

UFRRJ
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS E FLORESTAIS

TESE

**Aproveitamento energético de finos de carvão em alto forno,
visando redução de emissões e obtenção de créditos de carbono**

Flávio Silva Machado

2009



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE FINOS DE CARVÃO EM ALTO FORNO,
VISANDO REDUÇÃO DE EMISSÕES E OBTENÇÃO DE CRÉDITOS DE
CARBONO

FLÁVIO SILVA MACHADO

Sob a Orientação do Professor

Roberto Carlos Costa Lelis

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciências**, no Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais

Seropédica, RJ

Novembro de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E
FLORESTAIS

FLÁVIO SILVA MACHADO

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciências**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 27/11/2009

Roberto Carlos Costa Lelis. Prof. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho. Prof^ª. Dr^ª. UFV

Luiz Heleno Moreira Duque. Prof. Dr. UFF

Edvá Oliveira Brito. Prof. Dr. UFRRJ

Heber dos Santos Abreu. Prof. Dr. UFRRJ

DEDICATÓRIA

A minha esposa Luci Neide, pelo companheirismo e
compreensão incondicional de sempre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **DEUS**, por me dar força, sabedoria e perseverança necessárias para conquistar meus objetivos.

Ao professor Roberto C. Costa Lelis pela confiança, orientação acadêmica e incentivo pessoal.

A UFRRJ e o Instituto de Florestas por apoiar e possibilitar o desenvolvimento deste trabalho.

Ao amigo Cláudio Rocha Lopes pela apoio e companheirismo.

Ao Eng^o Miguel Ângelo Bentes por possibilitar a realização experimental deste trabalho.

A equipe do Laboratório de Matérias-primas da Companhia Siderúrgica Nacional.

A Cia Saint Gobain Canalização.

A todos os amigos do Pólo Universitário de Rio das Ostras pelo apoio e compreensão na elaboração da tese.

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

BIOGRAFIA

FLÁVIO SILVA MACHADO, filho de Francisco das Chagas Taranto Machado e de Madalena da Silva Machado, nasceu em Volta Redonda, Estado do Rio de Janeiro, em 09 de janeiro de 1964.

Em 1991 graduou-se Engenheiro Metalúrgico pela UFF - Universidade Federal Fluminense.

Em 1998 graduou-se em Matemática e Física pela Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Volta Redonda.

Em 1995 foi contratado pela Fundação CSN como Professor na Escola Técnica Pandiá Calógeras, em Volta Redonda, ERJ, no qual lecionou até Dezembro de 2008.

Em 2000 iniciou, na UFRRJ - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, o Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais, em 2002, defendeu tese, requisito indispensável para a obtenção do título de Magister Scientiae.

Em Agosto de 2002 foi contratado pelo UniFOA – Centro Universitário de Volta Redonda para lecionar no curso de engenharia, no qual atuou até Dezembro de 2008.

Em Agosto de 2002 foi contratado pelo UBM – Centro Universitário de Barra Mansa para lecionar no curso de administração e engenharia, no qual atuou até Dezembro de 2008.

Em Setembro de 2008 participou de concurso público na Universidade Federal Fluminense, no qual tomou posse da vaga de professor assistente em 20 de Janeiro de 2009. Atualmente leciona no curso de Engenharia de Produção no PURO – Pólo Universitário de Rio das Ostras.

RESUMO

MACHADO, Flávio Silva. **Aproveitamento energético de finos de carvão em alto forno, visando redução de emissões e obtenção de créditos de carbono.** 2009. 116 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2009.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar os ganhos ambientais e econômicos, de misturas de finos carvão vegetal com carvão mineral (importado e nacional), através da injeção em alto forno, visando o aproveitamento de matriz energética, a redução dos índices de emissões de carbono, a comercialização de Certificados de Emissões Reduzidas e também a retomada da produção de carvão mineral nacional para o setor siderúrgico. Foram utilizados carvão vegetal proveniente da madeira de *Eucalytus urophylla* (CVSG), carvões minerais importados da Austrália e Indonésia (carvão S. Walker Creek Weak e carvão Kaltim Prima) e carvões minerais nacionais provenientes de diferentes minas localizadas na Região Sul do Brasil, a saber: carvão CRM-CE4200 (CN1), carvão CRM-CE6700 (CN2), carvão COPELMI-CE5200 (CN3), carvão COPELMI-CE6000 (CN4), carvão COPELMI-CE6500 (CN5), Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 (CN6) e Carvão mineral Rio Deserto CN7). Foram avaliados os resultados das análises químicas imediata e elementar, bem como da composição das cinzas dos carvões; da basicidade binária das escórias; da granulometria, da moabilidade, da densidade e da porosidade dos carvões. Finos de carvões vegetais foram misturados com finos de carvão mineral importado e nacional em diferentes proporções, sendo avaliadas as principais características das misturas que são importantes quando se procede a injeção no alto forno siderúrgico (limites operacionais). Para cada mistura foi avaliada também as eficiências de queima dos carvões. Tendo-se por base os índices de eficiência de combustão das misturas de carvões, a mistura 80 % CVSG – 20 % CN1 apresentou melhores condições para ser injetada nas ventaneiras do alto forno. Apresentou também condições ambientais favoráveis, pois permitiu redução dos índices de emissões de carbono na ordem de 41,26 kg por tonelada de ferro gusa produzido e favorecendo a comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas em US\$ 0,86 por tonelada de ferro produzido. Houve também uma redução do custo de injeção de finos de carvão de US\$ 1,20 por tonelada de ferro produzido. Somando os ganhos ambientais e comerciais com a mistura 80 % CVSG – 20 % CN1 serão US\$ 2,06 por tonelada de ferro produzido.

Palavras chaves: Desenvolvimento limpo, efeito estufa, certificado emissões

ABSTRACT

MACHADO, Flávio Silva. The use of fines of coal as fuel in blast furnaces, aiming the reduction of emissions and the acquisition of carbon credits. 2009. 116 f. Thesis (Doctor in Environmental and Forest Sciences). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2009.

The main aim of this paper is to check the environmental and economical gains of mixtures of fines of vegetal and mineral coal (both Brazilian and imported ones) in the injection in blast furnaces for iron, aiming its use as fuel, the lowering of carbon emission rates, the trading of Reduced Emission Certificates and also restart the production of Brazilian mineral coal for the steel making industry. It was used vegetal coal from *Eucalyptus urophylla* woods (CVSG). The mineral coal was from Australia and Indonesia (S.Walker Creek Weak and Kaltim Prima coals) and the Brazilian mineral coals from the several coal mines located in the south of Brazil, such as: coal CRM-CE4200 (CN1), coal CRM-CE6700 (CN2), coal COPELMI-CE5200 (CN3), coal COPELMI-CE6000 (CN4), coal COPELMI-CE6500 (CN5), Carbonifera Metropolitana-Antracito-CM20 (CN6) and Rio Deserto mineral coal (CN7). The results of elementary and immediate chemical analyses were evaluated as well as the analyses of coal ash components, the binary basicity of scraps, the size of grains, the grindability and the density and porosity of the coals. Vegetal coal fines were mixed to mineral coal fines from abroad and from Brazil in different proportions and the main characteristics of each mix were evaluated; such characteristics are important when the injection in blast furnaces is made. (operational limits). It was also evaluated the efficiency in burning of each coal mix. Having the combustion efficiency rates as base, the 80% mix CVSG – 20% CN1 presented the best conditions to be injected in the blast furnace tuyeres. This mix also presented favorable environmental conditions because it allowed the lowering of carbon emission rates, as much as 41,26 kilos per ton of produced pig iron. Such rates improved the trading of Reduced Emission Certificates to US\$ 0.86/ton of produced iron. Moreover, there was a reduction in the injection of coal fines of US\$ 1.20/ton of iron. Adding up environmental and economical gains, using the 80 % CVSG – 20 % CN1 mix, the amount of US\$ 2.06/ton of iron is reached.

Key words: Clean development, greenhouse effect, emission certificates

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Comparação da produtividade florestal e absorção de dióxido de carbono em países com economias baseadas em produtos madeireiros	3
Tabela 2	Estimativa de carbono fixado em projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (reflorestamentos no Brasil)	7
Tabela 3	Propriedades do carvão vegetal produzido com diferentes temperaturas de carvoejamento. (BRITO & BARRICHELO, 1980)...	9
Tabela 4	Mão-de-obra empregada nos segmentos que utilizam carvão vegetal no Brasil, do plantio ao enformamento na usina, no ano de 2006	13
Tabela 5	Valores médios percentuais observados a partir da análise química imediata das diferentes fases de transformação da matéria vegetal até a formação do carvão mineral carvão mineral.....	16
Tabela 6	Cronologia da implantação da injeção de carvão no alto forno no mundo.....	23
Tabela 7	Representação esquemática da dependência da eficiência de combustão com as variáveis do processo.....	29
Tabela 8	Cronograma dos tratados e convenções que geraram o Protocolo de Kyoto.....	30
Tabela 9	Distribuição do consumo de energia em uma usina integrada a coque.....	34
Tabela 10	Misturas proporcionais de Carvão Vegetal e Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak.....	41
Tabela 11	Misturas proporcionais de Carvão Vegetal e Carvão Mineral Importado Kaltim Prima.....	41
Tabela 12	Misturas proporcionais de Carvão Vegetal e Carvões Minerais Nacionais.....	41
Tabela 13	Resultados da análise de granulometria média ponderada e a da porcentagem de finos dos carvões.....	45
Tabela 14	Tratamentos realizados nos ensaios de combustão dos carvões.....	46
Tabela 15	Resultados das análises das granulométricas de carvão vegetal e carvões minerais. SAUSMIKAT (1994).....	47
Tabela 16	Valores médios dos teores de umidade dos carvões.....	48
Tabela 17	Valores médios dos graus de moabilidade dos diferentes carvões.....	49
Tabela 18	Valores médios das densidades verdadeira e aparente dos carvões....	50
Tabela 19	Resultados encontrados por BRITO no estudo comparativo de carbonização de três tipos de turfa em relação à madeira de <i>Eucalyptus grandis</i> (1987).....	51
Tabela 20	Valores médios das porosidades dos carvões.....	51
Tabela 21	Teores médios de matérias voláteis, de cinza e de carbono fixo, com base na análise química imediata dos carvões	52
Tabela 22	Faixas dos valores ideais para os teores de carbono fixo, matérias voláteis, cinza, índice de moabilidade (HGI) e enxofre para carvões a	52

	serem injetados em um alto forno (CALDEIRA, 2000).....	
Tabela 23	Resultados encontrados por ASSIS (2008) na caracterização de materiais para injeção no alto forno.....	53
Tabela 24	Classificação ASTM dos carvões por classe (ASSIS, 2006).....	54
Tabela 25	Resultados encontrados por GOMES (2002) na caracterização de materiais para injeção no alto forno.....	55
Tabela 26	Valores médios da análise química elementar dos carvões avaliados..	56
Tabela 27	Teores de oxigênio, hidrogênio e carbono dos carvões pesquisados por ANDRIONI (2002).....	56
Tabela 28	Valores médios do poder calorífico superior dos carvões avaliados...	58
Tabela 29	Valores médios percentuais, observados a partir da análise dos principais componentes das cinzas dos carvões.....	59
Tabela 30	Basidade binária das escórias no alto forno, estimada pela relação dos teores médios de CaO e de SiO ₂ , considerando-se as respectivas massas moleculares.....	61
Tabela 31	Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CMWC.....	63
Tabela 32	Índice de emissões de CO ₂ , SO ₂ e remoção de O ₂ da atmosfera na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CMWC.....	67
Tabela 33	Redução nos níveis de CO ₂ (em kg) quando se utiliza misturas de CVSG e CMWC.....	67
Tabela 34	Valores monetários (US\$/t) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CMWC.....	67
Tabela 35	Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CMKP.....	68
Tabela 36	Índice de emissões de CO ₂ , SO ₂ e remoção O ₂ da atmosfera na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CMKP.....	70
Tabela 37	Redução nos níveis de CO ₂ quando se utiliza misturas de CVSG e CMKP.....	70
Tabela 38	Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CMKP.....	70
Tabela 39	Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN1.....	71
Tabela 40	Índice de emissões de CO ₂ , SO ₂ e O ₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN1.....	74
Tabela 41	Redução nos níveis de carbono (CO ₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN1.....	74
Tabela 42	Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN1.....	74
Tabela 43	Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN2.....	74
Tabela 44	Índice de emissões de CO ₂ , SO ₂ e O ₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN2.....	77
Tabela 45	Redução nos níveis de carbono (CO ₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN2.....	77
Tabela 46	Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN2.....	77

Tabela 47	Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN3.....	78
Tabela 48	Índice de emissões de CO ₂ , SO ₂ e O ₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN3.....	80
Tabela 49	Redução nos níveis de carbono (CO ₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN3.....	81
Tabela 50	Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN3.....	81
Tabela 51	Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN4.....	81
Tabela 52	Índice de emissões de CO ₂ , SO ₂ e O ₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN4.....	84
Tabela 53	Redução nos níveis de carbono (CO ₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN4.....	84
Tabela 54	Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN4.....	84
Tabela 55	Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN5.....	84
Tabela 56	Índice de emissões de CO ₂ , SO ₂ e O ₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN5.....	87
Tabela 57	Redução nos níveis de carbono (CO ₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN5.....	87
Tabela 58	Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN5.....	87
Tabela 59	Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN6.....	87
Tabela 60	Índice de emissões de CO ₂ , SO ₂ e O ₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN6.....	90
Tabela 61	Redução nos níveis de carbono (CO ₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN6.....	90
Tabela 62	Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN6.....	90
Tabela 63	Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN7, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	90
Tabela 64	Índice de emissões de CO ₂ , SO ₂ e O ₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN7.....	93
Tabela 65	Redução nos níveis de carbono (CO ₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN7.....	93
Tabela 66	Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN7.....	93
Tabela 67	Misturas de carvões que atenderam as especificações do alto forno com suas respectivas eficiências de queima, valores de redução de CO ₂ e valores unitários de venda de CER.....	94
Tabela 68	Preço da tonelada de carvão mineral brasileiro em diferentes estados, segundo Empresa de Pesquisa Energética 2007).....	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Superfície do planeta com localização de florestas tropicais.....	7
Figura 2	Rendimento do processo de carbonização da madeira seca ao ar.....	9
Figura 3	Ciclo integrado da produção de ferro gusa, a partir de uma floresta plantada.....	15
Figura 4	Etapas de decomposição da matéria vegetal	26
Figura 5	Visão esquemática do alto forno como um sistema de contra corrente.....	20
Figura 6	Estrutura externa do alto forno e principais dispositivos de funcionamento.....	20
Figura 7	Corte longitudinal de um alto-forno siderúrgico, mostrando as suas zonas internas.....	22
Figura 8	Fluxograma esquemático dos equipamentos de uma instalação de injeção de carvão no alto forno.....	24
Figura 9	Fluxograma do sistema de injeção de finos de carvão vegetal num dos altos-fornos da ACESITA.....	26
Figura 10	Modelo da combustão da partícula de carvão.....	28
Figura 11	Balanço de massa do carbono na produção de 1 tonelada de aço.....	35
Figura 12	Moinho de esferas utilizado nos ensaios de moabilidade dos carvões. (NBR 8739).....	37
Figura 13	Gráfico de calibração do índice de moabilidade do carvão.....	37
Figura 14	Esquema do equipamento utilizado para a determinação da densidade aparente dos finos dos carvões, em g/cm^3 , de acordo com a norma NBR 8479.....	39
Figura 15	Equipamento utilizado para a simulação da injeção de finos de carvão estimando a eficiência de queima de carvões num alto-forno siderúrgico.....	40
Figura 16	Simulador de injeção de misturas de carvões do centro de pesquisa da Companhia Siderúrgica Nacional.....	43
Figura 17	Ampliação da seção referente ao ponto c do simulador de injeção de carvão.....	44
Figura 18	Equipamento TESTO 300 M and XL – Flue gas analyser utilizado para análise dos gases de combustão do simulador de injeção de finos de carvão.....	44
Figura 19	Balanço de emissões de carbono no processo de fabricação de uma tonelada de ferro gusa, considerando as proporções de carvão enforado.....	45
Figura 20	Valores médios dos teores de umidade dos diferentes carvões, comparados ao valor máximo aceite para o alto forno.....	49
Figura 21	Valores médios comparativos do grau de moabilidade (HGI) e o teor de cinza dos carvões.....	50
Figura 22	Valores médios dos teores de cinza dos carvões analisados, comparados ao valor padrão estabelecido para alto forno, segundo CALDEIRA (2000).....	53

Figura 23	Valores médios dos teores de matérias voláteis dos diferentes carvões, comparados aos valores padrões para o alto forno a coque (limite inferior e superior).....	54
Figura 24	Valores médios dos teores de carbono fixo dos carvões analisados em comparação com os limites operacionais estabelecidos para alto forno.....	55
Figura 25	Relações de O/C e H/C nos carvões minerais importados e nacionais e no carvão vegetal.....	57
Figura 26	Valores médios comparativos do poder calorífico dos carvões com os seus teores de carbono fixo.....	58
Figura 27	Correlação entre poder calorífico superior e a percentagem de carbono fixo dos carvões.....	59
Figura 28	Valores médios percentuais das somas dos teores de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ para os diferentes carvões.....	60
Figura 29	Valores das basicidades binárias das escórias no alto forno, estimada pela relação dos teores médios de CaO e de SiO_2 , considerando as respectivas massas moleculares e o limite máximo ideal para o alto forno.....	62
Figura 30	Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CMWC, com apresentação dos valores mínimos e máximos operacionais no alto forno.....	63
Figura 31	Curva do índice de eficiência de queima das misturas CVSG – CMWC em função da percentagem de carvão vegetal.....	64
Figura 32	Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CMWC e valores mínimos e máximos exigidos pelo alto forno.....	64
Figura 33	Valores comparativos dos teores de cinza com os índices de eficiência de queima da mistura CVSG – CMWC.....	65
Figura 34	Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CMWC, com apresentação dos valores máximos para operação no alto forno.....	65
Figura 35	Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CMWC, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	66
Figura 36	Valores comparativos dos teores de carbono fixo, matérias voláteis e eficiência de queima da mistura CVSG – CMWC.....	66
Figura 37	Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CMKP, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	68
Figura 38	Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CMKP com a redução da percentagem de carvão vegetal.....	68
Figura 39	Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CMKP, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	67
Figura 40	Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CMKP, com apresentação dos valores máximo para operação no alto forno.....	69

Figura 41	Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CMKP e com apresentação dos valores máximo para operação no alto forno.....	70
Figura 42	Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN1, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	71
Figura 43	Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN1 com a redução da percentagem de carvão vegetal.....	72
Figura 44	Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN1, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	72
Figura 45	Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN1, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	73
Figura 46	Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN1, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	73
Figura 47	Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN2, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	75
Figura 48	Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN2.....	75
Figura 49	Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN2, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	76
Figura 50	Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN2, com apresentação do valor máximo para operação no alto forno.....	76
Figura 51	Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN2, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	77
Figura 52	Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN3, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	78
Figura 53	Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN3 com a redução da percentagem de carvão vegetal.....	79
Figura 54	Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN3, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	79
Figura 55	Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN3, com apresentação do valor máximo para operação no alto forno.....	80
Figura 56	Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN3, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	80
Figura 57	Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN4 com a redução da percentagem de carvão vegetal.....	81
Figura 58	Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN4, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	81

Figura 59	Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN4, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	82
Figura 60	Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN4, com apresentação do valor máximo para operação no alto forno.....	83
Figura 61	Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN4, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	83
Figura 62	Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN5 com a redução da percentagem de carvão vegetal.....	84
Figura 63	Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN5, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	85
Figura 64	Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN5, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	85
Figura 65	Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN5, com apresentação do valor máximo para operação no alto forno.....	86
Figura 66	Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN5, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	86
Figura 67	Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN6 com a redução da percentagem de carvão vegetal.....	87
Figura 68	Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN6, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	88
Figura 69	Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN6, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	88
Figura 70	Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN6, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	89
Figura 71	Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN6, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	89
Figura 72	Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN7 com a redução da percentagem de carvão vegetal.....	90
Figura 73	Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN7, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	91
Figura 74	Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN7, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	91
Figura 75	Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN7, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	92

Figura 76	Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN7, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.....	92
Figura 77	Relação entre as eficiências de queima das misturas com os valores monetários dos CER`s.....	94
Figura 78	Variação dos preços da tonelada de carvão mineral nos Estados Unidos, segundo BP Global.....	97
Figura 79	Comparação entre os custos de injeção por tonelada de ferro gusa produzido e os valores monetários na venda de CER`s.....	100

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISAO DE LITERATURA	3
2.1 Biomassa como Fonte de Energia	3
2.2 Eucalipto com Matéria-prima Energética	4
2.2.1 Características gerais do eucalipto	5
2.3 Quantificação de Carbono em Florestas	5
2.4 Carbonização da Madeira	8
2.4.1 Fenômenos térmicos associados ao processo de carbonização da madeira e dos seus principais componentes químicos	10
2.5 Carvão Vegetal na Siderurgia.	12
2.5.1 Aspectos metalúrgicos na utilização do carvão vegetal	13
2.5.2 Aspectos ambientais relacionados à siderurgia a carvão vegetal ...	14
2.6 Carvão Mineral na Siderurgia	15
2.6.1 Origem e formação do carvão mineral	16
2.6.2 Mineração de carvão	17
2.6.2.1 Mineração a céu aberto	17
2.6.2.2 Mineração subterrânea	17
2.6.3 Qualidade do carvão mineral	18
2.6.3.1 Carvão mineral nacional	18
2.6.3.2 Carvão mineral importado	19
2.7 Alto Forno Siderúrgico	19
2.8 Injeção de Finos de Carvão no Alto Forno	22
2.8.1 Qualidade do carvão vegetal e sistema de injeção no alto forno	25
2.8.2 Injeção de finos de carvão mineral no alto forno	27
2.9 Fenômenos da Combustão do Carvão na Injeção no Alto Forno	27
2.10 Efeito Estufa e o Tratado de Kyoto	29
2.11 Mercado de Carbono	31
2.11.1 Mercado de carbono no setor siderúrgico	32
2.12 Biomassa no Setor Siderúrgico	33
2.13 Balanço de Energia no Setor Siderúrgico	34
3. MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1 Obtenção dos Carvões	36

3.2	Análise Granulométrica dos Carvões	36
3.3	Determinação do Teor de Umidade	36
3.4	Moabilidade dos Carvões	37
3.5	Densidades dos Carvões	38
3.5.1	Densidade verdadeira	38
3.5.2	Densidade aparente	39
3.6	Porosidade dos Carvões	39
3.7	Análise Química Imediata dos Finos de Carvão	39
3.8	Análise Química Elementar dos Finos de Carvão e da Cinza	40
3.9	Poder Calorífico dos Carvões	40
3.10	Basicidade Binária das Escórias	40
3.11	Ensaio de Combustão dos Carvões	40
3.11.1	Simulador de injeção de carvão no alto forno	42
3.12	Ganhos Ambientais e Avaliação de Certificados de Emissões Reduzidas	44
3.13	Análise dos Dados	45
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1	Ensaio Granulométrico dos Carvões	47
4.2	Teor de Umidade dos Carvões	48
4.3	Ensaio de Moabilidade dos Carvões	49
4.4	Ensaio das Densidades dos Carvões	50
4.5	Porosidades dos Carvões	51
4.6	Análise Química Imediata dos Carvões	52
4.7	Análise Química Elementar dos Carvões e Poder Calorífico	55
4.8	Análise Química Inorgânica da Cinza dos Carvões.....	59
4.9	Basicidade Binária das Escórias	61
4.10	Eficiência de Combustão dos Finos de Carvão e Avaliação dos	
Certificados de Emissões Reduzidas (CER's)	62	
4.10.1	Misturas dos finos CVSG – CMWC	62
4.10.2	Misturas dos finos CVSG – CMKP	67
4.10.3	Misturas dos finos CVSG – CN1.....	71
4.10.4	Misturas dos finos CVSG – CN2	74
4.10.5	Misturas dos finos CVSG – CN3	78
4.10.6	Misturas dos finos CVSG – CN4.....	81
4.10.7	Misturas dos finos CVSG – CN5.....	84

4.10.8 Misturas dos finos CVSG – CN6	87
4.10.9 Misturas dos finos CVSG – CN7	90
4.11 Aspectos Técnicos e Ambientais Relacionados às Misturas de Carvões.	93
4.11.1 Cálculo do valor arrecadação com a venda de Certificado de	
Emissões Reduzidas na injeção da mistura 80 % CVSG – 20 %	
CN1 para um alto forno do porte do alto forno n° 2 da CSN.....	95
4.11.2 Estimativa dos preços dos carvões minerais importados, nacionais	
e carvão vegetal para injeção no alto forno	97
5. CONCLUSÕES	102
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
8. GLOSSÁRIO	114
Anexos	116

1. INTRODUÇÃO

As ações decorrentes das atividades econômicas e industriais têm provocado alterações significativas na biosfera, resultando na quase duplicação da concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE). O setor siderúrgico está entre uma das atividades econômicas que mais poluem o meio ambiente (SAMPAIO & LOPES, 1995). Esse fato se deve à alta produtividade e o baixo nível de tecnologia empregado nos processos. Apesar desse ponto negativo, o setor siderúrgico está entre os que mais geram benefícios à sociedade, através de empregos gerados em toda sua cadeia produtiva e impostos arrecadados. A siderurgia brasileira está entre as maiores do mundo em volume de produção e qualidade de produto (RIBAS & OSÓRIO, 1999). No cenário mundial, o Brasil está em 9ª lugar com uma produção de aço bruto de 35.606×10^3 t (IBS, 2007).

O setor siderúrgico brasileiro divide-se em dois grupos, no que se refere ao elemento termo-redutor utilizado em seus altos fornos: o carvão mineral e carvão vegetal. O segmento siderúrgico a carvão vegetal é de baixa produção, mas é de fundamental importância, pois traz divisas ao país com suas exportações, contribuindo com a geração de empregos, desde o plantio da floresta até a produção do ferro gusa. Outro grande benefício do carvão vegetal está relacionado com o meio ambiente, pois, seu consumo contribui para um baixo nível de emissões de gases de efeito estufa. Isto se deve ao balanço positivo de carbono, quando comparado ao carvão mineral (SAMPAIO, 1990). Apesar das vantagens apresentadas no uso do carvão vegetal, ele tem uma grande desvantagem, que é o alto índice de geração de finos (moinha). Segundo OLIVEIRA (1988) a alta friabilidade do carvão vegetal possibilita a geração de até 25 % de finos. Esses finos de carvão, por estarem abaixo da granulometria adequada do alto forno, não podem ser utilizados no processo siderúrgico.

Esses finos de carvão, apesar de se encontrarem fora das especificações de carregamento no alto forno, não devem ser descartados. Dentre as alternativas tecnológicas para aproveitamento dos finos, a que se apresenta como a mais viável é a injeção através das ventaneiras do alto forno (BRAGA, 1999). A tecnologia de injeção de finos de carvão não é uma técnica nova, sendo desenvolvida no século passado. A injeção de carvão pulverizado (PCI – “Pulverized Coal Injection”) foi um dos desenvolvimentos mais importantes nos últimos anos. A injeção de carvão pulverizado permite acrescentar à carga do alto forno uma massa de 180 a 200 kg de carvão pulverizado por tonelada de ferro, substituindo parcialmente o coque, insumo importado que corresponde a maior parte dos gastos com a produção do ferro, caracterizando, portanto, uma redução significativa nos custos operacionais das siderúrgicas. Os carvões utilizados para injeção no Brasil são importados em sua totalidade, sendo escolhidos em função dos custos e das experiências bem sucedidas de uso. Muitos são os parâmetros estudados para a escolha dos carvões utilizados na injeção. Entre os parâmetros mais limitantes, tem-se o teor de cinza, o teor de enxofre, os teores de álcalis presentes na cinza e o índice de moabilidade. Ainda não existe um consenso sobre o melhor tipo de carvão pulverizado a ser injetado no alto forno. Entretanto, a razoável flexibilidade do processo de injeção permite uma expansão dos tipos de carvões a serem utilizados, especialmente sob a forma de misturas. Isto acompanha a tendência mundial das usinas pelo uso de carvões de menor custo. A injeção de carvão pulverizado nos altos fornos vai de encontro a uma necessidade crescente da indústria siderúrgica: reduzir custos e aumentar a produtividade (WEBER, 1990).

O Brasil possui grandes reservas de carvão mineral, localizadas na região sul; porém, este carvão apresenta propriedades metalúrgicas inadequadas ao uso no alto forno, tais como: altos teores de cinza, enxofre e matérias voláteis. Entretanto, estas propriedades metalúrgicas podem ser melhoradas quando se utilizam misturas com outros carvões de melhores características metalúrgicas (REIS, 1999).

A problemática da emissão de gases de efeito estufa com utilização de combustíveis fósseis é conhecida, uma vez que estes gases podem provocar aumento da temperatura terrestre, trazendo consequências graves para o clima. Isso culminou com o estabelecimento do Tratado de Kyoto que especificou metas de redução de dióxido de carbono e criou mecanismos de flexibilização para auxiliar os países industrializados a atingir essas metas. Neste contexto, projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), que promovam a geração de créditos de carbono vêm se estabelecendo no país. A utilização de misturas de carvão vegetal com carvão mineral em alto forno siderúrgico poderá significar ganhos ambientais e econômicos para a indústria siderúrgica.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar os ganhos ambientais e econômicos do emprego de misturas de finos carvões vegetal com mineral (importado e nacional), através da injeção em alto forno siderúrgico. Assim, foi feito um estudo comparativo da eficiência de combustão das misturas, visando a redução das emissões de carbono e a possibilidade de comercialização de Certificados de Emissões Reduzidas (CER's). Os objetivos específicos foram:

- avaliar a qualidade dos carvões a serem utilizadas;
- proceder os ensaios de eficiências de queima de misturas dos carvão vegetal com carvões minerais nacionais e importados, em diferentes proporções;
- avaliar, para cada mistura, os parâmetros operacionais do alto forno relevantes ao processo de redução;
- calcular para cada mistura que atende aos parâmetros do alto forno o índice de redução de emissões de dióxido de carbono e os valores monetários de comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas (CER's);
- avaliar a melhor mistura para injeção em alto forno considerando-se os valores de eficiência de queima e valores monetários na comercialização do CER's, simulando seu emprego, e
- avaliar os ganhos ambientais e econômicos do emprego da melhor mistura calculados através da redução de carbono e ganhos de CER's.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Biomassa como Fonte de Energia

Nosso planeta possui na sua superfície uma zona onde se desenvolvem os organismos vivos: a biosfera. Esta, por sua vez, se divide em duas partes: a região autótrofa, onde se desenvolvem e vivem as plantas verdes; e a região heterotrófica, na qual estão inseridos os seres que, direta ou indiretamente, vivem à custa das plantas clorofiladas. A massa que constitui a biosfera é denominada biomassa. A biomassa engloba simultaneamente tanto os seres vivos como também o conjunto dos produtos orgânicos gerados por estes seres vivos, mas que não se encontram completamente decompostos em moléculas elementares. Essa biomassa contém uma energia química que, para as plantas verdes, provém da conversão da energia luminosa graças à fotossíntese (FREITAS, 2005).

O Brasil, em particular por apresentar uma elevada taxa de incidência de energia solar, condições significativamente favoráveis e uma disponibilidade relativamente elevada de grandes áreas apropriadas para a agricultura e, ou, silvicultura, apresenta todas as condições necessárias ao processo natural de bioconversão para produção de biomassa, quer seja para fins energéticos ou para produção de alimentos, já que dispõe de vastas áreas disponíveis ou pouco utilizadas. É o único país do mundo que pode aumentar sua base florestal sem prejudicar a produção de alimentos (NUNES, 1998).

Desta forma, a energia solar condiciona o crescimento de todos os seres vivos, especialmente os vegetais, que graças à fotossíntese elaboram a sua biomassa a partir da energia disponibilizada pelo sol (BRITO, 1993). A Tabela 1 compara a produtividade florestal e a absorção de dióxido de carbono no Brasil e em outros países que têm economia fortemente baseada em produtos madeireiros (CAVALIERO & JANUZZI, 1998).

Assim, a fotossíntese corresponde à absorção da energia solar que a planta faz à custa de sua clorofila, convertendo-a em energia química. Na fotossíntese, a energia solar é aproveitada para usar a água que a planta retira do solo e o gás carbônico absorvido do ar, transformando-o em matéria orgânica (carboidratos: glicose, celulose e outros) e desprendendo o oxigênio. Apesar das trocas e conversões de energia inerentes ao processo fotossintético, os vegetais absorvem apenas uma pequena parte desta energia. O processo fotossintético é condicionado por inúmeros parâmetros, dentre os quais a espécie, as condições de luminosidade, os teores em oxigênio, a temperatura do ar, o estresse fisiológico, entre outros. Assim, torna-se evidente que o clima e as características do solo interferem consideravelmente na velocidade de crescimento dos vegetais, de forma que através do mundo uma gama significativa de formações vegetais em equilíbrio com o meio ambiente apresenta um potencial de produção energética bem diversificada (MELLO, 2001).

Tabela 1. Comparação da produtividade florestal e absorção de dióxido de carbono em países com economias baseadas em produtos madeireiros.

País	Produtividade Florestal (m ³ /ha/ano)	Absorção de dióxido de carbono (t/ha/ano)
Finlândia	5	4
Portugal	10	8
EUA	15	12
África do Sul	18	14,4
Brasil	30	24,0

Fonte: BDS/SBS

A biomassa constitui a massa total dos organismos por unidade de superfície ou de volume, capaz de ser aproveitada como insumo energético. No caso particular da biomassa florestal, ela está constituída pelos elementos aéreos e subterrâneos das árvores (troncos, galhos, folhas e raízes), bem como da vegetação herbácea e arbustiva, dos líquens e da serrapilheira (biomassa morta) (SAMPAIO & LOPES, 1995).

No contexto puramente energético é preciso distinguir entre a biomassa que foi plantada com a finalidade puramente energética, como as florestas energéticas de *Eucalyptus* spp., plantadas exclusivamente para atender à demanda industrial do setor siderúrgico, e a biomassa que engloba todos os resíduos orgânicos provenientes de outras atividades, como o bagaço de cana, a palha de arroz, o caroço de algodão, a casca do amendoim, entre outros (LIMA, 1987).

A quantificação da biomassa tem recebido, nesses últimos anos, uma atenção especial na medida em que ela se relaciona diretamente com a fixação do dióxido de carbono atmosférico, e agindo como redutora das emissões de dióxido de carbono, um dos grandes responsáveis pelo gases de efeito estufa (MOLINA & MOLINA, 2004).

Entre as biomassas mais importantes na fixação de dióxido de carbono, destacam-se as florestas, que possuem as maiores acumulações de material orgânico. Nas regiões tropicais e temperadas úmidas foram medidas biomassas de até mais de 400 t/ha; nas latitudes maiores da zona temperada fria, além das latitudes 50 e 60°, foram encontradas as florestas com as maiores quantidades de matéria orgânica morta, tendo massas de 25 a 100 t/ha (ANDRADE, 1993).

No Brasil, sobretudo no Estado de Minas Gerais, é muito grande o volume de madeira anualmente transformada em carvão vegetal. Segundo o relatório anual da AMS (2009), 33,43 x 10⁶ mdc foram produzidos para atender as siderúrgicas em sua demanda de carvão. Diante da enorme quantidade de madeira carbonizada anualmente e da conseqüente pressão sobre as áreas de florestas nativas ainda exploradas pelos carvoeiros, é recomendável a aplicação de técnicas visando o aumento da produtividade e melhorias na qualidade da biomassa produzida. Nesse sentido, técnicas de manejo, aliadas ao melhoramento genético e estudos sobre a qualidade da madeira têm propiciado aumentos significativos na produção de madeira.

2.2 Eucalipto como Matéria-prima Energética

No Brasil, o gênero *Eucalyptus* foi introduzido em 1825 como espécie ornamental e como quebra-vento. Para finalidades econômicas seu uso iniciou-se em 1903, quando eram necessários dormentes para atender ao desenvolvimento das estradas de ferro através da Companhia Paulista de Estradas de Ferro. O plantio de eucalipto em escala comercial teve a finalidade de produção de lenha e carvão. Logo depois, começou a ser utilizado para estruturas simples, como é o caso de postes para iluminação, mourões para cerca e como matéria-prima para papel, celulose, chapas de fibra, aglomerados e móveis (LIMA, 1987).

A crise de energia desencadeada nos anos 70 representou, sem dúvida, um impulso adicional no aumento da demanda de madeira e no conseqüente aumento do interesse na utilização do eucalipto para a formação de plantações florestais.

Com as restrições impostas em relação ao uso das florestas nativas tornou-se necessário a busca de novas alternativas para a obtenção de madeira para fins energéticos. Em função disto, foram criadas as florestas energéticas. Estas florestas, nada mais são do que povoamentos do gênero *Eucalyptus* que apresenta elevada densidade, com rotações curtas, características fundamental para produzir madeira exclusivamente para fins energéticos (MARTINS, 1982).

2.2.1 Características Gerais do Eucalipto

O eucalipto é uma espécie que tem origem na Austrália, sendo identificadas cerca de 670 espécies diferentes (LIMA, 2004). A maioria das espécies de eucaliptos são árvores típicas de florestas altas atingindo alturas que variam entre 30 e 50 metros. Algumas espécies podem atingir alturas superiores a 70 metros, como o *Eucalyptus grandis* e o *Eucalyptus deglupta*.

A madeira de eucalipto é usada para muitas finalidades, onde o manejo e o tempo de cultivo são variáveis e dependentes do produto final. Portanto, no caso do eucalipto, o produto final é o fator determinante do ciclo da cultura. A cultura é submetida a um ciclo curto, quando a finalidade da madeira se dá para celulose, papel, carvão, lenha, paletes e caixotaria, tendo-se a colheita, entre 7 e 10 anos após o plantio. Neste caso, a área é reaproveitada, permitindo-se mais dois ciclos seguintes, ou seja, mais duas rebrotas até se que faça a reforma da área. O ciclo longo é aquele que destina o produto final à indústria de móveis, construção civil e outros fins que exijam a madeira com um diâmetro maior. Neste ciclo, a madeira pode ser colhida a partir dos 14 anos até os 25 anos, tendo-se uma variação no tempo de cultivo atrelada à finalidade do produto, ao sistema de cultivo, espaçamento e adubação, entre outros fatores. (MAGALHÃES, 2001).

O cultivo do eucalipto pode ser dividido em duas etapas: implantação e manutenção. A implantação consiste na escolha da área, preparo do solo, aração e descompactação se for o caso, abertura das covas, adubação, escolha da variedade mais adequada, plantio e irrigação. A manutenção é a etapa que sucede a implantação, onde o objetivo é o acompanhamento da cultura, para que essa tenha seus melhores rendimentos possíveis. Conhecida também como a etapa dos tratos culturais, a manutenção consiste em uma série de atividades, como a irrigação, capina manual ou mecânica, desbaste, desgalhamento, controle de pragas, controle de doenças e adubação. No final do ciclo da cultura é realizada a colheita, que pode ser manual ou mecanizada, variando com a dimensão da área onde a cultura está instalada, a inclinação do terreno, entre outros fatores (BRITO & BARRICHELO, 1980a).

2.3 Quantificação do Carbono em Florestas

O Brasil é um país que dispõe das condições ideais para aproveitamento da biomassa como fonte de energia, ou como substituto dos derivados de petróleo, ou como matéria-prima para a fabricação do carvão vegetal. A elevada taxa de insolação, e disponibilidade de grandes áreas para o reflorestamento, permite a utilização dessa fonte de energia renovável em escala muito mais elevada do que em qualquer outro país. Além disto a utilização da biomassa cultivada como fonte de energia é benéfica ao meio ambiente (SAMPAIO & LOPES, 1995).

Quando se queimam combustíveis fósseis, gás carbônico é lançado para a atmosfera. O aumento da concentração desse gás na atmosfera do planeta acarreta uma elevação gradual da temperatura, fenômeno conhecido como “efeito estufa”. O efeito estufa é causado pelo bloqueio que o gás carbônico provoca à irradiação solar refletida pela terra. Ao se queimar biomassa, gás carbônico é lançado para a atmosfera, tal como no caso do combustível fóssil. Mas durante a fase de crescimento da biomassa, gás carbônico é absorvido da atmosfera e oxigênio é liberado para a mesma. Além disto, o oxigênio contribui para a recuperação do ozônio através do equilíbrio termodinâmico oxigênio-ozônio. Tratando-se de uma fonte de energia renovável, a biomassa cultivada tem, portanto, um grande futuro no Brasil, pois é necessário sempre lembrar que os combustíveis fósseis são fontes de energia não renovável e finita. (GOLDEMBERG, 2004)

O acréscimo da concentração de dióxido de carbono na atmosfera foi intensificado nos últimos 200 anos. Houve também um decréscimo correspondente na concentração do oxigênio e ozônio devido ao equilíbrio termodinâmico oxigênio-ozônio. A redução na

concentração do ozônio aumenta a radiação ultravioleta na terra, e conseqüentemente o risco de câncer na pele (MOUTINHO & BUENO, 2002).

O ano de 1750 é a data inicial do primeiro modelo de mensuração das emissões de dióxido de carbono. Atualmente estima-se que aproximadamente 70 % das emissões antropogênicas de dióxido de carbono provenham da queima de combustíveis fósseis, enquanto 30 % aproximadamente tiveram origem na mudança de uso da terra. Cerca de 45 % deste dióxido de carbono permanece na atmosfera, enquanto 30% foi absorvido pelos oceanos e o restante pela biosfera terrestre. Uma vez emitido para a atmosfera, cerca da metade do dióxido de carbono é eliminado numa escala de 30 anos; outros 30% são eliminados em alguns séculos e os 20% remanescentes ficam na atmosfera por muitos milhares de anos (SANDOR & WALSH, 2000). Até a pouco, não havia um estudo sistemático das emissões históricas pela mudança de uso da terra de cada país de forma a que se pudesse atribuir corretamente a responsabilidade histórica de cada um deles. Avaliando-se as emissões de dióxido de carbono cumulativas históricas, no período entre 1700 – 1990, devido às mudanças de uso da terra (milhões de toneladas de dióxido de carbono), nota-se a maior responsabilidade histórica de países como os EUA e a China, que ocupam os primeiros e segundos lugares respectivamente. Entretanto o Brasil tem participação significativa ocupando a quarta posição. (MCT, 2009).

A necessidade de se quantificar o carbono em uma floresta é uma das questões mais complexas de serem levantadas, pois envolve fatores externos como a variação do clima, o perfil do solo, a temperatura local e o tipo de vegetação. Cada bioma tem uma capacidade distinta de armazenar carbono, seja na forma de biomassa aérea, matéria orgânica morta, biomassa no solo (raízes) ou carbono no solo; este último é, em geral, encontrado até cerca de 1 metro de profundidade (ROCHA, 2004).

