atingir acima de 30% do peso da escória (MORALES, 2003).

A principal característica da matéria-prima utilizada no processo de produção de Si-met. está relacionada com a granulometria. A granulometria da matéria-prima deve ser ajustada para que os gases gerados na reação atravessem a fase sólida de maneira uniforme. Além disso, a matéria-prima também deve ser escolhida conforme a quantidade máxima de óxidos (impurezas) especificada para o produto. Dessas impurezas, as principais são  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , e  $\text{MgO}$ . O redutor utilizado deve ser seco a menos de 2% de umidade e deve conter menos que 15% de cinzas (FEMA, 2010).

No entanto, a definição da carga está diretamente relacionada com a resistência mecânica, crepitação e degradação sob redução, ou seja, as propriedades da carga estão relacionadas com a quantidade de finos gerados por esforço mecânico, choque térmico e por ação química do gás, respectivamente. Estas três propriedades relacionadas à geração de finos, prejudica o escoamento gasoso por causar a formação de caminhos preferenciais que impede o gás de reagir com toda carga (CVRD, 1995).

Outro fator importante no processo produtivo de Silício Metálico esta relacionado aos custos da matéria-prima. O carvão vegetal e a energia elétrica são os insumos com mais participação, devido à tecnologia do processo. Na indústria siderúrgica o carvão vegetal representa cerca de 40% dos custos de produção (SANTOS, 2008 *apud* VIEIRA et al., 2013). E na indústria de Si-GM, mesmo que consiga agregar um valor significativo aos seus produtos de exportação, a energia elétrica representa, em média, 30% dos custos variáveis (MENDES, 2003). Suspeita-se que este custo pode estar intimamente ligado com a variação da densidade a granel do carvão vegetal utilizada no processo. Porém, não foi encontrada literatura que representasse os custos de produção de ferro-ligas ou de Si-met. relacionados com essa variação.

Dessa forma, as matérias-primas devem seguir alguns requisitos para garantir uma boa operação no forno. Cada componente individual da carga deve atender a uma faixa granulométrica com diâmetro médio adequado; elevada resistência à degradação sob os pontos de vista de abrasão, queda, crepitação e redução; elevada resistividade elétrica mesmo em altas temperaturas (FEMA, 2010).

## a) Quartzo

O quartzo é o mineral de onde se extrai o silício. O Silício é um elemento químico pertencente ao grupo do carbono, de símbolo Si, isolado pelo sueco Jöns Jacob Berzelius, em 1824. Não é encontrado, normalmente, em estado puro na natureza. Em estado livre, o silício é um sólido cinza-escuro, duro, de brilho metálico e estrutura cristalina semelhante à do diamante. O ponto de ebulição do silício é de 2.355° C e sua densidade é de 2,42 g/cm<sup>3</sup> (MORI et al., 2007).

O dióxido de silício, vulgarmente chamado de sílica que ocorre na natureza, se apresenta em três formas cristalinas distintas: quartzo, tridimita e cristobalita, sendo que, estas duas últimas, encontram-se em rochas vulcânicas e não têm aplicações industriais. O quartzo é muito comum e ocorre no granito, na areia e em arenitos. Sua presença na crosta terrestre é estimada em tomo de 25 a 28%, o que o torna o segundo elemento mais abundante, superado apenas pelo oxigênio (MORCELLI, 2002).

Segundo Seo (1997), os depósitos minerais de silício encontram-se distribuídos em toda a crosta terrestre, principalmente na forma de sílica (SiO<sub>2</sub>) e de silicatos. Sob a forma de sílica é encontrada em quartzitos, areias silicosas e em numerosas variedades cristalinas, geralmente, de quartzo, tridimita, cristobalita e coesita.

O quartzo é utilizado na produção de Ferro-Silício, Silício Metálico e cálcio-silício, e ele pertence à classe mineralógica dos silicatos, sendo sua fórmula molecular a do dióxido de silício (SiO<sub>2</sub>), cuja composição é de 46,75% silício e 53,25% de oxigênio, em porcentagem de massa. O teor de sílica deve ser  $\geq 97\%$ ; com baixos teores de CaO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\leq 0,5\%$ ); baixo teor de ferro, quando se desejar produzir ligas com altos teores de silício (Si  $\geq 90\%$ ) e granulometria dentro de uma faixa de 19 – 28 mm (CVRD, 1995).

Na produção de Silício Metálico um dos problemas relacionados com deficiência de sílica está na formação SiC (carbeto de silício) denominado *carborundum*. O *carborundum* é formado nas reações intermediárias que ocorrem dentro do forno e é altamente refratário.

Ao formar em zonas laterais do forno, se não for levado a região de altas temperaturas, o SiC pode ser decomposto pela sílica, formando uma crosta de difícil remoção. Mas se houver deficiência de sílica, o SiC poderá ir ao fundo da cuba formando perigosas crostas de fundos que são muito condutoras, forçando os eletrodos a subirem na carga (para manter a queda de tensão) piorando ainda mais a operação pelas perdas de calor (energia) por radiação. Se não for controlada essa situação a tempo, o

fenômeno poderá levar a necessidade de parada total do forno para a remoção da carga (MENDES, 2003).

#### **b) Carvão vegetal e cavaco de madeira**

A escolha do agente redutor, assim como, a combinação entre os redutores é de grande importância para uma boa operação do forno. Os agentes redutores utilizados na redução carbotérmica são o cavaco de madeira e o carvão vegetal ou coque.

A função principal do carvão vegetal é agir como um redutor, ou seja, para reagir com o óxido do metal e para formar monóxido de carbono. O cavaco de madeira também age como redutor, mas a função principal é gerar porosidade na carga.

A fonte de carbono aumenta a permeabilidade da carga que conduz a uma melhor distribuição do gás. Na produção de ligas de ferro silício, eles agem como um filtro de gás que preserva a matéria e a energia. Além disso, eles melhoram a resistência elétrica do fardo e do funcionamento do forno (SAHAJWALLA et al., 2004). Segundo os autores, a disponibilidade, propriedades e custo dos materiais de redução são os principais fatores na determinação da escolha e aplicação da fonte de carbono em processamento de ferro-ligas e de Silício Metálico.

As propriedades do carvão vegetal estão intimamente ligadas aos parâmetros do processo de produção e da matéria-prima que lhe deu origem. Considerando que cada minério a ser reduzido, devido as suas características, poderá necessitar de um redutor com determinadas propriedades, torna-se, de grande importância o conhecimento de como se pode atuar, durante a fabricação, nas propriedades do carvão vegetal (MENDES et al., 1982).

O rendimento na produção de carvão é maximizado com o uso de madeira mais densa, de maior poder calorífico e constituição química adequada, resultando também em carvão de melhor qualidade (PALUDZYSYN FILHO, 2008). As referências de um carvão de qualidade almejadas pela metal-siderúrgicas são: granulometria de 4-5 cm; carbono fixo de 75-80%; umidade menor que 8%; cinzas entre 1-2%; densidade maior que 240 kg/m<sup>3</sup>; geração de finos abaixo que 12 mm entre 10-17%; voláteis menores que 25% e ser resistente (GOMES, 2006).

Os profissionais entrevistados comentaram que a densidade, resistência mecânica e granulometria do carvão vegetal são de grande relevância para sintonizar a operação do forno em termos de produtividade. É importante que o carvão seja pesado, resistente e com uma granulometria parecida com a do quartzo. Nessa configuração, o redutor não

se desintegra antes do quartzo e permite que ele seja preservado dentro do circuito, desde o transporte até o forno.

Na produção de silício metálico pode ser usado o coque de petróleo, que possui baixo teor de impurezas, porém apresenta baixa reatividade. Segundo CVRD (1995), o emprego do coque implica em redução da produção, pois, reduz a resistividade elétrica da carga e fator de potencia, além de aumentar o volume de escória e o consumo específico de energia elétrica. As cargas com carvão vegetal apresentam uma resistividade maior, trazendo benefícios de aumento da produção com um menor volume de escória, conseguindo-se, deste modo, uma economia global de energia elétrica.

Em comparação aos combustíveis fósseis, o carvão vegetal é um combustível renovável e recurso sustentável. Aplicações de carvão vegetal na siderurgia são considerados como tecnologia limpa, devido à redução dos níveis de CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>. (SAHAJWALLA et al., 2004).