O Brasil se destaca em termos de estoque de carbono de biomassa aérea em relação ao resto do mundo, ocupando 20,50 % do total do estoque de carbono em biomassa. Biomassa aérea não representa a única fonte de estoque de carbono. Em projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo florestal, são 5 os reservatórios de biomassa que podem ser mensurados para se estimar a absorção de gás de efeito estufa (GEE) decorrentes das atividades do projeto:

- Biomassa acima do solo corresponde ao tronco, folhas, galhos. Isto é, de modo grosseiro, à parte visível de uma árvore;
- Biomassa abaixo do solo corresponde às raízes da árvore. Esse reservatório, associado ao da biomassa acima do solo, constitui o que é comumente chamado de reservatório de biomassa viva;
- Serrapilheira é a camada de folhas no solo, formada pelo desfolhamento das árvores.
- Madeira morta corresponde a galhos, árvores e arbustos mortos;
- Carbono no solo corresponde ao teor de carbono que está mineralizado na matéria orgânica do solo. Esse reservatório é mais significativo nas latitudes temperadas do globo. (SCARPINELLA, 2002)

Entre as regiões fundamentais para a manutenção do equilíbrio ambiental planetário, a zona tropical apresenta destaque, (Figura 1). A zona tropical compreendida entre as latitudes de 23,5 S e 23,5 N e dividida entre a África, América Latina e Ásia, representa mais de um terço da população mundial, correspondendo a aproximadamente 36% da superfície total de terras e 52% da área florestal do globo (BOUNGIORNO, & GILLESS, 1984).

O estoque de carbono no solo, isto é, até 1 metro de profundidade, é maior do que o estoque da atmosfera e de toda a vegetação combinados. Desta forma, qualquer discussão referente à conservação ou manejo de florestas, plantadas ou nativas, necessariamente passa pelo manejo apropriado do solo (EKONO, 1980).



Figura 1. Superfície do planeta com localização de florestas tropicais (negrito) (EKONO, 1980).

As florestas fixam carbono durante seu crescimento armazenando-o como constituintes de suas partes. E as florestas de eucaliptos, isto é, florestas plantadas, o fazem mais eficientemente, já que são mantidas em pé no seu período de maior crescimento, quando elas fixam o carbono na forma de madeira. Nas árvores adultas, existe um equilíbrio entre a quantidade de carbono consumido durante a fotossíntese e o liberado pela respiração. As únicas atividades de projetos elegíveis ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo para atividades de uso da terra, mudança no uso da terra e florestas está relacionada ao florestamento e reflorestamento. Áreas que normalmente formam uma floresta e que estão temporariamente sem estoque, como resultado de intervenção humana (corte, causas naturais), e que se espera ser revertida para floresta não são elegíveis no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, uma vez que são consideradas como áreas florestais temporariamente “desestocadas”. A Tabela 2 mostra o potencial estimado de fixação de carbono anual médio em projetos de reflorestamento no Brasil (MORA & GARCIA, 2000).

Tabela 2. Estimativa de carbono fixado em projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (reflorestamentos no Brasil). MORA & GARCIA, 2000

Classe de produtividade	Área plantada anualmente (10 ⁶ ha)	Produtividade potencial anual (tC/ha)	Carbono fixado (Mt)
Alta	0,0396	13,1	0,5187
Alta/média	0,2248	10,1	2,2705
Média	0,2898	7,3	2,1155
Média/baixa	0,0423	4,7	0,1988
Baixa	0,0750	1,3	0,0975
Totais	0,6715		5,201

Para se fazer o inventário de carbono em uma floresta de eucalipto, torna-se uma tarefa um pouco mais simples, por tratar-se de uma monocultura onde se espera uma produtividade homogênea, de acordo com a variedade cultivada e com os dados para o cultivo que se dispõe da região, restando apenas as interações com o meio.

As florestas, quando atingem o equilíbrio, têm um balanço praticamente nulo em relação à entrada e saída de carbono de sua biomassa. A quantidade seqüestrada de carbono

durante o dia no processo da fotossíntese é praticamente a mesma liberada durante o processo de respiração. Em florestas de eucalipto por estarem em desenvolvimento, absorção de dióxido de carbono é maior até que se atinja também a maturidade da floresta. A idade em que uma floresta atinge a sua maturidade ou estabilização é variável de acordo com o tipo de formação florestal, e as espécies envolvidas.

Segundo SILVA (2001) a quantidade total de carbono estimada em uma espécie de eucalipto pode ser dividida da seguinte forma: tronco 65 %, copa 13 % e raiz 22 %. Pode-se observar que o tronco corresponde a mais da metade da biomassa de uma floresta de eucalipto. Desprezar a copa e as raízes para a contabilização do carbono em uma floresta de eucalipto seria um desperdício, se não fosse à dificuldade de aferição e comparação do conteúdo destas partes. Devemos considerar que a facilidade de aferição ao tronco é mais fácil, pois após a colheita, a copa é queimada ou sofre processo de decomposição no local, devolvendo o carbono para atmosfera. As raízes permanecem no solo, também sofrendo também de decomposição.

2.4 Carbonização da Madeira

A decomposição térmica ou pirólise da biomassa pode resultar em diversos produtos de grande valor econômico e energético para as siderúrgicas (MARTINS, 1982).

A carbonização é o nome dado à pirólise quando o objetivo da operação é a produção de carvão vegetal, ou ainda destilação seca, quando o objetivo do processo é a recuperação fracionada dos efluentes líquidos, denominados pirolenhosos. A carbonização pode ser considerada otimizada desde a década de trinta, tendo em vista que a partir daí se conseguia recuperar o conjunto dos produtos líquidos e por intermédio da destilação era possível obter ácido acético e metanol, principalmente, e muito frequentemente produtos gasosos reciclados dentro do próprio processo de carbonização (OBST, 1990).

Os processos de carbonização podem ser de dois tipos: contínuos ou descontínuos. Os processos contínuos trabalham 24 horas por dia, 320 dias por ano. Os gases de carbonização são utilizados para a produção de calor para manter a temperatura interna da retorta, maximizando o rendimento em carvão. Como a matéria-prima é manuseada mecanicamente, esta poderá ter comprimento ideal de 30 cm e 10 cm de diâmetro, para se obter um bom escoamento do material dentro da retorta, minimizando-se produção de finos no forno. Para uma boa carbonização em retortas contínuas, é necessário secar a madeira o que torna o processo contínuo de custo elevado quando comparado ao processo descontínuo (OLIVEIRA, 1982).

Os fornos descontínuos são muito mais empregados, principalmente os de modelos fixos. Nos processos descontínuos, a energia para pirólise é obtida pela combustão de uma parte da própria matéria-prima e seus produtos gasosos. Os processos contínuos de carbonização por sua vez, possuem uma eficiência mais alta, porém são muito mais sofisticados e de maior custo operacional (FERREIRA, 2007).

O processo de carbonização, descontínuo, propriamente dito é, em princípio, bem simples. A operação inicia-se com o preenchimento do forno, normalmente a partir do nível do solo, com madeira seca ao ar. Após o fechamento da porta, acende-se o forno, normalmente num orifício que se encontra no topo do mesmo (clarabóia), iniciando-se, desta forma, o processo de carvoejamento propriamente dito. O controle da pirólise da madeira é efetuado através de aberturas estrategicamente distribuídas nas paredes do forno, o que permite a dosagem do oxigênio no decorrer do processo. As entradas de ar são controladas, de forma que a pirólise progrida lentamente, sem que o oxigênio admitido seja suficiente para queimar o carvão já formado. O controle da tiragem é de vital importância e requer grande experiência, sendo que essa operação, normalmente, deve ser acompanhada até que a

carbonização se complete, o que pode exigir um período de vários dias, variando conforme a umidade da madeira e o tamanho do forno. Em geral, o final da carbonização é confirmado pela coloração da fumaça que sai pela(s) chaminé(s) do forno, que tornar-se-á azulada e mais leve, ocasião em que todos os orifícios deverão estar fechados e o forno será deixado a resfriar durante o tempo necessário, antes do seu descarregamento. Desta forma, tem-se o processo de carbonização clássico, com um tempo de duração que pode atingir dias, com uma taxa de aquecimento lento (BRITO, 1990).

A composição química, as propriedades físicas e o rendimento do processo estão ligados ao controle da temperatura de carvoejamento, como mostra a Tabela 3. A Figura 2 ilustra o rendimento da carbonização de uma tonelada métrica de madeira seca ao ar (12-15% umidade) (BRITO & BARRICHELO, 1980b).

Tabela 3. Propriedades do carvão vegetal produzido com diferentes temperaturas de carvoejamento (BRITO & BARRICHELO, 1980b).

Temperatura de Carvoejamento	300 °C	400 °C	500 °C	600 °C	700 °C	800 °C
% Carbono	30,2	71,5	87,0	87,5	92,4	93,4
% Hidrogênio	5,67	3,93	3,10	2,67	1,71	1,03
% Oxigênio	63,73	22,17	8,50	6,93	3,89	3,57
% Cinzas	0,4	2,4	1,4	2,9	2,0	2,0
% Umidade	1,9	2,8	2,8	1,0	1,8	2,2
% Matérias Voláteis	70,8	30,9	17,7	7,1	3,9	2,4
% Carbono fixo	28,8	66,7	80,9	90,0	94,1	95,6
Poder Calorífico (MJ/kg)	22,40	29,88	32,14	33,20	33,40	33,90
Produção de carvão vegetal (% em massa)	56,27	28,03	22,65	21,63	20,22	19,54
Eficiência energética (%)	65,92	43,80	38,07	37,56	34,22	34,64

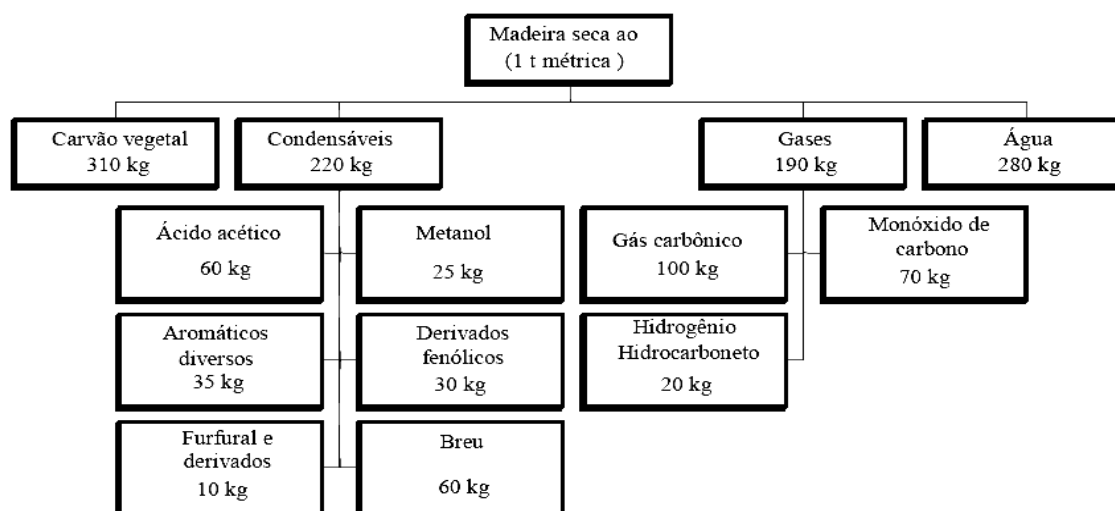


Figura 2. Rendimento do processo de carbonização da madeira seca ao ar. (BRITO & BARRICHELO, 1980b)

2.4.1 Fenômenos Térmicos Associados ao Processo de Carbonização da Madeira e dos seus Principais Componentes Químicos

Quando se fala de madeira para a produção de carvão vegetal, também deve-se considerar as suas características químicas. Tais características podem expressar, de uma forma direta, se uma madeira é de boa, média ou de ótima qualidade ou, até mesmo, contraindicá-la para a produção de carvão vegetal. Uma das principais características químicas da madeira e que mantém uma grande influência sobre as características físicas e químicas do carvão vegetal é o seu teor de lignina, BRITO & BARRICHELO (1980a) detectaram uma correlação positiva entre os teores de lignina de madeiras de espécies de eucalipto com o rendimento gravimétrico e com o teor de carbono fixo do carvão vegetal. Segundo estes autores, a lignina é mais resistente à decomposição térmica, quando comparada à celulose e às hemiceluloses, em função, sobretudo, da sua estrutura físico-química extremamente complexa. Para OLIVEIRA (1982), o comportamento da madeira, perante ao processo de carbonização, representa o somatório do comportamento de cada um dos seus principais componentes.

Quando a madeira é submetida à ação do calor, ao atingir temperaturas em torno de 150 °C, inicia-se um processo de decomposição no qual todos os seus componentes são extensivamente alterados. Em temperaturas acima de 150 °C ocorre uma destruição gradativa dos seus componentes, gerando vários produtos, dentre os quais encontram-se o carvão vegetal. A carbonização da madeira é a decomposição térmica parcial da mesma, num ambiente fechado e com quantidades controladas de oxigênio, envolvendo uma série de transformações físicas e químicas complexas (WENZL, 1970).

Estudos sobre a carbonização de madeira já demonstraram que o processo consiste, basicamente, em concentrar carbono e retirar oxigênio da madeira, sendo bastante dependente da temperatura. Longos períodos de exposição a altas temperaturas, normalmente, resultam em maiores concentrações de carbono residual. Entretanto, durante a retirada do oxigênio da constituição da madeira acaba-se perdendo carbono, associado ao oxigênio na forma de gases; daí os baixos rendimentos do processo em relação ao carbono (WENZL, 1970). Existe uma correlação positiva entre a temperatura máxima de carbonização da madeira e o teor de carbono fixo no carvão (OLIVEIRA, 1982).

A carbonização é discutida por vários autores como um fenômeno que acontece por fases. Estas fases são caracterizadas por regiões bem distintas em grau de decomposição térmica e podem ser percebidas numa mesma peça de madeira sob aquecimento (GOLDSTEIN, 1973; OLIVEIRA, 1982). Para um curto período de tempo, a carbonização da madeira inicia-se quando a temperatura do ambiente atinge valores em torno de 150 °C. Neste ponto tem-se a fase A da carbonização, quando observa-se a presença de ácido fórmico, ácido acético e do glioxal e de gases efluentes constituídos de vapor d'água, de traços de dióxido de carbono, ocorrendo principalmente a secagem da madeira, pois a temperatura no interior das peças ainda é baixa (KOLLMAN & COTÊ JR, 1968; GOLDSTEIN, 1973; LeVAN & WINANDY, 1990).

A madeira úmida faz com que parte da energia calorífica a ela aplicada seja utilizada na sua própria secagem. Por outro lado, a água aumenta a condutibilidade térmica da madeira, aumentando, conseqüentemente, o fluxo de calor pela região úmida (BROWNE, 1958). De 200 °C até 280 °C ocorre a fase B, com a fase A deslocando-se para o interior da madeira. Na fase B são produzidos gases semelhantes aos da fase A, havendo apenas uma moderação na quantidade de vapor d'água desprendido e a liberação de monóxido de carbono (GOLDSTEIN, 1973). As reações químicas até aqui descritas são de natureza endotérmica e os gases produzidos não são combustíveis (KOLLMAN & COTÊ JR, 1968). Numa segunda fase ocorre a quebra das hemiceluloses, a despolimerização da celulose nas regiões amorfas e a ruptura da lignina em blocos complexos. Ao mesmo tempo, a madeira sofre pequenas

contrações e, dependendo da velocidade das reações de carbonização, surgem pequenas rachaduras em sua estrutura em consequência da rápida expansão dos gases liberados. É nessa fase que a madeira começa a perder a sua aparência e estruturas originais, tornando-se cada vez mais enegrecida com o aumento da temperatura (BROWNE, 1958; OLIVEIRA et al., 1982).

Quando a temperatura ultrapassa os 280°C, inicia-se a fase C, quando ocorre a pirólise propriamente dita. As reações são exotérmicas e a decomposição térmica da madeira pode se manter apenas com a energia liberada da quebra das ligações das unidades básicas de celulose, hemiceluloses e lignina. A degradação térmica nesta faixa gera monóxido de carbono, metano, formaldeído, ácido fórmico, ácido acético, metanol e hidrogênio, que evoluem no sistema, diluídos com os produtos da pirólise das fases A e B, que transpõem a região já carbonizada e a superfície livre da peça de madeira. Também são gerados alcatrões que, nestas condições, são altamente inflamáveis.

Os alcatrões, gerados na terceira fase, constituídos por produtos líquidos com alto ponto de ebulição, são levados para fora do corpo sólido pelos gases e vapores da pirólise. A massa sólida, resultante da pirólise, na fase C, é o que se denomina carvão vegetal. Os produtos volatilizados podem sofrer uma nova pirólise (pirólise secundária) e reagem entre si, antes de deixarem o sistema. Esta reação secundária pode ser catalisada pelo carvão gerado, que apresenta, devido às condições em que foi formando, uma elevada atividade catalítica. Caso não haja perda de calor pelo sistema, estas reações podem ser detectadas por meio de bruscos aumentos na temperatura. As temperaturas nas quais ocorrem as reações exotérmicas ainda não estão bem definidas, pois parecem variar com a velocidade de carbonização, o tipo de madeira, o diâmetro das peças e outros fatores (BROWNE, 1958; KOLLMAN & COITÊ JR, 1968; WENZL, 1970; ELDER, 1979; SHAFIZADEH, & DeGROOT, 1976).

As hemiceluloses, a celulose e a lignina são os principais componentes químicos da madeira. Durante a pirólise, as hemiceluloses são os componentes menos estáveis à degradação térmica, devido à sua natureza amorfa. A sua degradação inicia-se em torno dos 250 °C, estando quase completa em torno dos 325 °C (OLIVEIRA, 1982). As hemiceluloses produzem mais gases não combustíveis e mais alcatrão do que a celulose. A maior parte do ácido acético produzido durante a pirólise é atribuída às hemiceluloses (BROWING, 1974; SHAFIZADEH & DeGROOT, 1976; LeVAN & WINANDY, 1990). A celulose, principal componente químico da madeira, se decompõe a temperaturas compreendidas entre 260 e 350 °C (SHAFIZADEH & DeGROOT, 1976), sendo responsável pela produção da maior parte dos voláteis inflamáveis (MARTINS, 1982). Os produtos formados na pirólise inicial da celulose, a pirólise primária, sofrem uma pirólise secundária. Como por exemplo, tem-se a levoglucosana decompondo-se, em temperaturas acima de 270°C, em água, formaldeído, ácido acético e fenóis (SHAFIZADEH & DeGROOT, 1976).

A lignina contribui, predominantemente, para a formação de um resíduo sólido rico em carbono. Em virtude da sua estrutura altamente complexa, o mecanismo de reação de degradação térmica é pouco conhecido. Contudo, existem na lignina ligações éteres e anéis furânicos, que são pontos prováveis para a quebra de sua estrutura durante o aquecimento. A degradação da lignina pode ocorrer por fragmentação termolítica e por desidratação (BROWNE, 1958). Entre 150 °C e 300 °C ocorre a quebra das ligações éter e, próximo aos 300 °C, das ligações linfáticas e aromáticas. A essa altura, as cadeias alifáticas destacam-se das cadeias aromáticas e, finalmente, rompem-se as ligações carbono-carbono às temperaturas compreendidas entre 370 e 400 °C (OBST, 1990; LeVAN & WINANDY, 1990). Embora a degradação da lignina se inicie em temperaturas mais baixas do que as observadas no caso da holocelulose, o processo ocorre de uma forma mais lenta e, por isso, tal constituinte é o principal responsável pela formação do carvão residual, representando

cerca de 50 % da sua própria massa inicial, a uma temperatura final de 450 °C (SHAFIZADEH & DeGROOT, 1976).

2.5 Carvão Vegetal na Siderurgia

A siderurgia à carvão vegetal no Brasil foi incrementada a partir do século XIX. A abundância do minério de ferro e a floresta natural, nas proximidades das fábricas, permitiram o seu desenvolvimento. Porém, esse crescimento ocorreu tardiamente, somente após três séculos do descobrimento. Isto ocorreu em função da coroa portuguesa não se interessar pelo desenvolvimento industrial de suas colônias, pois todo ferro necessário era comprado em outros países da Europa, principalmente da Inglaterra, que trocava os seus produtos industrializados pelo ouro do Brasil. Isso explica o porquê do atraso da implantação da siderurgia em nosso país (COSTA, 1978).

Posteriormente, com o apoio de D. João VI e José Bonifácio, foram realizadas contratações de técnicos alemães e franceses, como o Barão de Eschwege, Guilherme Feldner, Jean Monlevade, Henri Gorceix. Esses técnicos embrenharam-se por Minas Gerais, transportando máquinas e equipamentos em barcos, lombos de burros e arrastes. O objetivo era atender à agricultura incipiente e às mineradoras. A água, o minério de ferro e a floresta permitiam grandes progressos no setor. Já em 1853, Monlevade calculava existir, de Ouro Preto até Itabira, 85 fundições de ferro, com 150.000 arrobas de ferro produzidas. Em 1880, Gorceix estimava a existência de 110 forjas de ferro, em Minas Gerais. Por essa época, a siderurgia na Europa iniciava sua transformação, substituindo o carvão vegetal pelo carvão mineral. No Brasil, essa transformação só se iniciou em 1940, na Cidade de Volta Redonda, no Estado do Rio de Janeiro, com a construção de uma siderúrgica de grande porte, utilizando o carvão mineral como agente redutor em seu alto forno (BOAS, 1966; POUNDS, 1966; WAINER, 1975; COSTA, 1978; ARAÚJO, 1997).

Porém, a siderurgia à carvão vegetal continuou suas atividades em usinas de pequeno e médio porte, distribuídas por todo Brasil, principalmente nas regiões onde haviam grandes jazidas de minério de ferro ou florestas, de onde poderiam extrair a madeira para a produção de carvão vegetal.

Hoje, 29,17 % do ferro gusa e 17,3 % do aço brasileiro são produzidos com carvão vegetal. Considerando-se a origem da madeira para produção de carvão vegetal, no ano de 2008, a demanda foi atendida em 49,2 % com carvão proveniente de florestas naturais e 50,8 % de florestas plantadas (AMS, 2006).

A produção brasileira de ferro gusa se divide entre a produção das usinas siderúrgicas integradas e a dos produtores independentes. Os produtores independentes de ferro gusa, também conhecidos por “guseiros”, apresentam como característica comum o emprego de carvão vegetal nos altos fornos. A produção das primeiras representou 17,52 % do total produzido em 2008, enquanto os guseiros produziram 82,47 %. Quanto ao processo, a produção divide-se entre aquele em que o ferro gusa é obtido a partir do coque e o obtido a partir do carvão vegetal. Das 32,45 milhões de toneladas produzidas, 63,8 % foram obtidas a partir do coque e 36,2 % do carvão vegetal. Neste último tipo de processo encontra-se a totalidade da produção dos produtores independentes (8,23 milhões de toneladas) e mais 1,95 milhão de toneladas produzidas pelas usinas integradas (IBS, 2008). A Tabela 4 apresenta o número de trabalhadores da siderurgia a carvão vegetal, do plantio ao enforamento na usina, no ano de 2007.

Em 2007, a produção independente de ferro gusa distribuiu-se entre Minas Gerais (56,5 %), Pará e Maranhão (36,5 %), Espírito Santo (4,0 %) e Mato Grosso do Sul (3,0 %). A produção das regiões norte e nordeste, principalmente a de Carajás é quase toda destinada à

exportação, enquanto as de Minas Gerais e Espírito Santo se dividem entre o atendimento do mercado interno e externo, sendo que cerca de 90 % de todo o ferro gusa comercializado no mercado interno é oriundo de Minas Gerais. Os produtores independentes de ferro gusa buscam a auto-suficiência em carvão vegetal, a partir da implantação de novas áreas florestais e da implementação de avanços tecnológicos que visam à otimização do processo, bem como o melhor aproveitamento das suas fontes energéticas (AMS, 2008).

Tabela 4. Mão-de-obra empregada nos segmentos que utilizam carvão vegetal no Brasil, do plantio ao enformamento na usina, no ano de 2006

Segmento	Empregos Diretos	Empregos Indiretos
Siderurgia Integrada	8.068	32.272
Ferro gusa	11.100	51.200
Ferros-ligas	8.970	35.800
Total	28.138	119.272

Fonte: IBS, 2007

2.5.1 Aspectos metalúrgicos na utilização de carvão vegetal

O carvão vegetal é o combustível e redutor mais puro e com menor teor de cinzas entre todos os energéticos sólidos usados para essa finalidade. Os efluentes gasosos (gás de alto forno) e sólidos (escórias) são reciclados pela floresta. O carbono é retirado do dióxido de carbono pela fotossíntese e incorporado à biomassa, enquanto o oxigênio é liberado e retorna a atmosfera. As escórias são fontes de cálcio de silício que podem ser úteis no cultivo de eucalipto e auxiliar na calagem do solo. O silício retém água no solo e na planta, evita pragas e doenças reduzindo o uso de agrotóxicos. Como o alto forno trabalha na produção de ferro líquido num limite de temperatura inferior ao similar à carvão mineral, forma-se menor quantidade de compostos nitrosos (DEFENDI, 2006).

O alto forno a carvão vegetal é um reator eficiente; a média de consumo de carbono fixo por tonelada de ferro gusa é de aproximadamente 430 kg/t_{ferro gusa}. Quando se considera apenas esse parâmetro, não é muito distante da média mundial de consumo de carbono fixo dos grandes altos fornos a coque. A melhor média anual praticada para o ferro gusa é de 400 kg/t_{ferro gusa}. Considerando a parte química, o carvão vegetal apresenta teores de cinza inferior a 1%, enquanto o mineral e o coque, na melhor das hipóteses, têm teores de cinza superiores a 6 % (CARNEIRO et al., 1997)

A produção de ferro gusa através de carvão vegetal proveniente de florestas plantadas pode contribuir significativamente para amenizar os efeitos das mudanças do clima, por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Tratado de Kioto. Sabe-se que cada hectare plantado com floresta de crescimento rápido produz uma quantidade de carvão vegetal que, se fosse obtido de vegetação nativa da região, exigiria o desmatamento de cerca de 10 hectares de florestas nativas, diminuindo assim as pressões sobre as florestas nativas (BRITO, 1990).

A siderurgia clássica está baseada na utilização de coque como agente redutor nos altos fornos. Ao redor desta tecnologia foi criada uma estrutura comercial e financeira muito eficiente, porém custosa, que facilita a implantação de novos projetos de tecnologia limpa. O Brasil que apresenta carência de carvão coqueificável, tem uma dependência permanente da exportação de carvão. As plantas são fonte de carbono muito mais comum que o carvão coqueificável e, além disso, são continuamente renováveis (CARVALHO, 2005).

Segundo SAMPAIO & LOPES (1995) não existem processos para a produção de ferro gusa menos impactante ao ambiente do que aqueles baseados na energia renovável. A produção de ferro gusa baseada na utilização da biomassa plantada é a que acarreta os

menores prejuízos ao homem e ao ambiente, sendo a rota tecnológica com o maior potencial de geração e distribuição de riqueza em seu sistema integrado de produção.

Como desvantagens das florestas como fonte de energia pode-se citar a necessidade de grandes quantidades de água e de terra, o que obriga a vencer muitos obstáculos não técnicos e sim políticos e administrativos (FREITAS, 2005).

2.5.2 Aspectos Ambientais Relacionados à Siderurgia a Carvão Vegetal

A busca de fontes de energia renovável é de importância vital para a sobrevivência do homem e do planeta (SAMPAIO et al., 1999). A opção por fontes energéticas renováveis em substituição aos combustíveis fósseis, além de reduzir substancialmente o impacto no meio ambiente, permite melhor gerenciamento dos recursos naturais finitos de nosso planeta. Considerando especialmente as indústrias siderúrgicas, que fazem uso intensivo de energia, essa é uma alternativa particularmente importante para a sua produção. Considerando as diversas possibilidades de fontes de energias renováveis utilizadas, a biomassa é sem dúvida a que provoca menor dano ambiental. Quando comparada aos combustíveis fósseis, a biomassa apresenta um baixo teor de enxofre (0,1 a 0,2%) e, por isto, sua combustão é menos nociva à atmosfera do que aquela de combustíveis fósseis. A transformação energética da biomassa florestal está alicerçada nos processos químicos, termoquímicos e biológicos, tornando-se cada vez mais vantajoso associar a valorização química da biomassa com finalidades energéticas (SAMPAIO & LOPES, 1995).

A produção de ferro gusa a partir do uso de biomassa plantada é um processo que remove da atmosfera o carbono que foi emitido durante a etapa de redução do minério de ferro no alto forno, liberando o oxigênio de volta para a atmosfera. Esse processo se realiza com a energia solar através da reação da fotossíntese. Este processo é a única opção capaz de reduzir o impacto negativo da produção de ferro e outros metais, pois, além de reciclar na floresta dióxido de carbono emitido em seu ciclo industrial, regenera o oxigênio. Durante o ciclo de produção da biomassa necessária, são formados estoques permanentes de dióxido de carbono fixado e de oxigênio liberado para atmosfera. Outro aspecto importante do uso de biomassa cultivada é a redução potencial da “poluição social”, representada pela exclusão de milhões de brasileiros da vida econômica, que vivem hoje em condições intoleráveis de miséria nas periferias dos grandes centros urbanos. A produção de biomassa usa de forma intensiva a mão de obra rural (FERREIRA, 2000).

O processo de produção de ferro gusa através da biomassa é o único que consegue reciclar todos os efluentes sólidos, líquidos e gasosos dentro de seu ciclo integrado de produção, conforme Figura 3. A rota tecnológica ilustrada compreende três etapas distintas: o cultivo da biomassa, a carbonização e a metalurgia (SAMPAIO & LOPES, 1995).

do carvão brasileiro para uso siderúrgico, e após, um breve período de transição, a partir de 1991, não mais foi produzido no país esse tipo de carvão, restando a partir daí apenas uma pequena produção de carvão coqueificável para fundição (PINHO & SILVEIRA, 1998).

Em termos de contribuição na matriz energética mundial, o carvão é atualmente responsável por cerca de 22 % de todo o consumo mundial de energia primária e 45 % de toda a eletricidade gerada no mundo (ANEEL, 2007). Apesar dos graves impactos no meio ambiente, o carvão é considerado a maior fonte de energia para uso local. As principais razões para isso são: abundância das reservas; distribuição geográfica das reservas; baixos custos e estabilidade nos preços, quando comparado a outros combustíveis. Os principais impactos na extração e beneficiamento do carvão mineral são impactos socioambientais que afetam principalmente os recursos hídricos, o solo e o relevo das áreas circunvizinhas. A queima de carvão em indústrias e termelétricas provoca também graves impactos, em face da emissão de material particulado e de gases poluentes, dentre os quais se destacam o dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e os óxidos de nitrogênio (NO_x). Além de prejudiciais à saúde humana, esses gases são os principais responsáveis pela formação da chamada chuva ácida, que provoca a acidificação do solo e da água e, conseqüentemente, alterações na biodiversidade e a corrosão de estruturas metálicas (ASSIS, 2006).

2.6.1 Origem e formação do carvão mineral

O carvão é a reminiscência da vegetação pré-histórica que originalmente se acumulou nos pântanos e nas turfeiras. Em função dos movimentos tectônicos, ocorreu o soterramento em grande profundidade dos pântanos e da turfa dos alagados. Desse modo, o material vegetal passou a sofrer a ação de grandes variações de temperaturas e pressão, provocando mudanças físicas e químicas, transformando-o em turfa e em seguida em carvão (ARAÚJO, 1997).

A formação do carvão se deu no Período Carbonífero, 360 a 290 milhões de anos. A carbonização é o processo pelo qual os restos vegetais, ao longo do tempo geológico, se solidificam em ambiente anaeróbico, perdem oxigênio e hidrogênio e se enriquecem em carbono. A qualidade de cada depósito de carvão é definida pela temperatura e pressão e pelo tempo de formação, o que define a sua maturidade orgânica. Inicialmente, a turfa será convertida em linhito, ambos considerados de baixa maturidade orgânica. Em comparação com outros carvões, o linhito é mais leve e de cor mais escura. Após mais alguns milhares de anos, os efeitos da temperatura e da pressão ampliam a maturidade orgânica do linhito, transformando-o em hulha, também conhecido como carvão sub-betuminoso, e após mais algumas transformações chega-se ao carvão betuminoso, mais duro e escuro (Tabela 5). Em seguida, o aumento da maturidade orgânica leva à formação do antracito (Figura 4).

Tabela 5. Valores médios percentuais observados a partir da análise química imediata das diferentes fases de transformação da matéria vegetal até a formação do carvão mineral. (ARAÚJO, 1997)

Tipo	Oxigênio	Hidrogênio	Carbono
Turfa	40,0	6,0	57,0
Linhito	25,0	5,0	70,0
Hulha	15,0	4,5	80,0
Antracito	3,0	2,0	95,0



Figura 4. Etapas de decomposição da matéria vegetal

Os carvões de maior valor econômico são geralmente mais rígidos e fortes e frequentemente têm uma aparência escura e lustrosa. Eles contêm mais carbono, menos compostos voláteis e produzem mais energia. O antracito é o tipo superior desta escala, possuindo o maior conteúdo de carbono e de energia e o menor nível de mistura. Os dois primeiros níveis não são economicamente viáveis, sendo o linhito e o sub-betuminoso os tipos utilizados para geração de energia (BERMANN, 2002). Embora algumas vezes o carvão utilizado pelas siderúrgicas também seja usado pelo setor energético, são os carvões do tipo betuminoso e antracito que possuem um poder calorífico superior. Estima-se que as reservas de carvão no mundo sejam suficientes para suprir as necessidades de consumo pelos próximos 200 anos, sendo o combustível fóssil de maior disponibilidade. Mesmo sendo um carvão de maior qualidade, as reservas de carvão metalúrgico são ligeiramente superiores às do carvão energético, representando 53 % das reservas totais de carvão. (BP Statistical Review of World Energy, 2005).

O carvão pode ser explorado comercialmente por meio de dois métodos: superfície (ou a céu aberto) e subterrânea (ou mina profunda). A escolha do método depende da geologia do depósito de carvão. A mina de subsolo é responsável por aproximadamente 60 % da produção mundial; já em alguns países é mais comum; a mina de superfície que tem custos de exploração bem inferiores. No Brasil, as minas de carvão são em sua maior ocorrência de superfície. Para a exploração de uma mina são considerados alguns fatores que determinam a sua viabilidade técnica e econômica. Destes fatores, os mais importantes são a localização da jazida e o teor de seus minerais, que determinam a viabilidade econômica de um projeto (GOMES et al., 2008).

2.6.2 Mineração de carvão

2.6.2.1 Mineração a céu aberto

A mineração de carvão em minas de céu aberto é economicamente mais viável, pois, em geral as jazidas que afloram são extensas e profundas. Dessa forma, pode-se realizar a exploração intensiva retirando-se sempre o material da superfície sem necessidade de trabalhar no subsolo. Outra vantagem que leva ao barateamento dos custos de produção é representada pela desnecessidade de equipamentos especiais, como no caso das minas subterrâneas. Além disso, nas jazidas a céu aberto, existe a possibilidade de empregar máquinas de grandes dimensões e rendimento de produção, e o transporte do material também pode ser feito a custos razoavelmente baixos. A conjugação desses fatores permite grande economia que, por outro lado, propicia a exploração vantajosa mesmo de pequenas jazidas de elementos com relativo valor comercial (CARNEIRO, 2003).

2.6.2.2 Mineração Subterrânea

A exploração de carvão em subsolo pode em alguns casos oferecer vantagens em relação à mineração em céu aberto. Geralmente, há uma redução na ocupação e desgaste do

solo, evitando-se assim a demolição e o transporte dos terrenos de cobertura. Ao mesmo tempo, existe a possibilidade de um trabalho regular e contínuo durante o ano todo, independentemente do clima da região. A mineração em subsolo apresenta algumas dificuldades operacionais, tais como a profundidade de mineração que é limitada pela elevada temperatura no subsolo, que chega a tornar-se insuportável, a despeito dos grandes aparelhos de condicionamento de ar. Outro fator é a grande dificuldade existente no escoramento das galerias mais profundas, por causa da enorme pressão exercida pelas camadas rochosas superiores. O transporte dos materiais retirados da mina é um fator de limitação. Este deve ser feito em escalas, pois os cabos dos elevadores não resistem ao esforço de elevar toneladas de mineral dos poços mais profundos. Considerando-se todas as desvantagens, essas vão tornando os custos de investimentos muito elevados, resultando em alguns casos uma exploração inviável (GOMES et al., 2008).

2.6.3 Qualidade do carvão mineral

Com o aumento da demanda de aço no mundo houve conseqüentemente aumento no consumo de carvão mineral pelas siderúrgicas. Por outro lado, a disponibilidade de carvões de boa qualidade fica mais difícil, forçando o emprego cada vez maior de carvões com qualidade inferior ou inertes, para a obtenção de um coque de boa qualidade. É de fundamental importância a escolha dos tipos de carvões para formar o coque com as características adequadas para o uso no alto forno, principalmente sabendo-se que o coque é responsável por aproximadamente 60% do custo do ferro gusa produzido. Um conceito normalmente utilizado nesta escolha com relação ao custo é a percentagem de carbono. Na classificação dos carvões pode-se enfocar alguns aspectos como: geológico ou químico, científico ou prático, regional ou internacional. Em qualquer caso, o importante é definir os parâmetros que foram determinados para elaborar esta ou aquela classificação. De uma forma prática, os carvões para fabricação de coque são classificados com base em: teor de carbono fixo; teor de materiais voláteis; teor de umidade; teor de cinza e teor de enxofre (CARVALHO, 2005).

2.6.3.1 Carvão mineral nacional

Historicamente, a mineração de carvão no Brasil durante décadas foi intermitente e primitiva, somente passando a adquirir estatura de uma indústria moderna a partir da Segunda Guerra Mundial, ainda que em ritmo lento e cheio de altos e baixos. O auge na produção de carvão no Brasil ocorreu na década de oitenta, em termos de volume de produção, mecanização das minas, número de trabalhadores empregados e valores econômicos arrecadados (DE LUCA, 2001).

A partir da década de noventa ocorreu uma drástica queda no volume de carvão comercializado, devido à desregulamentação do setor. Com a desobrigação de compra de carvão metalúrgico nacional pelas siderúrgicas integradas, a mineração de carvão entrou em declínio. Somente nessa década começou a ocorrer alguma recuperação do setor, com a elevação dos preços e o maior consumo de carvão pelas termo-elétricas (MARRECO & PEREIRA, 2006).

As reservas de carvão no Brasil somam 32 bilhões de toneladas, dos quais cerca de 28 bilhões de toneladas (89%) estão no Rio Grande do Sul; 3,3 bilhões de toneladas (10%) em Santa Catarina; 103 milhões de toneladas (0,3%) no Paraná e apenas 8,5 milhões de toneladas no Estado de São Paulo. Segundo o Departamento Nacional de Pesquisa Mineral, a produção do carvão brasileiro em 2007 foi de 6,194 milhões de toneladas em carvão bruto, corresponde a 0,12 % da produção mundial deste insumo energético. Desta produção, 6 Mt de carvão vendável ou passível de consumo principalmente pelas usinas termoelétricas e 0,194 Mt de

toneladas para o setor metalúrgico. Está muito aquém do potencial das jazidas e da capacidade instalada das carboníferas (DE LUCA, 2001). O carvão nacional contribui apenas com 1% na matriz energética brasileira, enquanto a indústria siderúrgica importa cerca de 13 milhões de toneladas/ano de carvão estrangeiro, carreando cerca de US\$ 650 milhões/ano, contribuindo com o desequilíbrio da balança comercial brasileira e o aumento da dependência externa. Um dos fatores que prejudicou a produção e consumo do carvão mineral brasileiro pelo setor siderúrgico após a desregulamentação, foi o fato de o carvão mineral ser de baixa qualidade e causar grandes danos ambientais na sua extração. O carvão metalúrgico nacional possui alto teor de cinza e de enxofre e a baixa qualidade deste carvão faz com que o Brasil importe esse insumo energético de diversos países (WEBER, 1990).

2.6.3.2 Carvão mineral importado

A globalização provocou uma competitividade muito grande no setor siderúrgico. As siderúrgicas foram forçadas a buscar redução de custos, através do aumento de sua produtividade, afim de se manterem competitivas em seus mercados (JAMALUDDIN et al., 1996).

O carvão mineral é matéria-prima básica para produção de coque. A partir de misturas de carvões com características bem distintas são produzidos coque de qualidade satisfatória e custo de produção reduzido. Praticamente 90 % das reservas mundiais de carvão mineral encontram-se no hemisfério norte (Rússia 56,5%, EUA 19,5%, China 9,5%, Canadá 7,8%, Europa 5%, África 1,3%, outros países 0,4%). Entre os maiores produtores, destacam-se a China, os Estados Unidos, a Índia, a Austrália, a África do Sul, a Rússia e a Polônia. Nesse meio, a posição do Brasil como produtor de carvão mineral é inexpressiva, pois o país possui 1,1 % das reservas mundiais, além de ser de baixa qualidade, o que dificulta tanto o seu aproveitamento como fonte de energia, como para fins siderúrgicos (BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY, 2006).

Foi a partir dessa deficiência energética, que criou-se a dependência do mercado externo. Desta forma, as siderúrgicas brasileiras importam carvão mineral de vários países, optando por aqueles que apresentam menor preço e qualidade satisfatória. Um dos fornecedores é a PT Kaltim Prima Coal, produtor de carvão térmico na Indonésia. A empresa situada em Kalimantan norte-oriental, sendo um carvão betuminoso, alto-volátil com valor calorífico alto, baixa teores de cinza, enxofre e umidade total. A Anglo Coal é outra mineradora de carvão, localizada na Austrália. Suas minas estão localizadas em Queensland e New South Wales, também possui participação efetiva de 23% na mina Jellinbah, em Queensland. O carvão da Anglo Coal é betuminoso, de baixo teor de matérias voláteis, valor calorífico alto, baixo teores de cinza, enxofre e umidade total.

2.7 Alto Forno Siderúrgico

O alto forno continua sendo o principal equipamento para produção de ferro primário (ferro gusa) no mundo, responsável por cerca de 60 % do aço produzido mundialmente (IBS, 2007). Usam-se como matérias-primas uma carga metálica (minério de ferro, pelota e sinter), combustível (coque ou carvão vegetal) e fundentes (calcário, dolomita e quartzo), variando de acordo com o alto forno e a própria matéria-prima. A redução do óxido de ferro se processa à medida que as matérias-primas descem em contracorrente em relação aos gases, provenientes da queima do carbono com o oxigênio do ar aquecido soprado pelas ventaneiras (Figura 5) (LINGIARDI, 2004). Os produtos formados pela interação e reações entre gases e matérias primas são: ferro gusa, gases, escória, poeira e lama.

Na estrutura externa do alto forno destaca-se a região das ventaneiras, que é constituída por peças de cobre refrigeradas a água, situadas na parte superior do cadinho, por onde é injetado ar quente e os materiais pulverizados. Segundo ASSIS (2004), o alto forno divide-se internamente em cinco zonas.

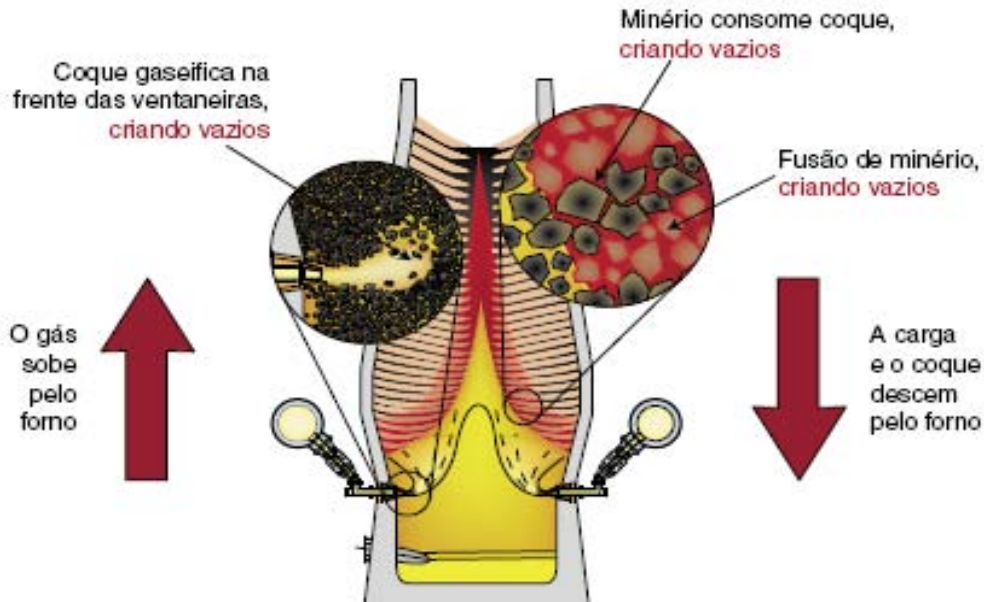


Figura 5. Visão esquemática do alto forno como um sistema de contra corrente (LINGIARDI,2004).

A estrutura do alto forno é dividida basicamente nas seguintes partes: goela, cuba, rampa, cadinho (Figura 6) (ARAÚJO, 1997).

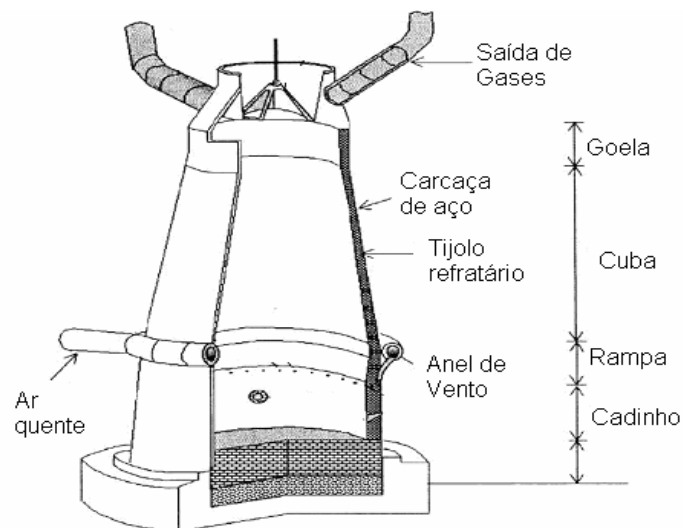


Figura 6. Estrutura externa do alto forno e principais dispositivos de funcionamento (ARAÚJO, 1997).

As zonas de um alto forno, conforme apresentado na Figura 7, podem ser caracterizadas da seguinte maneira (MACHADO, 2006):

Zona granular - Região do forno onde a carga é composta de coque ou carvão vegetal, que é o principal elemento gerador de energia térmica e química ao processo de redução; minério de ferro, fonte metálica da carga (sinter, pelota, hematita); e fundentes (dolomita, calcário, cascalho), fonte dos elementos que corrigem as características da escória (basicidade, volume, viscosidade e temperatura). Esta região, compreendida entre o nível superior da carga e o início de amolecimento da carga metálica, se mantém sólida e apresenta temperaturas variando entre 100 °C e 900 °C.

Zona de amolecimento e fusão - Localizada logo abaixo da zona granular, é definida pela temperatura de início de amolecimento e final de fusão dos componentes da carga metálica. Pelo fato de os materiais estarem numa fase de transição física, essa região determina ao sistema uma elevada resistência à passagem dos gases, sendo responsável por uma elevada perda de pressão na coluna do forno, acima da mesma;

Zona de gotejamento - Região compreendida entre a zona de amolecimento e fusão e a região das ventaneiras. Nela ocorrem diversos fenômenos, tais como a fusão dos materiais metálicos, as reações de incorporação dos elementos não ferrosos (silício, manganês, enxofre, carbono e o fósforo) ao ferro gusa, a maior parte da dessulfuração do ferro gusa, a fusão da dolomita na região inferior da rampa e a parcial transformação do coque ou carvão vegetal, no estado sólido, em dióxido de carbono. Nesta região tem-se o minério fundido, transformado em gusa, descendo por entre as pedras de carvão ou coque, dividindo espaço com os gases ascendentes da região das ventaneiras.

Zona de combustão – Esta região localiza-se na frente das ventaneiras, onde ocorre a combustão do carvão pelo oxigênio proveniente do ar quente soprado. Nesta região do forno é importante que sejam controlados alguns parâmetros, dentre os quais destacam-se: a temperatura de chama, que corresponde ao calor gerado principalmente pela combustão e pelo calor transportado pelo ar soprado. Essa temperatura sofre influência de outras variáveis no processo como o enriquecimento do sopro com oxigênio; a injeção de hidrocarbonetos (óleo, gás natural, finos de carvão); o volume do gás gerado, que é definido pelos gases que atravessam as ventaneiras. Este volume deve ser controlado em função da permeabilidade da carga, uma vez que, se a permeabilidade diminui, tem-se menos vazios para o gás fluir, sendo necessário a redução do volume de gás que atravessará a carga; e a velocidade dos gases na frente das ventaneiras, que está diretamente relacionada à temperatura de chama, com o volume de gases gerados nas ventaneiras e com o diâmetro das ventaneiras. Esta velocidade também influi na penetração dos gases, uma vez que, em tese, quanto maior for a velocidade, maior será a penetração. No entanto, o redutor chega ainda sólido na região das ventaneiras, é bombardeado continuamente pelo sopro em alta velocidade, o que acarreta uma abrasão, e provoca a geração de finos. Estes finos pioram a permeabilidade nesta região, dificultando a penetração dos gases. Portanto, quanto maior a velocidade dos gases, menor a permeabilidade e, conseqüentemente, menor a penetração.

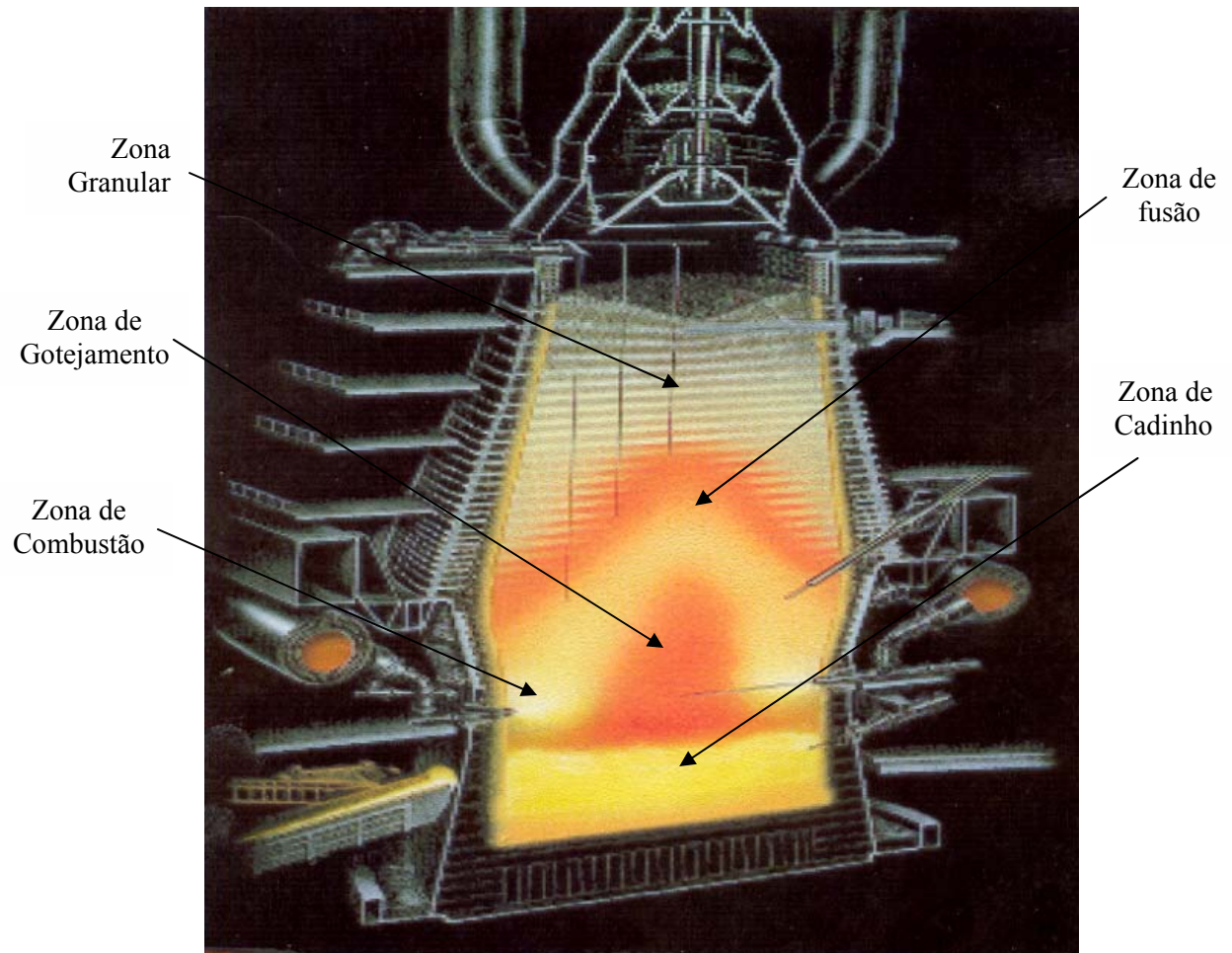


Figura 7. Corte longitudinal de um alto forno siderúrgico, mostrando as suas zonas internas (MACHADO, 2006).

2.8 Injeção de Finos de Carvão no Alto Forno

A injeção de finos de carvão em alto forno iniciou-se em 1831 com uma patente inglesa e passou por várias etapas de desenvolvimento no mundo inteiro. No Brasil, pelo fato do país ser dependente de fontes externas de carvão mineral, a primeira empresa nacional a trabalhar com esse processo foi a Acesita, com a injeção de carvão vegetal em alto forno, o que difundiu a utilização dessa tecnologia na siderurgia brasileira (ASSIS, 1998). A Tabela 6 mostra o processo evolutivo da injeção de finos de carvão em altos fornos.

Tabela 6. Cronologia da implantação da injeção de carvão no alto forno no mundo (ASSIS, 1998).

Data	Fato ocorrido
1831	Patente inglesa para injeção de carvão
1840 - 1845	Experiências de injeção de carvão na França
1877	Patente alemã.
1910 - 1920	Experiência com transporte pneumático e injeção, com conclusões limitadas, devido a poucos recursos técnicos.
1943	Produção de ferro-silício com utilização da injeção de carvão.
1959	Experiências na Rússia na Usina de Dzerzinsky, Rússia
1959 - 1961	Experiências no alto forno de La Chasse na França.
1963	A Weirton Steel Co, nos EUA, iniciou a injeção de carvão
1967	A injeção torna-se rotina operacional do alto forno de Bellefonte, Ishland, no EUA, da Armco Steel Co.
1976	Término do estudo de viabilidade técnico-econômica da ACESITA.
1980	Iniciam-se teste em planta piloto na ACESITA
1981	Teste no alto forno nº 2 na ACESITA
1982	A injeção no alto forno é incorporada no alto forno nº 2 na ACESITA
1986	Implantação da injeção de carvão no alto forno nº 1 da ACESITA
1989	Implantação provisória de injeção no alto forno da Siderúrgica Pains
1990	A Mannesmann inicia a injeção de carvão no alto-forno nº 1
1990	A Siderúrgica Pains implanta a injeção de carvão no 3 alto fornos.
1993	A USIMINAS inicia a injeção de carvão nos 3 altos fornos
1995	A Açominas inicia a injeção de carvão no seu alto forno nº 1
1995	A Cia Siderúrgica de Tubarão inicia a injeção de carvão
1995	A COSIPA inicia a injeção de carvão no seu alto forno
1995	A Cia Siderúrgica Nacional inicia a injeção de carvão no alto-forno nº 2

De acordo com BRAGA (1999), as principais vantagens da injeção de carvão em alto forno são:

- Para empresas que possuem *déficit* de coque é vantajoso economicamente adquirir carvão e prepará-lo para a injeção, quando comparado à aquisição do coque;
- A injeção de carvão aumenta a vida útil das coquerias e diminui o número de desenformamento;
- A injeção elimina o investimento em coqueria para empresas que pretendem aumentar a produção de ferro gusa;
- Com a injeção de carvão, podem-se utilizar carvões de baixo custo, uma vez que esses não necessitam ter propriedades coqueificantes;

- Devido ao seu efeito refrigerante, a injeção de carvão leva a um abaixamento da temperatura de chama no alto forno e para mantê-la nos níveis normais é necessário aumentar a temperatura de sopro, reduzir a injeção de vapor ou enriquecer o ar soprado com oxigênio;
- Redução no consumo específico de coque, e
- Melhora na qualidade do coque e aproveitamento mais racional das reservas do carvão mineral.

Com relação aos equipamentos utilizados na injeção de carvão no alto forno deve-se considerar alguns princípios, segundo CASTRO & TAVARES (1998):

- O carvão deve queimar na zona de combustão; para que ocorra esse fenômeno, o carvão deve ser pulverizado na menor granulometria economicamente possível.
- O carvão deve ser distribuído de forma uniforme pelas ventaneiras.
- O equipamento de injeção de carvão deve ter alta taxa de utilização; para isto, deve haver um fluido, que pode ser o próprio ar, que mantenha a linha pressurizada, evitando-se o retorno de ar quente. Em situações onde o redutor possui baixa temperatura de ignição, é interessante que se tenha um gás inerte para o transporte pneumático.
- Deve-se ter uma capacidade de estocagem para no mínimo seis horas de injeção, visando suprir qualquer parada no sistema de preparação.
- O sistema deve garantir um carvão antes da injeção com umidade máxima de 4,0 %, para evitar aglomeração durante o transporte e maior abaixamento da temperatura de chama.

A Figura 8 ilustra o fluxograma dos equipamentos de uma instalação de injeção de carvão no alto forno (LINGIARDI, 2004).

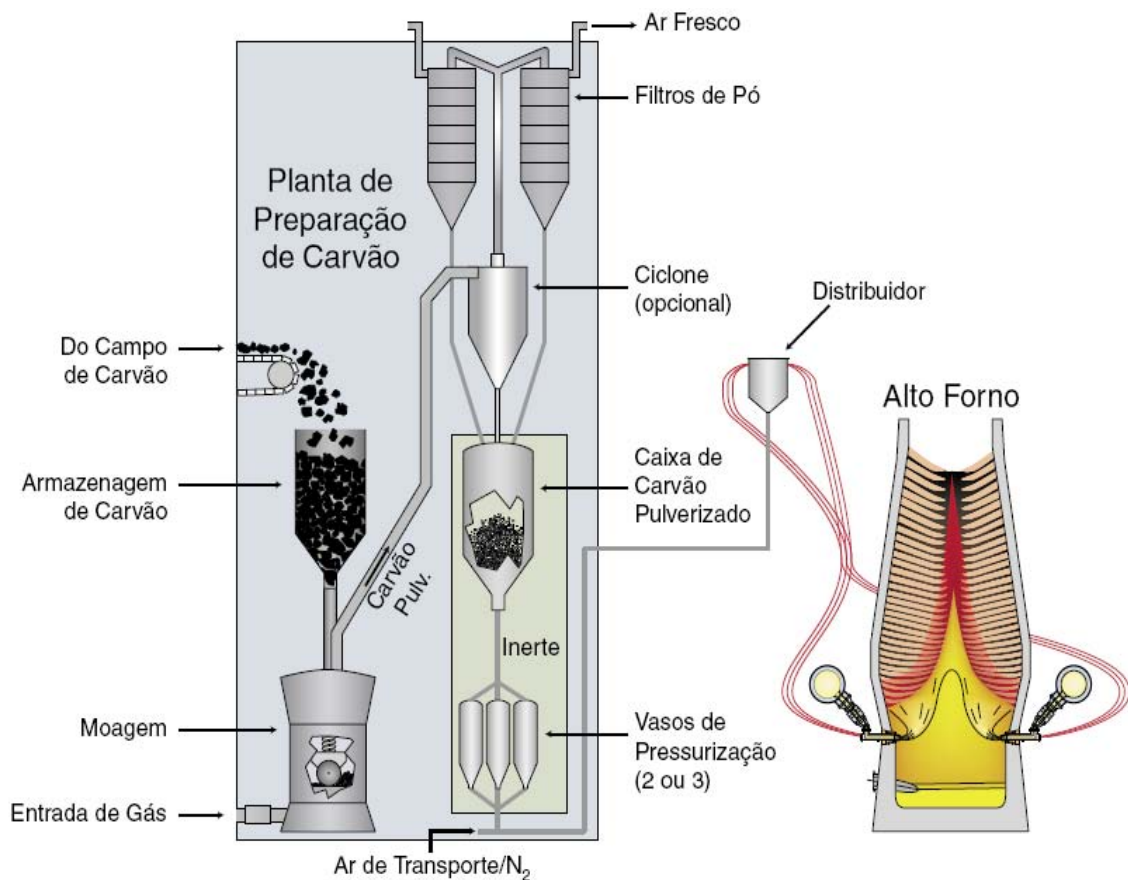


Figura 8. Fluxograma esquemático dos equipamentos de uma instalação de injeção de carvão no alto forno (LINGIARDI,2004).

2.8.1 Qualidade do carvão vegetal e sistema de injeção no alto forno

Quando o carvão vegetal é direcionado para o uso em um alto forno, deve-se atentar para a sua combustibilidade. Dentre as principais características que podem afetar o grau de combustão do carvão vegetal destacam-se: o teor de matérias voláteis, a composição da cinza, a reatividade do carvão que já liberou seus componentes voláteis e o tamanho das partículas. Segundo RIBAS & OSÓRIO (1999) outros parâmetros operacionais, tais como a temperatura de sopro, o enriquecimento e a umidade do ar soprado, a taxa de injeção e o tipo e o posicionamento da lança de injeção também podem afetar a eficiência da combustão. Além disso, os teores de elementos minerais no carvão, como enxofre, fósforo e sílica devem ser mantidos em níveis tais que não exijam procedimentos posteriores para o ajuste da qualidade do ferro gusa. Quanto maior o teor de matérias voláteis no carvão, maior será a eficiência de queima. Entretanto, a injeção de carvões com altos teores de matérias voláteis resulta na geração de um volume muito grande de gases no alto forno, aumentando o tamanho e a instabilidade da zona de combustão, causando então uma maior degradação do carvão nesta região (RIBAS & OSÓRIO, 1999).

O teste de tamboramento é utilizado pelos consumidores de coque, carvão mineral e carvão vegetal, com o objetivo de se determinar a resistência destes materiais à ação combinada de abrasão e queda. Este teste dá uma indicação do índice de friabilidade e produção de finos, quando solicitado mecanicamente durante o manuseio. Através dele pode-se fazer comparações entre carvões produzidos a partir de diferentes espécies vegetais e condições de carbonização (BRITO & BARRICHELLO, 1980b).

Ao ser injetado nas ventaneiras de um alto forno, o carvão pulverizado passa por quatro etapas básicas de combustão: aquecimento, desvolatilização, ignição e combustão dos voláteis e do carvão desvolatilizado. A combustão dos voláteis ocorre rapidamente, sendo que os carvões com altos teores de matérias voláteis, por serem mais reativos, resultam na formação de uma menor quantidade de carvão desvolatilizado. Por outro lado, o maior volume de voláteis ocasiona um grande aumento da pressão de topo e do fluxo de gás periférico, sendo necessárias alterações operacionais a fim de manter a estabilidade do alto forno, como o carregamento central do carvão. Após a queima dos voláteis ocorre a etapa de combustão do carvão desvolatilizado, bem mais lenta do que a etapa anterior, mas que, sob altas taxas de injeção, dificilmente será completada na zona de combustão (CASTRO & TAVARES, 2006).

A injeção de materiais sólidos, líquidos ou gasosos em altos fornos não é uma técnica nova. Ela foi desenvolvida junto aos altos fornos, sobretudo a partir do século passado. Os motivos que levam a optar pela injeção são determinados pelos fatores ligados ao aumento de produção, aproveitamento de fontes energéticas naturais de baixo custo, aproveitamento de resíduos de redutores, melhoria da qualidade do ferro gusa e controle de processo (ASSIS, 1998). A utilização mais viável para os finos de carvão vegetal, sob o ponto de vista econômico, é a injeção dos mesmos no alto forno, o que possibilita a redução do consumo de carvão vegetal na usina (CAMPOS & SILVEIRA, 1977).

No Brasil, após estudos que se iniciaram em 1976 e testes em unidade piloto a partir de 1980, a Companhia ACESITA incorporou na prática operacional do alto forno o primeiro sistema de injeção de finos de carvão vegetal (OLIVEIRA & GUSHIKEN, 1999). A tecnologia desenvolvida pela ACESITA tem sido aperfeiçoada e várias modificações foram incorporadas ao sistema. No início, a taxa de injeção foi projetada para 130 kg de finos de carvão / $t_{\text{ferro gusa}}$ e, atualmente, já alcança valores próximos de 200 kg de finos de carvão / $t_{\text{ferro gusa}}$ (BRAGA, 1999; JONSOHN, 1999).

Além das vantagens da injeção de carvão em alto forno relatadas anteriormente, deve-se registrar outras vantagens específicas na injeção de carvão vegetal: aproveitamento

integral do carvão vegetal, uma vez que cerca de 25 % da produção é constituída de finos; como o manuseio de carvão vegetal nas usinas siderúrgicas gera poluição por partículas sólidas, ocorre a necessidade da instalação de equipamentos para o despoeiramento. Os finos captados por estes equipamentos podem ser injetados no alto forno; necessidade de menores áreas de reflorestamentos, devido ao menor consumo de carvão vegetal; e, o equilíbrio de dióxido de carbono do alto forno torna-se positivo, considerando-se a liberação de menores taxas desse composto do que a absorvida pela floresta (BRAGA,1999) .

Segundo PORTO & BRAGA (1993), o sistema de injeção de finos de carvão vegetal no alto forno da ACESITA pode ser dividido nas três etapas apresentadas a seguir, conforme:

1ª) Secagem e moagem dos finos de carvão vegetal – a secagem e a moagem dos finos de carvão vegetal são feitas simultaneamente, em um moinho de rolos do tipo Raymond, onde são introduzidos os gases quentes provenientes da combustão de gás de alto forno. A estocagem dos finos é realizada em silos com a capacidade para cerca de 8 horas de injeção, com um sistema de fluidização por gás inerte, o que garante o escoamento do material além da segurança contra incêndios;

2ª) Fluidização e transporte pneumático – do silo de estocagem, os finos são transferidos para o sistema de transporte pneumático onde, através de vasos de pressão e alimentadores rotativos, são introduzidos numa tubulação e transportados até o alto forno. Este sistema tem uma configuração tal que possibilita o transporte ininterrupto de material, em taxas que podem ser variadas em função da velocidade dos alimentadores rotativos; e,

3ª) Distribuição e injeção – os finos, quando chegam no alto forno, são divididos em tantos ramais quantas forem as ventaneiras do forno. O sistema de distribuição é colocado em uma plataforma situada acima do nível das ventaneiras de forma a evitar interferências e, para cada ventaneira, desce uma tubulação onde estão acopladas as lanças de injeção. A Figura 9 ilustra o sistema de injeção de finos num dos altos fornos da ACESITA.

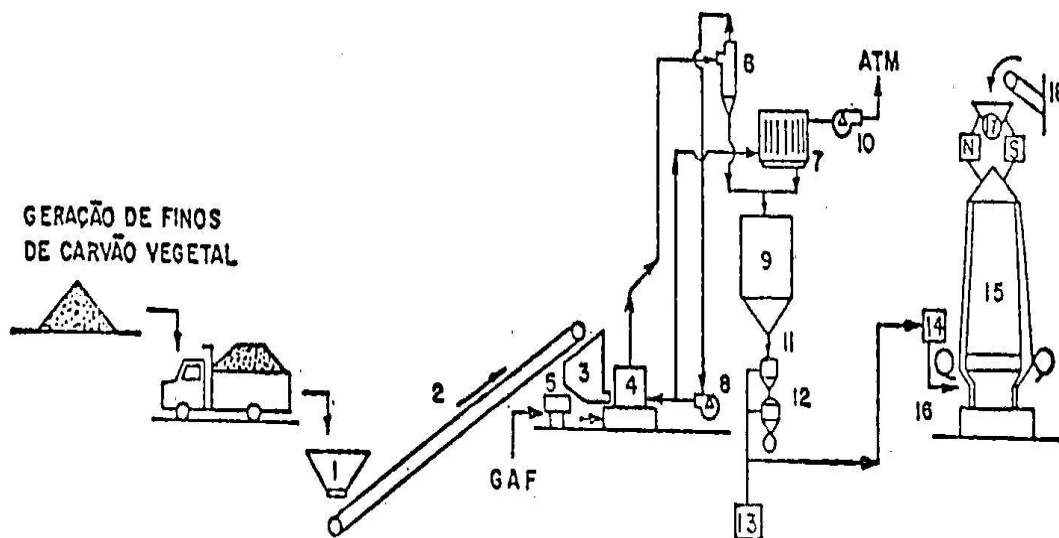


Figura 9. Fluxograma do sistema de injeção de finos de carvão vegetal num dos altos fornos da ACESITA, em que: 1 = Tremonha; 2 = Transportador de correia; 3 = Silo de matérias-primas com a capacidade para 50 m³; 4 = Moinho de rolos Raymond para 3 a 10 t/hora; 5 = Gerador de gases quentes; 6 = Ciclone; 7 = Filtros de manga; 8 = Exaustor principal; 9 = Silo de material pulverizado com a capacidade para 200 m³; 10 = Exaustor secundário; 11 = Vaso de pressão; 12 = Vaso de transporte; 13 = Compressor; 14 = Distribuidor; 15 = Alto-forno; 16 = Ventaneiras; 17 = Carregamento do topo; e, 18 = Alimentação do alto-forno (PORTO & BRAGA, 1993).

Quando da injeção nas ventaneiras de um alto forno, deve-se atentar para as propriedades físico-químicas do carvão vegetal. Características como a granulometria média, o teor de cinza e a umidade do carvão devem ser consideradas. As densidades do granel,

aparente e relativa verdadeira do carvão também são parâmetros que auxiliam na determinação das características do carvão. A porosidade do carvão está diretamente ligada a sua reatividade, sendo que porosidades elevadas favorecem a reação de oxidação e prejudicam a resistência mecânica. Deve-se, portanto, buscar uma relação que permita o trabalho com carvões de alta reatividade e boa resistência mecânica. Com base nos valores das densidades aparente e verdadeira pode-se estimar a porosidade do carvão vegetal (OLIVEIRA, 1982). Para ser injetado no alto forno, o carvão deve ser moído e soprado através de tubulações. Antes da injeção propriamente dita, deve-se determinar a densidade aparente dos finos, para se ter condições de estimar a massa de finos injetada.

A granulometria do carvão vegetal influencia o comportamento da queima na zona de combustão do alto forno e interfere no desgaste dos refratários e na produtividade do moinho. O aumento da granulometria da partícula do carvão vegetal não altera o seu índice de combustão até cerca de 1,00 mm, devido à própria estrutura do carvão vegetal, altamente porosa e friável (OLIVEIRA, 1982).

Aumentando-se o teor de cinza do carvão injetado nas ventaneiras dos altos fornos, ocorre uma redução no índice de combustão do mesmo (ASSIS, 2006). Isto decorre do calor gasto no aquecimento, fusão e redução da cinza.

2.8.2 Injeção de finos de carvão mineral no alto forno

Com a elevação da produção de ferro gusa e a paralisação da bateria de fornos de produção de coque em inúmeras siderúrgicas a carvão mineral por motivos ambientais, operacionais ou custos de ampliação, houve um aumento considerável no *déficit* de coque e, com isso, a dependência da compra do coque externo.

A planta de injeção de carvão mineral é um sistema contínuo de transporte pneumático utilizando um ou mais vasos. Os vasos de injeção são carregados por um grande silo de estocagem de carvão pulverizado. O silo é mantido com atmosfera inerte por nitrogênio e os teores de oxigênio e monóxido de carbono são monitorados continuamente. O carvão fino é selecionado por uma peneira vibratória antes de abastecer o vaso que após a sua pressurização, o carvão contido no seu interior estará pronto para ser injetado. A troca de injeção do vaso ocorre quando é emitido o sinal do peso mínimo para o computador de controle de processo, ou quando ocorrer uma alteração elevada na taxa de injeção de carvão. Quando o vaso inicia a injeção no interior do alto forno, o vaso vazio é despressurizado para que inicie o seu carregamento. O gás de arraste utilizado no processo de injeção é o nitrogênio e o seu fluxo é controlado de acordo com a taxa de injeção de carvão, onde para taxas baixas utiliza-se um volume elevado de nitrogênio e para taxas elevadas o volume é reduzido (WEBER, 1990).

2.9 Fenômenos da Combustão do Carvão na Injeção no Alto Forno

Para que os benefícios da injeção de carvão possam ser bem aproveitados, é necessário que este carvão queime integralmente dentro da zona de combustão. Para atingir esse estágio operacional, é necessário buscar condições que acelerem esse processo de queima. Estudos desenvolvidos por BENNETT (2004), aplicados para a seleção de carvões injetados em altos fornos, concluíram que, para a determinação do melhor carvão ou mistura a ser injetada, é necessário considerar alguns parâmetros: a eficiência de queima e os teores de cinza e enxofre. Para efeito de comparação foi adotado o critério utilizado pelas siderúrgicas, que não injeta misturas de carvões no alto forno com teores de cinza acima de 10 % e teores de enxofre acima de 0,8 %.

Quanto à modelagem física, é relatada na literatura a existência de dois tipos de fornos: os fornos-piloto, que tentam obter as condições mais próximas possíveis do processo no alto forno, sendo destacado o da NSC (Nippon Steel Corporation - Japão). Tais fornos trabalham com injeção contínua, simulando a região das ventaneiras (zona de combustão). A eficiência de queima dos carvões é obtida através de um balanço de massa, utilizando-se as cinzas como parâmetro, o outro forno foi idealizado na universidade de Aachen (Alemanha), onde a queima da amostra é feita uma de cada vez, ou seja, o processo de queima é intermitente; isto é, não é contínuo. Esse equipamento tem uma concepção bem mais simples e um tempo de resposta para o ensaio menor do que os anteriores, mas só pode ser utilizado para análises qualitativas e comparativas das performances dos carvões. A obtenção da eficiência de queima é feita através da análise química do gás, sendo o resultado uma referência do melhor ou pior comportamento de um carvão. O mecanismo de combustão da partícula de carvão, que ocorre na região das ventaneiras foi descrito por SILVA (2006), conforme mostra a Figura 10.

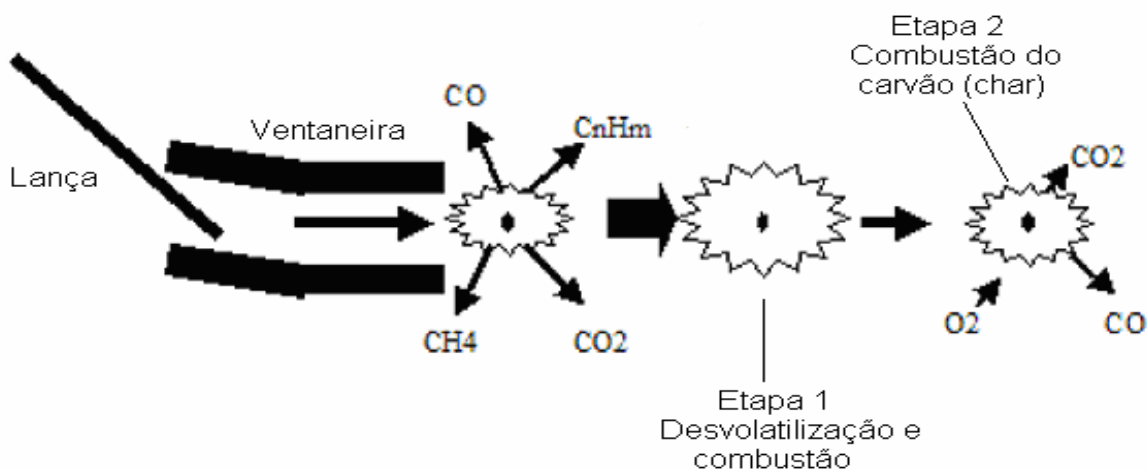


Figura 10. Modelo da combustão da partícula de carvão (SILVA,2001).

HUTNY et al. (2003) mostraram a influência dos parâmetros de qualidade do carvão, as condições em que ocorre a combustão e o tipo de equipamento (lança de injeção) na eficiência de combustão. A Tabela 7 mostra a dependência da eficiência de combustão com as variáveis do processo.

Baseado no mecanismo de queima do carvão e considerando o tempo extremamente curto de residência do material no *raceway*, da ordem de 20 ms, JAMALUDDIN et al.(1986) e ISHII (2001) observaram a importância da matéria volátil do carvão na eficiência de combustão. Tal fato decorre da diminuição da temperatura de ignição da partícula com o aumento da quantidade de matérias voláteis, além do que uma maior desgaseificação da matriz sólida do carvão tende a gerar um *char* (carvão desgaseificado) mais poroso e reativo. Este fenômeno foi bem identificado por SAITO et al. (1991), através de um equipamento experimental utilizado na combustão de carvão. Esse equipamento possibilita o recolhimento da amostra para análise da microestrutura do carvão, nos diferentes estágios do processo de queima. No estudo, constataram o aparecimento de poros provenientes da liberação do volátil no carvão, tão mais intensamente quanto maior o teor de matéria volátil do carvão testado.

Tabela 7. Representação esquemática da dependência da eficiência de combustão com as variáveis do processo.

		Variáveis do Processo
Eficiência de Combustão	Propriedades do carvão	- Matéria Volátil - Teor de inerte (macerais) - Microestrutura do Char - Matéria mineral
	Condições de combustão	- Taxa de injeção e excesso de ar. - Tamanho da partícula - Temperatura de sopro - Pressão de sopro - Teor de oxigênio
	Tipos de lança de injeção	- Tipo de lança - Ponto de posição de injeção

O processo de combustão do carvão pulverizado descrito por ISHII (2001) mostrou que ocorre uma mudança estrutural na superfície do carvão durante o processo de ignição. Essa mudança é iniciada com a expansão e evolução do alcatrão fundido, seguida da desgaseificação desse alcatrão, o que provoca o bloqueio dos poros da partícula de carvão. Em seguida, o alcatrão se desprende e sai da partícula. Esse processo é contínuo até a fusão completa da partícula de carvão.

Partindo da premissa de que a reação de combustão pode ser decomposta em dois processos distintos, sendo a combustão da matéria volátil e a combustão do carbono, JUNK & BROWN (1993), propuseram um modelo para a dinâmica da combustão do carvão em leito fluidizado. O carvão, ao entrar no leito fluidizado, é rapidamente submetido à decomposição térmica, liberando matérias voláteis, tais como metano, alcatrão e outros hidrocarbonetos. A desvolatilização da partícula de carvão proporciona um aumento de porosidade e diminui a massa específica, fato esse consolidado em carvões do tipo alto volátil que entra em processo de combustão espontânea quando estocado no pátio por um período superior a 8 meses. Segundo LAU & NIKSA (1992), a queima dos voláteis é considerada como instantânea e a composição dos voláteis será obtida a partir de um balanço de carbono, hidrogênio e oxigênio do carvão, do semi-coque e dos voláteis, levando em consideração que o semi-coque é composto por carbono. Este balanço é executado em base seca, sem considerar o teor de cinzas.

Na reação dos gases com a partícula de carvão, é considerada a reação do oxigênio e a do gás carbônico. Pela temperatura elevada, o produto da reação do oxigênio com a partícula de carvão é o monóxido de carbono e as reações são superficiais. Nos trabalhos desenvolvidos por ISHII (2001), CARNEIRO (1997), PHILLIP & BENNET (1997), HUTNY et al. (2008) e YOSHIDA et al. (1991), a correlação entre taxa de substituição (coque consumido no alto forno pelo carvão queimado nas ventaneiras) e a eficiência em queima da mistura de carvões ficou comprovada. A relação se mostrou inversamente proporcional, ou seja, o aumento da taxa de substituição resultou na diminuição da eficiência de queima do carvão.

2.10 Efeito Estufa e o Protocolo de Kyoto

O aquecimento global é a consequência do aumento da temperatura na superfície do planeta, e cada vez mais, esse fenômeno tem preocupado a comunidade científica. Acredita-se que a elevação da temperatura seja devido aos processos industriais e uso de combustíveis fósseis, que elevam a concentração na atmosfera de gases geradores do efeito estufa, tais como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e os

clorofluorcarbonos (CFCs). Há décadas que se sabe da capacidade que o dióxido de carbono tem para reter a radiação infravermelha do sol na atmosfera, estabilizando assim a temperatura terrestre por meio do efeito estufa, mas, ao que parece, isto em nada preocupou a humanidade que continuou a produzir enormes quantidades destes gases. A grande preocupação atual é se esses gases podem vir a provocar um aumento na temperatura terrestre suficiente para trazer graves conseqüências à escala global, pondo em risco a sobrevivência do homem (FONSECA et al., 2001).

A preocupação com essas mudanças passou a ser demonstrada em diversas reuniões e uma série de acordos, como a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), que propiciaram aos países de todo o mundo a oportunidade de se unirem para discutir as soluções mais adequadas na elaboração de estratégias globais de proteção ao sistema climático. Esses acordos culminaram com o estabelecimento, em 1997, do Protocolo de Kyoto que entrou em vigor em 2005. O cronograma dos tratados e convenções que geraram o Tratado de Kyoto está apresentado na Tabela 8. O Tratado de Kyoto especificou metas de redução de dióxido de carbono equivalente para os países industrializados e criou mecanismos de flexibilização para auxiliar esses países a atingir essas metas (KYOTO PROTOCOL, 2007).

Para melhor compreender a participação brasileira nas negociações do regime de mudanças climáticas é necessário salientar que as emissões de carbono no Brasil têm três grandes vantagens e uma grande desvantagem. As três vantagens são: ser um país em desenvolvimento, estando fora dos compromissos obrigatórios de redução de emissões de carbono correspondentes aos países desenvolvidos; ter uma matriz energética com geração hídrica e conseqüentemente muito limpo do ponto de vista de emissões, e possuir no seu território 16 % das florestas mundiais. A grande desvantagem é ter uma grande emissão de carbono derivada do uso da queimada na agricultura tradicional e do desmatamento na Amazônia. (VARKULYA, 2004).

Tabela 8. Cronograma dos tratados e convenções que geraram o o de Kyoto.

Ano	Encontros
1988	O programa da ONU para o Meio Ambiente cria o IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), para analisar o impacto das mudanças climáticas. Governantes e cientistas se reúnem em Toronto, no Canadá, para discutir o tema.
1990	Os cientistas informam por meio do IPCC que seria necessário reduzir 60% das emissões de dióxido de carbono na atmosfera. A ONU passa a discutir a criação de uma Convenção sobre Mudança Climática.
1992	Mais de 160 governos assinam a Convenção Quadro sobre Mudança Climática na Eco 92, no Rio. O Brasil é o primeiro a assiná-la. As mudanças climáticas são frutos da interferência humana.
1995	Primeira Conferência das Partes (COPs), em Berlim. O principal documento desta conferência foi o Mandato de Berlim.
1997	É adotado o Protocolo de Kyoto, no Japão, o mais importante acordo ambiental feito pela ONU. Até 2012, 38 países industrializados precisam reduzir em 5,2 % as emissões de gases de efeito estufa.
2001	Os EUA, maior poluidor, se retiram das discussões sobre o Protocolo por considerá-lo custoso demais à economia norte-americana. O país é responsável por 36 % das emissões globais de gases estufa e, desde, 1990, aumentaram suas emissões em 13%.
2004	Acontece a 10. ^a COP na Argentina. Cresce a pressão para que os países em desenvolvimento também tenham metas em 2012.
2005	Entra em vigor o Protocolo de Kyoto a partir do mês de fevereiro.

As emissões de carbono do Brasil são aproximadamente 5 % das mundiais, quase 25% são procedentes da indústria e da agricultura modernas e 75% da agricultura tradicional, da conversão de uso na fronteira agrícola e das atividades madeireiras ineficientes e/ou predatórias. Cerca de 80% da população brasileira está vinculada a atividades produtivas que não dependem de altas emissões de carbono e conseqüentemente tem uma taxa de emissões per capita e por unidade de PIB muito inferiores à média dos países desenvolvidos e emergentes (MACEDO & CORTEZ, 2005).

O Tratado de Kyoto especificou metas de redução de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) para os países industrializados e criou mecanismos de flexibilização para auxiliar esses países a atingir essas metas. Para tanto, as negociações devem seguir as exigências do Tratado de Kyoto, bem como as particularidades do mercado de carbono. Para os países em desenvolvimento como o Brasil, os projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), promovem a geração dos créditos de carbono, que possibilitam a entrada de divisas para o país, atraindo investidores dos países industrializados que necessitam alcançar suas metas de redução de carbono (MACEDO & CORTEZ, 2005).

Todo esse movimento de acordos ambientais e a preocupação com o meio em que vivemos, potencializou-se recentemente, especificamente a partir da década de setenta, quando a comunidade científica despertou para os efeitos e prejuízos gerados pela negligência ambiental. Após isso, o tema “proteção ambiental” teve um rápido crescimento no meio científico e político. Passaram-se somente três décadas até a ratificação do Tratado de Kyoto. Merecem destaque por terem contribuído efetivamente com o Tratado de Kyoto a Declaração de Estocolmo, a Convenção de Viena e o Protocolo de Montreal, e a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento.

2.11 Mercados de Carbono

O conceito de sequestro de carbono surgiu na Conferência de Kyoto, em 1997, com a finalidade de conter e reverter o acúmulo de dióxido de carbono na atmosfera, cuja principal consequência seria a redução do efeito estufa. A conservação de estoques de carbono nos solos, nas florestas plantadas, na preservação de florestas nativas e sistemas agro-florestais e a recuperação de áreas degradadas são algumas ações que contribuem para a redução da concentração de dióxido de carbono na atmosfera.