Além dessas vantagens, o carvão vegetal é um produto de fontes renováveis que proporciona uma liga ou um Si-met de maior qualidade, por possuir baixa concentração de enxofre e menores concentrações de contaminantes. Como desvantagem, a presença de fósforo no carvão vegetal representa uma contaminação indesejável no processo de purificação do silício (ANDRADE et al., 1999). Para proporcionar uma liga de maior pureza, o ideal seria carbonizar madeira descascada, visto que, a maior concentração de fósforo esta na casca.

Em aplicações mais nobres do silício (p.ex., para a indústria de semicondutores), o boro e o fósforo, estão entre as impurezas críticas e de mais difícil remoção (STANLEY, 1984; MORALES, 2001; SUZUKI, 1992 *apud* MENDES, 2003). Segundo o mesmo autor, as impurezas de pequeno número atômico como Mg, Na, K e Ca são encontradas em menores concentrações no silício resultante. O carbono é outra impureza de maior concentração presentes no Si-GM, sendo a sua presença decorrente do próprio processo de carboredução. O carvão vegetal geralmente contribui com maior parte desta impureza (MENDES 2003).

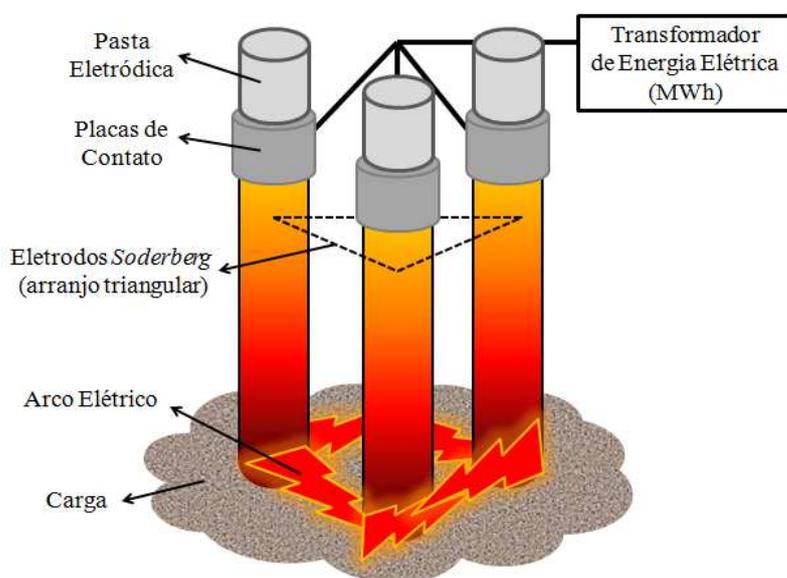
No entanto, os gargalos na produção de Silício Metálico estão relacionados com a qualidade do carvão vegetal. Há uma grande necessidade de trabalhar com um carvão mais denso e menos friável para suportar a carga metálica e a diferença de densidade entre os componentes da mistura para manter a estabilidade do forno.

### c) Eletrodos

Os eletrodos são utilizados para produção dos arcos voltáicos nos fornos elétrico, podendo ser utilizados eletrodos de grafite, eletrodos amorfos de carbono ou eletrodos *Soderberg* (FEMA, 2010).

O arco elétrico é um tipo de descarga elétrica na qual a corrente passa através de um gás ionizado, vapores de metais e óxidos. Ele é formado quando três eletrodos, ligados a uma fonte de energia elétrica, são colocados em contato entre si e, em seguida, afastados um do outro, ou então colocados em contato com a carga e logo depois afastados desta. À medida que esses eletrodos se tornam mais distantes, a resistência nos pontos de contato aumenta, elevando a potência liberada, resultando na formação do arco elétrico que produz altas temperaturas, disponibilizadas para que as reações do processo ocorram (FEMA, 2010).

O arco elétrico de corrente trifásica passa de eletrodo para eletrodo através da carga que derrete e reage para formar o produto desejado quando a energia elétrica é convertida em calor. Normalmente, três eletrodos de carbono arranjado em uma formação triangular estendem-se através da abertura do forno. Após receber a eletricidade por meio de placas de contato a pasta eletródica é denominada eletrodos pré-fabricados ou eletrodos *Soderberg* com diâmetro variando entre 76 a 100 cm (FEMA, 2010) (Figura 6). O triângulo formado pelos eletrodos está inscrito em um círculo cujo diâmetro é chamado “diâmetro do círculo primitivo” e é estabelecido em função da ferro-liga que se deseja produzir (CVRD, 1995).



Fonte: ISBAEX, (2014)

**Figura 6:** Esquema de um conjunto de eletrodos *Soderberg*.

Os eletrodos *Soderberg* consistem em uma “camisa”, um invólucro de aço macio ou aço inoxidável, reforçada internamente e preenchida com uma pasta carbonácea, geralmente, antracita calcinada e uma pasta de carvão *tap pitch*. Quando aquecido o alcatrão torna-se plástico e preenche todo o volume da camisa. Por aquecimento dentro do forno a pasta é cozida e torna-se sólida (FEMA, 2010).

Segundo MME (2009), no caso do Silício Metálico, este eletrodo é, na maioria dos casos, de carbono amorfo, previamente cozido. Em todos os demais casos, os eletrodos são formados a partir de uma mistura pastosa, constituída de coque de petróleo e piche. Esta mistura, quando aquecida, sofre uma destilação e, em temperaturas mais elevadas, completa o cozimento e se consolida. À medida que os eletrodos se consomem, mais pasta é adicionada no topo, assegurando a continuidade do processo.

A elevada resistividade elétrica da carga é importante para se obter uma mais profunda imersão das extremidades dos eletrodos na carga, melhor distribuição de energia no forno e aproveitamento maior da capacidade dos eletrodos em transportar a corrente elétrica (FEMA, 2010). No entanto, os pontos chave para reduzir os custos de operação com os eletrodos *Soderberg*, estão relacionados com a experiência do operador e o balanço de carbono dentro do forno (FEMA, 2010).

#### **d) Energia elétrica**

A produção de Silício Metálico é uma atividade que consome uma significativa quantidade de energia elétrica em relação aos outros tipos de ferro-ligas. Seu consumo de energia é cerca de 11 a 14MWh/t de silício produzido (Tabela 1). Em Minas Gerais, o consumo de energia para a produção deste silício é de 253,6 GWh/mês, ou seja, 64% do total de energia elétrica demandada pelo setor de ferro-ligas em Minas Gerais (FEMA, 2010).

A potência elétrica necessária nos fornos a arco se situa entre algumas centenas de kW até cerca de 100 MW. O rendimento global é elevado e o consumo específico varia consideravelmente com o tipo de forno, o produto e a forma de operação do forno, (FEMA, 2010).

**Tabela 1** - Consumo específico de energia para diversos produtos dos fornos a arco submerso

<b>PRODUTO</b>	<b>ENERGIA (kWh/t)</b>
Ferro-Manganês (padrão)	2.800 - 3.200
Ferro-Cromo (4-6% C)	4.000 - 6.000
Silício-Cromo	5.500 - 6.500
Ferro-Silício (75% Si)	8.500 - 10.000
<b>Silício Metálico</b>	<b>11.000 - 14.000</b>
Carbureto de Cálcio	2.800 - 3.200
Gusa	2.200 - 2.800