Créditos de Carbono têm princípio bem simples: as agências de proteção ambiental reguladoras emitem certificados autorizando emissões de toneladas de dióxido de carbono, metano, óxido de nitrogênio e outros gases poluentes. As empresas recebem bônus negociáveis na proporção de suas responsabilidades. Cada bônus ou cota em dólares, equivale a uma tonelada de poluentes. Quem não cumpre as metas de redução progressiva estabelecidas por lei, tem que comprar certificados das empresas ambientalmente bem sucedidas (CHAER,1980).

O sistema tem a vantagem de permitir que cada empresa estabeleça seu próprio ritmo de adequação às leis ambientais. Estes certificados podem ser comercializados através das Bolsas de Valores e de Mercadorias. Há várias empresas especializadas no desenvolvimento de projetos que reduzem o nível de gás carbônico na atmosfera, e esses certificados são preparados para serem vendidos para países desenvolvidos, que em geral emitem mais poluentes que o tratado permite emitir. Enfim, preparam-se para negociar contratos de compra e venda de certificados que conferem aos países desenvolvidos o direito de poluir. Existe uma forte demanda por países industrializados e uma expectativa futura de que esses mercados venham a ser um grande negócio, uma fonte de investimentos, do ponto de vista econômico (BM&F, 2007).

Nessa nova modalidade de comercialização de títulos, o Brasil saiu na frente, sendo o primeiro país na América Latina a comercializar os créditos de carbono. Foi lançado na Bolsa de Valores do Rio de Janeiro (BVRJ) o banco de projetos do mercado brasileiro de carbono, o primeiro passo para a criação do Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE). Com o MBRE, as empresas podem capitalizar os projetos, vendendo o crédito associado às reduções para outros países, empresas ou fundos internacionais que precisam atender as cotas fixadas no tratado.

O Brasil poderá se beneficiar com a venda de projetos voltados para o Mecanismos de Desenvolvimento Limpo, nos diferentes seguimentos, tanto com projetos nos setores energéticos, de transporte e florestal. No setor florestal, pode-se falar em projetos de florestamento e reflorestamento, os quais permitem que o carbono, pelo crescimento das árvores, seja removido da atmosfera (LIMA, 2004).

2.11.1 Mercado de Carbono no Setor Siderúrgico

O Brasil teve participação especial no estabelecimento do MDL, desenvolvido a partir de uma proposta brasileira que sugeria, inicialmente, a formação de um Fundo de Desenvolvimento Limpo, no qual os países de grande emissão, que não conseguissem reduzir suas emissões acordadas entre as Partes, pudessem contribuir com recursos para este fundo. Em Kyoto, a idéia do fundo foi transformada em mecanismo, passando a ser chamado de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (REZENDE et al., 2001).

A partir desse momento, as siderúrgicas começaram a pensar com mais ênfase na sua responsabilidade ambiental e no lucrativo mercado de crédito de carbono, sendo que grandes siderúrgicas estão investindo fortemente para diminuir a emissão dos Gases do Efeito Estufa (GEE). Além do faturamento com a venda das cotas para a indústria de países que assinaram o Tratado de Kyoto, as empresas brasileiras esperam reverter a imagem de grandes poluidoras nas regiões em que atuam. Na busca da adequação aos rígidos padrões do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, as siderúrgicas estão baixando custos e melhorando o seu relacionamento com as comunidades vizinhas. Os investimentos das siderúrgicas brasileiras em meio ambiente no período pós-privatizações chegou a R\$ 1,6 bilhão, segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS), entre 1994 a 2005. Entre as diferentes possibilidades de melhorias ambientais pelas siderúrgicas, a utilização da biomassa plantada representa uma boa perspectiva, pois o Brasil é um dos poucos países do mundo que possui características favoráveis para empreendimentos florestais (SAMPAIO & ANTUNES, 2007).

Considerando-se especificamente o alto forno, as emissões de carbono são relevantes, pois na produção de uma tonelada de ferro gusa, utilizando carvão mineral, são emitidos 1,742 t de dióxido de carbono, 8,4 kg de dióxido de enxofre além de retirar da atmosfera 1,226 t de oxigênio (SAMPAIO et al., 2007). Desta forma, a siderurgia contribui significativamente para o aquecimento global e as suas consequências. Uma solução para minimizar esses índices de emissões seria a utilização de biomassa plantada que somadas às vantagens ambientais, significa mais empregos no campo e maior distribuição de renda no ciclo de produção do aço, reduzindo também a poluição social (fome, miséria, desemprego, favelas, etc.). Todos os efluentes (gases, alcatrão) e resíduos (escórias, poeiras) gerados no processo através da biomassa plantada são menos prejudiciais aos seres vivos e ao meio ambiente do que os equivalentes da energia fóssil. Com isso, o setor florestal brasileiro pode ser um dos grandes beneficiados com a implementação do Tratado de Kyoto, pois estima-se que nossa capacidade de neutralização de dióxido de carbono seja de 80 milhões de toneladas. Considerando-se que o valor de créditos para quem reflorestar seja de até US\$ 40 por certificado, um CER's equivale a 1 tonelada de gás, o potencial de captação do Brasil chega a US\$ 3,2 bilhões (CHAER, 2007).

2.12 Biomassa no Setor Siderúrgico

A biomassa representa uma solução para os problemas ambientais no setor siderúrgico pelo seu baixo teor em enxofre e crescimento baseado na fotossíntese. A biomassa tem sido apontada, numa escala global, como alternativa de reciclagem do dióxido de carbono produzido pelos processos industriais e ao mesmo tempo, como minimizadora de emissões de enxofre. Entre os gases que contribuem para o aquecimento global, através do efeito estufa, o dióxido de carbono é responsável por aproximadamente 55% do efeito. A sua maior presença na atmosfera decorre principalmente da combustão de carvão, petróleo e gás natural, na geração de energia, na siderurgia, e nos transportes principalmente (MATARELLI et al., 2001)

A siderurgia, como indústria de base e grande consumidora de energia e emissora de gases de efeito estufa, deve ser tratada com atenção especial. Vale a pena lembrar que o processo produtivo gera uma massa de dióxido de carbono maior que a própria produção do aço. A otimização do rendimento dos fornos siderúrgicos vem sendo perseguida. Entretanto, a utilização de biomassas seja “in natura” (madeira), seja na forma de carvão vegetal, é a resposta definitiva para este problema. Isto se deve porque a biomassa estabelece um ciclo fechado: o dióxido de carbono é capturado pelas florestas na fotossíntese, o carbono é incorporado à biomassa e o oxigênio é liberado para a atmosfera. Assim, o carbono utilizado no processo que se transforma em dióxido de carbono, seja na redução, seja na queima e geração de energia, se obtém por um ciclo fechado com sequestro do carbono da atmosfera e não pela via da queima de carbono de origem fóssil. Outro fator importante é o baixo teor de enxofre presente na biomassa, resultando baixo índice de emissões de dióxido de enxofre (MINAS AMBIENTE, 1998).

A indústria de ferro e aço demanda por esta fonte de energia da biomassa, que no passado originava-se majoritariamente de florestas nativas e cujas técnicas de produção eram rudimentares. Esta situação, mais o fato de o setor siderúrgico agora buscar carvão vegetal oriundo de florestas plantadas, produzido com técnicas eficientes e ambientalmente corretas para ser utilizado na fabricação do chamado “aço verde”, cria grandes oportunidades para o desenvolvimento de processos e produtos inovadores. Especificamente, buscam-se aqui processos mais avançados de carvoejamento, com maior eficiência de conversão e menor custo, inclusive com o aproveitamento integral dos subprodutos, como o alcatrão e os gases residuais (GUTMAN, 1998).

Analisando-se as diferentes tecnologias que utilizam energias renováveis já desenvolvidas e suficientes para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa possui a flexibilidade de atender às necessidades energéticas, tanto para a produção de eletricidade quanto para siderurgia e transportes (LAMONICA, 2005).

O Brasil, em particular por ostentar uma elevada taxa de incidência de energia solar, condições significativamente favoráveis e uma disponibilidade relativamente elevada de grandes áreas apropriadas para a agricultura e, ou, silvicultura, apresenta todas as condições necessárias ao processo natural de bioconversão para produção de biomassa, quer seja para fins energéticos ou para produção de alimentos. A energia solar condiciona o crescimento de todos os seres vivos, especialmente o dos vegetais, que graças à fotossíntese elaboram a sua biomassa a partir da energia disponibilizada pelo sol (HALL & RAO, 1980).

Para a siderurgia trabalhar com biomassa, a lenha deve ser cortada no quinto ao sétimo ano. Dependendo da espécie plantada, é necessário existir os seis anos de floresta em franco crescimento e permanente plantio. Infelizmente, para o meio ambiente, do total de unidades de ferro gusa produzido, 60% são produzidas com o uso da energia fóssil na forma de carvão mineral transformado em coque. Os restantes 40% são de reciclagem de sucata de aços e 10% de unidades de ferro gusa produzidos através da biomassa (MATARELLI et al., 2001).

Portanto, pode-se dizer que, ao se optar pela energia renovável da biomassa, evitamos as emissões carbono e o consumo de oxigênio e promovemos a limpeza da atmosfera à medida que produzimos o ferro gusa (SAMPAIO, 1999).

2.13 Balanço de Energia

A produção de aço envolve três etapas: redução, refino e conformação. Quando uma usina siderúrgica realiza essas três etapas é considerada como integrada, sendo que a ausência de qualquer uma delas é classificada como não integrada ou semi-integrada.

O conjunto de etapas denominada de redução, engloba a coqueificação, sinterização e a redução do minério em alto forno, que juntas representam um consumo energético global entre 65 a 75 %, dependendo da siderúrgica (GOMES et al., 2008a). O consumo de energia nos diversos setores da siderurgia é função de alguns fatores: nível de produção, perfil de produção e tipos de reatores. A Tabela 9 mostra a distribuição de consumo de energia em uma usina integrada a coque. (CAVALIERO & JANNUZZI, 1998)

Tabela 9. Distribuição do consumo de energia em uma usina integrada a coque. (CAVALIERO & JANNUZZI, 1998).

Etapas de processo de fabricação do aço	Energia (%)
Sinterização	10,1
Coqueria	6,9
Alto forno	54,3
Aciaria	3,5
Sub-Total	74,8
Laminação a quente	10,7
Laminação a frio	4,4
Galvanização	5,3
Sub-Total	20,4
Outros	4,8
Total	100,0

Com relação a produção de ferro primário, quase a totalidade é produzida em altos fornos e destina-se a fabricação de aço. Como mostra a Tabela 8, o alto forno é o maior consumidor de energia. Nos últimos 25 anos muitos avanços no sentido de economizar energia nesta etapa de produção, foram conseguidos, principalmente pelo melhor conhecimento dos fenômenos que ocorrem dentro do equipamento. Em 1960 o consumo de combustível estava em torno de 750 kg/t gusa. No meio da década de 60 o óleo combustível passou a ser muito usado nos fornos. O uso do óleo, além de substituir uma parte do coque, possibilitava ao operador do forno um controle mais dinâmico do processo (CASTRO & TAVARES, 2006). Outras melhorias causaram queda ligeira no consumo energético dos fornos, até que no início dos anos 80, com a crise do petróleo, a operação com injeção de óleo passou a ser antieconômico (CARNEIRO, 2003).

A variação dos custos, disponibilidade da energia e a maior competitividade no setor siderúrgico, provocou a busca de fontes de energias alternativas, optando sempre por aquela

que tenha sua disponibilidade garantida a custos relativamente baixos e represente maior eficiência energética possível. Na procura de outros combustíveis ou técnicas que pudessem atender as exigências, a injeção de carvão pulverizado passou a ser considerada a melhor alternativa (ASSIS, 1998).

Atualmente a injeção de carvão pulverizado através das ventaneiras no alto forno, seja mineral ou vegetal, é o combustível mais utilizado. Esta prática encontra-se consolidada nas empresas siderúrgicas do mundo inteiro (ASSIS, 2006). Teoricamente, qualquer material que apresente alta porcentagem de hidrocarbonetos é possível de ser injetado pelas ventaneiras do alto forno. Existem diversos materiais já testados e aprovados para injeção: plásticos picotados, óleo combustível, álcool, alcatrão, gás natural, borras oleosas, coque de petróleo, pneus, carvão vegetal e carvão mineral pulverizados, entre outros. A escolha do material mais adequado passa, obviamente, pelos aspectos práticos e econômicos desta injeção.

Com relação a injeção de combustíveis no alto forno, o aspecto ambiental tem que ser considerado. O uso intensivo de combustíveis fósseis, acarreta uma parcela considerável de emissões de carbono, agravando ainda mais o efeito estufa, cerca de 93 % do total de carbono introduzido, na forma de coque, é emitido no processo de produção de aço bruto (GUTMAN, 1998). O balanço de carbono no processo de fabricação de 1 tonelada de aço, de forma simplificada, está apresentado na Figura 11.

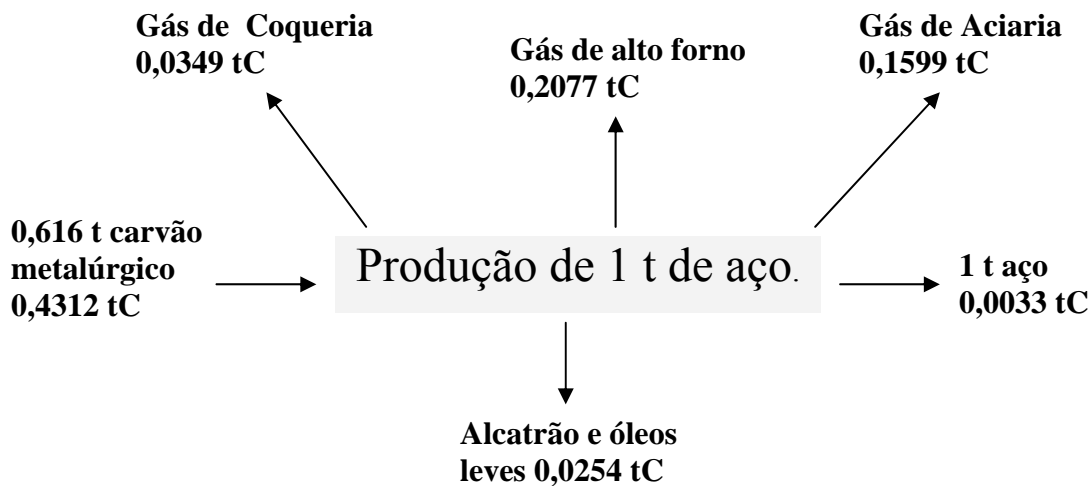


Figura 11. Balanço de massa do carbono na produção de 1 tonelada de aço (CAVALIERO & JANNUZZI, 1998).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Obtenção dos Carvões

Três tipos de carvões foram utilizados para obtenção dos finos, a saber:

- Carvão vegetal da bateria de fornos da Cia Saint Gobain Canalização, proveniente da madeira de *Eucalyptus urophylla*, com idade aproximada de 6 anos, de povoamento da Fazenda St^a Tereza, localizada no distrito de Amparo, município de Barra Mansa, RJ;
- Carvões minerais importados da Austrália e Indonésia (carvão S. Walker Creek Weak e carvão Kaltim Prima, respectivamente).
- Carvões minerais nacionais: carvão CRM-CE4200 (CN1), carvão CRM-CE6700 (CN2), carvão COPELMI-CE5200 (CN3), carvão COPELMI-CE6000 (CN4), carvão COPELMI-CE6500 (CN5), Carbonífera Metropolitana-Antracito CM20 (CN6) e Rio Deserto - Finos de carvão metalúrgico (CN7), provenientes de diferentes minas localizadas nos Estados de Santa Catarina, Paraná e Rio Grande do Sul.

3.2 Análise granulométrica dos carvões

A análise granulométrica divide a amostra por tamanho de partículas. Os carvões foram secos em estufa à temperatura de 60 °C por 1 hora. Em seguida, o material foi colocado na parte superior do conjunto de nove peneiras granulométricas (U.S. Tyler), com aberturas de: 10,0; 7,0; 5,0; 3,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,15 e 0,063 mm, acopladas em ordem decrescente de abertura no equipamento ROTAPY, segundo a norma ABNT NBR 8629 (1984). Após 5 min de peneiramento, o material retido em cada malha foi pesado, determinando-se a granulometria média ponderada, através da equação 1.

$$GMP = \sum (\phi_p \times \%mr) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

GMP – abertura média ponderada da peneira (mm)

ϕ_p – abertura da malha (mm)

$\%mr$ – porcentagem de massa de material retido na peneira

3.3 Determinação do Teor de Umidade

A análise de umidade foi feita segundo a norma NBR 8293 (1987). Uma amostra (m_1) foi colocada em colocar uma amostra (m_1) em uma placa de petri, de massa conhecida, que foi levada à estufa, à temperatura de 105°C ± 5. Após obtenção da massa constante da placa com a amostra, a mesma foi levada a um dessecador, para resfriamento. A seguir, a placa foi pesada para obtenção da amostra (m_2). O teor de umidade dos carvões foi calculado pela equação 2.

$$TU = \left[\frac{m_1 - m_2}{m_2} \right] \cdot 100 \quad \begin{array}{l} \text{onde:} \\ m_1 = \text{massa da amostra úmida (g)} \\ m_2 = \text{massa da amostra seca (g)} \\ TU = \text{teor de umidade (\%)} \end{array} \quad (\text{Equação 2})$$

3.4 Moabilidade dos Carvões

Para realização dos ensaios de moabilidade dos carvões foi utilizada a norma NBR 8739 (1985) (Hardgrove Grindability Index). O teste consiste em medir o grau de pulverização de uma amostra de carvão, numa determinada faixa granulométrica, submetendo-a a uma energia de moagem padronizada. Inicialmente, uma amostra de 50 g de carvão foi moída até uma granulometria de 0,075 mm (Figura 12). O material, depois de ser moído, foi peneirado numa malha com abertura de 0,075 mm por 5 min. Após o peneiramento, o material foi separado em duas frações: o material passante, com granulometria abaixo de 0,075 mm e o material retido na peneira, com granulometria acima de 0,075 mm. O índice de moabilidade foi determinado usando-se o gráfico de calibração, comparando a massa de carvão menor que 0,075 mm com a reta de ajuste do gráfico (Figura 13).



Figura 12. Moinho de esferas utilizado nos ensaios de moabilidade dos carvões. (NBR 8739, 1992)

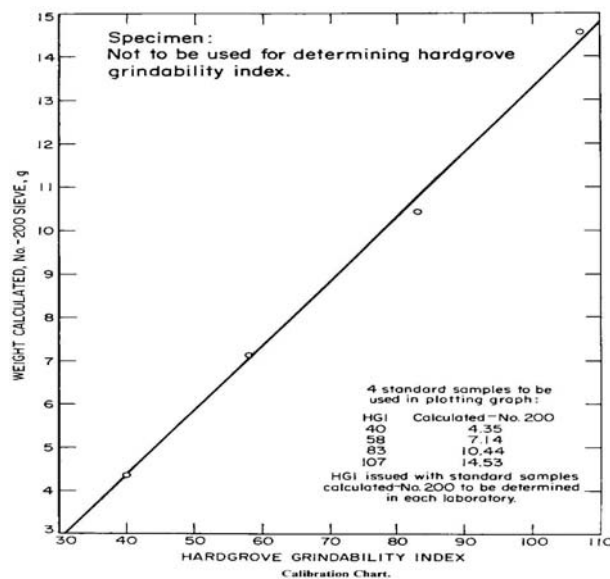


Figura 13. Gráfico de calibração do índice de moabilidade do carvão (NBR 8739, 1992)

3.5 Densidades dos Carvões

Foram determinados dois tipos de medidas de densidade: densidade aparente e densidade verdadeira.

De modo geral, existem três métodos para se expressar a densidade do carvão. Um primeiro método é a densidade do granel, que consiste determinar o peso do carvão contido em uma caixa com volume de 1m^3 . O segundo método é a densidade aparente que prevê a subtração do volume dos vazios entre os vários pedaços de carvão da medida realizada para a densidade do granel. O terceiro método é a densidade verdadeira que é a subtração da densidade aparente menos a porosidade interna do material.

Dentre as três medidas de densidades citadas, em termos práticos de operação do alto forno, a mais importante é a densidade do granel, pois, esta determina o espaço útil a ser ocupado no alto forno. As demais formas de expressão da densidade do carvão ficam quase que condicionadas a trabalhos acadêmicos de laboratório, por envolverem peças de carvão de menores dimensões e menores amostragens e, portanto, sem grande aplicação prática. Justamente pelo fato deste trabalho envolver materiais de pequena granulometria, finos de carvões, foram determinadas as densidades aparente e a verdadeira.

3.5.1 Densidade Verdadeira

A densidade verdadeira é definida pela razão da massa das partículas dividida pelo volume ocupado por elas, sendo que este volume não leva em consideração os vazios entre as partículas, excluindo-se também os poros dentro do material. Esta densidade pode ser medida por porosimetria de mercúrio (Hg) e por picnometria à gás hélio, segundo a norma ABNT NBR 9165 (1982). A densidade determinada por picnometria à hélio costuma ser designada por densidade absoluta, enquanto a densidade determinada por porosimetria de mercúrio (Hg) costuma ser designada por densidade “skeletal”. A técnica consiste no fato de que o mercúrio (Hg) ou o hélio (He) penetram nos contornos das partículas, bem como nos poros que porventura existam no material, medindo assim o volume real ocupado por uma determinada massa de material. Os valores encontrados serão diferentes, pois o gás hélio terá maior facilidade de entrar em microporos do que o mercúrio sob pressão.

O teste por picnometria à hélio consiste em secar o material em estufa por 1 h, à temperatura de $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$, introduzir o material no receptáculo do aparelho e produzir vácuo. O equipamento utilizado é o picnômetro Quantachrome, modelo Ultrafon. Ao se estabilizar a balança, obtém-se o peso do material introduzido e a seguir, injeta-se gás hélio no interior do receptáculo de volume conhecido, para que este gás ocupe os vazios entre as partículas e dos poros. Ao se estabilizar a pressão, mede-se o volume de He injetado e com os valores obtidos nos ensaios, pode-se obter a densidade através da equação 3.

$$\rho_{V-He} = \frac{P_a}{(V_r - V_g)}$$

Onde:

- ρ_{V-He} = Densidade verdadeira (g/cm^3);
- P_a = Peso da amostra (g);
- V_r = Volume do receptáculo (cm^3);
- V_g = Volume do gás He inserido (cm^3).

(Equação 3)

3.5.2 Densidade Aparente

Este ensaio foi realizado conforme a norma NBR 9165 (1982). O teste consiste em preparar três amostras na granulometria na faixa de 0,075 mm, devidamente quarteadas e secas. Após esta preparação, o material foi colocado no interior do funil, sendo em seguida aberto o fundo falso do funil, de maneira que o material caísse no interior do cilindro, removendo-se com auxílio de uma espátula a quantidade de material que sobrepusasse as bordas deste cilindro, conforme a Figura 14. O valor da densidade aparente foi obtido pela equação 4.

$$\rho_A = \frac{m}{V_C} \quad \text{onde:} \quad \begin{array}{l} \rho_A = \text{densidade aparente (g/cm}^3\text{)} \\ m = \text{massa de material (g)} \\ V_C = \text{volume do cilindro (cm}^3\text{)} \end{array} \quad \text{(Equação 4)}$$

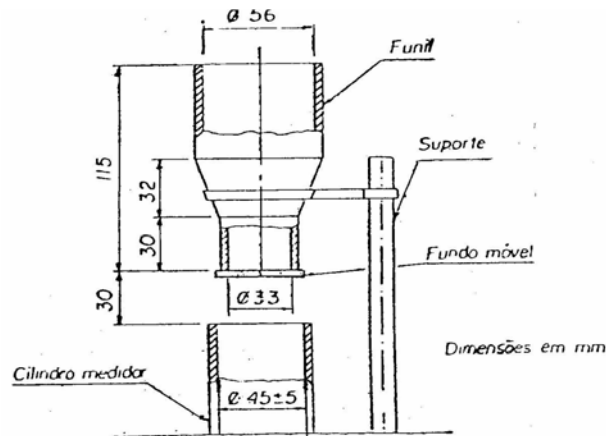


Figura 14. Esquema do equipamento utilizado para a determinação da densidade aparente dos finos dos carvões, em g/cm³, de acordo com a norma NBR 9165 (1982)

3.6 Porosidade dos Carvões

As porosidades dos finos dos carvões foram estimadas utilizando-se a equação 5.

$$\text{Porosidade} = \left(1 - \frac{d_{ap}}{d_{verd}} \right) \times 100 \quad \text{Onde:} \quad \begin{array}{l} d_{verd} = \text{Densidade verdadeira (g/cm}^3\text{)} \\ d_{ap} = \text{Densidade aparente (g/cm}^3\text{)} \end{array} \quad \text{(Equação 5)}$$

3.7 Análise Química Imediata dos Finos de Carvão

Na análise química imediata dos finos dos carvões foi utilizada a norma ASTM 1762-64, adaptada por OLIVEIRA (1982), sendo avaliadas os teores de matérias voláteis, cinza e carbono fixo. Para realização da análise química imediata utiliza-se a equação 6.

$$\% \text{ Carbono Fixo} = 100 \% - [(\% \text{ Matéias Voláteis} + \% \text{ Cinza})] \quad (\text{Equação 6})$$

3.8 Análise Química Elementar dos Finos de Carvão e da Cinza

A análise química elementar dos finos de carvão foi realizada conforme a norma NBR 8290 (1987), utilizando-se um espectrômetro de absorção atômica.

3.9 Poder Calorífico dos Carvões

O poder calorífico de um carvão é o número de calorias por unidade de massa (cal/g), liberada durante a sua combustão completa. O poder calorífico foi determinado através de uma bomba calorimétrica PARR 1201, segundo a norma ABNT-NBR 8633 (1985).

3.10 Basicidade Binária das Escórias

As basicidades binárias das escórias no alto forno foram estimadas relacionando-se os teores médios de cal (CaO) e de sílica (SiO₂) dos carvões, considerando-se as respectivas massas moleculares. Para o cálculo da basicidade foi utilizada a equação 7.

$$B = \frac{\sum \text{óxidos básicos}}{\sum \text{óxidos ácidos}} = \frac{\%CaO}{\%SiO_2} \quad (\text{Equação 7})$$

3. 11 Ensaios de Combustão dos Carvões

Os ensaios de combustão, relacionados à eficiência de queima dos carvões, foram realizados no simulador de termo-redução da Companhia Siderúrgica Nacional, apresentado na Figura 15.

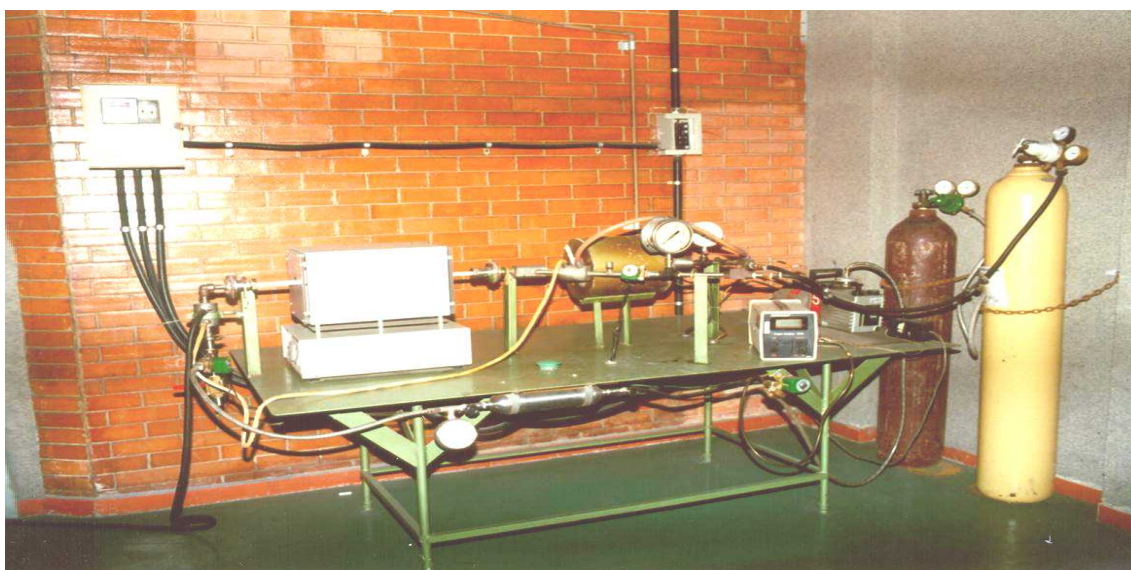


Figura 15. Equipamento utilizado para a simulação da injeção de finos de carvão estimando a eficiência de queima de carvões num alto-forno siderúrgico (CSN - Companhia Siderúrgica Nacional, 2001)

O objetivo do ensaio foi avaliar a eficiência de combustão de misturas de carvão vegetal com carvão mineral. Para a realização dos testes de combustão foram preparadas misturas proporcionais dos carvões. Foram utilizadas misturas com 0 %, 20 %, 40 %, 60 %, 80 % e 100 % de carvão vegetal. As misturas foram preparadas manualmente correspondendo aos valores em massa de cada carvão. Cada mistura foi homogeneizada, pesada e seca em estufa à 60 °C por 2 horas. As amostras misturadas fisicamente eram então colocadas no local do ensaio que é esquematicamente mostrado na Figura 16.

Ao se promover as misturas de carvões foram calculados de forma proporcional os teores de matérias voláteis, cinza, enxofre e carbono fixo em cada amostra a ser ensaiada. Essa determinação se faz necessária devido aos parâmetros técnicos utilizados no alto forno (CALDEIRA, 2000), (ver Tabela 21). Para cada mistura de carvão vegetal e carvão mineral foram dimensionados os valores das emissões de CO₂, SO₂ e O₂, e convertidos em Certificados de Emissões reduzidas.

Nos ensaios de combustão foram realizados 46 tratamentos, conforme as Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10. Misturas proporcionais de Carvão Vegetal Saint Gobain e Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak

Misturas	Carvão Vegetal Saint Gobain (%)	Carvão Mineral S. Walker Creek Weak (%)
C V - C MI	100	0
	80	20
	60	40
	40	60
	20	80
	0	100

Tabela 11. Misturas proporcionais de Carvão Vegetal Saint Gobain e Carvão Mineral Importado Kaltim Prima

Misturas	Carvão Vegetal Saint Gobain (%)	Carvão Mineral Kaltim Prima (%)
C V – CMI	100	0
	80	20
	60	40
	40	60
	20	80
	0	100

Tabela 12. Misturas proporcionais de Carvão Vegetal Saint Gobain e Carvões Minerais Nacionais

Misturas	Carvão Vegetal Saint Gobain (%)	CN1, CN2, CN3, CN4, CN5, CN6, e CN7 (%)
C V – CMN	100	0
	80	20
	60	40
	40	60
	20	80
	0	100

3.11.1 Simulador de injeção de carvão no alto forno

As Figuras 16 e 17 representam de forma esquemática o simulador de injeção de carvão e a respectiva região no alto forno, dividido nas seguintes seções:

Seção A: Representa a lança por onde o carvão é injetado nas ventaneiras do alto forno. Esta seção é subdividida em dois ramos por uma válvula solenóide (VS1), normalmente fechada e acionada eletricamente. A linha de alta pressão tem a finalidade de facilitar a injeção da amostra de carvão, que está localizada na linha da baixa pressão. As seções B, D, E partem da seção A trabalham com a mesma pressão, sendo controlados pelo manômetro P2. O sistema de admissão de gases é composto por uma válvula do tipo esfera e uma válvula do tipo agulha.

Seção B: Recipiente onde o ar aquecido puro ou enriquecido com oxigênio é soprado. Esta seção compreende o forno de pré-aquecimento do ar (reservatório de ar), o manômetro P2, um trocador de calor e o sistema de admissão de ar, composto por uma válvula tipo esfera e uma válvula tipo agulha. A finalidade da seção B é fornecer calor ao gás acumulado no reservatório de ar, que simulará o ar soprado oriundo dos regeneradores para o alto forno. A temperatura no reservatório pode chegar até 1100 °C e a capacidade do reservatório de ar é de 1000 ml.

Ponto C: Ponto de junção das seções A, B e D, é o local onde o carvão ou a mistura sai da lança para entrar na região de queima, também chamada de *raceway*. O ar aquecido da seção B entra em contato com as partículas de carvão da seção A, sendo este ponto o início do processo de queima do material.

Seção D: A seção D compreende o tubo que conduz a mistura ar aquecido mais a partículas de carvão ao forno Tammann (zona de combustão), e o flange que faz a ligação entre o tubo de alumina e a tubulação de aço inoxidável. É a região entre a saída da lança e o início da região de queima.

Seção E: A seção E simula a condição de queima na zona de combustão do alto forno, onde tem-se a mistura ar soprado mais carvão pulverizado. As condições da zona de combustão são simuladas utilizando-se um forno elétrico capaz de atingir uma temperatura de 2000 °C (forno Tammann). O material utilizado para simular a zona de combustão foi um tubo cerâmico de alumina, que atravessa o forno.

Para se determinar a quantidade de carvão, em gramas, a ser injetada no simulador foi desenvolvida no Centro de Pesquisa da Companhia a seguinte equação (Equação 8):

$$TI = \frac{Mc}{\left[\frac{Vr \times 298}{(Ts + 273) \times 1000} \right] \times (P_{inicial} - P_{final})} \times 1,2 \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

TI – taxa de injeção simulada (kg carvão / t ferro gusa);

Mc – massa de carvão usada no teste (mg);

Vr – volume do reservatório (1000 ml);

Ts – temperatura de sopro (°C)

P_{inicial} – pressão inicial do reservatório (atm);

P_{final} – pressão final do reservatório ao termino do teste (atm).

Para cada tratamento foi avaliada a eficiência de queima da mistura de carvão. Na análise dos gases de combustão utilizou-se o equipamento TESTO 300M and XL – Flue gas

analyser (Figura 18). O equipamento coletava os gases provenientes da combustão da mistura de carvões e mensurava as porcentagens de O_2 e CO . Através destes valores, pode-se determinar a porcentagem de CO_2 e a eficiência de queima, com a utilização das Equações 9 e 10, desenvolvidas pelo Centro de Pesquisa da Companhia.

$$\% CO_2 = (\% O_2 gas - \% O_2 gc) - \% COgc \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

- % CO_2 – porcentagem de dióxido de carbono nos gases de combustão;
- % O_2 gas – porcentagem de oxigênio no gás usado no teste;
- % O_2 gc – porcentagem de oxigênio nos gases de combustão;
- % CO gc – porcentagem de monóxido de carbono nos gases de combustão

$$EQ = \left[\frac{477,77 \times (1 + P_f) \times (\%CO_2 + \%CO)}{Pa \times \%Cm} \right] \times 100 \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

- EQ – eficiência de queima (%)
- P_f – pressão final do equipamento (atm)
- Pa – peso da amostra (mg)
- % CO_2 – porcentagem de dióxido de carbono
- % CO – porcentagem de monóxido de carbono
- % Cm – porcentagem de carbono da amostra

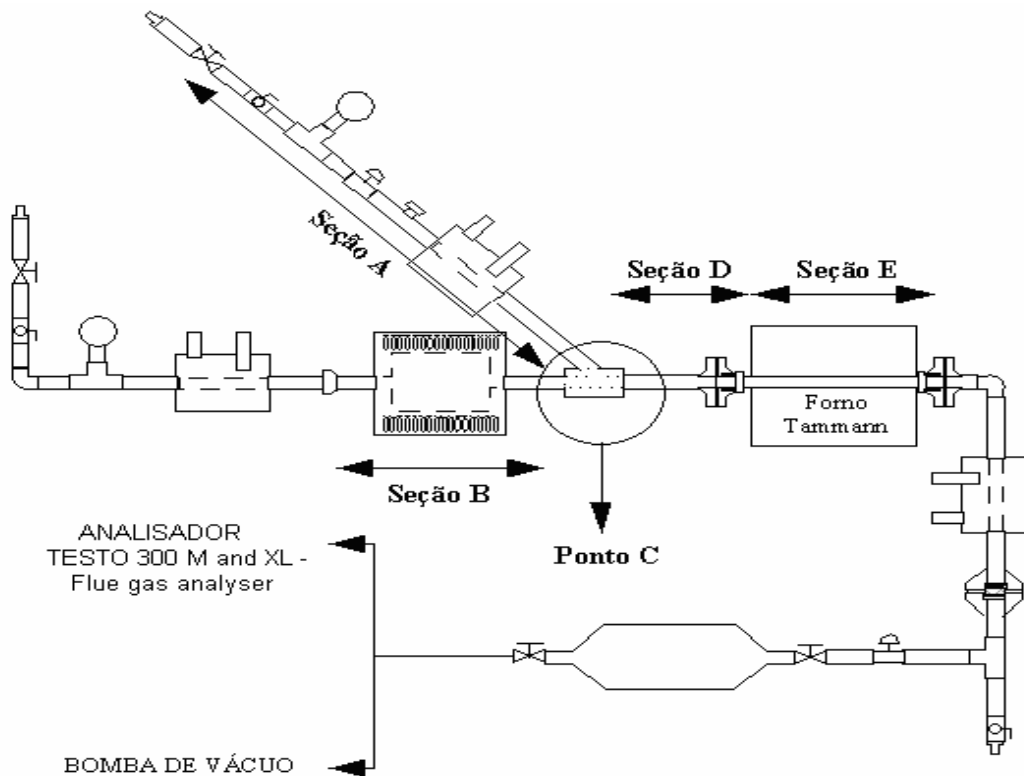


Figura 16. Simulador de injeção de misturas de carvões do centro de pesquisa da Companhia Siderúrgica Nacional

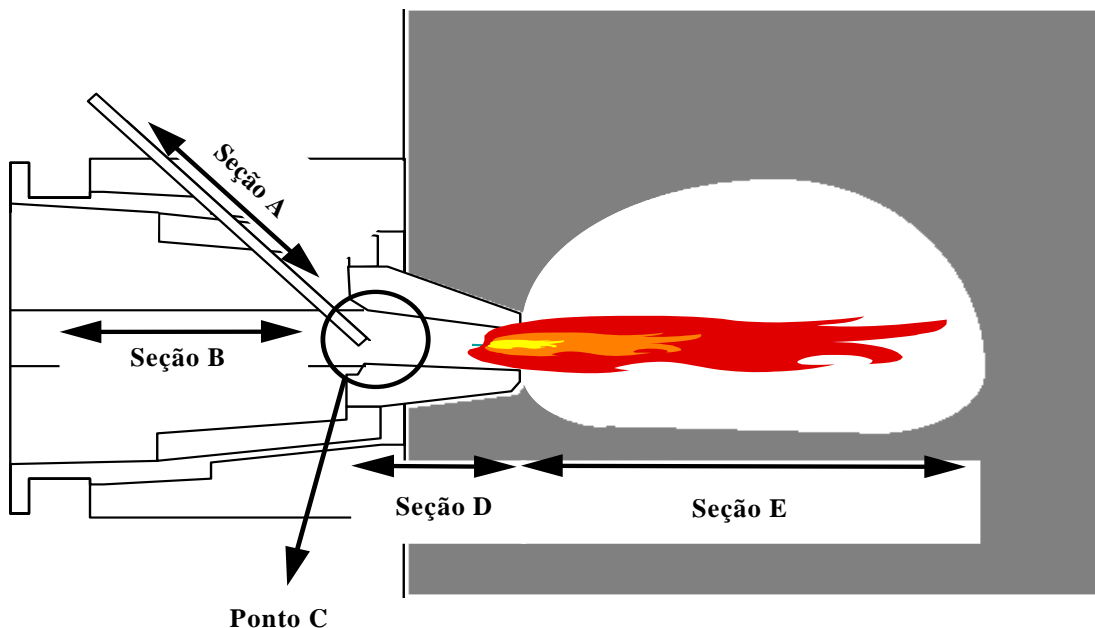


Figura 17. Ampliação da seção referente ao ponto c do simulador de injeção de carvão.



Figura 18. Equipamento TESTO 300 M and XL – Flue gas analyser utilizado para análise dos gases de combustão do simulador de injeção de finos de carvão.

3.12 Ganhos ambientais e avaliação de certificados de emissões reduzidas

Segundo SAMPAIO et al., (2007), para produção de uma tonelada de ferro gusa através de energia fóssil, isto é, carvão mineral, são emitidos 1742 kg de CO₂; 8,4 kg de SO₂ e retirados da atmosfera aproximadamente 1226 kg de O₂. A Figura 19 representa o balanço de emissões de carbono no processo de fabricação de uma tonelada de ferro gusa, considerando as proporções de carvão enformado.

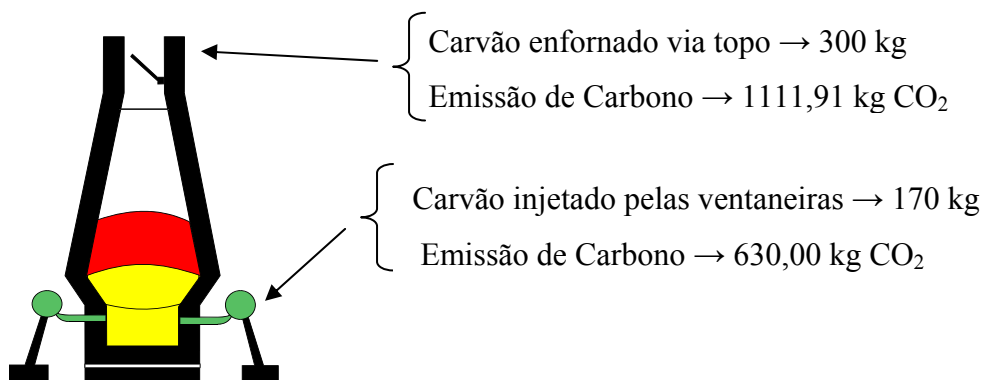


Figura 19. Balanço de emissões de carbono no processo de fabricação de uma tonelada de ferro gusa, considerando as proporções de carvão enornado.

A proposta do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo consiste em que cada tonelada de dióxido de carbono (CO₂) deixada de ser emitida ou retirado da atmosfera por um país em desenvolvimento poderá ser negociada no mercado mundial, criando um novo atrativo para a redução das emissões globais. As empresas que não conseguirem reduzir suas emissões poderão comprar os Certificados de Emissões Reduzidas (CER's).

O método utilizado para o cálculo dos níveis de emissões de carbono, em toneladas, foi o Método “*top-down*” recomendado pelo Ministério das Minas e Energia – MME em 1999 no Balanço Energético Nacional – BEN (ROCHA, 2004).

Segundo o European Climate Exchange (EXC), no Relatório Mensal de Julho de 2009, o valor médio da cotação do Certificado de Emissões Reduzidas foi de US\$ 20,75. Os valores dos CER's variam conforme o tipo de projeto, demanda de mercado, tecnologia empregada no sequestro do gás poluente e outros.

3.13 Análise dos Dados

Para a análise dos dados utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com 10 tratamentos e 10 repetições por tratamento. Especificamente, no ensaio de combustão dos carvões, foram 46 tratamentos com 10 repetições por tratamento. Os dados foram avaliados por intermédio da análise de variância e por comparações entre as médias através do teste de Tukey. Foi adotado o nível de significância de 5 % de probabilidade. As Tabelas 13 e 14 ilustram os tratamentos realizados.

Tabela 13. Tratamentos realizados nos ensaios de caracterizações físicas e químicas dos carvões

Tratamentos	Ensaio	Número de repetições
T1	Análise Granulométrica	10
T2	Teor de umidade	10
T3	Índice de Moabilidade	10
T4	Densidade	10
T5	Porosidade	10
T6	Análise Química Imediata dos Finos	10
T7	Análise Química Elementar dos Finos	10
T8	Análise Química Elementar da Cinza	10
T9	Poder Calorífico	10
T10	Basicidade Binária	10

Tabela 14. Tratamentos realizados nos ensaios de combustão dos carvões.

Tratamentos	Misturas	Proporções	Repetições
T1	CVSG – CMWC	100 : 0	10
T2	CVSG – CMWC	80 : 20	10
T3	CVSG – CMWC	60 : 40	10
T4	CVSG – CMWC	40 : 60	10
T5	CVSG – CMWC	20 : 80	10
T6	CVSG – CMWC	0 : 100	10
T7	CVSG – CMKP	80 : 20	10
T8	CVSG – CMKP	60 : 40	10
T9	CVSG – CMKP	40 : 60	10
T10	CVSG – CMKP	20 : 80	10
T11	CVSG – CMKP	0 : 100	10
T12	CVSG – CN1	80 : 20	10
T13	CVSG – CN1	60 : 40	10
T14	CVSG – CN1	40 : 60	10
T15	CVSG – CN1	20 : 80	10
T16	CVSG – CN1	0 : 100	10
T17	CVSG – CN2	80 : 20	10
T18	CVSG – CN2	60 : 40	10
T19	CVSG – CN2	40 : 60	10
T20	CVSG – CN2	20 : 80	10
T21	CVSG – CN2	0 : 100	10
T22	CVSG – CN3	80 : 20	10
T23	CVSG – CN3	60 : 40	10
T24	CVSG – CN3	40 : 60	10
T25	CVSG – CN3	20 : 80	10
T26	CVSG – CN3	0 : 100	10
T27	CVSG – CN4	80 : 20	10
T28	CVSG – CN4	60 : 40	10
T29	CVSG – CN4	40 : 60	10
T30	CVSG – CN4	20 : 80	10
T31	CVSG – CN4	0 : 100	10
T32	CVSG – CN5	80 : 20	10
T33	CVSG – CN5	60 : 40	10
T34	CVSG – CN5	40 : 60	10
T35	CVSG – CN5	20 : 80	10
T36	CVSG – CN5	0 : 100	10
T37	CVSG – CN6	80 : 20	10
T38	CVSG – CN6	60 : 40	10
T39	CVSG – CN6	40 : 60	10
T40	CVSG – CN6	20 : 80	10
T41	CVSG – CN6	0 : 100	10
T42	CVSG – CN7	80 : 20	10
T43	CVSG – CN7	60 : 40	10
T44	CVSG – CN7	40 : 60	10
T45	CVSG – CN7	20 : 80	10
T46	CVSG – CN7	0 : 100	10

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaios Granulométricos dos Carvões

A análise granulométrica consiste em separar uma amostra de material em frações, contendo cada uma das frações partículas com dimensões entre limites correspondentes às aberturas das respectivas peneiras.

Na Tabela 15 estão os valores respectivos das percentagens de material abaixo de 10,0 mm e as granulometrias médias ponderadas dos carvões.

Tabela 15. Resultados da análise de granulometria média ponderada e a da percentagem de finos dos carvões.

Procedência dos carvões	Granulometria Ponderada (mm)	Porcentagem de finos ($\leq 10,0$ mm)
CMWC	3,31	91,41
CMKP	2,88	97,01
CVSG	2,72	92,57
CN1	5,85	99,52
CN2	2,88	83,16
CN3	5,30	99,45
CN4	4,33	100,00
CN5	7,77	76,45
CN6	5,50	87,34
CN7	3,93	78,77

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto

Todos os carvões estudados apresentaram granulometria média ponderada abaixo de 10,00 mm. As percentagens de materiais considerados finos pelo critério técnico das siderúrgicas ficaram acima de 70 %, o que caracteriza que os carvões estavam muito fragmentados, devido ao transporte e manuseio dos mesmos.

De modo geral, o carvão vegetal CVSG apresentou menor granulometria média ponderada quando comparado aos carvões minerais. Isto se deve à sua elevada friabilidade. Com relação aos carvões minerais, é sabido que, ao ser descarregado nos silos de estocagem das indústrias, esses já se encontram bastante fragmentados devido ao seu transporte e manuseio até o alto forno. É por isto que, antes de ser conduzido para o alto forno, o carvão mineral importado deve ser submetido ao processo de “coqueificação”, que consiste no aumento da granulometria média das partículas, em ambientes com temperaturas em torno de 1100 °C. O carvão mineral CN4 apresentou em sua totalidade material abaixo de 10,0 mm (100 % de finos). Outros dois carvões (CN1 e CN3) ficaram também próximos de 100 % de finos. Essa baixa granulometria dos carvões nacionais se deve ao fato de se tratar de material com faixa granulométrica inadequada para comercialização. Desta forma, esses carvões vêm

sendo oferecido à siderúrgica para avaliação técnica para serem utilizadas no alto forno através da injeção.

SAUSMIKAT (1994), analisando granulometrias de diferentes carvões minerais e carvão vegetal, encontrou altas percentagens de materiais abaixo de 10 mm.

4.2 Teor de umidade dos carvões

O teor de umidade depende exclusivamente do tipo de carvão e do processo de beneficiamento na mina. A umidade presente no carvão se concentra de duas maneiras: livre na superfície das partículas e no interior de fissuras e capilares maiores, apresentando pressão de vapor normal e concentração inversamente proporcional ao tamanho do carvão; ou inerente à estrutura dos poros do carvão, apresentando pressão de vapor inferior à normal e concentração diretamente proporcional à porosidade do carvão (BRAGA, 1999). Na Tabela 16 estão os valores médios dos teores de umidade dos carvões. Observa-se que, com exceção dos carvões CMKP e CN4, os valores médios da umidade ficaram em torno de 5 %.

Embora ASSIS (1998) recomende que os teores de umidade dos carvões, para fins siderúrgicos, não devam extrapolar o percentual de 4 %, todos os valores médios superaram o referido patamar. Há de se ressaltar que, naturalmente, ocorrerão equilíbrios relativos das umidades dos carvões em função da umidade do ambiente em que se encontram. Embora todos os carvões analisados tenham apresentado teores de umidade acima dos adequados para a termoredução nos altos fornos, isto não constitui-se numa contra-indicação dos mesmos (Figura 20). Para que sejam evitados os contratempos comuns na utilização de carvões com altos teores de umidade, tais como o entupimento de tubulações e o abaixamento da temperatura da chama do alto forno, os mesmos podem ser submetidos a uma pré-secagem na própria usina. Isto, evidentemente, resultaria no aumento do custo de produção do termoreductor.

Tabela 16. Valores médios dos teores de umidade dos carvões .

Procedência do Carvão	Umidade (%)
CMWC	4,70
CMKP	7,80
CVSG	5,32
CN1	5,52
CN2	5,20
CN3	5,39
CN4	7,71
CN5	5,52
CN6	4,78
CN7	5,53

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto

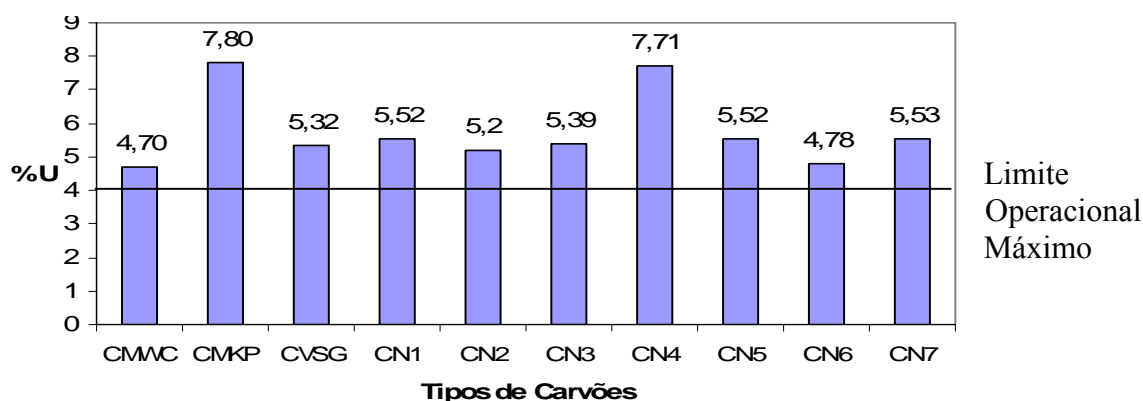


Figura 20. Valores médios dos teores de umidade dos diferentes carvões, comparados ao valor máximo aceito para o alto forno

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

4.3 Ensaio de Moabilidade dos Carvões

Os carvões, antes de serem injetados nas ventaneiras dos altos fornos, devem ser previamente moídos até a granulometria de, aproximadamente, 0,075 mm (200 mesh). A Tabela 17 apresenta os valores médios observados para os graus de moabilidade dos carvões.

Os valores médios dos graus de moabilidade dos carvões indicam que os carvões minerais apresentaram uma dureza superior à apresentada pelo carvão vegetal, sendo os valores significativos. A maior dureza do carvão resulta em maiores tempos de moagem, menores produtividades e maiores desgastes dos equipamentos envolvidos no processo de pulverização dos carvões. O menor grau de moabilidade dos carvões minerais resultou de uma série de fatores intrínsecos ao mesmo, dentre os quais destacam-se o seu elevado teor de cinza (Tabela 20) e a sua menor porosidade (Tabela 19). A Figura 21 ilustra a relação entre os graus de moabilidades (HGI) dos carvões e os teores de cinza dos mesmos. De modo geral, há uma boa relação entre o grau de moabilidade e a percentagem de cinza dos carvões.

Tabela 17. Valores médios dos graus de moabilidade dos diferentes carvões

Procedência do Carvão	Grau de Moabilidade – HGI
CMWC	89,25 b
CMKP	55,82 h
CVSG	98,04 a
CN1	75,07 c
CN2	59,17 g
CN3	70,90 d
CN4	67,04 e
CN5	68,28 e
CN6	60,13 i
CN7	64,04 f

*Medias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5 % de probabilidade pelo teste de Tukey.

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto

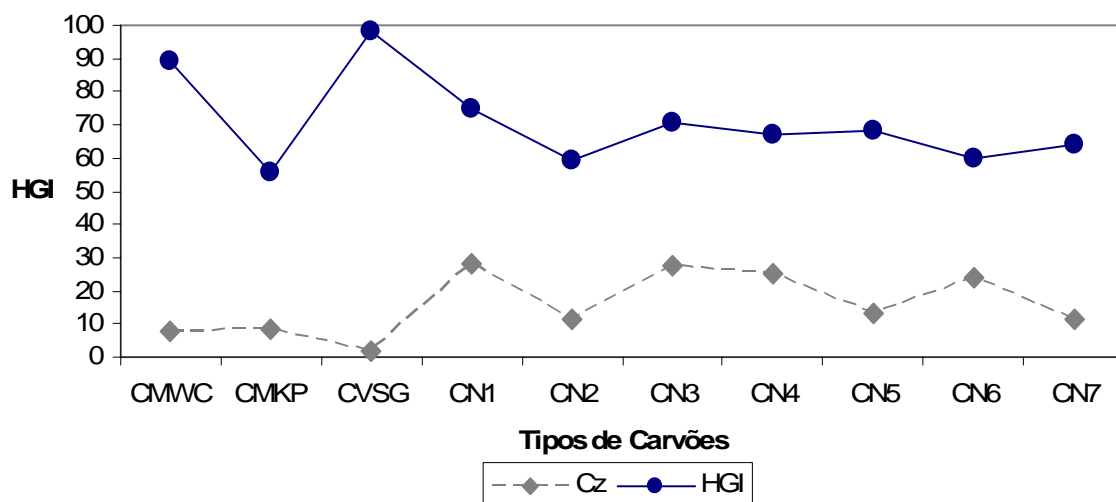


Figura 21. Valores médios comparativos do grau de moabilidade e o teor de cinza dos carvões

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto

4.4 Ensaio das Densidades dos Carvões

A Tabela 18 apresenta os valores médios da densidade verdadeira e aparente (g/cm^3) dos carvões minerais e vegetal. Os valores médios observados indicam que os carvões diferenciaram-se pouco entre si com relação à densidade verdadeira.

Tabela 18. Valores médios das densidades verdadeira e aparente dos carvões.

Tipo do Carvão	Densidade	
	Verdadeira (g cm^{-3})	Aparente (g cm^{-3})
CMWC	1,586	1,240
CMKP	1,538	1,158
CVSG	1,583	0,535
CN1	1,466	1,134
CN2	1,621	1,173
CN3	1,474	1,150
CN4	1,556	1,086
CN5	1,689	1,148
CN6	1,430	1,078
CN7	1,413	1,095

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto

Com relação à densidade verdadeira, o CVSG apresentou um valor 3,32 % superior à média dos carvões minerais. A média das densidades aparentes dos carvões minerais apresentou-se

113 % superior à do carvão vegetal (CVSG). Essa diferença entre os valores das densidades aparente e verdadeira no carvão vegetal CVSG proporciona ao material uma porosidade alta. As densidades verdadeiras dos carvões apresentaram pequena variação percentual (19,53 %) entre os valores avaliados.

Estudos realizados por BRITO (1993) com a carbonização de três tipos de turfas e madeira de *Eucalyptus grandis*, identificaram as densidades verdadeira, aparente e porosidade dos carvões (Tabela 19). Observa-se que as densidades verdadeiras dos materiais também apresentaram pequena variação percentual (13,74 %). As densidades aparentes dos materiais estudados pelo autor apresentaram valores inferiores; isto se deve ao fato do material ser turfa e não carvão mineral.

Tabela 19. Resultados encontrados por BRITO no estudo comparativo de carbonização de três tipos de turfa em relação à madeira de *Eucalyptus grandis*.(1987)

Tipo de Carvão	Densidade Verdadeira (g · cm ⁻³)	Densidade Aparente (g · cm ⁻³)	Porosidade %
T. Criciúma	1,48	0,87	41,0
T. Registro	1,49	0,41	42,5
T. São José	1,45	0,95	34,4
<i>E. grandis</i>	1,31	0,32	75,5

4.5 Porosidades dos Carvões

A Tabela 20 apresenta as porosidades médias dos carvões minerais importados e nacionais, bem como do carvão vegetal.

Os valores médios comparativos das porosidades dos carvões denotam a discrepância entre a porosidade do carvão vegetal e os carvões minerais, nacional e importado. O carvão vegetal apresentou o maior valor de porosidade, sendo estatisticamente significativo quando comparado aos carvões minerais. Dentre os carvões minerais nacionais, observou-se também diferenças significativas nos valores de porosidade dos carvões avaliados.

Tabela 20. Valores médios das porosidades dos carvões

Procedência do Carvão	Porosidade do Carvão (%)
CMWC	21,26 e
CMKP	24,44 c d e
CVSG	66,85 a
CN1	22,64 d e
CN2	27,63 b c d
CN3	21,80 e
CN4	30,14 b c
CN5	32,03 b
CN6	24,39 d e
CN7	24,75 c d e

*Medias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 95 % de probabilidade.

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto

A menor porosidade dos carvões minerais, por sua vez, pode estar associada às próprias condições de sua formação, caracterizadas por longos períodos de transformações.

BRITO (1993), através de seu estudo comparativo, também identificou a ampla faixa de variação entre a porosidade das turfas e do carvão vegetal.

4.6 Análise Química Imediata dos Carvões

A Tabela 21 apresenta os teores médios de matérias voláteis, de cinza e de carbono fixo dos carvões, obtidos a partir da análise química imediata dos mesmos.

Tabela 21. Teores médios de matérias voláteis, de cinza e de carbono fixo, com base na análise química imediata dos carvões.

Procedência do Carvão	Matérias Voláteis (%)	Cinza (%)	Carbono Fixo (%)
CMWC	15,98 f	7,98 e	76,04 a
CMKP	35,75 a	8,64 e	55,61 d
CVSG	30,14 b c	1,83 f	68,03 b
CN1	29,30 c	28,11 a	42,59 g
CN2	36,87 a	11,31 d	51,82 e f
CN3	29,02 c	27,49 a	43,49 g
CN4	31,31 b	25,23 b	43,46 g
CN5	36,02 a	13,06 c	50,92 f
CN6	23,07 e	23,76 b	53,17 e
CN7	26,83 d	11,43 d	61,74 c

*Medias seguidas pela mesma letra, dentro de uma mesma coluna, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 95 % de probabilidade.

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

Desde o início da implantação da injeção de carvão pulverizado nos altos fornos foram testados diversos tipos de carvões, com propriedades localizadas num intervalo bem amplo. A Tabela 22 apresenta as faixas dos valores ideais para os teores de carbono fixo, matérias voláteis, cinzas, índice de moabilidade (HGI) e enxofre, de carvões para injeção em alto forno, segundo CALDEIRA (2006).

Tabela 22. Faixas dos valores ideais para os teores de carbono fixo, matérias voláteis, cinza, índice de moabilidade (HGI) e enxofre para carvões a serem injetados em um alto forno (CALDEIRA, 2006).

	Valor mínimo	Valor máximo
Carbono fixo	68,0	91,0
Matérias voláteis	10,0	40,0
Cinzas	5,0	10,0
Índice de moabilidade (HGI)	44	95
Enxofre	-	0,8

Os valores médios apresentados na Tabela 22, resultantes da análise química imediata dos carvões, indicaram, de modo geral, que as propriedades químicas dos carvões vegetal e minerais importados foram melhores do que aquelas apresentadas pelos carvões minerais nacionais. Essa afirmação baseou-se, principalmente nos teores de cinza encontrados.

O carvão vegetal apresentou o menor valor de teor de cinza, sendo altamente significativo quando comparado com os outros carvões. Dentre os carvões minerais os importados apresentaram valores de teores de cinza inferiores aos valores dos nacionais, sendo significativos. O teor de cinza do carvão é um aspecto relevante no combustível; seu teor deve ser o mais baixo possível, geralmente na faixa de 8 % a 12 %, dependendo da situação local (LINGIARDI, 2004). Os carvões nacionais apresentaram valores médios de teores de cinza acima do especificado pelas siderúrgicas. Esse fato inviabiliza o uso do carvão nacional no alto forno. Quanto maior o teor de cinza, maior é o consumo de carbono, devido ao calor necessário para aquecimento, fusão e redução dos componentes minerais das cinzas (WEBER, 1990). A Figura 21 apresenta os teores de cinza nos carvões, comparando-os aos parâmetros especificados no alto forno.

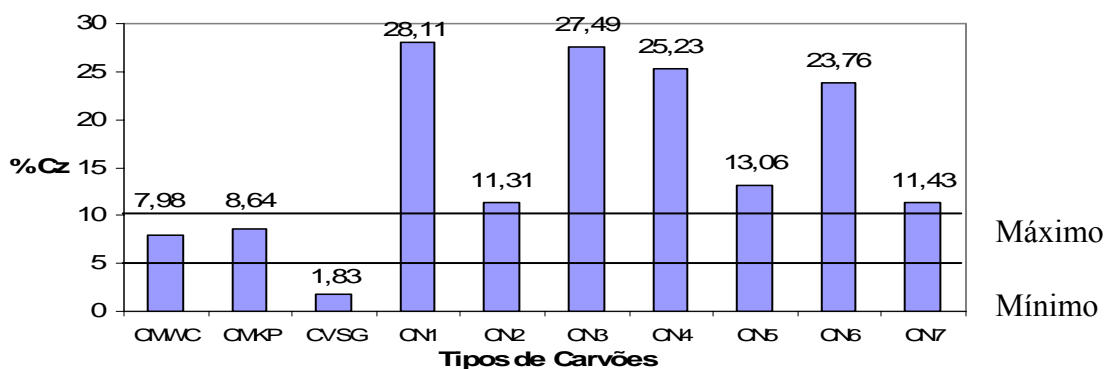


Figura 22. Valores médios dos teores de cinza dos carvões analisados, comparados ao valor padrão estabelecido para alto forno, segundo CALDEIRA (2000).

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

Estudos de caracterização de carvão mineral, carvão vegetal e coque para injeção no alto forno, realizado por ASSIS (2008), mostraram os seguintes teores na análise química imediata dos materiais (Tabela 23). O teor de matéria volátil do carvão mineral analisado pelo autor, assemelha-se ao carvão mineral CMWC, ambos considerados de baixo teor de matéria volátil. O teor de cinza do carvão vegetal também foi inferior ao do carvão mineral. Os teores de matérias voláteis e carbono fixo do coque apresentaram comportamentos opostos, pois quando se promove a coqueificação do carvão mineral faz-se a destilação do material. Desta maneira, o teor de matérias voláteis é diminuído o teor de carbono fixo.

Tabela 23. Caracterização de materiais para injeção no alto forno (ASSIS, 2008).

Análise Elementar	Carvão mineral	Carvão vegetal	Coque
Matérias Voláteis	19,4	25,0	-
Cinza	7,2	1,3	8,08
Carbono Fixo	73,4	73,39	89,7

Devido à complexidade de suas propriedades físicas e químicas e suas várias formas de utilização, existem várias maneiras de classificar os carvões que datam desde 1931 e que utilizam uma gama de parâmetros e termos de referência (SILVA, 2006). O método mais utilizado na siderurgia é o de “rank”, que é a determinação do grau de carbonificação, sendo utilizado para fins tecnológicos e de classificação desse combustível fóssil, o qual se baseia no teor de voláteis e no poder calorífico. A Tabela 24 mostra a classificação dos tipos de carvões usados em função do teor de matérias voláteis, segundo classificação da ASTM (ASSIS, 2006).

Segundo a classificação ASTM (ASSIS, 2006), somente o carvão CMWC é considerado com baixo teor de matérias voláteis; os demais são de médios e altos teores de matérias voláteis. Esses altos teores de matérias voláteis nos carvões influenciam o processo de redução, pois aumentam a pressão interna e o volume de gases no interior do alto forno. Segundo SILVA (2006), carvões com altos teores de matérias voláteis podem ser utilizados no alto forno quando misturados com carvões de médios e baixos teores de matérias voláteis.

Tabela 24. Classificação ASTM dos carvões por classe (ASSIS, 2006).

	Valor Mínimo (%)	Valor Máximo (%)
Baixo Teor de Matérias Voláteis	14	22
Médio Teor de Matérias Voláteis	22	30
Alto Teor de Matérias Voláteis	30	40

A Figura 23 apresenta os teores de matérias voláteis dos carvões, evidenciando-se os limites superiores e inferiores, especificados pelo alto forno.

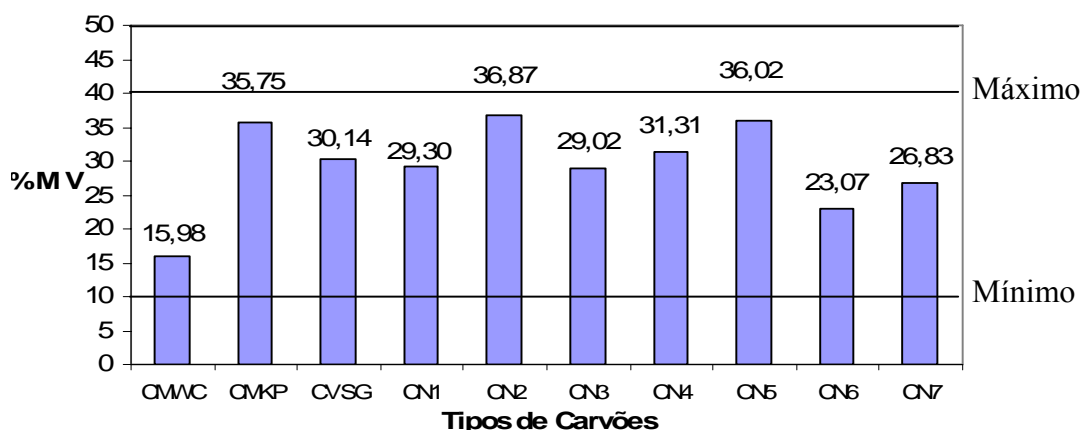


Figura 23. Valores médios dos teores de matérias voláteis dos diferentes carvões, comparados aos valores padrões para o alto forno a coque (limite inferior e superior).

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; CMKP = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain; CN1 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; CN2 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; CN3 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; CN4 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; CN5 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; CN6 = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e CN7 = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

Nota-se que todos os carvões apresentaram teores de matérias voláteis dentro da faixa aceitável pelo alto forno.

A Figura 24 apresenta os teores de carbono fixo dos carvões, quando comparados ao limite especificado pelo alto forno, segundo CALDEIRA (2006). Os carvões CMWC e CVSG apresentaram teores aceitáveis. Por outro lado, o carvão CMKP e todos os minerais nacionais apresentaram teores abaixo do limite mínimo operacional para um alto forno.

O carbono fixo representa, basicamente, a concentração de carbono, sendo um importante parâmetro utilizado para os cálculos de balanço energético e na caracterização de carvões. É válido o argumento de que o teor de carbono fixado no carvão, para fins siderúrgicos, deva ser o maior possível, para a otimização do processo de termoredução no alto forno. Porém, no caso do carvão vegetal, o efetivo controle do processo de concentração de carbono é bastante difícil, sendo dependente de muitos fatores, tais como: propriedades da madeira, temperatura máxima no leito de carbonização, condições ambientais, tipo do forno, dentre outros.

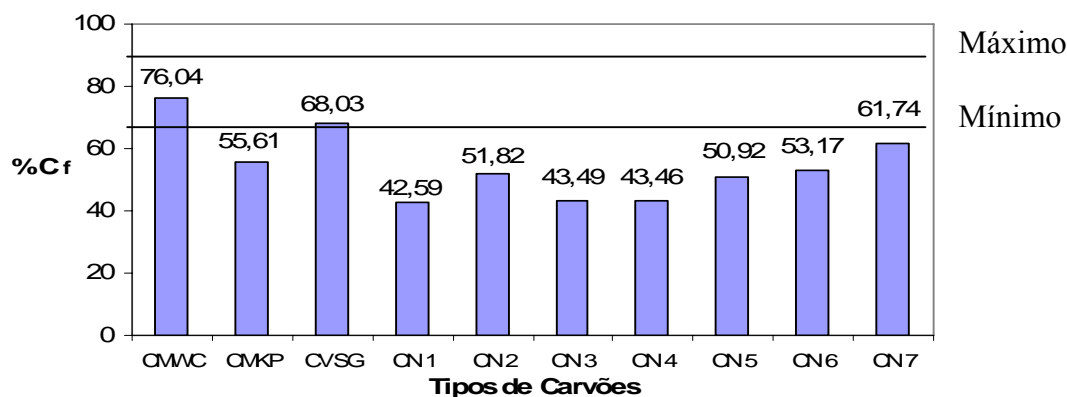


Figura 24. Valores médios dos teores de carbono fixo dos carvões analisados em comparação com os limites operacionais estabelecidos para alto forno.

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

GOMES et al., (2002) estudaram a viabilidade técnica da utilização de carvões minerais nacionais para injeção no alto forno (Tabela 25).

Tabela 25. Resultados encontrados por GOMES et al., na caracterização de materiais para injeção no alto forno.

Amostra	Matéria Volátil %	Cinza %	Carbono fixo %
S ₁	26,6	39,6	33,8
S ₂	30,8	27,8	41,3
S ₃	35,0	14,0	51,0

Quanto maior o teor de cinza, maior será o consumo de calor, sendo que pode haver entupimento das lanças durante a injeção e decréscimo da temperatura adiabática de chama na zona de combustão. Com relação à matéria volátil, verificou-se que os valores encontrados são compatíveis com os tipos de carvões usados para injeção no alto forno.

4.7 Análise Química Elementar dos Carvões e Poder Calorífico

A Tabela 26 apresenta os valores médios observados da análise química elementar dos carvões avaliados. Dos carvões avaliados, o carvão mineral CMWC apresentou o maior teor de carbono.

Tabela 26. Valores médios da análise química elementar dos carvões avaliados.

Procedência do Carvão	% C	% H	% S	% O	% N
CMWC	85,46	3,90	0,32	0,90	1,80
CMKP	67,90	5,11	0,37	1,13	1,11
CVSG	70,21	2,33	0,04	5,41	1,39
CN1	52,41	5,77	0,96	1,36	2,40
CN2	64,16	5,70	1,39	1,10	1,40
CN3	51,14	5,30	0,70	1,22	1,70
CN4	56,85	6,12	0,54	1,43	1,90
CN5	66,16	5,70	0,57	1,42	1,21
CN6	62,39	4,54	1,73	1,22	1,31
CN7	71,62	5,35	1,20	1,34	1,61

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

ANDRIONI et al. (2002) estudaram a influência das relações oxigênio/carbono e hidrogênio/carbono de diferentes carvões utilizados em alto forno e concluiu que são significativas essas relações. Essas influências são maiores, quanto maior for a utilização de carvão vegetal (Tabela 27). As relações O/C e H/C influenciam o comportamento termoquímico, isto é, estas relações possuem forte influência na determinação de parâmetros de controle operacional do alto forno.

Tabela 27. Teores de oxigênio, hidrogênio e carbono dos carvões pesquisados por ANDRIONI. (2002)

Amostra de Carvão	% O	% H	% C	Relação O/C	Relação H/C
Baixo Volátil	2,6	4,8	85,4	0,03	0,05
Médio Volátil	3,6	4,9	86,4	0,04	0,05
Alto Volátil	6,1	1,4	79,5	0,07	0,01

A Figura 25 representa as relações O/C e H/C dos carvões minerais importados e nacionais e do carvão vegetal. Como o oxigênio e o hidrogênio são elementos termógenos, quanto maior for a relação melhor serão as condições de queima desse material no interior do alto forno. Os carvões minerais nacionais apresentaram relações O/C e H/C com variação percentual de 51,35 % e 51,29 % respectivamente. As baixas relações O/C nos carvões minerais influenciaram nas eficiências de queima das misturas (ver item 4.10).

As relações H/C nos carvões minerais nacionais apresentaram-se superiores aos carvões minerais importados, este fato se deve a formação geológica das minas de carvão brasileira.

Os teores de hidrogênio, oxigênio e nitrogênio nos carvões permitem determinar as quantidades de gases CO₂, H₂ e N₂ que deixam a zona de combustão no interior do alto forno. Esses gases são gerados em função do volume e composição do ar soprado e da taxa de injeção e composição química do carvão pulverizado (RIBAS & OSÓRIO, 1999). Os valores percentuais desses elementos estão relacionados com o teor de matérias voláteis e o volume de ar soprado no alto forno.

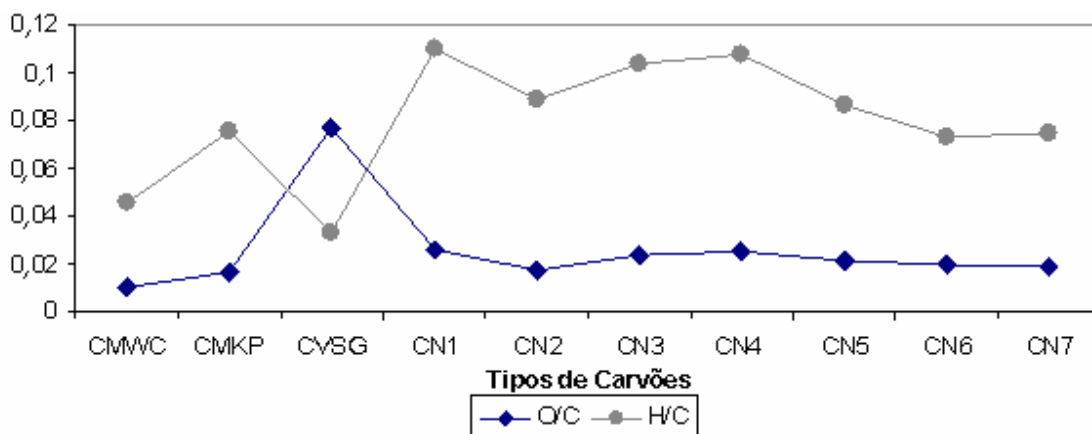


Figura 25. Relações de O/C e H/C nos carvões minerais importados e nacionais e no carvão vegetal.

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

O teor de hidrogênio do carvão vegetal (CVSG) apresentou um valor 2,26 vezes menor que a média dos demais carvões. O carvão vegetal CVSG apresentou teor de oxigênio 4,39 vezes maior que a média dos demais carvões. O teor de nitrogênio apresentou uma variação percentual de 116,21 % respectivamente.

O enxofre está presente nos carvões sob três formas: orgânico, pirítico e sulfático. A soma dessas três formas determina o enxofre total do carvão. O enxofre do carvão é parcialmente liberado na matéria volátil sob a forma de sulfeto (H_2S) e outros compostos de enxofre. É importante lembrar que o enxofre residual do carvão afeta diretamente a qualidade do ferro gusa no alto forno. Por esse motivo, o teor de enxofre da mistura de carvões deve ser limitado (HUR, 1993). O carvão vegetal (CVSG) apresentou valor percentual de enxofre 21,61 vezes menor que a média percentual dos demais carvões. Os carvões minerais importados apresentaram valores inferiores aos carvões nacionais. Conforme literatura, os teores percentuais do enxofre nos carvões minerais nacionais foram superiores aos teores de enxofre nos carvões minerais importados. SILVA (2006) avaliou os teores de enxofre em carvões minerais importados de diferentes países e encontrou valores de 0,39 % (Indonésia), 0,45 % (Canadá) e 0,41 % (Austrália). O teor de enxofre do carvão CMWC apresentou uma variação de 21,95 % inferior ao carvão Australiano e o carvão CMKP uma variação de 5,13 % também inferior quando comparado ao carvão da Indonésia, este fato se deve a características da mina.

Segundo CARNEIRO (2003) a escolha de um combustível é baseado no preço e na sua capacidade de gerar calor. Assim, considera-se como efeito muito positivo o valor do poder calorífico superior.

A Tabela 28 apresenta os valores médios do PCS dos carvões avaliados. A Figura 26 mostra o comportamento das curvas de poder calorífico superior e o carbono fixo dos carvões. Pode-se observar que o comportamento na declividade da curva do poder calorífico é acompanhado pela curva do carbono fixo dos carvões. Este comportamento significa que, quanto maior o teor de carbono no carvão, maior o seu poder calorífico.

Tabela 28. Valores médios do poder calorífico superior dos carvões avaliados.

Carvão	PCS (kcal/kg)
CMWC	6900
CMKP	6300
CVSG	7140
CN1	4900
CN2	5700
CN3	5200
CN4	6000
CN5	6500
CN6	6200
CN7	6850

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto

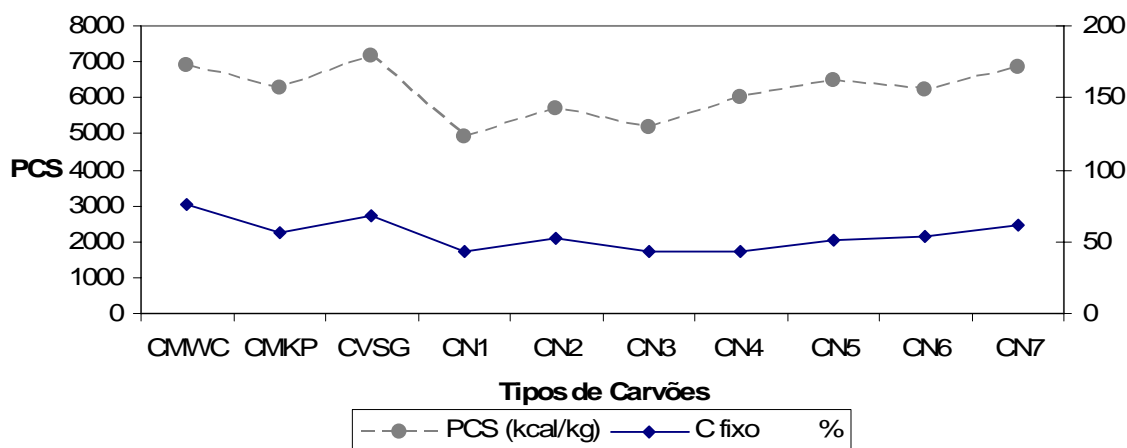


Figura 26. Valores médios comparativos do poder calorífico dos carvões com os seus teores de carbono fixo

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto

Através da Figura 27, pode-se observar a existência de uma correlação positiva entre os PCS dos carvões com os seus respectivos teores de carbono fixo ($R^2 = 0,70$); ou seja, quanto maior o teor de carbono fixo no carvão, maior o seu poder calorífico.

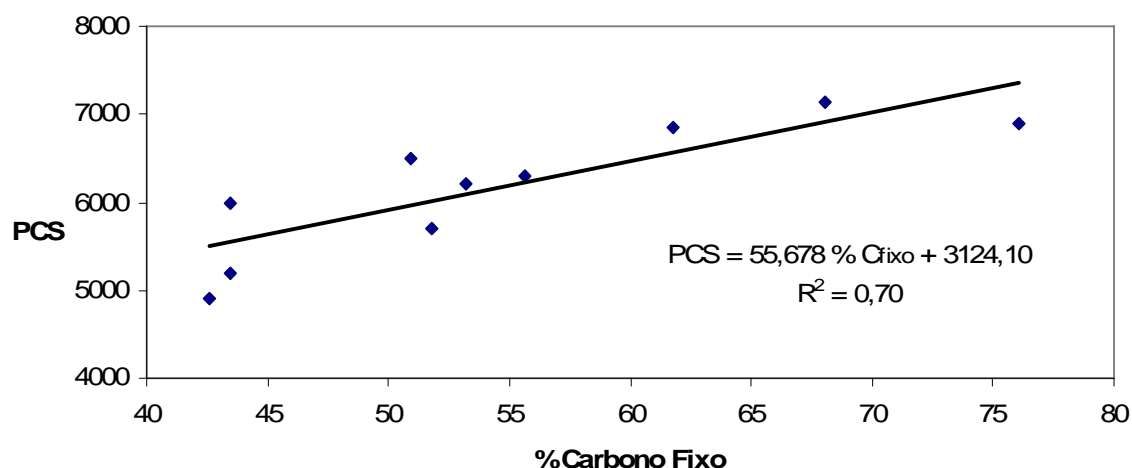


Figura 27. Correlação entre poder calorífico superior e a percentagem de carbono fixo dos carvões

4.8 Análise Química Inorgânica das Cinzas dos Carvões

A Tabela 29 apresenta os valores médios obtidos a partir da análise dos principais componentes das cinzas dos carvões.

Tabela 29. Valores médios percentuais, observados a partir da análise dos principais componentes das cinzas dos carvões

	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	P
CMWC	11,893	1,618	52,576	19,120	1,291	1,211	11,039	1,251
CMKP	2,669	4,229	43,773	28,583	0,995	3,640	15,675	0,437
CVSG	11,903	15,051	3,310	12,136	8,536	2,206	46,336	0,523
CN1	2,237	0,3530	27,259	65,005	1,505	1,163	2,347	0,750
CN2	3,958	0,7460	28,101	57,436	0,229	1,113	7,981	0,436
CN3	1,592	0,3830	26,927	65,826	0,114	0,961	4,037	0,160
CN4	2,149	0,5569	27,310	66,174	0,379	1,040	1,979	0,412
CN5	4,050	0,9097	21,942	64,364	0,303	1,695	6,642	0,095
CN6	4,400	0,6370	24,236	58,419	0,246	1,431	10,300	0,331
CN7	4,385	0,6580	28,124	55,354	0,232	1,062	9,917	0,268

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

Considerado o carvão mineral nacional, foram observados valores médios percentuais superiores para os teores de sílica (SiO_2) quando comparados aos carvões minerais importados e carvão vegetal, respectivamente 159,07 % e 409,14 %. Os valores médios de alumina (Al_2O_3) dos carvões minerais importados foram 83,36 % superiores aos valores médios teor médio dos carvões minerais nacionais e 1355,28 % superiores ao carvão vegetal.

Para OLIVEIRA (1982), a composição da cinza pode interferir no comportamento do alto forno e sobre a oxidação do carbono. Os metais alcalinos, ao assumirem o papel de catalisadores das reações no interior do alto forno, aceleram o processo de oxidação e provocam um considerável aumento no consumo de termo-redutor. Nas regiões do alto forno em que as temperaturas mantiverem-se relativamente baixas (700 a 800 °C) haverá a geração de grandes quantidades de monóxido de carbono, que não serão utilizados no processo de redução do minério de ferro.

Segundo ASSIS (1998), quanto maior o teor de cinza, maior será o consumo de carbono, o que reduz a taxa de substituição. Também ocorre um aumento na quantidade de escorificantes requerida e conseqüentemente uma diminuição da produtividade, pois as cinzas irão formar a escória produzida no alto forno. Normalmente, 1 kg de cinza implica na formação de 1,5 a 1,86 kg de escória. A utilização de carvões com elevados teores de sílica (SiO_2), como os carvões minerais nacionais analisados, darão à escória uma natureza química ácida, resultando num acréscimo significativo de fundentes no alto forno o que, por sua vez, elevaria o volume de escória no decorrer do processo de termo-redução.

SAMPAIO (1990) ressalta também que o aumento da quantidade de finos de carvão vegetal injetado provoca uma redução do volume específico de escória, pois as cinzas do carvão vegetal são de características químicas básicas, ao contrário da cinza do carvão mineral. Esta propriedade da cinza do carvão vegetal aliada ao seu menor teor por unidade de volume, possibilita uma operação do alto forno com uma menor utilização de fundentes, o que implica numa menor geração do volume de escória.

OLIVEIRA (1982) ressaltam que concentrações elevadas de álcalis como o Na_2O e o K_2O devem ser evitadas, uma vez que podem ocasionar problemas operacionais no alto-forno. A Figura 28 ilustra os valores médios percentuais da soma dos teores de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ para os diferentes carvões. A formação de partículas que irão aderir às paredes internas do alto forno, impregnam os refratários. Esses “cascões” poderão interferir na descida da carga e aumentar o consumo de termoredutor, devido à perda de calor para a sua fusão. Nesse caso, dentre os carvões analisados, deve-se atentar para o teor de Na_2O no carvão vegetal que apresentou um valor 1351,7 % superior à média dos demais carvões.