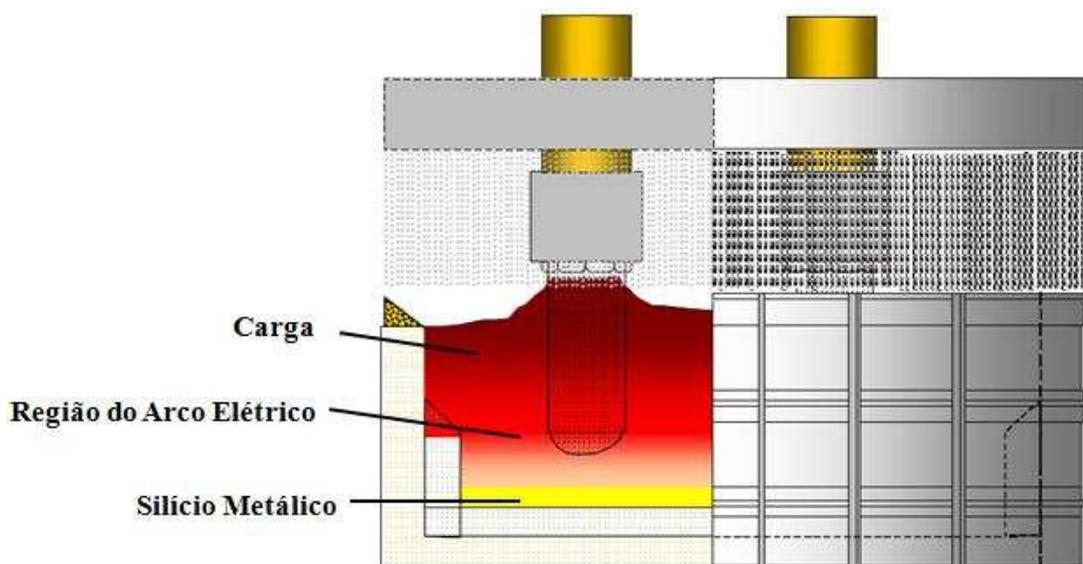
Fonte: FEMA (2010)

De modo geral, os segmentos das ligas e de silício possuem, como característica marcante, o fato de ser o maior consumidor energético entre as principais ferro-ligas. A produção de silício necessita de aproximadamente 12 mil kWh por tonelada de liga acabada, o equivalente a cinco vezes o que é demandado para a produção de ferro-manganês (FEMA, 2010).

### 3.4.2 Características elétricas do forno a arco submerso

Uma tecnologia muito utilizada no Brasil para produção de Ferro-Silício (Fe-Si) e Silício Metálico é a do forno elétrico de abertura superior a arco submerso, pois, os processos de fabricação são semelhantes.

O aquecimento do forno é feito por meio de três eletrodos (sistema trifásico), que são inseridos na carga (Figura 7). O aquecimento da carga é obtido por uma corrente que passa entre os eletrodos de grafite suspensos. Internamente o aparelho é todo revestido por material refratário e possui forma de xícara ou panela. Os gases gerados no processo são exauridos via coifa, montada sobre o forno (MME, 2009).



Fonte: MME (2009) adaptado

**Figura 7:** A configuração típica de um forno elétrico de abertura superior a arco submerso.

Uma corrente alternada aplicada aos eletrodos provoca o fluxo de corrente através da carga entre as pontas dos eletrodos. Isso proporciona uma zona de reação com temperaturas de até 2000°C. A ponta de cada eletrodo muda de polaridade continuamente com os fluxos da corrente alternada entre as pontas. Para manter uma carga elétrica uniforme, a profundidade dos eletrodos é variada continuamente por meios mecânicos ou hidráulicos (FEMA, 2010). Segundo Morcelli (2002), as reações ocorrem entre 1800 - 2000°C e envolve algumas reações intermediárias.

Um das reações é a formação do monóxido de silício que se converte novamente em sílica quando em contato com a atmosfera oxidante dentro do forno (MORCELLI, 2002).

Segundo Morales (2003), a ativação térmica da carga contendo a mistura de  $\text{SiO}_2$  e carbonáceos gera importantes fases gasosas intermediárias à reação, que dentre as principais se destaca o monóxido de silício [ $\text{SiO (g)}$ ], monóxido de carbono [ $\text{CO (g)}$ ] e em menor quantidade o dióxido de carbono [ $\text{CO}_2 \text{ (g)}$ ]. A reatividade entre tais fases, promovidas em ambientes apropriadamente reativos, sobretudo quanto às condições ideais de temperatura, pressão e tempo de residência, resultará na formação do Si e SiC (carbeto de silício ou carborundum). Em altas temperaturas o  $\text{SiO}_2$  e o SiC, também formam gases de Si e CO e Silício Metálico (MENDES, 2003).

O gás deve deixar o forno através da carga onde ele é esfriado. O SiO no gás reagirá com o carbono na carga e/ou condensará ou será expelido do forno. Por isso que

é fundamental importância para o funcionamento do forno que a carga seja porosa (MENDES, 2003).

Outra reação importante é a de *boundouvard*, que envolve a gaseificação do carbono presente no carvão vegetal. Esta reação produz o gás redutor, monóxido de carbono, a partir de dióxido de carbono produzido na redução de minérios, consumindo calor (FEMA, 2010). O material carbonáceo na carga do forno reage com o oxigênio dos óxidos metálicos da carga e reduz estes óxidos para o metal. A reação produz grandes quantidades de monóxido de carbono que passam através da carga do forno, Si e Silício Metálico. O metal fundido e a escória são removidos por meio de um ou mais orifícios (MENDES, 2003; MME, 2009).

O silício fundido retirado do forno possui tipicamente 98,5% em massa de silício, o restante é constituído por escória. Em síntese, pode considerar que no início do ciclo de redução a quantidade dessas impurezas está diretamente relacionada com a qualidade do quartzo e do carvão. O silício obtido contém um significativo nível de impurezas (MORCELLI, 2002; MENDES, 2003).

No processo de produção de ferro-ligas, o arco está submerso na carga e flui entre o eletrodo de carbono e a liga. Os pontos de fusão e vaporização de todos os elementos numa liga são muito inferiores à temperatura do arco. Portanto, vapores de todos os elementos de uma liga estão sempre presentes na atmosfera dele (FEMA, 2010).

Dessa forma, uma das vantagens do forno aberto é que seu design é simples, apresenta menor custo de investimento e de manutenção e controle operacional é mais flexível, pode-se utilizar com quase todas as matérias-primas e produz água quente. No entanto, os fornos abertos consomem uma grande quantidade de energia elétrica, não recupera calor exceto pela água quente e causam alto impacto ambiental devido ao volume dos gases de saída e o aquecimento do ar ambiente (FEMA, 2010).

### **3.4.3 As consequências do uso do carvão de baixa densidade na produção do Si-Met.**

As principais consequências no processo produtivo do Si-Met quando se usa carvão de baixa densidade (abaixo de 250 kg/mdc) são: maior consumo de eletrodo e de energia por tonelada de silício produzido, maior geração de escórias e menor eficiência do forno, haja vista a ocupação do mesmo com maior volume de carvão que quartzo.

Um carvão com menor densidade, além de ocupar um volume maior dentro do forno, deixa de disponibilizar a quantidade necessária de carbono para realizar a reação

global de redução. A panela do forno é ocupada mais por carvão do que por quartzo. Segundo os profissionais, um carvão de menor densidade proporciona um balanço inadequado de carbono, que aliado à falta de resistência do carvão, tende a criar uma camada impermeável que causa instabilidade do arco elétrico, maior consumo de eletrodo e energia por tonelada de silício produzido. Com isso, é necessário adicionar uma carga extra de quartzo entre os eletrodos para equilibrar a resistência elétrica da carga. Dessa forma, o quartzo adicionado não é capaz de ser reduzido totalmente, gerando escória de quartzo fundido. Segundo Andrade et al., (1999), o teor adequado de carbono contido no carvão proporciona maior resistividade elétrica reduzindo o consumo de energia e geração de escória.

No caso da utilização do carvão vegetal em siderurgia, a densidade é uma propriedade bastante importante, pois, segundo Gomes & Oliveira (1980) citado por Brito et al. (1982) ela determina o volume ocupado pelo redutor no alto forno. Segundo estes mesmos autores, não havendo prejuízo para as outras propriedades, a densidade do carvão vegetal deve ser a maior possível.

O processo de redução do quartzo é altamente dependente do balanço de carbono da carga, conduções de temperatura das várias partes do forno e muito dependente da tensão, de corrente, da resistividade da carga, da posição dos eletrodos, etc., que variam no tempo em função de diversos fatores, alguns fora do controle dos operadores (MENDES, 2003).

Tanto na fabricação de Ferro-Silício quanto no Silício Metálico, a formação de “pontes” ou “vazios” no interior da carga (que ocorre com certa frequência) requer grande esforço para normalizar a operação. As “pontes” poderiam ser ocasionadas por falta de carbono ou por má distribuição dos componentes da carga no interior do cadinho. Nesta hipótese, o carvão vegetal de baixa densidade estaria separado do restante do material carregado por causa de uma mistura imperfeita ou por segregação como efeito da diferença de granulometrias. Os “vazios” quase sempre são formados por granulometria ou dosagem inadequada da carga, que impediriam a sua movimentação normal (CVRD, 2005).