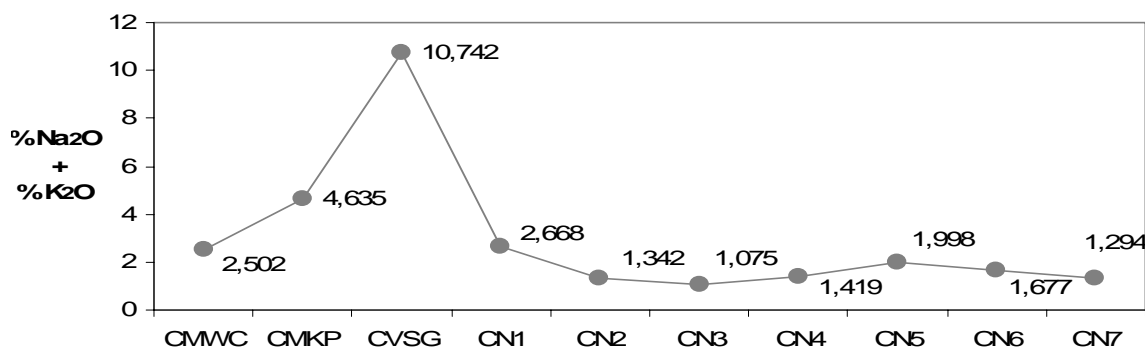


Figura 28. Valores médios percentuais das somas dos teores de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ para os diferentes carvões.

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

GOMES et al., (2002) determinaram as percentagens de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ em elementos termo-redutores utilizados em altos fornos. O autor encontrou valores médios para $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ de 2 % em coque e carvão mineral importado e de 17 % para carvão vegetal.

CORREA (1989) analisou diferentes amostras de carvão mineral nacional, encontrando valores 1,06 a 1,96.

Os valores encontrados para as percentagens de álcalis nos carvões minerais analisados ficaram próximos aos valores encontrados por CORREIA (1989).

4.9 Basicidade Binária das Escórias

A Tabela 30 apresenta os valores médios das basicidades binárias das escórias no alto forno, estimados a partir da relação entre os teores médios de CaO e de SiO_2 , considerando-se as respectivas massas moleculares.

Tabela 30. Basicidade binária das escórias no alto forno, estimada pela relação dos teores médios de CaO e de SiO_2 , considerando-se as respectivas massas moleculares.

Procedência do Carvão	Basicidade Binária da Escória
CMWC	0,667 b
CMKP	0,100 c
CVSG	1,052 a
CN1	0,036 g
CN2	0,073 e f
CN3	0,025 h
CN4	0,034 g
CN5	0,067 f
CN6	0,080 d e
CN7	0,084 d

*Medias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 95 % de probabilidade.

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

O carvão vegetal apresentou o maior índice de basicidade binária da escória (1,052), sendo estatisticamente significativo. Apresentou valores oito vezes superiores aos teores médios dos demais carvões.

Segundo ASSIS (1998), existe evidências de que para uma boa eficiência termo-redutora, o alto forno deve operar com basicidades binárias abaixo de 0,90. Assim sendo, ao considerar-se apenas a basicidade binária, pode-se inferir que somente o carvão vegetal apresentou um valor médio acima do recomendável. Isto ocorreu em virtude da associação do alto teor de CaO e do baixo teor de SiO_2 apresentado pelo carvão vegetal, o que resultou na elevada basicidade binária da escória. Entretanto, tais características podem ser alteradas, desde que as causas do alto teor de CaO no carvão vegetal sejam identificadas. Uma das possíveis causas, de acordo com resultados observados por ANDRADE (1993), pode ser a correção da acidez dos solos por meio da aplicação de quantidades excessivas de calcário calcítico ou de outros corretivos ricos em cálcio. Nesse caso, o cálcio presente no solo será capturado pelo sistema radicular das árvores e comporá estruturas químicas inter e intracelulares como os pectatos e os oxalatos de cálcio que, por sua vez, serão acusados na composição do carvão vegetal.

Há de se ressaltar que, no caso em questão, a menor basicidade binária da escória apresentada pelos carvões minerais nacionais deveu-se ao elevado teor de sílica (SiO_2) nos mesmos. Esta, evidentemente, não é a melhor forma de se controlar a basicidade binária da escória, pois, conforme mencionado anteriormente, elevados teores de sílica também resultam num considerável aumento do volume de escória no alto forno. Todavia, deve-se destacar que o aumento do volume de escória no alto forno, indiretamente, contribui para a diminuição do caráter ácido do minério de ferro brasileiro (hematita). Desta forma, ao considerar-se, simultaneamente, os teores e a composição das cinzas, bem como as basicidades binárias das escórias, pode-se afirmar que o carvão vegetal apresenta as melhores propriedades para ser injetado nas ventaneiras de um alto forno siderúrgico. A Figura 29 apresenta os índices de basicidades binárias das escórias dos carvões, quando comparados ao limite operacional do alto forno.

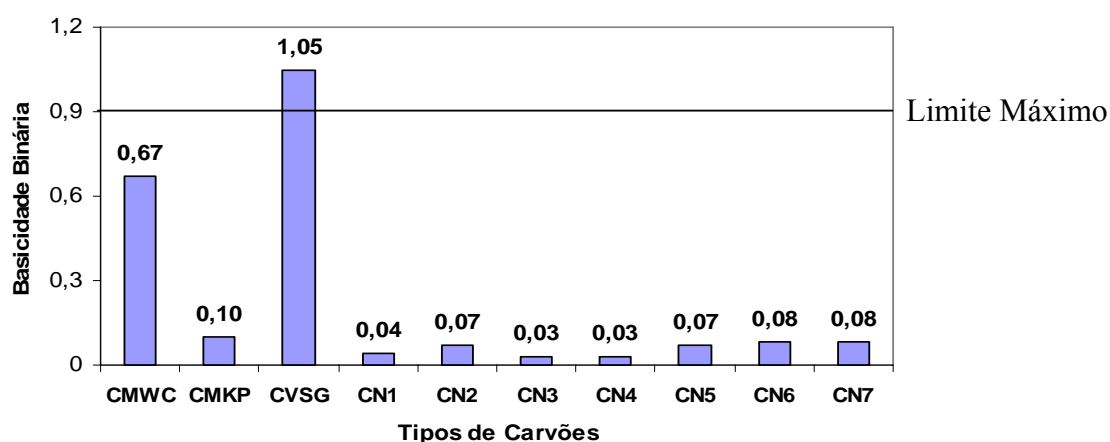


Figura 29. Valores das basicidades binárias das escórias no alto forno, estimada pela relação dos teores médios de CaO e de SiO_2 , considerando as respectivas massas moleculares e o limite máximo ideal para o alto forno.

CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

4.10 Eficiência de Combustão dos Finos de Carvão e avaliação dos Certificados de Emissões Reduzidas (CER's)

4.10.1 Misturas dos finos CVSG - CMWC

Foram preparadas proporcionalmente 5 misturas de carvão vegetal (CVSG) com carvão mineral CMWC. As Figuras 30, 32, 34 e 35 apresentam os valores médios de matérias voláteis, cinza, enxofre e carbono fixo de cada mistura. As eficiências de queima das misturas de carvão vegetal CVSG e carvão mineral CMWC estão na Tabela 31.

Tabela 31. Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CMWC

Mistura	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
cvsg - cmwc	75,66 a	52,07 b	51,73 b	47,70 b	41,73 b c	34,45 c

*Medias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 95 % de probabilidade.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain. e CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak

Considerando os resultados das eficiências de queima das misturas, observou-se que quanto maior a massa de carvão vegetal adicionada ao carvão mineral, maior é o índice de combustão, sendo estatisticamente significativo. Esse fato pode ser explicado pelo efeito combinado de pirólise e combustão dos voláteis, que acontece na zona de combustão. As eficiências de queima das misturas CSVG – CMWC não apresentaram diferenças estatísticas significativas na faixa de 80 % a 20 % de carvão vegetal.

Quanto maior o teor de matérias voláteis, até um limite máximo, maior é a eficiência de combustão. Valores de matérias voláteis acima do especificado pelo alto forno provoca aumento no volume de gases gerados, contribuindo para instabilidade da carga e maior degradação do carvão enforado. Analisando as percentagens de matérias voláteis nas misturas CVSG – CMWC, observa-se que todas estão dentro da faixa operacional do alto forno (Figura 30).

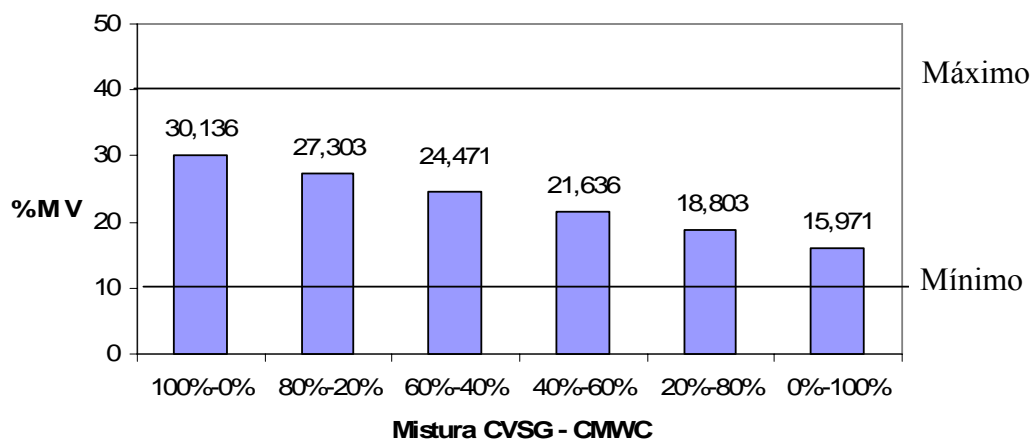


Figura 30. Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CMWC, com apresentação dos valores mínimos e máximos operacionais no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain. e CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak

A reatividade é influenciada diretamente pelo teor de matérias voláteis do carvão vegetal. Durante o processo de combustão do carvão no alto forno, verifica-se que maiores percentagens de matérias voláteis, no carvão, aumentam a reatividade (ASSIS, 2006). A Figura 31 representa a curva dos índices de eficiência de queima das misturas em função da percentagem de carvão vegetal na mistura.

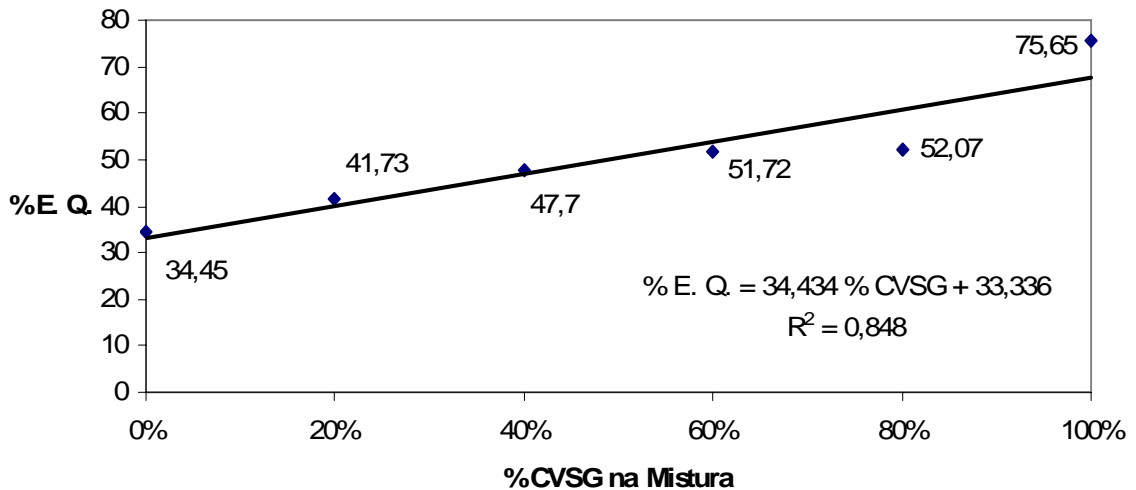


Figura 31. Curva do índice de eficiência de queima das misturas CVSG – CMWC em função da porcentagem de carvão vegetal.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain. e CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak

Com relação aos teores médios de cinza, somente misturas com no mínimo de 48,56 % de carvão vegetal, atendem aos parâmetros operacionais do alto forno (Figura 32).

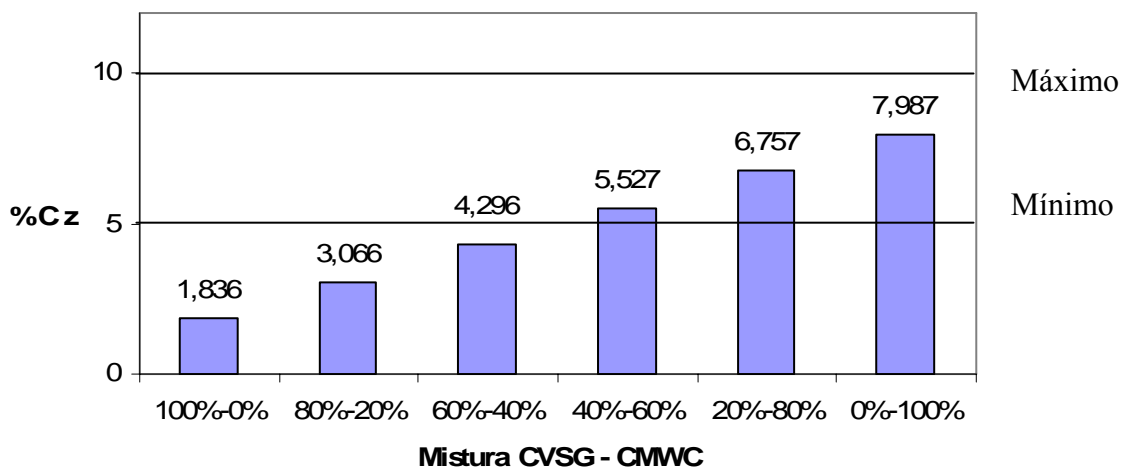


Figura 32. Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CMWC e valores mínimos e máximos exigidos pelo alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain. e CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak

Elevado teor de cinza no carvão é prejudicial tanto no alto forno, quanto na injeção de carvão pulverizado. Nos dois casos, a cinza consome calor e ocupa volume dentro da partícula e também dentro do alto forno. Normalmente, quanto maior o teor de cinza, menor será o índice de combustão (Figura 33).

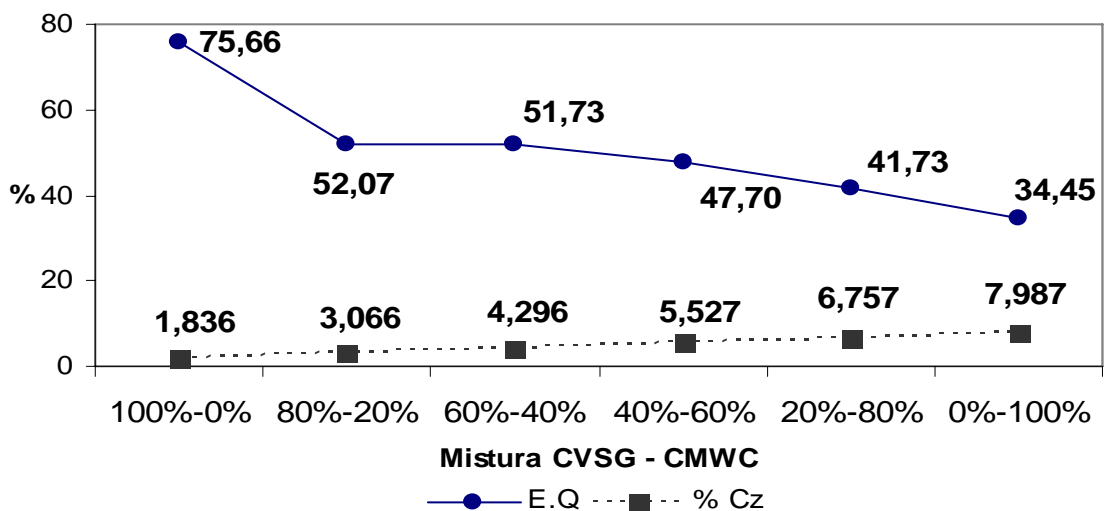


Figura 33. Valores comparativos dos teores de cinza com os índices de eficiência de queima da mistura CVSG – CMWC

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak

Todas as misturas de carvões apresentaram teores médios de enxofre abaixo dos parâmetros operacionais do alto forno. Os teores de enxofre devem atingir no máximo 0,8 % em massa na composição do carvão. Esse aumento da percentagem de enxofre na escória acarreta maior custo de dessulfuração no ferro gusa e modificação na basicidade de escória (Figura 34).

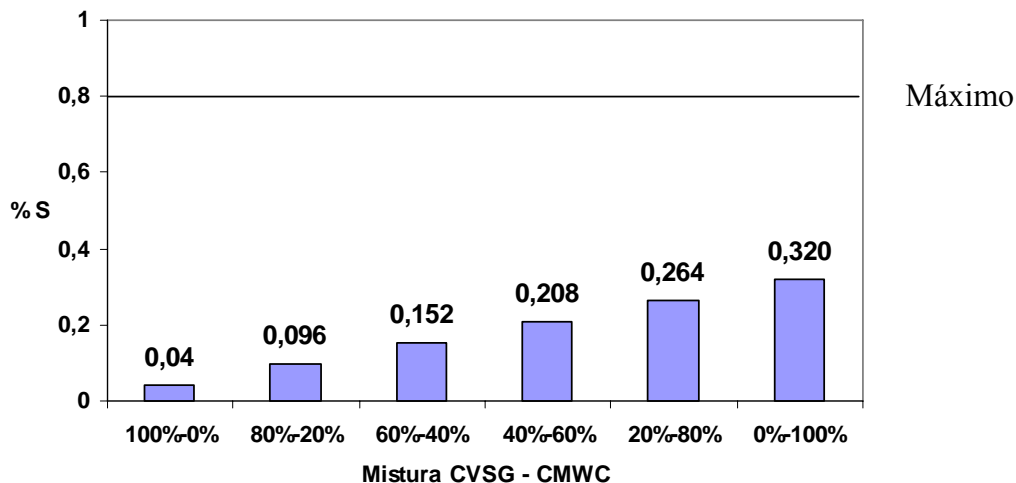


Figura 34. Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CMWC, com apresentação dos valores máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak

Todas as misturas de carvões apresentaram teores médios de carbono fixo dentro da faixa que representa os parâmetros operacionais do alto forno. Os teores de carbono fixo e matérias voláteis influenciam os índices de queima da mistura. Quanto maior a quantidade de carbono fixo e matérias voláteis, maior será a eficiência de queima da partícula na injeção de carvão pulverizado (Figura 35).

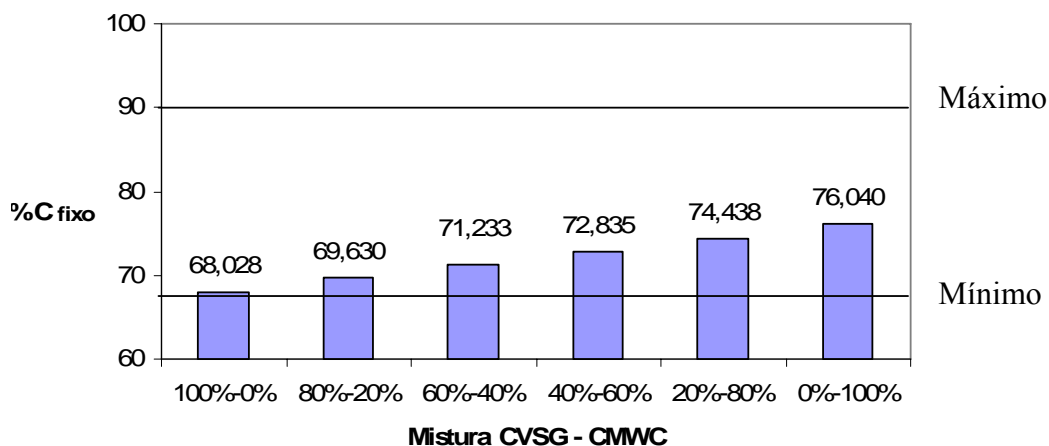


Figura 35. Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CMWC, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak

A Figura 36 ilustra o comportamento dos valores de C_{fixo} , E.Q. e MV para as diferentes proporções de CVSG – CMWC.

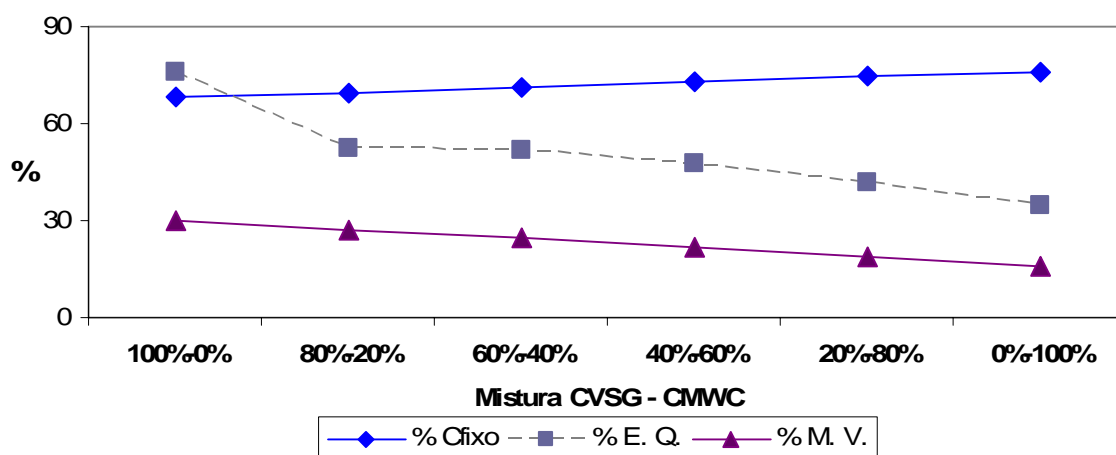


Figura 36. Valores comparativos dos teores de carbono fixo, matérias voláteis e eficiência de queima da mistura CVSG – CMWC

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak

Nota-se que a adição de diferentes percentagens de carvão vegetal ao carvão mineral, favoreceu para a obtenção de maiores teores de voláteis. A eficiência de queima é claramente influenciada pela adição de carvão vegetal ao carvão mineral.

Na prática, a injeção de finos de carvão pelas ventaneiras no alto forno tem se limitado em valores que se situam entre 200 e 220 kg/t_{ferro}. O aumento desta taxa de injeção provocaria uma diminuição na permeabilidade da carga, acarretando uma diminuição da produtividade do alto forno (JONSOHN, 1999). Para produção de uma tonelada de ferro gusa são consumidos pelo alto forno 470 kg de carvão, sendo 300 kg (63,83 %) enfiados pelo topo e 170 kg (36,17 %) injetados pelas ventaneiras (SILVA, 2006).

Com relação as misturas, somente aquelas com 40 %, 20 % e 0 % de carvão vegetal (CVSG) atenderam integralmente as condições operacionais do alto forno.

A Tabela 32 apresenta as emissões de CO₂, SO₂ e remoção de O₂ da atmosfera na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CMWC que atendem todas as especificações do alto forno. A Tabela 33 apresenta as reduções nos níveis de CO₂ quando se utilizam essas misturas de CVSG e CMWC. Segundo o European Climate Exchange (EXC), no Relatório Mensal de Julho de 2009, o valor médio da cotação do Certificado de Emissões Reduzidas foi de US\$ 20,75. A Tabela 34 apresenta os valores monetários referente à cotação do CER's quando se utiliza a mistura CVSG – CMWC nas proporções de 40 %, 20 % e 0 % de carvão vegetal (CVSG).

Das três misturas aceitáveis, a melhor é a 40 % - 60 %, pois apresenta maior índice de eficiência de queima e maiores ganhos ambientais e comerciais, na venda de Certificados de Emissões Reduzidas.

Tabela 32. Índice de emissões de CO₂, SO₂ e remoção de O₂ da atmosfera na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CMWC.

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CO ₂ (Kg)	-	-	-	378,00	504,00	630,00
SO ₂ (Kg)	-	-	-	1,82	2,43	3,04
O ₂ (Kg)	-	-	-	- 266,10	- 354,80	- 443,50

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak

Tabela 33. Redução nos níveis de CO₂ (em kg) quando se utiliza misturas de CVSG e CMWC

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0% - 100%
CVSG – CMWC	-	-	-	252,00	126,00	0

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak

Tabela 34. Valores monetários (US\$/t) referente a comercialização de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CMWC

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CMKP	-	-	-	5,23	2,61	0

Segundo o European Climate Exchange CER's = US\$ 20,751.

1 CER's equivale a 1 tonelada de CO₂.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMWC = Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak

4.10.2 Misturas dos finos CVSG – CMKP

As Figuras 37, 39, 40 e 41 apresentam os teores de matérias voláteis, cinza, enxofre e carbono fixo das 5 diferentes misturas de carvão vegetal (CVSG) com carvão mineral (CMKP), considerando também os parâmetros operacionais do alto forno.

As eficiências de queima das misturas de carvão vegetal CVSG e carvão mineral CMKP estão na Tabela 35. Considerando os resultados das eficiências de queima das misturas, observou-se que quanto maior a massa de carvão vegetal maior o índice de combustão, sendo estatisticamente significante. As misturas com 80 %, 60 %, 40 % e 20 % de carvão vegetal não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as eficiências de queima.

Tabela 35. Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CMKP

Mistura	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG-CMKP	75,62 a	53,62 b	50,50 b	45,20 b	44,70 b	31,90 c

*Medias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 95 % de probabilidade.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMKP = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima

Considerando os parâmetros operacionais do alto forno, algumas misturas apresentaram valores percentuais inadequados.

Com relação aos teores de matérias voláteis das misturas, todas apresentaram valores percentuais dentro dos limites operacionais do alto forno.

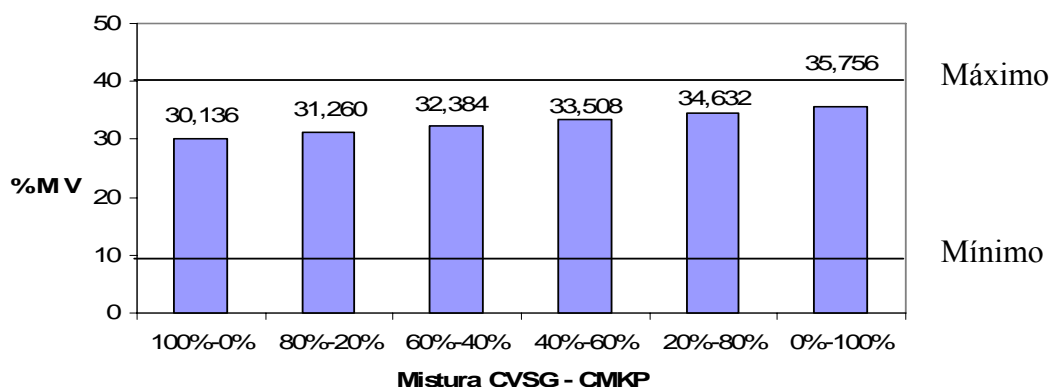


Figura 37. Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CMKP, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CMKP = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima e CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain

A Figura 38 representa a relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CMKP em função da percentagem de carvão vegetal.

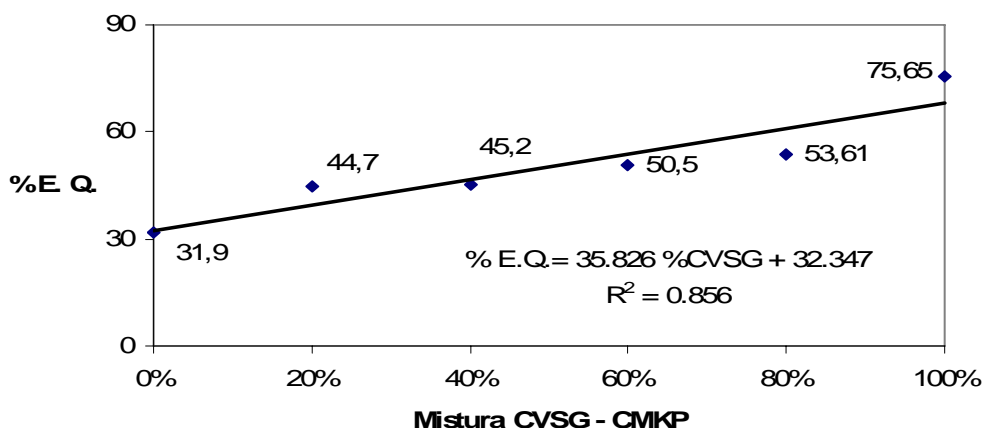


Figura 38. Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CMKP com a redução da percentagem de carvão vegetal.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMKP = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima

Com relação aos teores médios de cinza, somente misturas com no mínimo de 53,52 % de carvão vegetal, atendem aos parâmetros operacionais do alto forno (Figura 39).

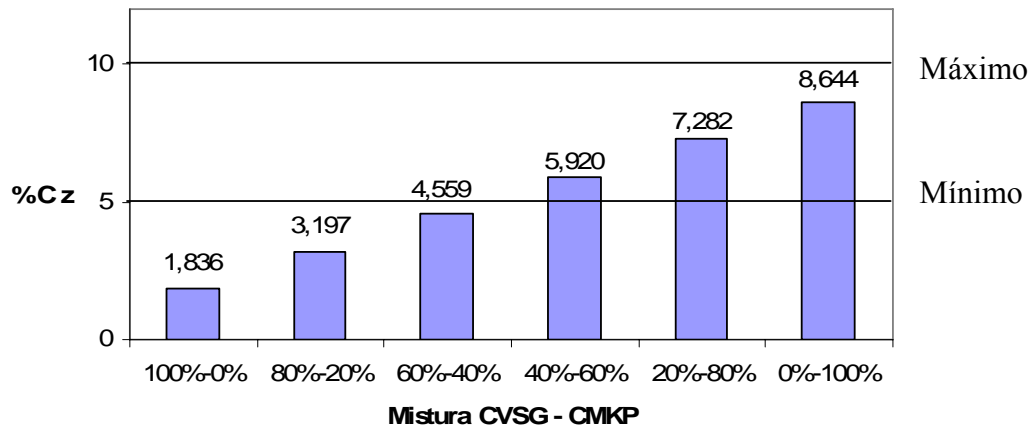


Figura 39. Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CMKP, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMKP = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima

Todas as misturas CVSG – CMKP apresentaram teores médios de enxofre abaixo do limite máximo operacional do alto forno, Figura 40.

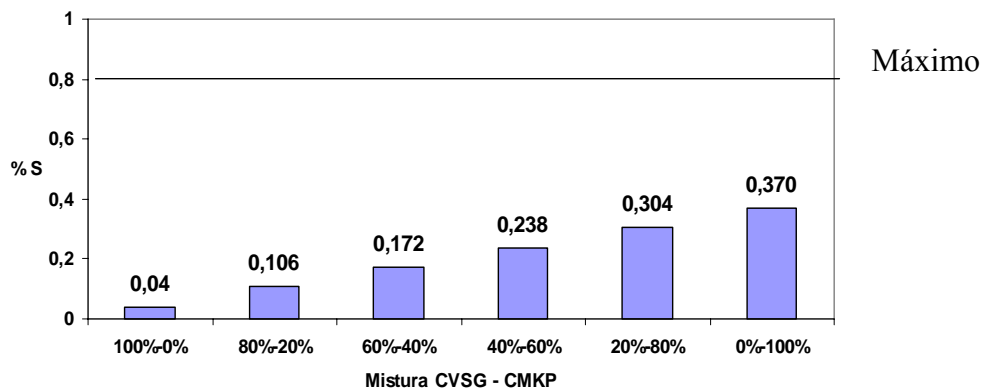


Figura 40. Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CMKP, com apresentação dos valores máximo para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMKP = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima

Com relação aos teores médios de carbono fixo, somente misturas com no mínimo de 99,775 % de carvão vegetal CVSG e 0,225 % de carvão mineral CMKP, poderão ser injetadas no alto forno, atendendo aos parâmetros operacionais (Figura 41).

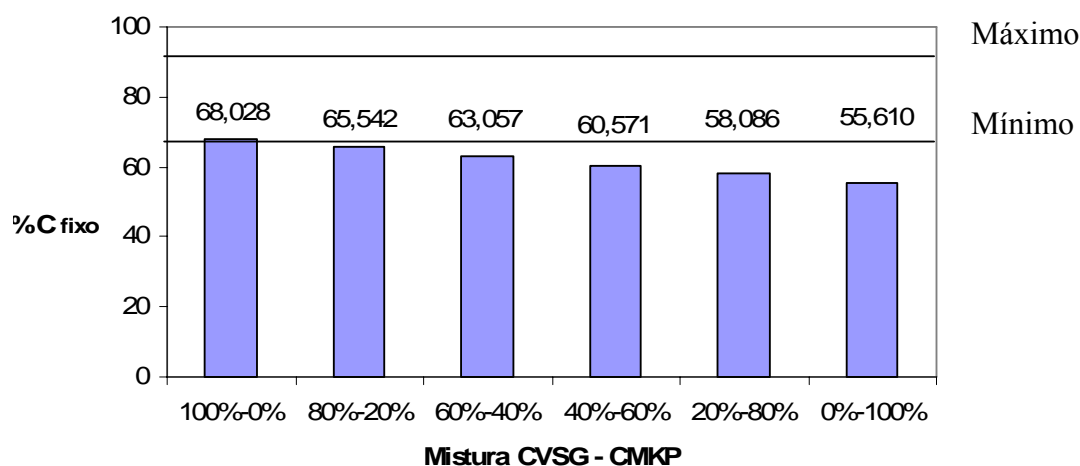


Figura 41. Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CMKP e com apresentação dos valores máximo para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMKP = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima

Considerando os parâmetros operacionais do alto forno, nenhuma das misturas de CVSG e CMKP atendem a todas as especificações. Porém a mistura 60 % CVSG e 40 % CMKP apresentou valores abaixo do mínimo, de cinza (8,82 %) e de carbono fixo (7,27 %). Como esses valores percentuais estão abaixo de 10 % esta mistura será considerada viável para injeção no alto forno.

Desta forma com relação aos índices de emissões de carbono a mistura 60 % CVSG e 40 % CMKP permitirá obtenção de ganhos ambientais e comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas, (Tabela 36). A Tabela 37 apresenta a redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza mistura de CVSG e CMKP e a Tabela 38 apresenta os valores monetários (US\$) referente à cotação do Certificado de Emissões Reduzidas, quando se utiliza a mistura de CVSG e CMKP, considerando 1 CER's = US\$ 20,75.

Tabela 36. Índice de emissões de CO₂, SO₂ e remoção O₂ da atmosfera na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CMKP

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CO ₂	-	-	252,00	-	-	-
SO ₂	-	-	1,21	-	-	-
O ₂	-	-	- 177,40	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMKP = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima

Tabela 37. Redução nos níveis de CO₂ quando se utiliza misturas de CVSG e CMKP

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG - CMKP	-	-	378,00	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMKP = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima

Tabela 38. Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CMKP

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG - CMKP	-	-	7,84	-	-	-

Segundo o European Climate Exchange CER's = US\$ 20,751.

1 CER's equivale a 1 tonelada de CO₂.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CMKP = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima

4.10.3 Misturas dos finos CVSG – CN1

As eficiências de queima das misturas de carvão vegetal CVSG e carvão mineral CN1 estão na Tabela 39. As misturas com 60 %, 40 %, 20 % e 0 % de carvão vegetal não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as eficiências de queima.

Tabela 39. Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN1

Mistura	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG - CN1	75,62 a	74,52 a	58,75 b	52,65 b	48,03 b	47,80 b

*Medias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 95 % de probabilidade.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN1 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200

Considerando os parâmetros operacionais do alto forno, algumas misturas apresentaram valores percentuais inadequados para injeção. As Figuras 42, 44, 45 e 46 apresentam os valores médios de matérias voláteis, cinza, enxofre e carbono fixo de cada mistura, comparados aos parâmetros operacionais.

Todas as misturas de carvões CVSG e CN1, apresentaram teores de matérias voláteis dentro da faixa especificada pelo alto forno (Figura 42).

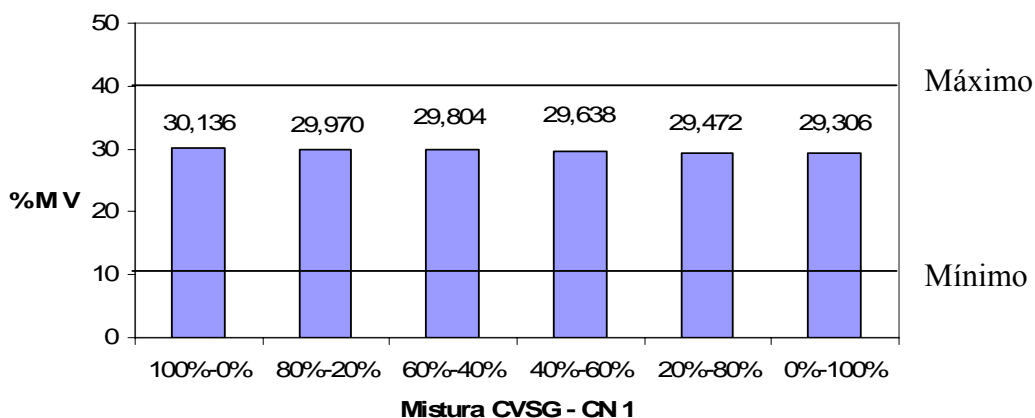


Figura 42. Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN1, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN1 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200

A Figura 43 representa a relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN1 em função da percentagem de carvão vegetal.

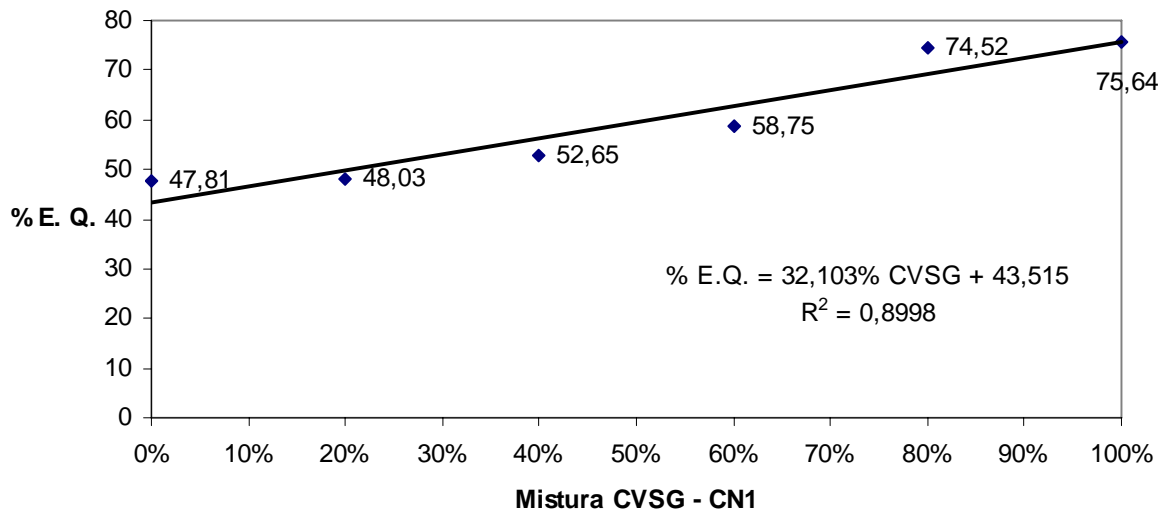


Figura 43. Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN1 com a redução da percentagem de carvão vegetal.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN1 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200

As misturas de CVSG e CN1 apresentaram teores de cinza elevados à medida que se aumentava o teor de carvão mineral na mistura. Desta forma, somente a mistura 80 % CVSG e 20 % CN1 apresentou teores de cinza dentro da faixa especificada pelo alto forno. Com relação aos teores de cinza, somente as misturas que tiverem as porcentagens de carvão vegetal (CVSG) na faixa de 68,92 % a 87,95 % poderão ser misturadas com o CN1 para injeção no alto forno (Figura 44).

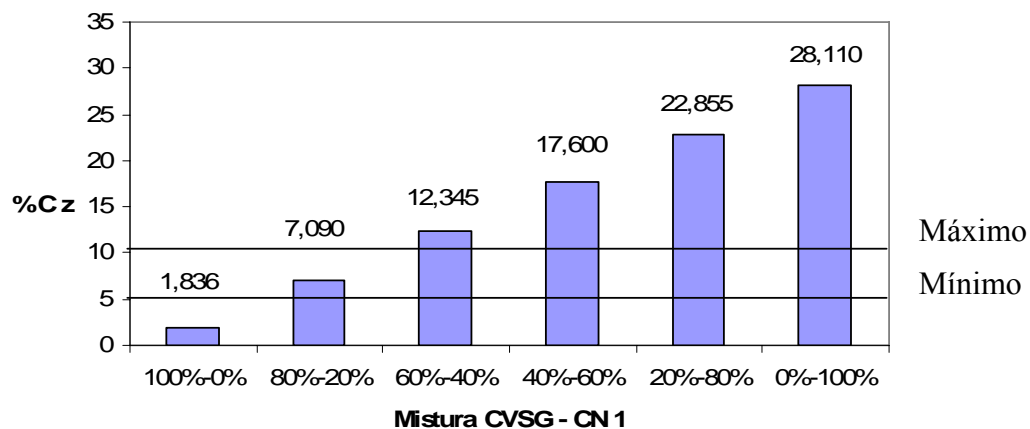


Figura 44. Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN1, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN1 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200

A porcentagem de enxofre nas misturas CVSG e CN1 apresentaram teores médios abaixo do limite máximo de 0,8 %, com exceção da fração 0 % CVSG e 100 % CN1. Com relação aos teores de enxofre, somente as misturas que tiverem as porcentagens de CVSG acima de 17,39 % poderão ser misturadas com o CN1 para injeção no alto forno (Figura 45).

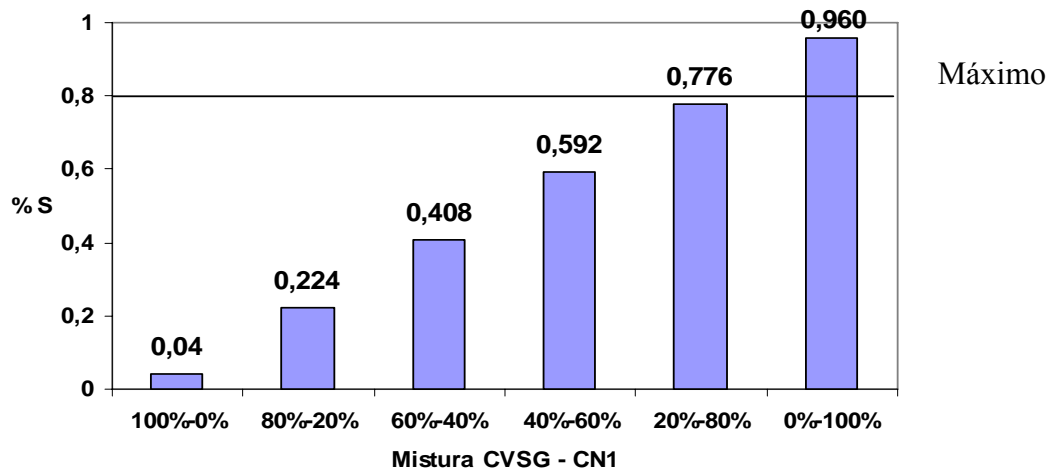


Figura 45. Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN1, com apresentação do valor máximo para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN1 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200

Com relação aos teores médios de carbono fixo, somente misturas com no mínimo de 98,90 % de carvão vegetal CVSG e 1,10 % de carvão mineral CN1, poderão ser injetadas no alto forno, atendendo aos parâmetros operacionais (Figura 46).

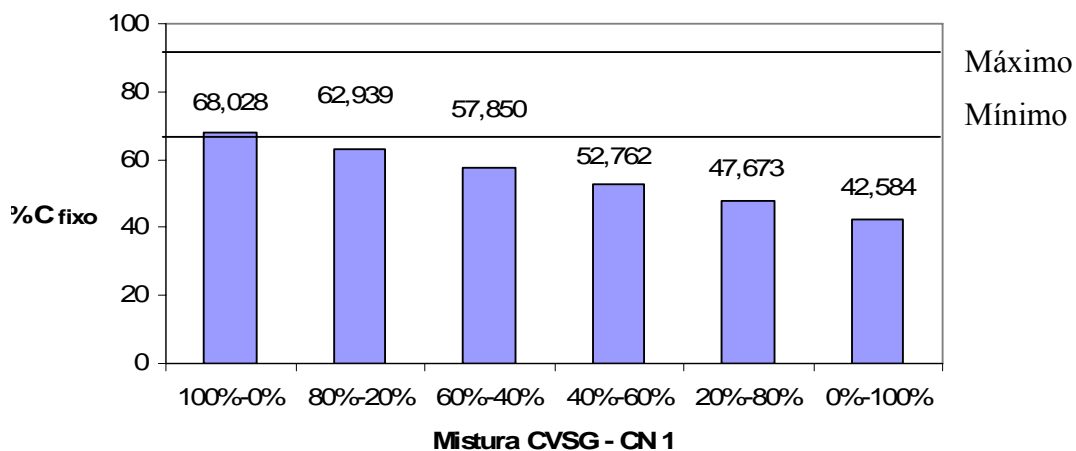


Figura 46. Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN1, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN1 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200

Considerando os parâmetros operacionais do alto forno, nenhuma das misturas de CVSG e CN1 atendem a todas as especificações. A mistura 80 % CVSG e 20 % CN1 apresentou valor de carbono fixo 7,44 % abaixo do mínimo estabelecido. Como esse valor percentual está abaixo de 10 %, esta mistura será considerada viável para injeção no alto forno.

Desta forma, com relação aos índices de emissões de carbono, essa da mistura de 80 % CVSG e 20 % CN1 permitirá obtenção de ganhos ambientais e comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas. A Tabela 40 apresenta índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura 80 % CVSG – 20 % CN1. A

Tabela 41 apresenta a redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza mistura de 80 % CVSG – 20 % CN1 e a Tabela 42 apresenta o valor monetário (US\$) referente à cotação do Certificado de Emissões Reduzidas quando se utiliza a mistura de CVSG e CN1, considerando 1 CER's = US\$ 20,75.

Tabela 40. Índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN1

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CO ₂	-	126,00	-	-	-	-
SO ₂	-	0,61	-	-	-	-
O ₂	-	-88,70	-	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN1 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200

Tabela 41. Redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN1

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN1	-	504,00	-	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN1 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200

Tabela 42. Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN1

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN1	-	10,46	-	-	-	-

Segundo o European Climate Exchange CER's = US\$ 20,751.

1 CER's equivale a 1 tonelada de CO₂.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN1 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200

4.10.4 Misturas dos finos CVSG – CN2

As eficiências de queima das misturas de carvão vegetal CVSG e carvão mineral CN2 estão na Tabela 43. As misturas com 80 %, 60 %, 40 %, 20 % e 0 % de carvão vegetal não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as eficiências de queima.

Tabela 43. Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN2

Mistura	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG CN2	75,62 a	54,28 b	50,81 b	48,86 b	48,61 b	46,05 b

*Medias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 95 % de probabilidade.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN2 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700

As Figuras 47, 49, 50 e 51 apresentam os valores médios de matérias voláteis, cinza, enxofre e carbono fixo de cada mistura, considerando também os parâmetros operacionais do alto forno.

Com relação aos teores de matérias voláteis das misturas, todas as misturas apresentaram teores dentro da faixa especificada para alto forno (Figura 47).

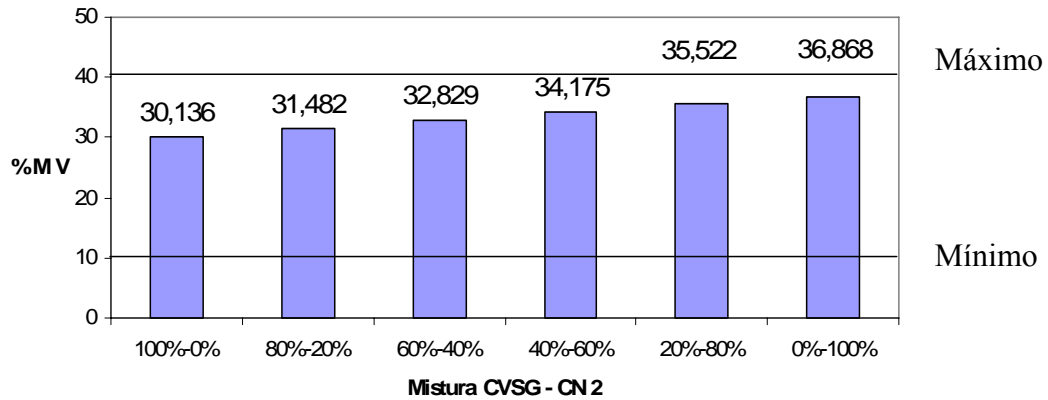


Figura 47. Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN2, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN2 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700

A Figura 48 representa a relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN2 em função da percentagem de carvão vegetal.

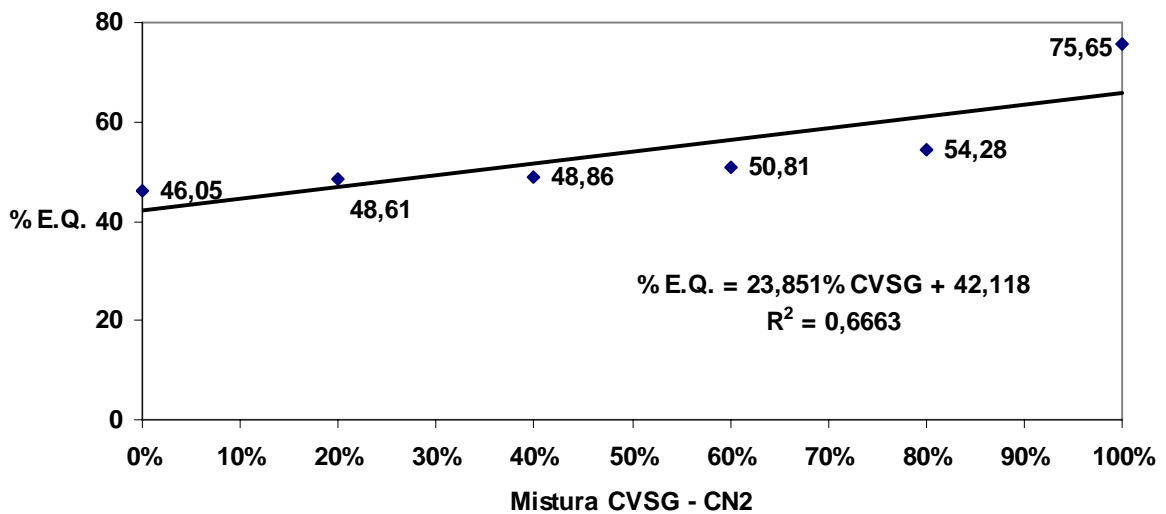


Figura 48. Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN2.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN2 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700

As misturas de CVSG e CN2 apresentaram teores de cinza elavados à medida que se aumentava o teor de carvão mineral CN2 na mistura. Desta forma, somente as misturas que tiverem as porcentagens de carvão vegetal (CVSG) entre 13,86 % e 66,61 % poderão ser injetadas no alto forno (Figura 49).

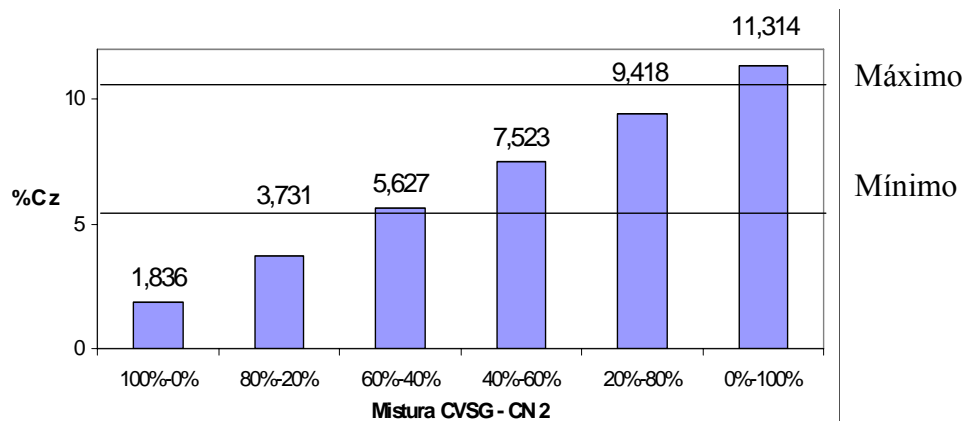


Figura 49. Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN2, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN2 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700

A porcentagem de enxofre nas misturas CVSG e CN2 apresentou uma variação de 3350 % entre a porcentagem de 100 % a 0 % de carvão vegetal, este fato ocorreu devido ao elevado teor de enxofre no carvão mineral nacional CN2. Para se injetar no alto forno misturas CVSG – CN2, a proporção de carvão vegetal (CVSG) tem que ser de no mínimo 43,28 % , (Figura 50).

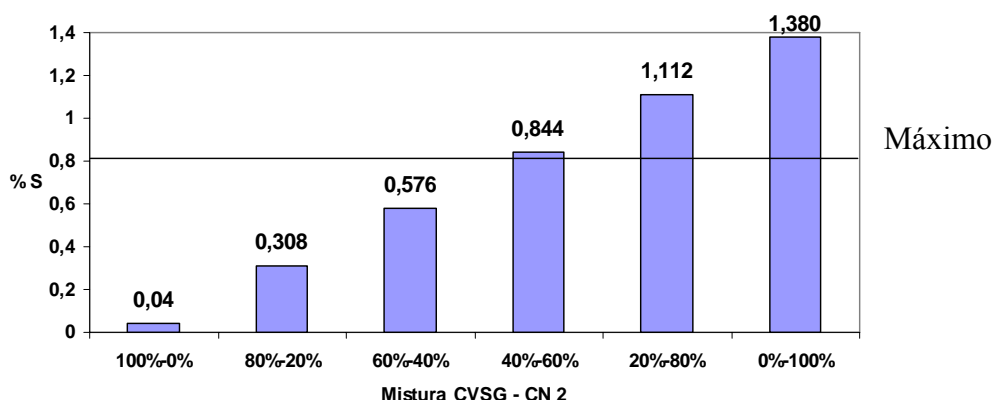


Figura 50. Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN2, com apresentação do valor máximo para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN2 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700

Com relação aos teores médios de carbono fixo, somente misturas com no mínimo de 99,83 % de carvão vegetal CVSG e 0,170 % de carvão mineral CN2, poderão ser injetadas no alto forno, atendendo aos parâmetros operacionais (Figura 51)

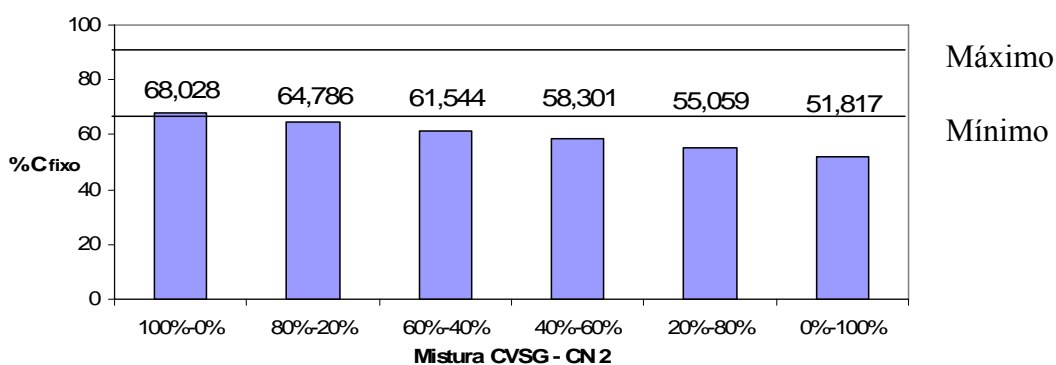


Figura 51. Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN2, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN2 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700

Considerando os parâmetros operacionais do alto forno, nenhuma das misturas de CVSG e CN2 atendem a todas as especificações. A mistura 60 % CVSG e 40 % CN2 apresentou valor de carbono fixo 9,50 % abaixo do mínimo estabelecido. Como esse valor percentual está abaixo de 10 %, esta mistura será considerada viável para injeção no alto forno.

Desta forma, a mistura 60 % CVSG e 40 % CN2 permitirá obtenção de ganhos ambientais e comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas. A Tabela 44 apresenta índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura 60 % CVSG – 40 % CN2. A Tabela 45 apresenta a redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza mistura de 60 % CVSG – 40 % CN2 e a Tabela 46 apresenta o valor monetário (US\$) referente à cotação do Certificado de Emissões Reduzidas quando se utiliza a mistura de CVSG e CN2, considerando 1 CER's = US\$ 20,75.

Tabela 44. Índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN2

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CO ₂	-	-	252,00	-	-	-
SO ₂	-	-	1,21	-	-	-
O ₂	-	-	- 177,40	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN2 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700

Tabela 45. Redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN2

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN1	-	-	378,00	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CN2 = Carvão Mineral Nacional e CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain

Tabela 46. Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN2

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN1	-	-	7,84	-	-	-

Segundo o European Climate Exchange CER's = US\$ 20,751.

1 CER's equivale a 1 tonelada de CO₂.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN2 = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700

4.10.5 Misturas dos finos CVSG – CN3

As eficiências de queima das misturas de carvão vegetal CVSG e carvão mineral CN3 estão na Tabela 47. Houve redução nas eficiências de queima com adição de carvão mineral CN3. A substituição de 20 % de carvão mineral no carvão vegetal (80 % - 20 %) não acarretam diferenças significativas na eficiência de queima. A eficiência de queima das misturas de CVSG – CN3 nas proporções de 60 - 40, 40 - 60 e 20 - 80 não foram estatisticamente significativas. Algumas misturas não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as eficiências de queima.

Tabela 47. Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN3

Mistura	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG CN3	75,62 a	66,12 a	54,09 b	48,06 b c	47,19 b c	37,54 c

*Medias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 95 % de probabilidade.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN3 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200

Considerando os parâmetros operacionais do alto forno, algumas misturas apresentaram valores percentuais inadequados para injeção. As Figuras 52, 54, 55 e 56 apresentam os valores médios de matérias voláteis, cinza, enxofre e carbono fixo de cada mistura, considerando também os parâmetros operacionais do alto forno.

Com relação aos teores de matérias voláteis, todas as misturas CVSG e CN3 atenderam as condições operacionais do alto forno. A Figura 52 apresenta os teores de matérias voláteis das misturas comparados aos parâmetros operacionais do alto forno.

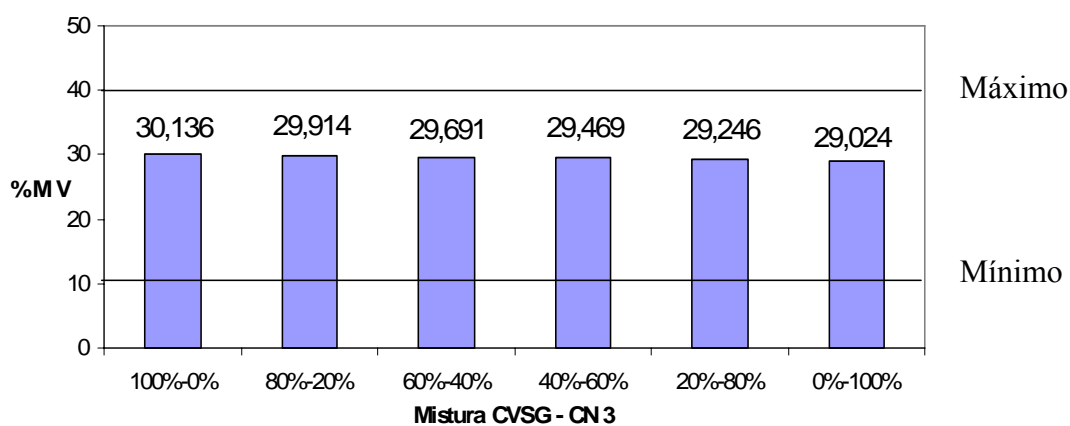


Figura 52. Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN3, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN3 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200

A Figura 53 representa a curva da eficiência de queima das misturas de CVSG e CN3. Os índices de eficiências de queima foram diminuindo conforme se aumentava a percentagem de carvão CN3 na mistura.

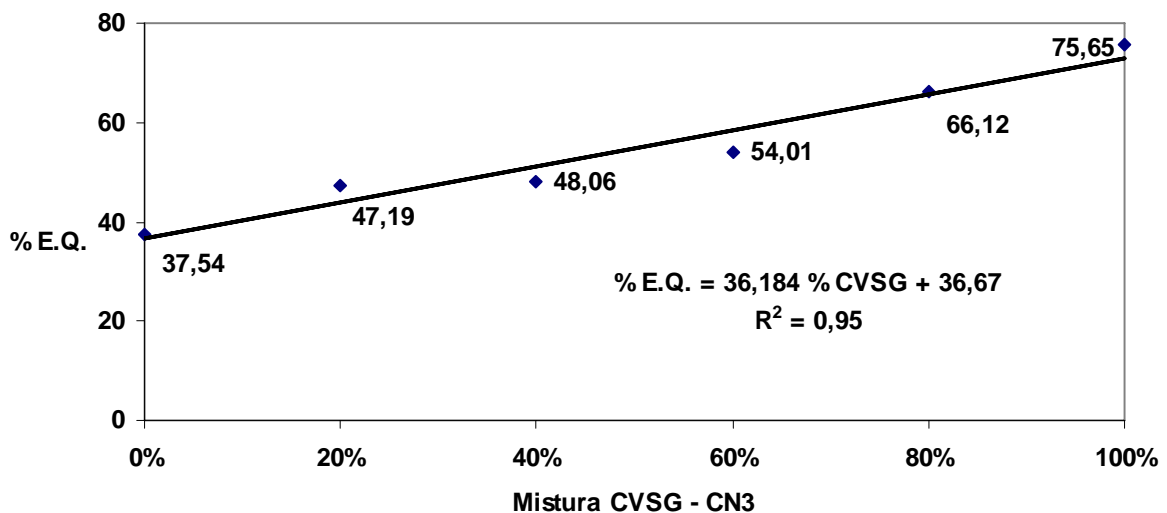


Figura 53. Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN3 com a redução da percentagem de carvão vegetal.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN3 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200

As misturas de CVSG e CN3 apresentaram teores de cinza elavados. O CN3 apresentou altos valores de teores de cinza, contribuindo assim para os altos valores nas misturas 60 – 40, 40 – 60 e 20 – 80. Desta forma, somente as misturas que tiverem as porcentagens de carvão vegetal (CVSG) entre 68,17 % e 87,66 % poderão ser injetadas no alto forno (Figura 54). A variação dos teores de cinza das misturas oscilou em 1397,06 % , este fato se deve à elevada percentagem de cinza no carvão mineral CN3.

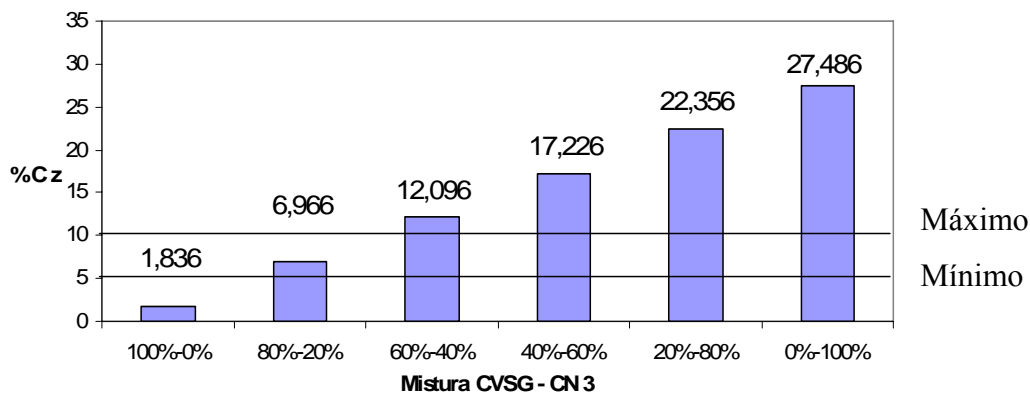


Figura 54. Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN3, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN3 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200

Com relação ao teor de enxofre nas misturas CVSG e CN3, houve uma variação de 2050 %; este fato ocorre devido ao elevado teor de enxofre no carvão mineral nacional CN3. Para se injetar no alto forno misturas CVSG – CN3 a proporção de carvão vegetal (CVSG) na mistura tem que ser no mínimo 7,31 % (Figura 55).

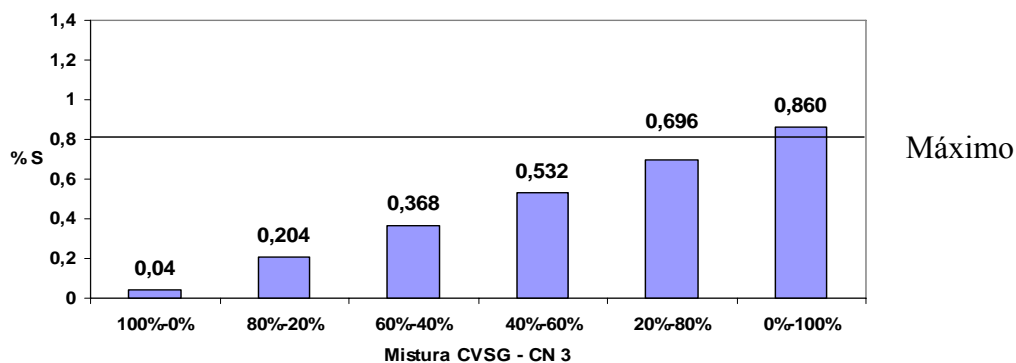


Figura 55. Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN3, com apresentação do valor máximo para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN3 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200

Com relação aos teores médios de carbono fixo, somente misturas com no mínimo de 99,54 % de carvão vegetal CVSG e 0,456 % de carvão mineral CN3, poderão ser injetadas no alto forno, atendendo aos parâmetros operacionais (Figura 56).

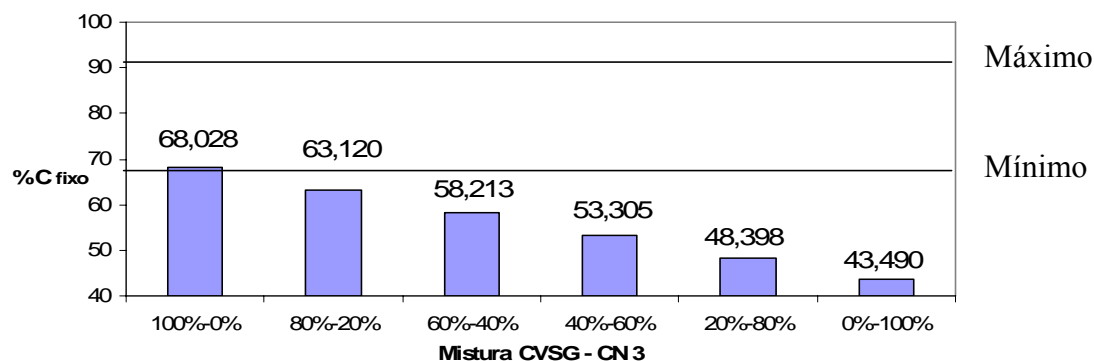


Figura 56. Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN3, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN3 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200

Considerando os parâmetros operacionais do alto forno, nenhuma das misturas de CVSG e CN3 atende a todas as especificações. A mistura 80 % CVSG e 20 % CN3 apresentou valor de carbono fixo 7,17 % abaixo do mínimo estabelecido. Como esse valor percentual está abaixo de 10 %, esta mistura será considerada viável para injeção no alto forno.

Assim, com relação aos índices de emissões de carbono, à mistura 80 % CVSG e 20 % CN3 permitirá obtenção de ganhos ambientais e comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas. A Tabela 48 apresenta o índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura 80 % CVSG – 20 % CN3. A Tabela 49 apresenta a redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza mistura de 80 % CVSG – 20 % CN3 e a Tabela 50 apresenta os valores monetários (US\$) referente à cotação do Certificado de Emissões Reduzidas quando se utiliza a mistura de CVSG e CN3, considerando 1 CER's = US\$ 20,75.

Tabela 48. Índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN3

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CO ₂	-	126,00	-	-	-	-
SO ₂	-	0,61	-	-	-	-
O ₂	-	- 88,70	-	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN3 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200

Tabela 49. Redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN3

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN1	-	504,00	-	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN3 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200

Tabela 50. Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN3

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN1	-	10,46	-	-	-	-

Segundo o European Climate Exchange CER's = US\$ 20,751.

1 CER's equivale a 1 tonelada de CO₂.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN3 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200

4.10.6 Misturas dos finos CVSG – CN4

As eficiências de queima das misturas de carvão vegetal CVSG e carvão mineral CN4 estão na Tabela 51.

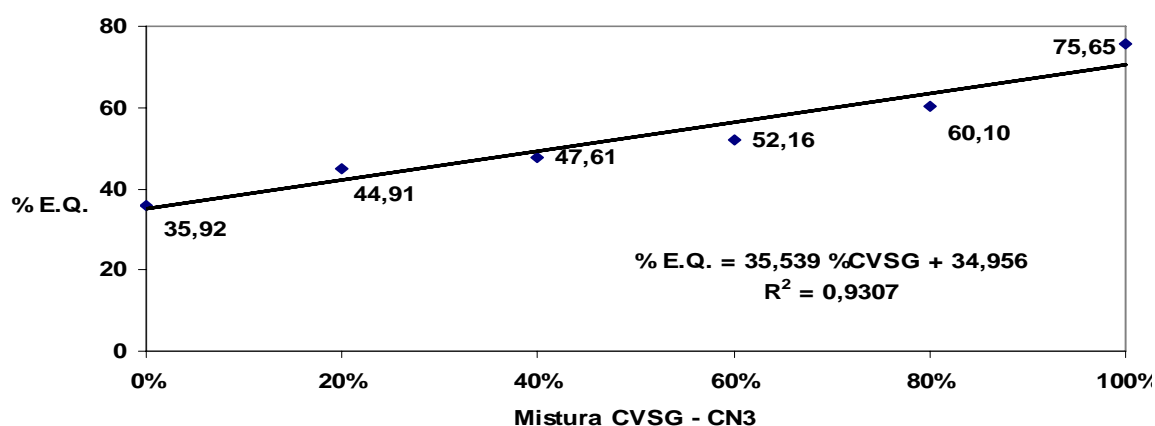
Tabela 51. Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN4

Mistura	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	80 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG CN4	75,65 a	60,10 b	52,16 b c	47,61 c	44,91 c d	35,92 d

*Medias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 95 % de probabilidade.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN4 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000

A relação da eficiência de queima em função da adição de diferentes percentuais de carvão mineral é mostrada através da equação da Figura 57.

**Figura 57.** Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN4 com a redução da percentagem de carvão vegetal.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN4 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000

As Figuras 58, 59, 60 e 61 apresentam os valores médios de matérias voláteis, cinza, enxofre e carbono fixo de cada mistura, considerando também os parâmetros operacionais do alto forno.

Com relação aos teores de matérias voláteis das misturas, todas as misturas CVSG e CN4 apresentaram teores dentro dos limites operacionais do alto forno. A Figura 58 apresenta os teores de matérias voláteis das misturas comparadas aos parâmetros operacionais do alto forno.

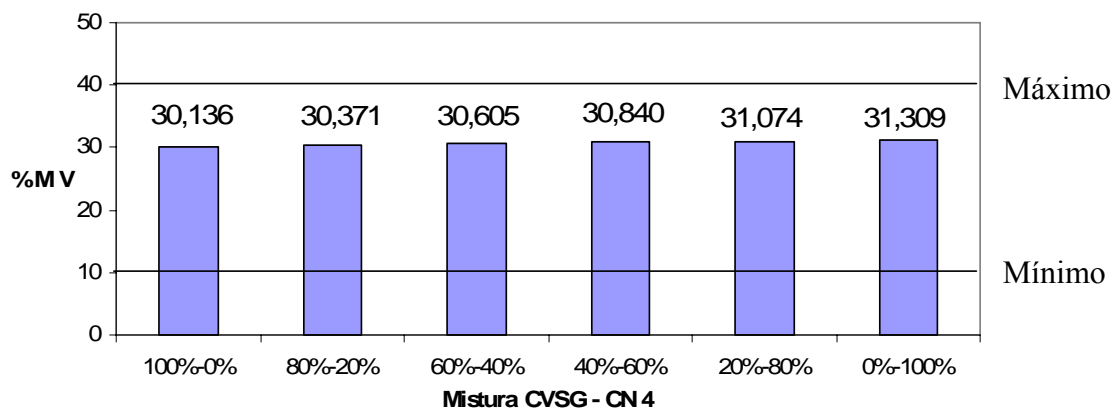


Figura 58. Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN4, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN4 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000

As misturas de CVSG e CN4 apresentaram teores de cinza elevados conforme aumentava o teor de carvão mineral na mistura, Figura 59. Desta forma somente as misturas que tiverem as porcentagens de CVSG entre 65,10 % e 86,47 % poderão ser injetadas no alto forno (Figura 59). A variação dos teores de cinza das misturas oscilou em 1274,13 %; este fato se deve ao teor elevado de cinza no carvão mineral CN4.

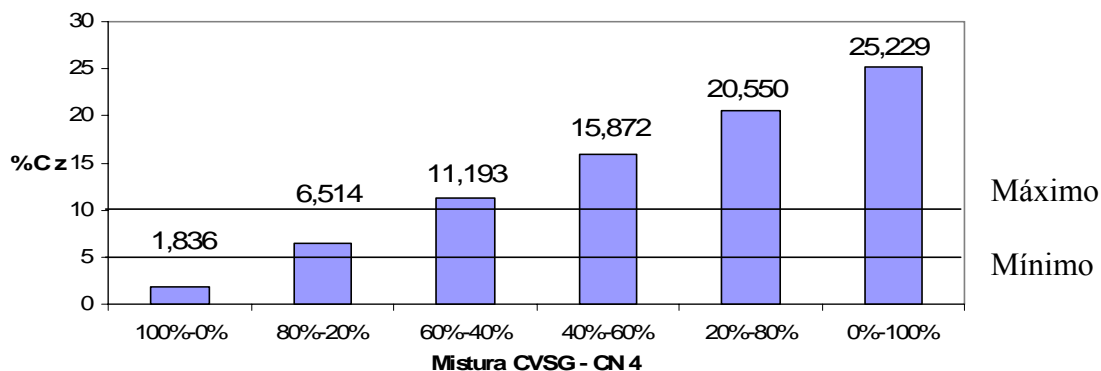


Figura 59. Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN4, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN4 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000

Com relação ao teor de enxofre nas misturas CVSG e CN4 todas apresentaram uma porcentagem abaixo do limite máximo operacional do alto forno. A variação do teor de enxofre nas misturas foi de 1250 %, devido ao elevado teor de enxofre no carvão mineral nacional CN4. (Figura 60).

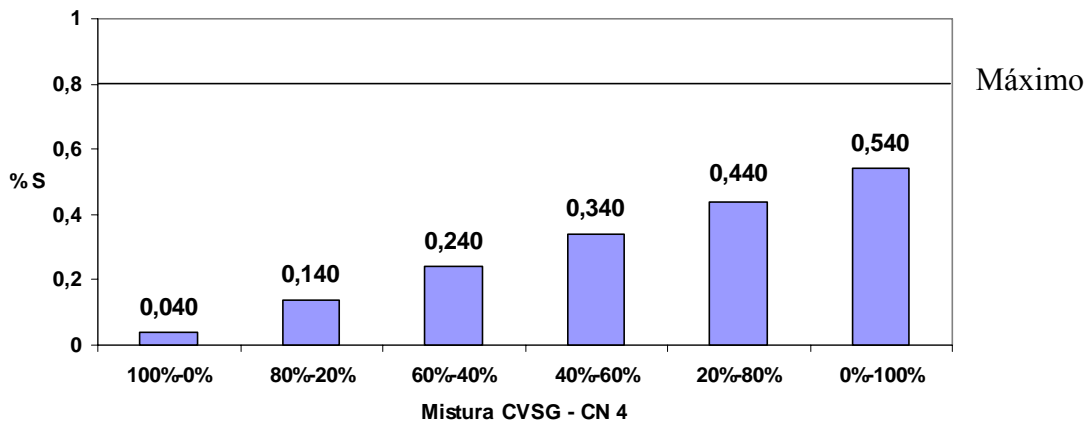


Figura 60. Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN4, com apresentação do valor máximo para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN4 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000

Com relação aos teores médios de carbono fixo, somente misturas com no mínimo de 99,886 % de carvão vegetal CVSG e 0,114 % de carvão mineral CN4, poderão ser injetadas no alto forno, atendendo aos parâmetros operacionais (Figura 61).

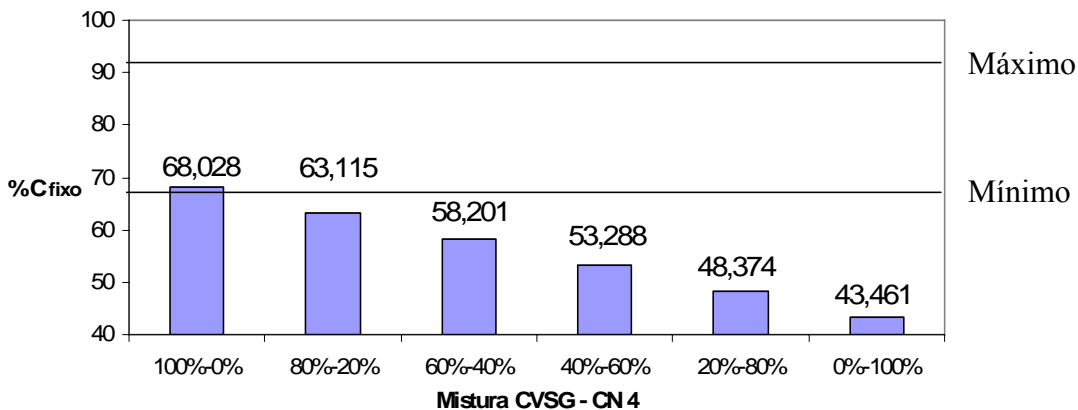


Figura 61. Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN4, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN4 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000

Considerando os parâmetros operacionais do alto forno, nenhuma das misturas de CVSG e CN4 atende a todas as especificações. A mistura 80 % CVSG e 20 % CN3 apresentou valor de carbono fixo 7,18 % abaixo do mínimo estabelecido. Como esse valor percentual está abaixo de 10 %, esta mistura será considerada viável para injeção no alto forno.

Assim, será possível obter ganhos ambientais e comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas. A Tabela 52 apresenta o índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura 80 % CVSG – 20 % CN4. A Tabela 53 apresenta a redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza mistura de 80 % CVSG – 20 % CN4 e a Tabela 54 apresenta os valores monetários (US\$) referente à cotação do Certificado de Emissões Reduzidas quando se utiliza a mistura de CVSG e CN4, considerando 1 CER's = US\$ 20,75.

Tabela 52. Índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN4.

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CO ₂	-	126,00	-	-	-	-
SO ₂	-	0,61	-	-	-	-
O ₂	-	- 88,70	-	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN4 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000

Tabela 53. Redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN4.

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN4	-	504,00	-	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN4 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000

Tabela 54. Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN4.

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN4	-	10,46	-	-	-	-

Segundo o European Climate Exchange CER's = US\$ 20,751.

1 CER's equivale a 1 tonelada de CO₂.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN4 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000

4.10.7 Misturas dos finos CVSG – CN5

As eficiências de queima das misturas de carvão vegetal CVSG e carvão mineral CN5 estão na Tabela 55. A Figura 62 ilustra a relação da eficiência de queima em função de diferenças percentuais de carvão vegetal. As misturas com 80 % e 60 % de carvão vegetal não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as eficiências de queima.

Tabela 55. Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN5

Mistura	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG CN5	75,62 a	58,41 b	57,61 b c	48,86 c d	45,97 d e	36,87 e

*Medias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 95 % de probabilidade.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN5 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500

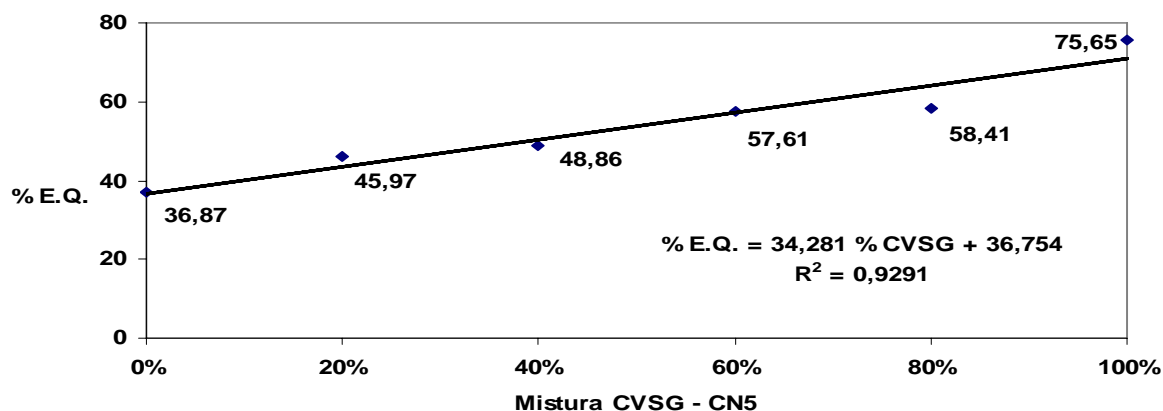


Figura 62. Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN5 com a redução da percentagem de carvão vegetal.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN5 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500

As Figuras 63, 64, 65 e 66 apresentam os valores médios de matérias voláteis, cinza, enxofre e carbono fixo de cada mistura, considerando também os parâmetros operacionais do alto forno.

Com relação aos teores de matérias voláteis todas as misturas CVSG e CN5 apresentaram teores dentro dos limites operacionais do alto forno. A Figura 63 apresenta os teores de matérias voláteis das misturas comparadas aos parâmetros operacionais do alto forno.

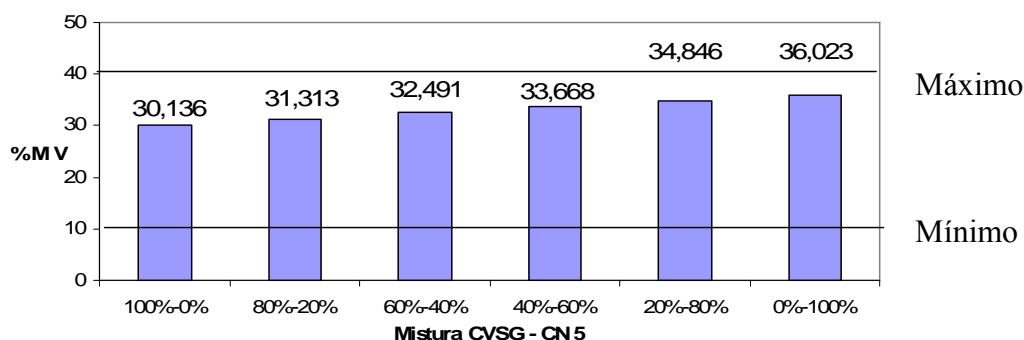


Figura 63. Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN5, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN5 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500

As misturas de CVSG e CN5 apresentaram teores de cinza elavados conforme se aumentava o teor de carvão mineral na mistura. Desta forma, somente as misturas que tiverem as porcentagens de carvão vegetal (CVSG) entre 27,24 % e 71,80 % poderão ser injetadas no alto forno (Figura 64). A variação dos teores de cinza das misturas oscilou em 611,16 %, devido ao teor elevado de cinza no carvão mineral CN5.

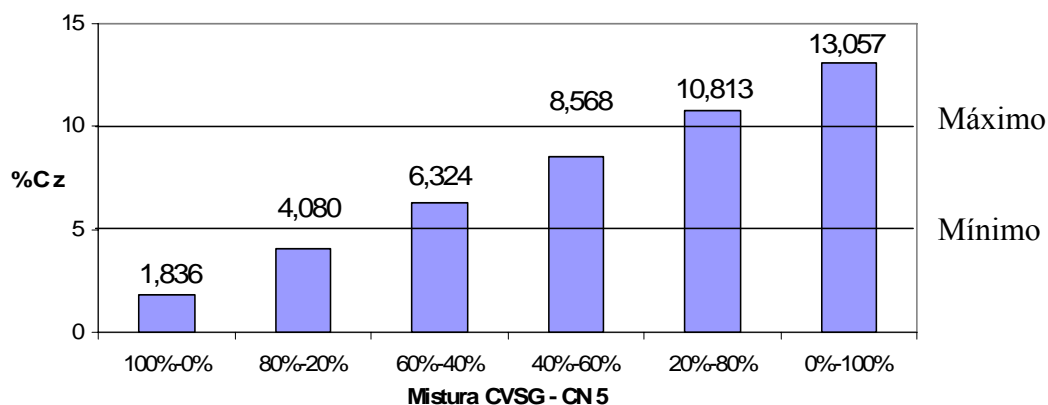


Figura 64. Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN5, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN5 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500

Com relação ao teor de enxofre nas misturas CVSG e CN5 todas apresentaram uma percentagem abaixo do limite operacional do alto forno. A variação do teor de enxofre nas misturas foi de 1325 %, devido ao elevado teor de enxofre no carvão mineral nacional CN5. (Figura 65).