A ocorrência de “pontes” ou “vazios” durante a operação de um forno é facilmente reconhecível pelo som procedente do interior da carga. Este som é provocado pelo arco elétrico no espaço vazio e desaparece quando a carga é revolvida com ponteiros ou tubos longos (CVRD, 2005).

## **4. METODOLOGIA**

Para o desenvolvimento da pesquisa foi visitada uma empresa de médio porte produtora de Silício Metálico, localizada no município de Santos Dumont, Minas Gerais.

No processo produtivo de Silício Metálico, de grau metalúrgico, a empresa utiliza cinco fornos elétricos a arco submerso de abertura superior que operam em turnos de 06 horas, 24 horas por dia, 30 dias no mês, com capacidade de 160 toneladas por dia.

A pesquisa foi dividida em quatro etapas: na primeira, foi feita uma busca de literatura; na segunda, foi realizada entrevistas com os profissionais da empresa com um delineamento descritivo e exploratório; na terceira, foi feito um levantamento de dados sobre os efeitos na produção de Silício Metálico usando carvão de diferentes densidades; e, na quarta, foram propostas diretrizes para uma política de remuneração para os produtores de carvão vegetal.

### **4.1. Fonte dos dados**

#### **4.1.1. Literatura específica**

Para melhor compreensão do processo produtivo e da influência da densidade do carvão vegetal, na geração de custos de produção do Si-met., o estudo iniciou-se por um abrangente processo de identificação e análise de informações de fontes secundárias, que permitiu um diagnóstico inicial da importância do carvão vegetal no segmento de Silício Metálico.

#### **4.1.2. Entrevista qualitativa**

Na segunda etapa foi feita uma entrevistas qualitativa semi-estruturada ou aberta, com os engenheiros metalúrgico e florestal, responsáveis pelo processo produtivo com a finalidade de atender aos objetivos da pesquisa.

A entrevista qualitativa pode ser utilizada como a única técnica de pesquisa, como técnica preliminar ou ainda associada a outras técnicas. Ao privilegiar a fala dos atores, permite atingir uma forma específica de conversação, que para fins de pesquisa, favorece o acesso direto ou indireto às opiniões, às crenças, aos valores e aos significados que as pessoas atribuem a si, aos outros e ao mundo circundante (FRASER & GONDIM, 2004).

Em relação a sua estruturação, por sua vez, as entrevistas podem ser estruturadas ou fechadas, semi-estruturadas ou não estruturadas. A primeira é utilizada, frequentemente, em pesquisas quantitativas e experimentais e esta modalidade de entrevista se caracteriza por uma estruturação rígida do roteiro e oferece pouco espaço para a fala espontânea do entrevistado. O roteiro da entrevista é pré-elaborado e testado, assim como as questões obedecem a uma sequência rigorosa com pouca flexibilidade para a formulação das perguntas e para o subsequente aproveitamento de comentários adicionais dos entrevistados (FRASER & GONDIM, 2004).

Na presente pesquisa foi realizada uma entrevista semi-estruturada, aberta. Para a entrevista não foi definido um roteiro, pois teve como finalidade proporcionar situações de contato, ao mesmo tempo formais e informais, de forma a provocar um discurso mais ou menos livre, mas que atendia aos objetivos da pesquisa e que fosse significativo no contexto investigado e academicamente relevante, conforme orienta DUARTE (2004). À medida que o entrevistado foi expressando suas opiniões e significados, novos aspectos sobre o tema foram emergindo, ampliando a compreensão do tema (FRASER & GONDIM, 2004).

No total, foram realizadas quatro entrevistas que tiveram duração média de duas horas, para que não se tornassem exaustivas para os entrevistados. As informações obtidas foram transcritas com base nas anotações feitas em um caderno no momento da entrevista.

O uso desta técnica proporcionou por meio das trocas verbais e não verbais o estabelecimento de um contexto de interação, que permitiu uma melhor compreensão dos significados, dos valores e das opiniões dos especialistas a respeito do uso do carvão vegetal no processo produtivo do Si-met.

## **4.2 Cenários e simulações**

Os dados primários fornecidos pela empresa foram concentrados dentro de uma série histórica mensal do período de 2011 a agosto de 2013. Foram disponibilizados dados mensais da produção de Si-met. (kg), consumo de energia elétrica (MWh), escória (kg) e densidade a granel do carvão vegetal ( $\text{kg/m}^3$ ). Também foram fornecidas as quantidades de quartzo (t), carvão vegetal (mdc), cavaco (st) e média de energia elétrica (MWh) por tonelada de Si-met.

Os dados foram tabulados em planilha eletrônica e analisados por meio de correlação, porcentagens, na forma de tabelas e gráficos. Com base nos valores de

consumo de energia elétrica (MWh) os valores de produção e densidade a granel do carvão vegetal foram organizados de forma crescente. De todo banco de dados, optou-se em trabalhar apenas em uma faixa de mesmo consumo de energia elétrica de 50 milhões de MWh, pois, foi a época em que os cinco fornos da indústria estavam operando com demanda total de energia elétrica.

Apesar da eficiência na produção de Silício Metálico depender de vários fatores, entre eles, a qualidade das matérias-primas, das máquinas e equipamentos e da competência gerencial, acredita-se que a densidade do carvão vegetal, *ceteris paribus*, seja um dos fatores mais impactantes na eficiência produtiva da indústria. Mesmo assumindo que o processo de fabricação do Si-met. se mantenha constante ou inalterado, não adiantaria ter a garantia da qualidade da matéria-prima e dos equipamentos, se não há bom gerenciamento, ou não adianta ter excelente gestão se a matéria-prima não tem qualidade, ou seja, não adianta um carvão denso se a operação não for adequada e vice-versa.

Com base em um ambiente sob ideais condições operacionais, ao relacionar os valores de energia e produção, foi possível analisar o consumo de energia elétrica por quilo de Si-met. De posse dos valores extremos da relação, foram feitos cenários para analisar o consumo eficiente de energia elétrica, para captar a influência da densidade a granel do carvão vegetal na geração de custos de matéria-prima.

No entanto, o valor pago pelo MWh se manteve em sigilo e não foi fornecido para a pesquisa. Mas, por meio de dados de mercado de curto prazo (CCEE, 2014), os cenários e as simulações foram construídos com base em duas situações de oferta de energia. A primeira, quando há uma grande oferta de energia no mercado (reservatórios estão cheios) e a segunda quando há uma pequena oferta nos períodos de crise energética (período de seca).

### **4.3 Diretrizes para a política de remuneração**

Com base nos resultados das simulações procura-se, neste item, propor diretrizes para uma política de remuneração que a indústria poderia implantar para estimular os produtores de carvão vegetal a produzirem um carvão de melhor qualidade e serem melhor remunerados. Dessa maneira, as informações obtidas nas entrevistas foram utilizadas para discutir melhor os resultados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Propriedades das matérias-primas para a produção do Si-met

#### 5.1.1 Matérias-primas

Na Tabela 2, são apresentados os quantitativos das matérias-primas necessária para produção de uma tonelada de Si-met., bem como os seus respectivos custos.

**Tabela 2** – Quantidades e custo de matéria-prima por tonelada de Si-met.

Matéria-prima	Quantidade	Unidade	Preço Unitário (R\$)	Custo (R\$)
Quartzo	2,3	t	90,00	207,00
Carvão	8,2	mdc	150,00	1.230,00
Cavaco	3,5	st	70,00	245,00
Total	14		310,00	1.682,00

Fonte: Dados da empresa.

Observa-se entre as matérias-primas utilizadas na produção do Silício Metálico, que os custos com carvão vegetal são bastante elevados, correspondendo a 73% do custo total com matéria prima. No entanto, salienta-se que ao adicionar os custos com energia elétrica, o gasto com carvão vegetal oscila entre 15 a 52%, dependendo do preço da energia elétrica ao longo do ano.

O quartzo é uma matéria-prima muito importante pra a fabricação do silício. Mas, para que se tenha uma operação segura, é desejável que o quartzo seja bastante estável em temperaturas elevadas, com a finalidade de evitar a fragmentação e reduzir a possibilidade de existência de uma grande quantidade de finos no interior do forno (CVRD, 1995). Além disto, segundo os profissionais, a granulometria do mineral é fundamental para uma boa operação do forno em termos de produtividade. O quartzo deve compor a carga com um tamanho de aproximadamente de 10 cm.

Quanto à qualidade do carvão vegetal além de possuir influência do material de origem é necessário verificar a umidade da madeira antes da carbonização. Se a madeira estiver com umidade elevada na região central, dará origem a carvão fendilhado, com maior predisposição à geração de finos, ocasionado pelo aumento da pressão de vapor durante a transformação madeira-carvão.

De acordo com as experiências realizadas no CETEC, com *Eucalyptus grandis* com diferentes teores de umidade, carbonização nas mesmas condições, mostram que um teor de umidade acima de 30%, gerou maior quantidade de finos (MENDES et al., 1982). A geração de finos é um fator problemático na produção de Silício Metálico,

pois, além de não ser aproveitado no processo, um carvão com baixa resistência mecânica, gera finos no interior da carga e deixa de cumprir a função de redutor, por não atingir a zona de reação, sendo um dos geradores de escória.

Dessa maneira, outro componente importante no processo produtivo é o cavaco de madeira. O cavaco é introduzido no forno com alta umidade para não entrar em combustão antes de atingir a carga. As reações químicas na ponta do eletrodo gera SiO (monóxido de silício) e este gás, geralmente, flui com alta pressão e de forma centralizada. Além de ser uma fonte de carbono a função principal do cavaco é gerar uma superfície porosa que distribua a liberação e condensação dos gases dentro do forno.

## 5.2 Efeitos da densidade do carvão vegetal na produção do Si-Met.

Na Tabela 3, são apresentados os valores de produção de Silício Metálico e seu respectivo consumo de energia elétrica (E. E.) de acordo com a densidade do carvão vegetal. Observa-se que um aumento próximo de 15% na densidade a granel do carvão vegetal ocasiona um aumento de 27,52% na produção de Silício Metálico.

**Tabela 3** – Efeito da densidade do carvão na produção do Si-Met

Cenários	Dens. a granel C.V. (kg/m <sup>3</sup> )	Produção (kg)	E. E. (MWh)	Consumo E. E./Prod. (MWh/kg)	Consumo Médio E. E./Prod. (MWh/kg)
1	199	3.748.588	50.109.266	13,37	12,5
2	230	4.780.064	51.946.947	10,87	
<b>Diferença</b>	31	1.031.476	1.837.681	2,50	
<b>Diferença (%)</b>	<b>15%</b>	<b>27,52%</b>	<b>3,67%</b>	<b>23,00%</b>	

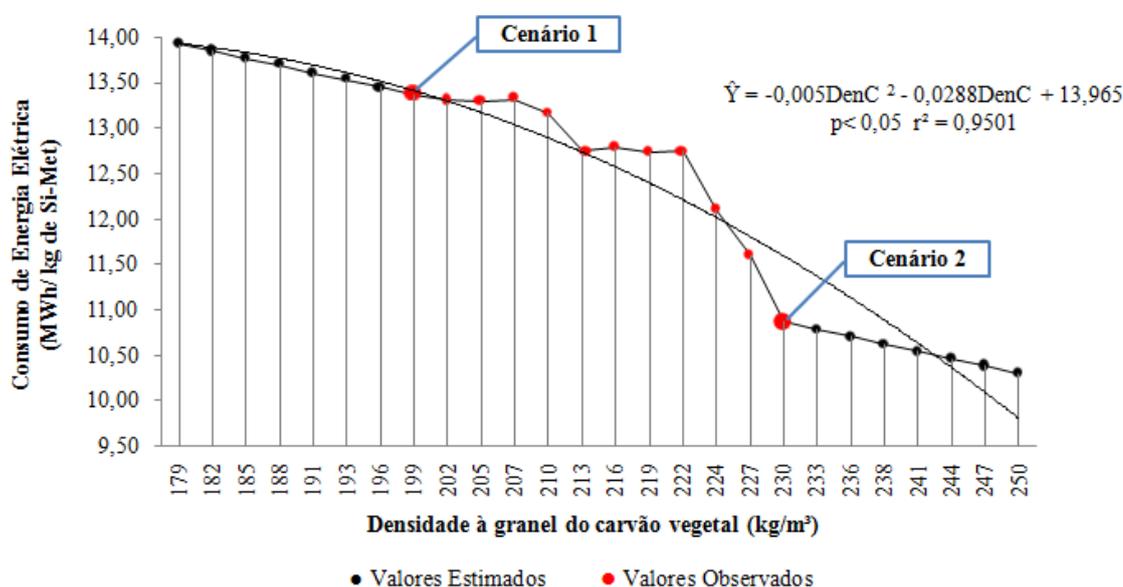
Fonte: Dados da empresa.

Apesar da diferença de consumo de energia elétrica ser de 3,67%, a relação entre o consumo de energia elétrica com a quantidade produzida de silício difere 23%, ou seja, quanto menor a densidade do carvão vegetal (C.V.) maior será o consumo de MW por tonelada produzida e vice-versa.

O carvão vegetal quando apresenta baixa densidade, menor resistência e maior granulometria, disponibiliza baixas quantidades de carbono fixo para o balanço estequiométrico, ocupando maior volume dentro do forno, gerando mais finos no processo e instabilizando a composição da carga. Esses fatores afetam negativamente a

resistência elétrica do arco e a produtividade do forno, pois, quanto maior volume e menor o peso de carvão no interior da carga, maior a ocorrência de segregação de carga, formação de vazios, consumo de eletrodo e geração de escória. Ao utilizar um carvão de baixa densidade, além de exigir significativo esforço operacional, consome energia elétrica em excesso para estabilizar a operação do forno, forçando a carga permanecer mais tempo dentro do forno.

Para avaliar o efeito da densidade do carvão vegetal no consumo de energia elétrica, foi construída uma simulação baseada em um cenário de operações e gerenciamento *Ceteris paribus* (Figura 8).



Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 8:** Consumo de energia elétrica de acordo com a variação da densidade à granel do carvão vegetal.

Os dois pontos indicados pelos cenários 1 e 2, expostos na Tabela 3, apontam os extremos de densidade e consumo de energia diagnosticados nos valores observados (pontos em vermelho). Ao estimar esses cenários para esquerda e para direita (pontos em preto), verifica-se que, quando a indústria opta em usar um carvão vegetal de 180 kg/m³, o consumo de energia pode atingir 14 MWh/kg de Si-Met. No entanto, o consumo de energia elétrica pode atingir 10 MWh/kg de Si-Met, quando a indústria utiliza um carvão de 250 kg/m³.

Neste caso, o custo de oportunidade com energia elétrica pode atingir 40% dos custos da matéria-prima.

### 5.3 Simulação do impacto da densidade do carvão no custo de produção do Si-Met

A Tabela 4, apresenta os cenários de custos totais de matéria prima e de oportunidade em função da *Simulação 1* e *Simulação 2*.

Nesta *Simulação 1*, avaliou-se o impacto da densidade do carvão vegetal no gasto com energia elétrica por tonelada de silício produzido. Ao estabelecer o preço da energia elétrica a R\$ 50,00 o MWh para os dois cenários (carvão com densidade de 199 e de 230 kg/m<sup>3</sup>), o preço do MWh foi de R\$ 668,00 e R\$ 543,00 respectivamente. No entanto, a diferença entre os custos totais foi de R\$ 125,00 para cada MWh/kg de Si-met. Ao extrapolar essa diferença dentro de uma produção anual de 48.844,334 toneladas, tem-se um custo de oportunidade de R\$ 6 milhões com energia elétrica devido ao fato de se usar um carvão de baixa densidade.

Por outro lado, ao considerar períodos críticos de crise energética em que o preço do MWh pode atingir o valor de R\$500,00, foi estabelecida a *Simulação 2*. Para os cenários 1 e 2, o preço do MWh atingiu o valor de R\$6.684,00 e R\$ 5.434,00 respectivamente. A diferença entre os custos totais foi de R\$1.250,00 para cada MWh/kg de Si-met. No entanto, o custo de oportunidade para o mesmo período de produção atingiu R\$ 61 milhões de reais o MW/t.

Tanto na *Simulação 1*, quanto na *Simulação 2*, ao considerar o cenário 2, *ceteris paribus*, a indústria poderia lucrar entre 6 a 61 milhões de reais, dependendo do preço da energia elétrica. O lucro seria proveniente dos reflexos de maior produtividade do forno e/ou a venda do excedente de energia elétrica.

**Tabela 4 – Simulação 1 e 2:** Cenários de custo total de matéria-prima e custo de oportunidade para produção de Si-Met.

Cenário	Densidade a granel do Carvão Vegetal (kg/m <sup>3</sup> )	Consumo (MWh/kg de Si-met.)	Custo Total (Matéria Prima + Energia Elétrica)		Unidade
			Simulação 1	Simulação 2	
1	199	13,37	R\$ 2.350,00	R\$ 8.366,00	MWh/kg Si-met.
2	230	10,87	R\$ 2.225,00	R\$ 7.116,00	MWh/kg Si-met.
		Diferença	R\$ 125,00	R\$ 1.250,00	MWh/kg Si-met.
		Produção Anual de Si-Met.	48.844,334		t
		Custo de Oportunidade Energia Elétrica	R\$ 6.105.755	R\$ 61.073.304	MW/t

Fonte: Elaborada pelo autor

A produção de Ferro-Silício e Silício Metálico necessitam de aproximadamente 12 MWh por tonelada, o equivalente a cinco vezes o que é demandado para a produção de ferro-manganês. Isso significa que, mais o que qualquer outra, as ligas de silício e Silício Metálico estão atreladas à energia, que representa cerca de 40% a 50% dos seus custos de produção. Consequentemente, esses segmentos tornam-se mais vulneráveis às variações de preços e de tarifas energéticas (ANDRADE et al., 1999).

Se considerar o conjunto de indústrias metalúrgicas (ferro-ligas e silício) no Brasil, esse montante encontrado nas simulações pode atingir valores incalculáveis. Se o melhor para as indústrias é utilizar carvão vegetal com densidade acima de 250 kg/mdc e que abaixo disso traz consequências negativas com ineficiências, escórias e desperdícios, é fato que o rumo das mudanças tem que vir da indústria para a floresta e não o contrário, pois, o lucro industrial é esperado ser sempre maior que o florestal.

A produção de Ferro-Silício e Silício Metálico necessitam de aproximadamente 12 MWh por tonelada, o equivalente a cinco vezes o que é demandado para a produção de ferro-mangânês. Isso significa que, mais o que qualquer outra, as ligas de silício e Silício Metálico estão atreladas à energia, que representa cerca de 40% a 50% dos seus custos de produção. Conseqüentemente, esses segmentos tornam-se mais vulneráveis às variações de preços e de tarifas energéticas (ANDRADE et al., 1999).

Se considerar o conjunto de indústrias metalúrgicas (ferro-ligas e silício) no Brasil, esse montante encontrado nas simulações pode atingir valores incalculáveis. Se o melhor para as indústrias é utilizar carvão vegetal com densidade acima de 250 kg/mdc e que abaixo disso traz conseqüências negativas com ineficiências, escórias e desperdícios, é fato que o rumo das mudanças tem que vir da indústria para a floresta e não o contrário, pois o lucro industrial é esperado ser sempre maior que o florestal.

Assim, pode-se questionar se parte deste custo de oportunidade causado pelo uso de um carvão de baixa densidade, não poderia ser revertido em aumento no preço do carvão para o produtor produzir um carvão mais denso, seja esperando um tempo maior para o corte da floresta. Com isso, é possível driblar os efeitos da crise do mercado florestal, plantando uma espécie ou clone mais denso, compatível com a densidade esperada pelas indústrias que, neste caso, é quem direciona o processo.

#### **5.4 Diretrizes para estabelecer uma política de remuneração**

Com a redução nos custos de produção, as metal-siderúrgicas poderiam estimular os produtores a fornecerem um carvão vegetal com maior densidade, a partir de uma política de remuneração. Através dessa política, as indústrias poderiam direcionar os produtores a fornecerem o carvão vegetal que desejam consumir, e não o contrário, o produtor produzir o carvão que elas terão que consumir.

Dessa forma, de acordo com o custo excedente de produção devido ao emprego de carvão de baixa densidade, como exposto na tabela 4, foi possível propor diretrizes para melhor remuneração do produtor florestal e/ou carbonizador. Com base nesse lucro que a empresa poderia atingir, no final de um período de produção, se metade desse valor de R\$ 6 milhões fosse repassado para o produtor, o preço do mdc que antes era de R\$150,00 poderia atingir um valor de R\$ 158,00. Do mesmo modo, se o preço da energia em períodos de crise atingir valores superiores a R\$500/MW, isso corresponderia a um repasse no preço do carvão que antes era de R\$150,00 o mdc para até R\$ 226,00 (Tabela 5).

**Tabela 5 - Simulação 1 e 2: Novo preço do metro de carvão (mdc)**

<b>Divisão dos custos de oportunidade</b>	<b>Simulação 1</b>	<b>Simulação 2</b>	<b>Unidade</b>
Indústria	R\$ 3.060.753	R\$ 30.536.652	t
Produtor	R\$ 3.060.753	R\$ 30.536.652	t
Valor adicional no preço carvão vegetal	R\$ 8,00	R\$ 76,00	mdc
Novo valor pago ao produtor	<b>R\$ 158,00</b>	<b>R\$ 226,00</b>	mdc

Fonte: Elaborada pelo autor

O carvão vegetal é uma fonte de energia renovável e importante matéria-prima na produção de aço, ferro-ligas e Silício Metálico no Brasil. Para o carvão vegetal se tornar competitivo no mercado é necessário estabelecer algumas diretrizes e tomadas de decisão dentro da empresa para a floresta como:

- Pagar um preço pelo carvão com base no peso e não em volume, de modo a estimular os produtores a gerirem sua floresta para obter um carvão mais denso.
- Realizar monitoramento de qualidade do carvão no recebimento da carga para evitar fraudes;
- Melhorar o processo de carbonização;
- Exigir que o produtor entregue apenas carvão de maior densidade na indústria, como por exemplo, acima de 250 kg/m<sup>3</sup>.

Mas, para que essas mudanças ocorram ao longo do tempo é necessário tomar algumas decisões silviculturais e gerenciais como:

- Não anteceder o corte das florestas existentes antes dos seis anos caso o tipo de material for de menor densidade. Manter a floresta por mais alguns anos pode resultar em um aumento em termos gravimétrico. Além disso, árvores juvenis possuem maior concentração de fósforo no tronco, principal contaminante do silício;
- Reformar os plantios por clones mais densos;
- Redefinir os espaçamentos para melhor granulometria das peças;
- Classificar os sítios de produção;
- Redefinir a adubação para que a planta não receba “consumo de luxo” e excesso de fósforo;
- Utilizar madeira descascada;
- Realizar capacitação de funcionários e operadores do forno para adequação ao novo modelo.

O Brasil tolera as consequências de falta de energia exatamente porque não explora as fontes de energia renováveis. Sob os pontos de vista econômico e ecológico, não é viável explorar madeiras com pouca idade para a geração de energia, sejam de *Eucalyptus spp* ou de espécies nativas, tendo em vista que as árvores aumentam o ritmo do processo de produção de celulose, lignina e hemicelulose, na medida em que se tornam mais velhas, refletindo no aumento da densidade (PAULA, 1995; TOMAZELLO, 1985 apud PAULA, 2005).

Enquanto se tinha carvão de alta densidade vindo da madeira de espécies nativas, conseguia-se melhor rendimento dos alto-fornos e fornos elétricos. Com a introdução do carvão da madeira de reflorestamento, mais especificamente do eucalipto, houve uma redução nesta densidade que se agravou quando se disseminou os plantios clonais desta espécie.

Se considerar que a densidade do carvão da madeira de nativa variava de 300 a 320 kg/m<sup>3</sup>, enquanto que do eucalipto de 200 a 220 kg/m<sup>3</sup>, percebe-se prováveis reflexos operacionais nos fornos. Se boa parte dos fornos foi projetada ainda na época em que o carvão era de nativa, portanto mais denso, as consequências negativa na produção metal-siderúrgica podem ser ainda maiores.

Se a densidade do carvão de eucalipto proveniente de plantações seminal comparada com a de madeira nativa, piorou com a dos clones, embora de alta produtividade volumétrica, não possuem propriedades adequadas para fins carboníferos. Dado este rápido crescimento em volume, que tem possibilitado antecipar o corte de sete para seis anos, tem-se produzido um carvão de baixa densidade, de 180 a 200 kg/mdc.

As predominâncias desse carvão proveniente de florestas clonadas devem estar provocando alterações significativas no custo de produção dos fornos, comprometendo a competitividade e prejudicando uma melhor remuneração no carvão para o produtor. O fato é que esta diferença na densidade do carvão, 180 a 320 kg/mdc, põe em risco a competitividade da indústria metal-siderúrgica brasileira.

Sendo assim, quando se pensa em bioenergia ou carvão, há que questionar se foi uma decisão correta disseminar plantios clonais de alto e rápido crescimento volumétrico, porém “leve”, sabendo o que importa é a massa da madeira.

## 6. CONCLUSÕES

Com base nos objetivos deste estudo, pode-se concluir que quanto mais denso possível for o carvão vegetal, melhor e mais eficiente o processo produtivo do Silício Metálico, pois, ocupa menos espaço com carvão dentro do forno; diminuí a ocorrência de segregação de carga e formação de vazios; melhora a estabilidade estequiométrica dentro do forno; aumenta a produtividade; gera menos escória; e reduz o consumo de eletrodo e de energia elétrica.

A densidade do carvão vegetal tem uma parcela de influência nos custos de matéria-prima e principalmente nos custos com energia elétrica.

Quanto maior a densidade do carvão vegetal, menor o consumo de energia elétrica por quilo de Si-Met.

Ao optar em utilizar um carvão de menor densidade a granel, a indústria pode estar deixando de ganhar em produtividade nos forno e em venda do excedente de energia elétrica e ainda, em oportunidade de estabelecer diretrizes para uma política de remuneração para o produtor florestal e carbonizador;

Para melhor análise do efeito da variável densidade do carvão vegetal é necessário um experimento *in loco* para quantificar exatamente as influências e os custos de produção do Silício Metálico.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, A. M. de & DELLA LUCIA, R. M. Avaliação da higroscopicidade do carvão vegetal e de seus efeitos na resistência ao esmagamento. **Revista Floresta e Ambiente**. Ano 2. 1995.

ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S.; GANDRA, G. T. **Panorama da Indústria Mundial de Ferroligas**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 10, p. 57-114, set. 1999.

ANDRADE, C. R. **Espectroscopia no infravermelho próximo para prever propriedades da madeira e do carvão vegetal de plantio clonal de *Eucalyptus sp.*** 2009. 121f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

ALENCAR, G. S. B. **Estudo da qualidade da madeira para produção de polpa celulósica relacionada à precocidade na seleção de um Híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla***. 2002. 73p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

ALFENAS, A. C.; ZAUZA, E. A. V.; MAFIA, R. G.; ASSIS, T. F. **Clonagem e doenças do eucalipto**. 2 ed. Viçosa, MG: UFV, 2009. 500 p.

ANTONÂNGELO, A.; BACHA, C. J. I. As fases da silvicultura no Brasil. **Revista Brasileira de Economia**, v. 52, n. 1, p. 207-238, 1998.

ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS - ABM. **Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico: 2008**. Nota técnica TR 04a: Biomassa da Madeira para siderurgia. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 18 p, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário Estatístico: ano base 2012**. Brasília, 2013. 142p. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br>>. Acesso em: 10 fev. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FERROLIGAS E DE SILÍCIO METÁLICO - ABRAFE. **Produtos finais: ferroligas e Silício Metálico**. Disponível em: <<http://abrafe.ind.br/produtos.htm>>. Acesso em: 22 de jun. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário Estatístico: ano base 2011**. Brasília, 2012. 145p. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br>>. Acesso em: 04 jul. 2013.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA-AMS. 2013. **Anuário estatístico 2012**. 2013. 41p. Disponível em: <[www.silviminas.com.br](http://www.silviminas.com.br)>. Acesso em 10 de fev. 2014.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA-AMS. 2011. **Números e índices de Minas Gerais até 2011**. 2011. Disponível em: <[www.silviminas.com.br](http://www.silviminas.com.br)>. Acesso em 3 de jul. 2013.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA-AMS. 2011. **Florestas plantadas – um caminho para o desenvolvimento sustentável**. Belo Horizonte, 2011 a.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA-AMS. 2009. **Florestas energéticas no Brasil: demanda e disponibilidade**. Belo Horizonte, 2009. 23p.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MURAMOTO, M. C.; et al. Estimativa da densidade a granel do carvão vegetal a partir de sua densidade aparente. **IPEF**, Piracicaba, Circular Técnica n. 150. 1982.

BRITO, J. O. Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. IPEF, Piracicaba, **Circular Técnica**, n. 181, 1993.

BRITO, J. O. **Desafios e perspectivas da produção e comercialização do carvão vegetal**. 2010. II Fórum Nacional sobre carvão vegetal. Sete Lagoas – MG. 2010.

BRITO, J. O. ; BARRICHELO, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: i. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - **IPEF**, Piracicaba. n.14, p.9-20, 1977.

BRITO, J. O. ; BARRICHELO, L. E. G. Aspectos florestais e tecnológicos da matéria-prima para carvão vegetal. **IPEF**, Piracicaba, n. 67, p. 1-4, set. 1979.

BRITO, J. O. ; BARRICHELO, L. E. G. Comportamento isolado da lignina e da celulose da madeira frente à carbonização. Piracicaba: ESALQ. (**Circular Técnica, 28**). 2006. 4 p.

BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; et al. Seleção de clones de Eucalyptus para biomassa Florestal e qualidade da Madeira. **The Science Forum**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 237-245, jun. 2010.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA- CCEE. Busca de preços. Disponível em:< [http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/como\\_ccee\\_atua/precos/historico\\_preco\\_semanal?\\_afzLoop=477170238664321#%40%3F\\_afzLoop%3D477170238664321%26\\_adf.ctrl-state%3D177hm9gkch\\_135](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/historico_preco_semanal?_afzLoop=477170238664321#%40%3F_afzLoop%3D477170238664321%26_adf.ctrl-state%3D177hm9gkch_135)>. Acesso em: 26 Fev. 2014.

CARNEIRO, A. C. O. **Notas de Aula – Energia da madeira**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

CARNEIRO, A. C. O.; BARCELLOS, D. C.; SANTOS, R. C. **Treinamento carvão vegetal: apostila teórica e prática**. Viçosa-MG, 2011. 129p.

CARNEIRO, A. C. O. **Qualidade da Madeira para produção de carvão vegetal. Treinamento carvão vegetal**. Viçosa – MG, 2013.

CARVALHO, A. M. **Valorização da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* através da produção conjunta de madeira serrada em pequenas dimensões, celulose e lenha.** 2000. 138 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Madeiras) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2000.

CARVALHO, R. M. M. A.; Valverde, S. R.; Gonçalves, L. A.; de Rezende, P.; & Noce, R. Estudo das relações dos atores sociais no complexo industrial florestal de Minas Gerais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 33, n. 2, p. 359-366, 2009.

CASTRO, A. F. N. M. **Efeito da idade e de materiais genéticos de *Eucalyptus* sp. na madeira e carvão de vegetal.** 2011, 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

COMPANHIA VALE DO RIO DOCE - CVRD. **Produção Ferroligas: Métodos e técnicas de produção.** Superintendência de desenvolvimento. SUDES. 1995. 100p.

CHOPRA, K. S., **Characterization of silicon metal** In: INTERNATIONAL FERROALLOYS CONGRESS, 5, April 23-26, 1989, New Orleans. Proceedings...New Orleans: p.227-245, 1989.

DIAS, E. C.; ASSUNÇÃO, A. A.; GUERRA, C. B.; et al. Processo de trabalho e saúde dos trabalhadores na produção artesanal de carvão vegetal em Minas Gerais, Brasil. **Cad. saúde pública**, v. 18, n. 1, p. 269-277, 2002.

DUARTE, R. Entrevistas em pesquisas qualitativas. Ed. UFPR. **Educar em Revista**, Curitiba, n. 24, p. 213-225, 2004.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2012-2021).** 2011.91f. Disponível em:< [http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20energia/20120104\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20energia/20120104_1.pdf)>. Acesso em: 09 fev.2014.

EMBRAPA FLORESTA. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. **Documentos**, 38. Colombo: *Embrapa Florestas*, 2000. 113p.

FERNANDES, G. F. S. **Decisões silviculturais com base na densidade.** 2013. 28f. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2013.

FRASER, M. T. D.; GONDIM, S. M. G. Da fala do outro ao texto negociado: discussões sobre a entrevista na pesquisa qualitativa. **Paidéia**. Salvador. v. 14, n. 28, p. 139-152, 2004.

FREDERICO, P. G. U. **Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal.** 2009. 73 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEMA). **Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e Silício Metálico no Estado de Minas Gerais, com prospecção de ações para o desenvolvimento sustentável da atividade.** Relatório de requisitos legais. Belo Horizonte. 2010. 62p.

GOMES, M. T. M. **Potencialidades de inserção do carvão vegetal em bolsas de mercadoria**. 2006. 71f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

GOVERNO DE MINAS. **Minas Gerais seu melhor investimento**. 2013. Disponível em: <<http://desenvolvimento.mg.gov.br/apresentacao/index.html>>. Acesso em: 20 mai. 2013.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTUDOS FLORESTAIS – IPEF. **IPEF Notícias**. Ano 39, nº 221 - maio/junho – 2013. Disponível em:< <http://www.ipef.br/publicacoes/Ipefnoticias/>> Acesso em 03 jul. 2013.

LEITE, A. A. F.; BAJAY, S. V.; GORLA, F. D. **Oportunidades de Eficiência Energética para a Indústria: relatório setorial: ferroligas**. Brasília: CNI, 46 p. 2010.  
MENDES, M. G. GOMES, P. A. OLIVEIRA, J. B. Propriedades e controle da qualidade do carvão vegetal. Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte, Centro Tecnológico de Minas Gerais - **CETEC**, p. 77- 89, 1982.

MENDES, W. **Caracterização de escórias e recuperação do silício**. 2003. 124f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, Campinas, SP, 2003.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Balço Energético Nacional 2008**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acessado em 28 jul. 2012.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Perfil de Ferroligas. Relatório técnico 60**. 2009. Disponível em:<[www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br)>. Acesso em: 26 jun. 2013.

MORALES, R. C. **Estudo do ciclo de obtenção do silício e carbeto de silício usando carvão de bagaço de cana-de-açúcar em reator de plasma**. 2003. 142f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2003.

MORI V.; SANTOS, R. L. C. dos; SOBRAL, L. G. S. Metalurgia do Silício: Processos de Obtenção e Impactos Ambientais. (**Série Tecnologia Ambiental**, 41). Rio de Janeiro. CETEM/MCT, 2007, 42p.

MORCELLI, A. E. **Estudos microestruturais e microanálise de fases intermetálicas presentes na produção do silício grau químico**. 2002. 95f. Dissertação (Ciências na Área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do Combustível Nuclear). Universidade de São Paulo. São Paulo. 2002.

MOURA, V. P. G. O germoplasma de *Eucalyptus urophylla* S. T. BLAKE no Brasil. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2004. 12 p. (Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. **Comunicado técnico**, 111).

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T de P.; TRUGILHO, P. T.; et al. Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* em diferentes idades para a produção de bioenergia. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 2, p. 139-148, 2013.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* f. Muell. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 37, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, J. B.; GOMES, P. A.; ALMEIDA, M. R. Carvão vegetal: destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - **CETEC**, Belo Horizonte, p.62-102. 1982.

PALUDZYSYN FILHO. Melhoramento do eucalipto para a produção de energia. **Revista Opiniões**. Ribeirão Preto, jun-ago, 2008. Disponível em:<<http://www.revistaopinioes.com.br/cp/materia.php?id=246>>. Acesso em: 15 nov. 2013.

PAULA, J. E. Caracterização anatômica da madeira de espécies nativas do cerrado visando sua utilização na produção de energia. **Cerne**, Lavras, v. 11, n.1, p. 90-100, 2005.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; et al. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Brasília: **Embrapa Florestas**, 2000. (Documento, 38).

PEREIRA, B. L. C. Qualidade da madeira de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. 2012. 102f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

PINHEIRO, P. C. C.; FIGUEIREDO, F. J.; SEYE, O. Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão de *Eucalyptus*. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 2, p. 159-168, 2005.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**. Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 317-326, 2012.

RAAD, T. J. **Simulação do processo de secagem e carbonização do *Eucalyptus spp.*** 2004. 114f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte- MG. 2004.

RAAD, T. J.; PINHEIRO, P. C. da C.; YOSHIDA, M. I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do *Eucalyptus spp.* **Cerne**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 93-106, 2006.

REIS, A. A.; MELO, I. C. N. A.; PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. C. O. Efeito de local e espaçamento na qualidade do carvão vegetal de um clone de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. **Floresta e Ambiente**, 2012. Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.055>>. Acesso em: 06 jun. 2013.

REZENDE, J. L. P. de, COELHO JUNIOR, L. M.; OLIVEIRA, A. D.; et al. Análise dos preços de carvão vegetal em quatro regiões no estado de Minas Gerais. **Revista Cerne**, Lavras, v. 11, n. 3, p. 237-252, 2005.

São Paulo (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. Resolução SAA nº 10, de 11 de julho de 2003. Norma de padrões mínimos de qualidade para carvão vegetal, como base para certificação de produtos pelo Sistema de Qualidade de Produtos Agrícolas, Pecuários e Agroindustriais do Estado de São Paulo, instituído pela Lei 10.481-9. *Diário Oficial do Estado de São Paulo*, São Paulo, jul. 2003. v. 113 (129).

SAHAJWALLA, V.; DUBIKOVA, M.; KHANNA, R. **Reductant characterisation and selection: implications for ferroalloys processing.** In: *Proceedings: Tenth International Ferroalloys Congress*. Vol. 1. 2004.

SANTOS, M. A. S. **Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto.** 2010. 173f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2010.

SEO, E. S. M. **Estudo Cinético da Cloração do Silício.** 1997. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo.

Sindicato da Indústria Mineral do Estado de Minas Gerais – SINDEXTA. **Ferroligas.** 2012. Disponível em: [http://www.sindiextra.org.br/arquivos/2012\\_02\\_14\\_00\\_50\\_16\\_Ferro\\_Ligas.pdf](http://www.sindiextra.org.br/arquivos/2012_02_14_00_50_16_Ferro_Ligas.pdf)>. Acesso em 03 out.2013

TRUGILHO, P. F. **Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira e do carvão de *Eucalyptus*.** 1995. 160 f. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

TRUGILHO, P. F.; VITAL, B. R.; REGAZZI, A. J.; GOMIDE, J. L. Aplicação da análise de correlação canônica na identificação de índices de qualidade da madeira de eucalipto para a produção de carvão vegetal. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 21, n. 2, p 259-267, 1997.

TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; LINO, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. *Cerne*, Lavras, v.7, n.2, p 104-114, 2001.

VALVERDE, S. R., SOARES, N. S.; da SILVA M. L.; JACOVINE, L. A. G.; NEIVA, S. A. O comportamento do mercado da madeira de eucalipto no Brasil. *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 4, p. 393-403, 2004.

VIEIRA, R. S.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; et al. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. *Cerne*, Lavras, v. 19, n. 1, p. 59-64, 2013.

VITAL, B. R.; JESUS, R. M. e VALENTE, O. F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. *Revista Árvore*, v.10, n.2, p.151-160, 1986.

XAVIER, A.; BORGES, R. C. D.; CRUZ, C. D.; et al. Parâmetros genéticos de características de qualidade da madeira em *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, v.21, n.1, p.71-78, 1997.

YANG, H., YAN, R.; CHEN, H.; et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, v. 86, n. 12, p. 1781-1788, 2007.