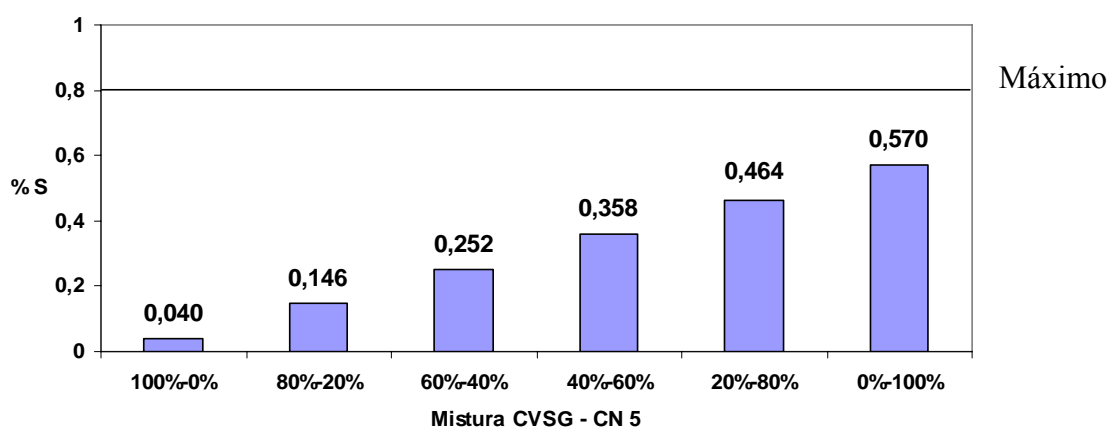


Figura 65. Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN5, com apresentação do valor máximo para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN5 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500

Com relação aos teores médios de carbono fixo, somente misturas com no mínimo de 99,836 % de carvão vegetal CVSG e 0,164 % de carvão mineral CN5, poderão ser injetadas no alto forno, atendendo aos parâmetros operacionais (Figura 66).

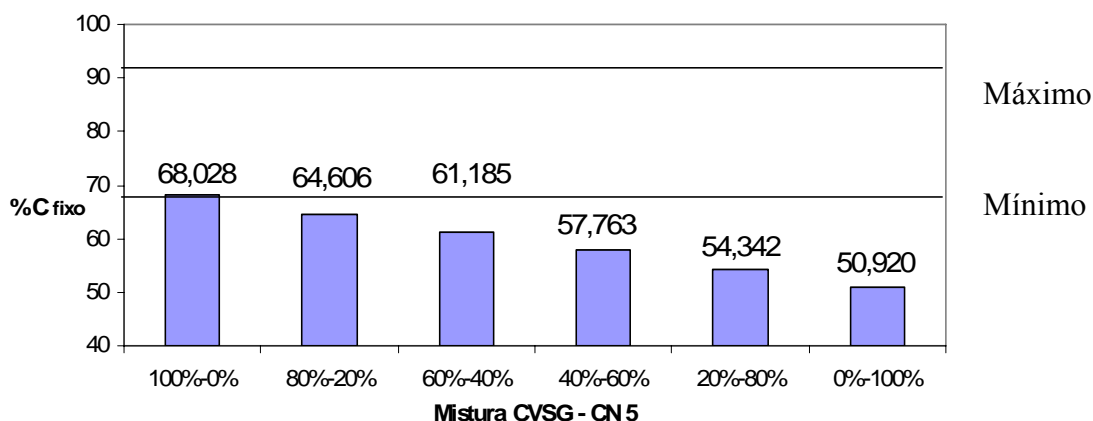


Figura 66. Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN5, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN5 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500

Considerando os parâmetros operacionais do alto forno, nenhuma das misturas de CVSG e CN5 atende a todas as especificações. A mistura 60 % CVSG e 40 % CN5 apresentou valor de carbono fixo 10 % abaixo do mínimo estabelecido. Como esse valor percentual representa 10 %, esta mistura será considerada viável para injeção no alto forno.

A mistura CVSG – CN5 (80 % - 20 %) não será considerada, uma vez que essa mistura não atendeu a exigência mínima quando ao teor de cinza. (ver Figura 64). A Tabela 56 apresenta índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura 60 % CVSG – 40 % CN5. A Tabela 57 apresenta a redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza mistura de 60 % CVSG – 40 % CN5 e a Tabela 58 apresenta os valores monetários (US\$) referente à cotação do Certificado de Emissões Reduzidas quando se utiliza a mistura de CVSG e CN2, considerando 1 CER's = US\$ 20,75.

Tabela 56. Índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN5

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CO ₂	-	-	252,00	-	-	-
SO ₂	-	-	1,22	-	-	-
O ₂	-	-	- 177,40	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN5 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500

Tabela 57. Redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN5

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN5	-	-	378,00	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN5 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500

Tabela 58. Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN5

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN1	-	-	7,84	-	-	-

Segundo o European Climate Exchange CER's = US\$ 20,751.

1 CER's equivale a 1 tonelada de CO₂.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN5 = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500

4.10.8 Misturas dos finos CVSG – CN6

As eficiências de queima das misturas de carvão vegetal CVSG e carvão mineral CN6 estão na Tabela 59. A Figura 67 ilustra a curva com a equação da reta para eficiência de queima de percentagem de adição de CVSG. As misturas com 40 %, 20 % e 0 % de carvão vegetal não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as eficiências de queima.

Tabela 59. Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN6

Mistura	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG - CN6	75,62 a	50,65 b	47,90 b	38,60 c	37,60 c	30,38 c

*Medias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 95 % de probabilidade.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN6 = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20

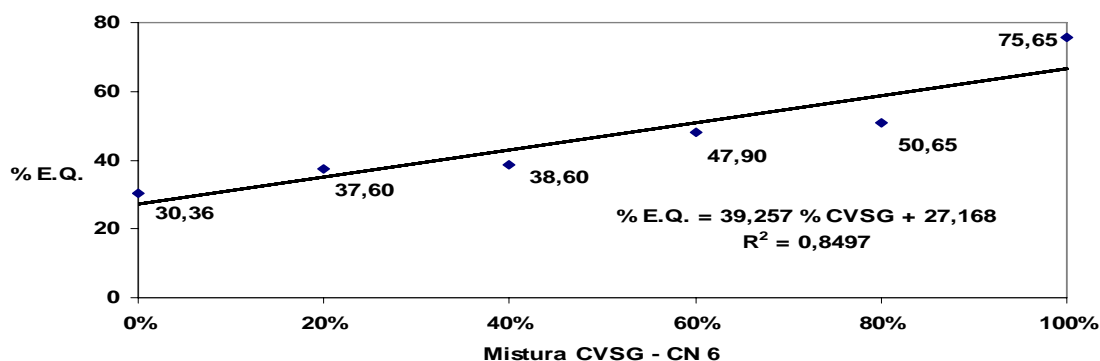


Figura 67. Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN6 com a redução da percentagem de carvão vegetal.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN6 = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20

As Figuras 68, 69, 70 e 71 apresentam os valores médios de matérias voláteis, cinza, enxofre e carbono fixo de cada mistura, considerando também os parâmetros operacionais do alto forno.

A Figura 68 apresenta os teores de matérias voláteis das misturas comparadas aos parâmetros operacionais do alto forno. Com relação as matérias voláteis das misturas, todas apresentaram teores dentro dos limites operacionais do alto forno.

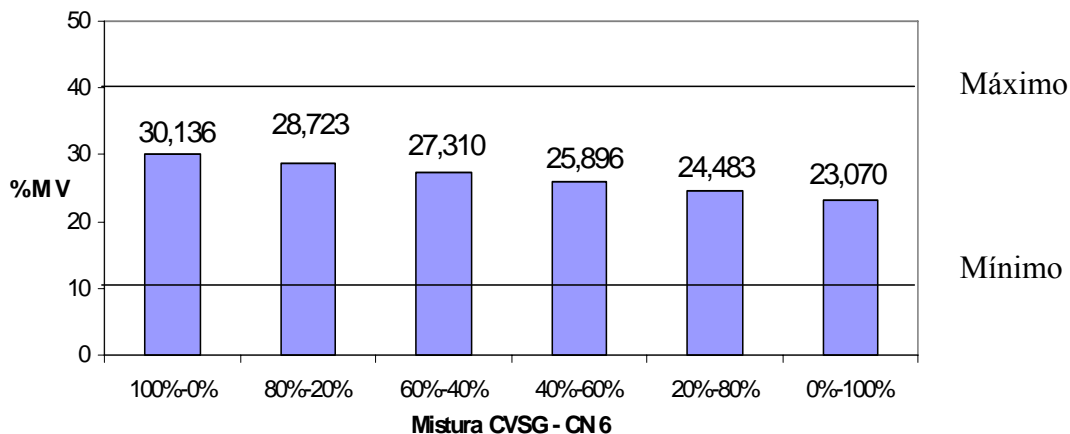


Figura 68. Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN6, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN6 = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20

As misturas de CVSG e CN6 apresentam teores de cinza elavados. Desta forma, somente as misturas que tiverem as porcentagens de CVSG entre 62,76 % e 85,56 % poderão ser injetadas no alto forno (Figura 69). A variação dos teores de cinza das misturas oscilou em 1194,06 %, em função do teor elevado de cinza no carvão mineral CN6.

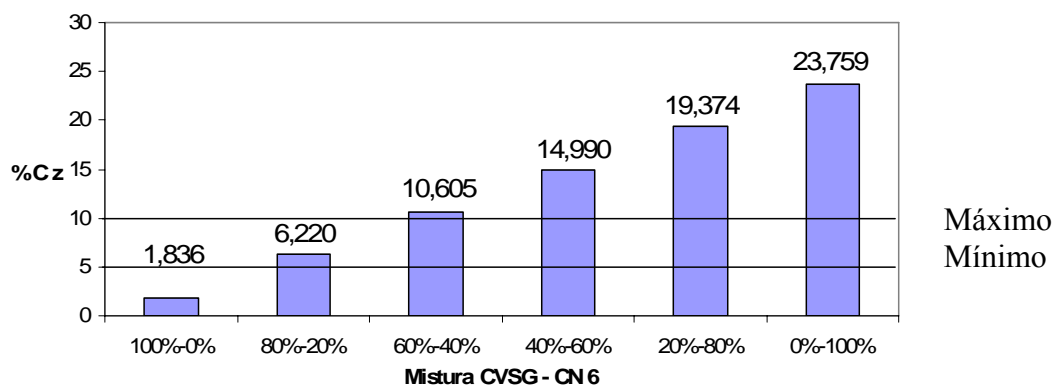


Figura 69. Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN6, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN6 = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20

Os teores de enxofre nas misturas CVSG e CN6 sofreram variações de 4725 %. Este fato ocorreu devido ao elevado teor de enxofre no carvão mineral nacional CN6. Para se injetar no alto forno misturas CVSG – CN6, a proporção de carvão vegetal tem que estar acima de 59,78 % (Figura 70).

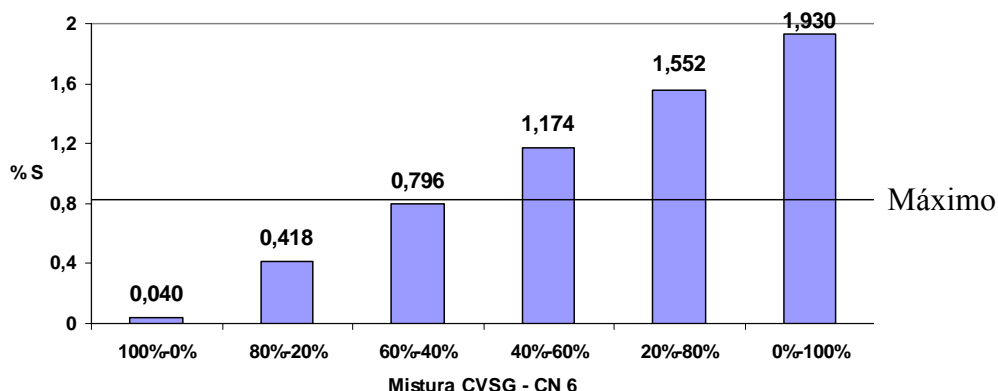


Figura 70. Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN6, com apresentação do valor máximo para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN6 = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20

Com relação aos teores médios de carbono fixo, somente misturas com no mínimo de 99,811 % de carvão vegetal CVSG e 0,189 % de carvão mineral CN6, poderão ser injetadas no alto forno, atendendo aos parâmetros operacionais (Figura 71).

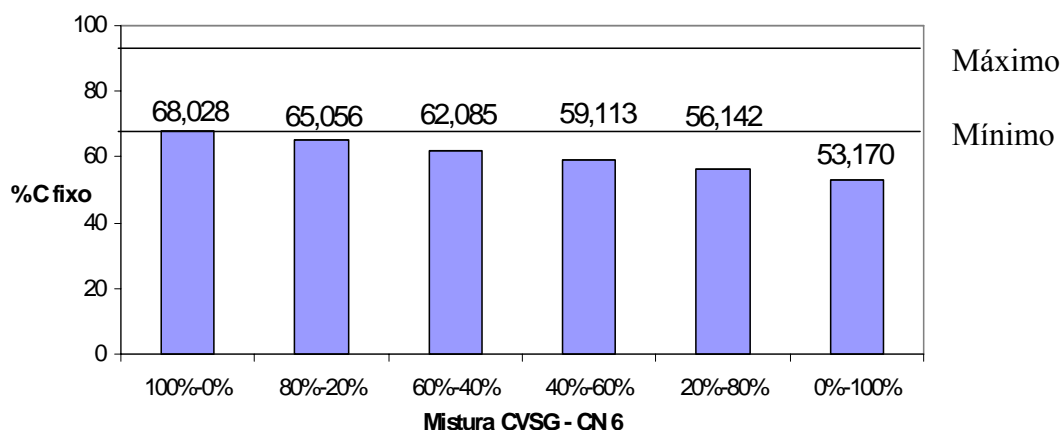


Figura 71. Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN6, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN6 = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20

Considerando os parâmetros operacionais do alto forno, nenhuma das misturas de CVSG e CN6 atendem a todas as especificações. Porém a mistura 80 % CVSG e 20 % CN6 apresentou valor abaixo do mínimo, de carbono fixo (4,33 %). Como esse valor percentual está abaixo de 10 %, esta mistura será considerada viável para injeção no alto forno.

Desta forma, será possível obter com a mistura 80 % CVSG - 20 % CN6 ganhos ambientais e comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas. A Tabela 60 apresenta o índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura 80 % CVSG – 20 % CN6. A Tabela 61 apresenta a redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza mistura de 80 % CVSG – 20 % CN6 e a Tabela 62 apresenta os valores monetários (US\$) referente à cotação do Certificado de Emissões Reduzidas quando se utiliza a mistura de CVSG e CN6, considerando 1 CER's = US\$ 20,75.

Tabela 60. Índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN6

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 %- 40 %	40 %-60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CO ₂	-	126,00	-	-	-	-
SO ₂	-	0,61	-	-	-	-
O ₂	-	- 88,70	-	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN6 = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20

Tabela 61. Redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN6

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 %- 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN6	-	504,00	-	-	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN6 = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20

Tabela 62. Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN6

	100 % - 0%	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN6	-	10,46	-	-	-	-

Segundo o European Climate Exchange CER's = US\$ 20,751.

1 CER's equivale a 1 tonelada de CO₂.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain e CN6 = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20

4.10.9 Misturas dos finos CVSG – CN7

As eficiências de queima das misturas de carvão vegetal CVSG e carvão mineral CN7 estão na Tabela 63. Na Figura 72 está ilustrada a equação que relaciona eficiência de queima em função da diferença percentual do CVSG. As misturas com 40 %, 20 % e 0 % de carvão vegetal não apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as eficiências de queima.

Tabela 63. Valores médios das eficiências de queima das misturas dos finos dos carvões CVSG e CN7, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

Mistura	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 %- 40%	40 %-60 %	20 %-80 %	0 %- 100 %
CVSG CN7	75,62 a	68,20 a	67,97 a	53,13 b	48,30 b	48,11 b

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain; e CN7 = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto

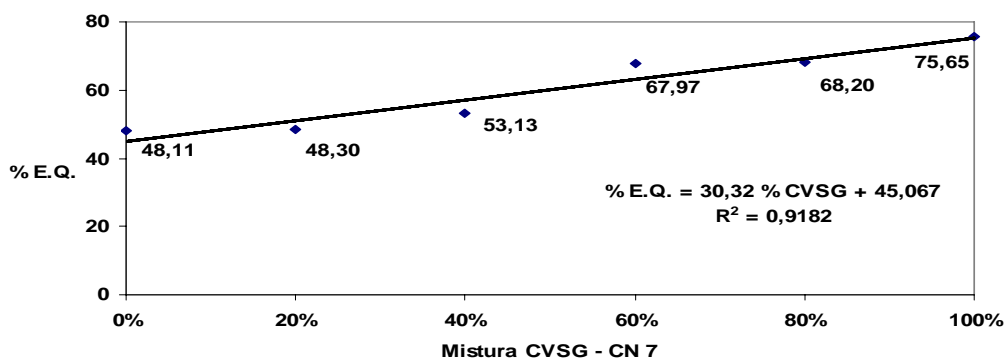


Figura 72. Relação dos índices de eficiência de queima das misturas CVSG – CN7 com a redução da percentagem de carvão vegetal.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain; e CN7 = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

As Figuras 73, 74, 75 e 76 apresentam os valores médios de matérias voláteis, cinza, enxofre e carbono fixo de cada mistura, considerando também os parâmetros operacionais do alto forno.

Com relação aos teores de matérias voláteis das misturas, todas apresentaram valores percentuais dentro dos limites operacionais do alto forno. A Figura 73 apresenta os teores de matérias voláteis das misturas comparadas aos parâmetros operacionais do alto forno.

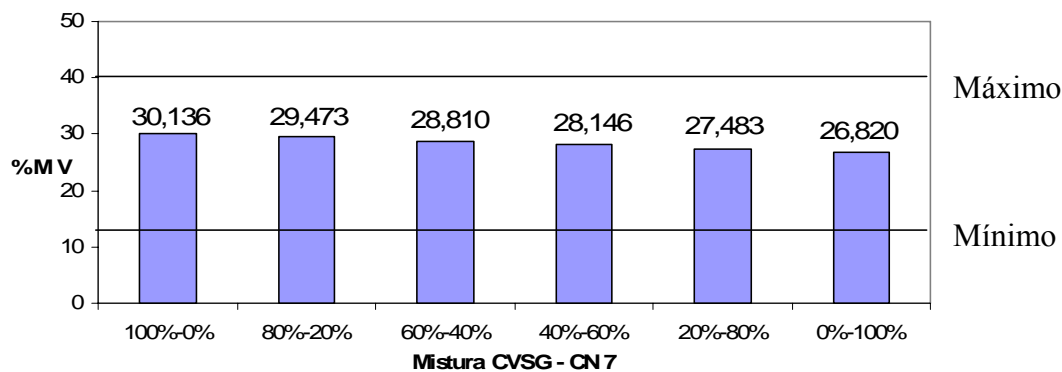


Figura 73. Valores médios percentuais dos teores de matérias voláteis das misturas de CVSG e CN7, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain; e CN7 = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

As misturas de CVSG e CN7 apresentaram teores de cinza elavados conforme se aumentava o teor de carvão mineral nacional CN7 na mistura. Desta forma, somente as misturas que tiverem as porcentagens de carvão vegetal (CVSG) entre 14,81 % a 66,98 % poderão ser injetadas no alto forno (Figura 74). A variação dos teores de cinza das misturas oscilou em 522,00 %, em razão do alto teor de cinza no carvão mineral CN7.

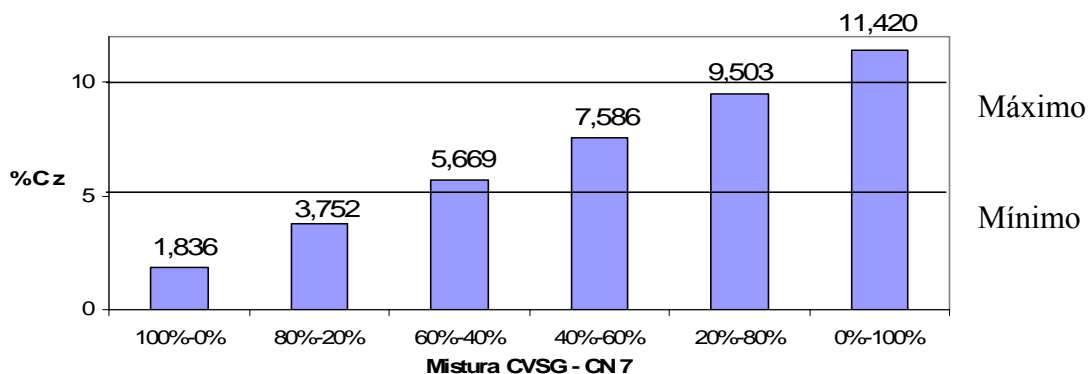


Figura 74. Valores médios percentuais dos teores de cinza das misturas de CVSG e CN7, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain; e CN7 = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto

Os teores de enxofre nas misturas CVSG e CN7 sofreram variações de 2900 %, este fato ocorreu devido ao elevado teor de enxofre no carvão mineral nacional CN7. Para se injetar no alto forno misturas CVSG – CN7 a proporção de carvão vegetal tem que ter no mínimo 34,48 % (Figura 75).

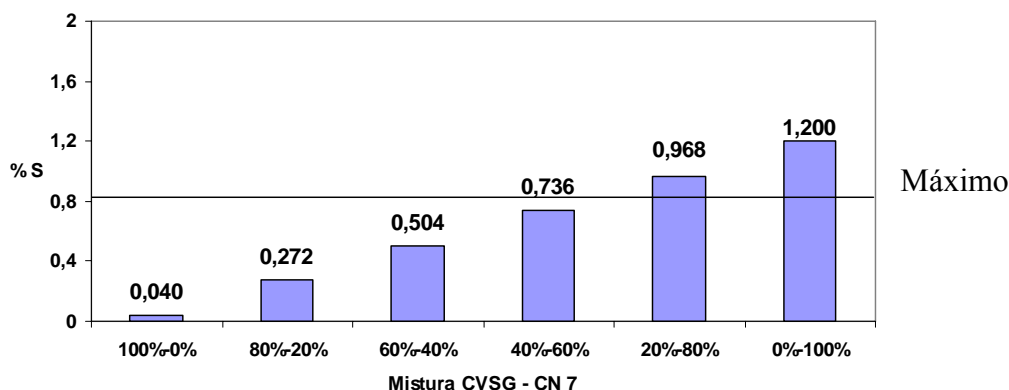


Figura 75. Valores médios percentuais dos teores de enxofre das misturas de CVSG e CN7, com apresentação do valor máximo para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain; e CN7 = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto

Com relação aos teores médios de carbono fixo, somente misturas com no mínimo de 95,55 % de carvão vegetal CVSG e 4,45 % de carvão mineral CN7 poderão ser injetadas no alto forno, atendendo aos parâmetros operacionais (Figura 76).

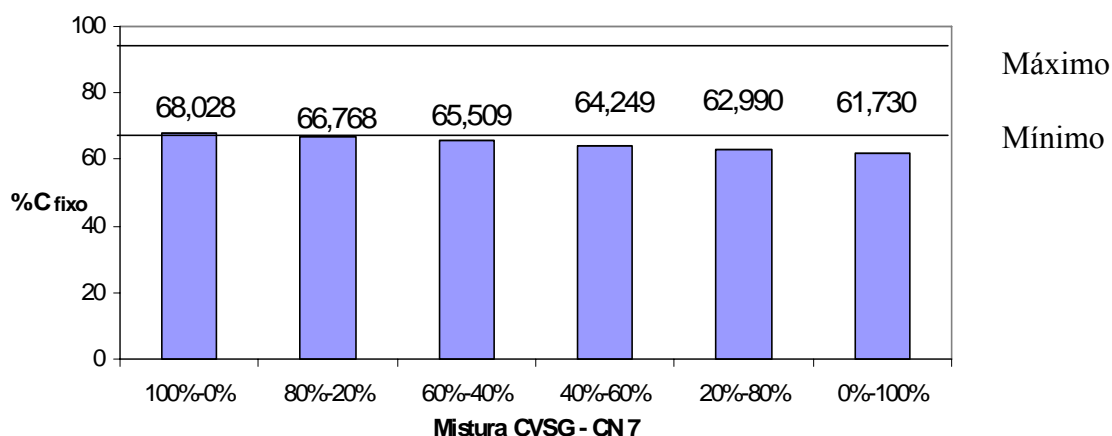


Figura 76. Valores médios percentuais dos teores de carbono fixo das misturas de CVSG e CN7, com apresentação dos valores mínimos e máximos para operação no alto forno.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain; e CN7 = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

Considerando os parâmetros operacionais do alto forno, nenhuma das misturas de CVSG e CN7 atendem a todas as especificações. Porém as misturas 60 % CVSG - 40 % CN7 e 40 % CVSG - 60 % CN7, apresentaram valores abaixo do mínimo, de carbono fixo (3,66 % e 5,51 %). Como esses valores percentuais estão abaixo de 10 %, estas misturas serão consideradas viáveis para injeção no alto forno.

Desta forma, as misturas 60 % - 40 % e 40 % - 60 % permitirão obtenções de ganhos ambientais e comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas. A Tabela 64 apresenta o índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a misturas 60 % - 40 % e 40 % - 60 %. A Tabela 65 apresenta a redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utilizam misturas de 60 % - 40 % e 40 % - 60 % a Tabela 66 apresenta os valores monetários (US\$) referente à cotação do Certificado de Emissões Reduzidas quando se utiliza a mistura de CVSG e CN7, considerando 1 CER's = US\$ 20,75.

Tabela 64. Índice de emissões de CO₂, SO₂ e O₂ na produção de uma tonelada de ferro gusa com a mistura CVSG e CN7

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CO ₂	-	-	252,00	378,00	-	-
SO ₂	-	-	1,22	1,82	-	-
O ₂	-	-	- 177,40	-266,10	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain; e CN7 = Finos de Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

Tabela 65. Redução nos níveis de carbono (CO₂) quando se utiliza misturas de CVSG e CN7

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN7	-	-	378,00	252,00	-	-

Cálculo efetuado conforme item 3.12

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain; e CN7 = Finos de Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

Tabela 66. Valores monetários (US\$) referente a venda de CER's, quando se utiliza misturas de CVSG e CN7

	100 % - 0 %	80 % - 20 %	60 % - 40 %	40 % - 60 %	20 % - 80 %	0 % - 100 %
CVSG – CN7	-	-	7,84	5,23	-	-

Segundo o European Climate Exchange CER's = US\$ 20,751.

1 CER's equivale a 1 tonelada de CO₂.

CVSG = Carvão Vegetal Saint Gobain; e CN7 = Finos de Carvão Mineral Nacional Rio Deserto.

Comparando as misturas CVSG – CN7, aquela que melhor atende as condições técnicas e ambientais no alto forno, e a mistura 60 % - 40 %, pois emitirá menos carbono (CO₂) e permitirá maior arrecadação com a venda dos CER's. Considerando o índice de eficiência de queima dessa mistura, seu valor médio é estatisticamente superior ao da mistura 40 % - 60 %.

4.11 Aspectos Técnicos e Ambientais Relacionados às Misturas de Carvões

De todas as misturas de carvão vegetal com carvões minerais, importados e nacionais testadas, apenas algumas atenderam integralmente às especificações operacionais do alto forno. As misturas de carvões apresentaram eficiências de queima diferentes. Como a eficiência de queima é um fator importante para utilização da mistura no processo de redução em alto forno, aquela que apresentou maior índice será a melhor opção.

A Tabela 67 apresenta de forma resumida todas as misturas que atenderam as especificações com seus respectivos índices de eficiência de queima, os valores da redução das emissões de carbono (CO₂) e o valor monetário na venda dos CER's referente à mistura. Com relação aos índices de emissões de carbono e valores monetários na comercialização dos CER's, aquelas misturas que utilizarem maior massa de carvão vegetal em sua composição será a escolhida pela siderúrgica.

A Figura 77 representa a relação entre as eficiências de queima das misturas com os valores monetários dos CER's, no qual pode-se observar que a mistura 80 % CVSG – 20 % CN1 é a que melhor atende aos quesitos técnicos e ambientais.

Tabela 67. Misturas de carvões que atenderam as especificações do alto forno com suas respectivas eficiências de queima, valores de redução de CO₂ e valores unitários de CER.

Misturas de Carvões	Proporções	Eficiência de Queima	Redução de massa de CO ₂ na mistura kg	Valores da comercialização na venda de CER's/t _{ferro} US\$
CVSG - CMWC	40 % - 60 %	47,70 %	252,00	5,23
CVSG - CMWC	20 % - 80 %	41,73 %	126,00	2,61
CVSG - CMWC	0 % - 100 %	34,45 %	0	0
CVSG - CMKP	60 % - 40 %	50,50 %	378,00	7,84
CVSG - CN1	80 % - 20 %	74,52 %	504,00	10,46
CVSG - CN2	60 % - 40 %	50,81 %	378,00	7,84
CVSG - CN3	80 % - 20 %	66,12 %	504,00	10,46
CVSG - CN4	80 % - 20 %	60,10 %	504,00	10,46
CVSG - CN5	60 % - 40 %	57,61 %	378,00	7,84
CVSG - CN6	80 % - 20 %	50,65 %	504,00	10,46
CVSG - CN7	60 % - 40 %	67,97 %	378,00	7,84
CVSG - CN7	40 % - 60 %	53,13 %	252,00	5,23

CMWC= Carvão Mineral Importado S. Walker Creek Weak; **CMKP** = Carvão Mineral Importado Kaltim Prima; **CVSG** = Carvão Vegetal Saint Gobain; **CN1** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE4200; **CN2** = Carvão Mineral Nacional CRM-CE6700; **CN3** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE5200; **CN4** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6000; **CN5** = Carvão Mineral Nacional COPELMI-CE6500; **CN6** = Carvão Mineral Nacional Carbonífera Metropolitana-Antracito-CM20 e **CN7** = Carvão Mineral Nacional Rio Deserto

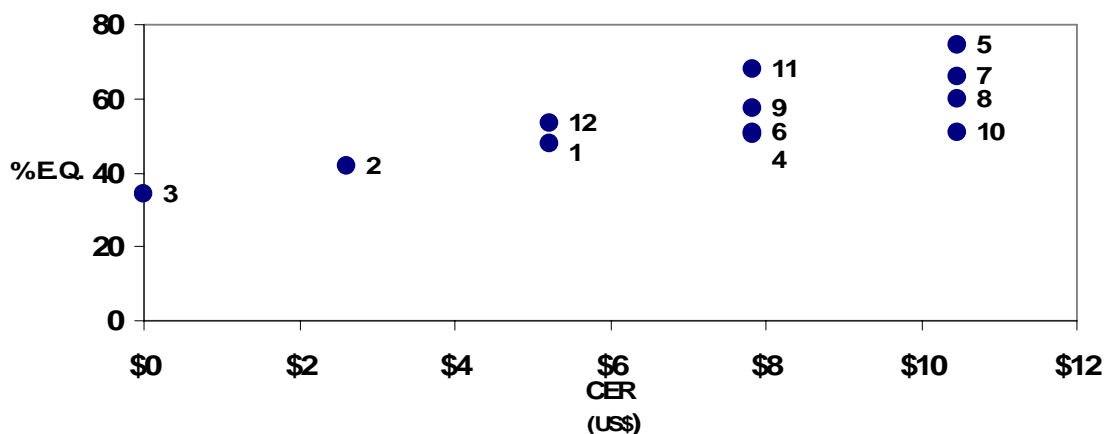


Figura 77. Relação entre as eficiências de queima das misturas com os valores monetários dos CER's.

1 = CVSG - CMWC (40 % - 60 %); **2** = CVSG - CMWC (20 % - 80 %); **3** = CVSG - CMWC (0 % - 100 %); **4** = CVSG - CMKP (60 % - 40 %); **5** = CVSG - CN1 (80 % - 20 %); **6** = CVSG - CN2 (60 % - 40 %); **7** = CVSG - CN3 (80 % - 20 %); **8** = CVSG - CN4 (80 % - 20 %); **9** = CVSG - CN5 (60 % - 40 %); **10** = CVSG - CN6 (80 % - 20 %); **11** = CVSG - CN7 (60 % - 40 %) e **12** = CVSG - CN7 (40 % - 60 %)

A preocupação com o meio ambiente vem alterando profundamente o gerenciamento das siderúrgicas brasileiras. As metas de produção e as formas de se produzir estão incorporando procedimentos para reduzir as emissões de carbono.

Para a siderurgia brasileira, a qualidade ambiental está fortemente associada à manutenção de uma boa imagem junto aos seus clientes, acionistas, funcionários, comunidade e governo. O processo de fabricação de ferro e aço abrange um número considerável de etapas

de produção, desde a atividade de preparação do minério até o acabamento do produto. Esta cadeia produtiva é de grande impacto ambiental, necessitando a todo o momento criar condições que venham a diminuir as agressões ao meio ambiente.

Os resultados alcançados pelo presente trabalho evidenciam a possibilidade de se aproveitar os finos de carvão vegetal gerados na Companhia Saint Gobain Canalizações. A Saint Gobain trabalha com dois altos fornos a carvão vegetal; sua produção de ferro gusa é de 700 t/dia. O consumo de carvão vegetal por tonelada de ferro gusa produzido é em média de 670 kg. A geração de finos de carvão vegetal dentro da siderúrgica é de 10 %. Calculando a geração de finos por dia teremos um montante de 46,9 t_{finos}/dia. A empresa destina esses finos ao aterro.

A Companhia Siderúrgica Nacional consome em seus altos fornos carvão mineral importado, que apresenta forte impacto ambiental, desde a sua extração até a queima no alto forno. A injeção de finos de carvão mineral no alto forno é uma prática já utilizada pela CSN desde 1997 (SILVA, 2006). O aproveitamento dos finos de carvão vegetal descartados pela Companhia Saint Gobain seria de grande valor técnico/ambiental para a CSN. Esse procedimento viria a amenizar os impactos negativos da produção de aço e gerar retorno financeiro através da venda de Certificados de Emissões Reduzidas (CER's).

4.11.1 Cálculo do valor de arrecadação com a venda de Certificado de Emissões Reduzidas na injeção da mistura 80 % CVSG – 20 % CN1 para um alto forno do porte do alto forno nº 2 da CSN

Procedendo-se uma estimativa da redução das emissões de carbono com a injeção da mistura 80 % CVSG – 20 % CN1, consideraremos um alto forno com uma produção diária de 4.200 t_{ferro}/dia. O alto forno consome 470 kg de carvão por tonelada de ferro gusa, numa proporção de 300 kg de coque (63,83 %) via topo do alto forno e 170 kg de carvão injetado (36,17 %) pelas ventaneiras.

A massa de carvão injetado por dia no alto forno é de 714 t/dia, isto é, a multiplicação da produção diária de ferro gusa pela massa de finos de carvão injetado pelas ventaneiras do alto forno por tonelada de ferro produzido (Expressão 1).

$$4200 \frac{t}{dia} \times 170 \frac{kg}{t} = 714000 \frac{kg}{dia} = 714 \frac{t}{dia} \quad (\text{Expressão 1})$$

Dimensionando-se a massa de finos de carvão injetado no alto forno por hora, divide-se a massa de finos de carvão injetado pelo número de horas em um dia (Expressão 2).

$$714 \frac{t}{dia} \div 24 = 29,75 \frac{t}{h} \quad (\text{Expressão 2})$$

A massa de finos de carvão vegetal (CVSG) disponível pela Cia Saint Gobain Canalizações por dia é de 46,9 t/dia. Dividindo-se esse valor por 24 horas, teremos a massa de finos de carvão vegetal disponível para injeção no alto forno (Expressão 3).

$$46,9 \frac{t}{h} \div 24 = 1,95 \frac{t}{h} \quad (\text{Expressão 3})$$

Se o alto forno injeta 29,75 t de finos de carvão por hora e a disponibilidade de finos de carvão vegetal para injeção é de 1,95 t/h, a porcentagem de finos de carvão vegetal na mistura a ser injeta é a divisão da massa disponível pela massa necessária para injeção (Expressão 4).

$$\frac{1,95}{29,75} \times 100 = 6,55\% \quad (\text{Expressão 4})$$

A mistura que melhor apresentou características técnicas-operacionais foi a mistura 80 % CVSG – 20 % CN1. Para determinar a porcentagem de carvão mineral (CN1) que comporá a mistura a ser injetada no alto forno, subtrai-se da porcentagem de carvão vegetal a fração de 20 %

$$\text{Mistura 80 \% CVSG – 20 \% CN1} \quad \left\{ \begin{array}{l} \% \text{ CVSG} = 6,55 \% \\ \% \text{ CN1} = \left(\frac{6,55\%}{0,8} \right) - 6,55\% = 1,63\% \end{array} \right.$$

Finalizando, teremos os seguintes valores para as porcentagens e as massas (Expressões 5, 6 e 7) dos carvões a serem injetados no alto forno pelas ventaneiras:

$$\text{CMI} = 91,82 \%$$

$$\text{CVSG} = 6,55 \%$$

$$\text{CN1} = 1,63 \%$$

$$\text{CMI} = 170 \frac{\text{kg}}{\text{t}} \times 91,82\% = 156,1 \frac{\text{kg}}{\text{t}} \quad (\text{Expressão 5})$$

$$\text{CVSG} = 170 \frac{\text{kg}}{\text{t}} \times 6,55\% = 11,12 \frac{\text{kg}}{\text{t}} \quad (\text{Expressão 6})$$

$$\text{CN1} = 170 \frac{\text{kg}}{\text{t}} \times 1,63\% = 2,78 \frac{\text{kg}}{\text{t}} \quad (\text{Expressão 7})$$

Para se determinar as emissões de carbono por massas de carvões injetados no alto forno por tonelada de ferro gusa produzido, multiplica-se cada fração percentual da mistura com o volume de dióxido de carbono emitido, para se produzir uma tonelada de ferro gusa, isto é, um volume de 630,00 kg CO₂, conforme item 3.12.

$$\text{CMI} = 578,47 \text{ kg CO}_2/\text{t}_{\text{ferro}} \quad \text{CVSG} = - 41,26 \text{ kg CO}_2/\text{t}_{\text{ferro}} \quad \text{CN1} = 10,27 \text{ kg CO}_2/\text{t}_{\text{ferro}}$$

$$CMI = 630,00 \times 0,9182 = 578,47 \frac{kgCO_2}{t_{ferro}}$$

$$CVSG = 630,00 \times 0,0655 = -41,26 \frac{kgCO_2}{t_{ferro}}$$

$$CN1 = 630,00 \times 0,0163 = 10,27 \frac{kgCO_2}{t_{ferro}}$$

Obs: A massa de dióxido de carbono referente ao CVSG é negativa, pois esta, na verdade, não representa uma emissão e sim uma absorção desse carbono pela floresta.

Na injeção da mistura 80 % CVSG- 20 % CN1 serão reduzidas as emissões de carbono da ordem de 41,26 kg por tonelada de ferro gusa produzido. Revertendo essa redução nas emissões em CER's, serão arrecadados US\$ 3.612,00 por dia. (1 CER's = US\$ 20,75)

$$41,26kg \times \frac{1}{1000} t \times 20,75 = 0,86 \frac{US\$}{t_{ferro}}$$

$$4200 \frac{t}{dia} \times 0,86 = 3.612,00 \frac{US\$}{dia}$$

4.11.2 Estimativa dos preços dos carvões minerais importados, nacionais e carvão vegetal para injeção no alto forno

O principal insumo energético utilizado pela siderurgia integrada é o carvão mineral nas diferentes formas (coqueificável, finos de carvão e antracito). Para a siderurgia brasileira, praticamente 100% do carvão mineral é importado de diferentes países. Desta forma, pensando-se em uma estratégia energética para a siderurgia a coque, há de se priorizar a melhoria da eficiência no uso do carvão.

Com relação aos preços do carvão mineral importado, existe uma grande oferta no mercado. As cotações internacionais do carvão não apresentam um comportamento semelhante a outros minerais comercializados em bolsas de mercado futuro (commodities). A comercialização do carvão ocorre de forma pulverizada, em que os contatos são acertados caso a caso, entre siderúrgica e mineradora. A Figura 78 apresenta a variação dos preços do carvão mineral em dólares, segundo o site <http://www.indexmundi.com/commodities>.

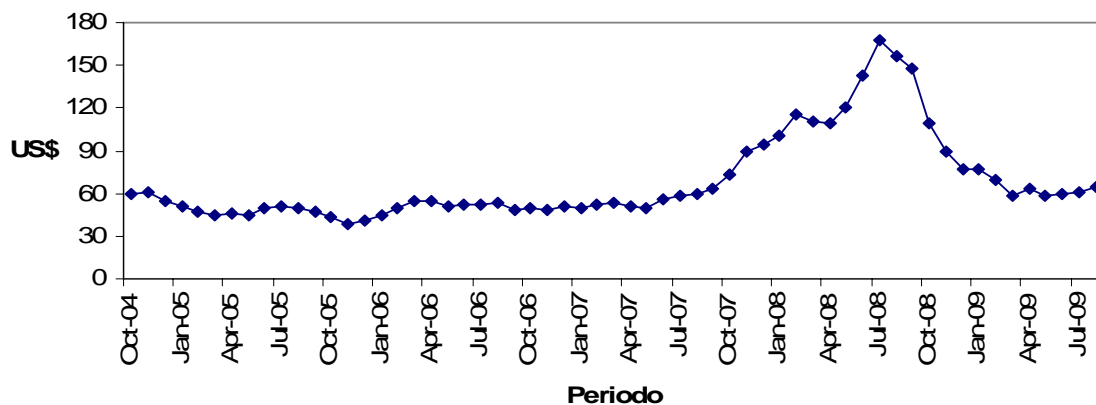


Figura 78. Variação dos preços da tonelada de carvão mineral no período de outubro de 2004 até agosto de 2009. <http://www.indexmundi.com/commodities>.

Diante da atual realidade econômica mundial, o mercado siderúrgico encontra-se com preços e demandas em níveis baixos. Atualmente, segundo informações de mercado, as empresas siderúrgicas estão comprando o carvão mineral a um preço que varia entre US\$ 60,00 a US\$ 157,00 por tonelada. Considerando um valor monetário mediano para a tonelada do carvão mineral importado, teremos US\$ 108,50.

O carvão mineral brasileiro pode ser classificado em carvão energético e carvão metalúrgico, e o seu preço de venda por tonelada depende de suas propriedades físicas e químicas. A Tabela 68 apresenta os valores em dólares por tonelada de carvão.

Tabela 68. Preço da tonelada de carvão mineral brasileiro em diferentes estados. Empresa de Pesquisa Energética (2007).

Estado	Mina	Preço (US\$/t)
Rio Grande do Sul	Candiota	16,25
Rio Grande do Sul	Recreio	27,48
Rio Grande do Sul	Leão I	40,02
Santa Catarina	STESESC	55,47
Paraná	Cambuí	83,40

Para as siderúrgicas brasileiras, o carvão vegetal apresenta excelentes condições técnicas e ambientais. Ao se comparar os custos do carvão mineral importado com o carvão vegetal, observa-se que o carvão vegetal apresenta ótima competitividade, pois, o seu preço final é inferior, quando se leva em consideração os ganhos na pureza e no aspecto ambiental. Para se produzir uma tonelada de ferro gusa são necessários cerca de 3 m³ de carvão vegetal, isto é, aproximadamente 690 kg. Segundo o Anuário Estatístico da AMS (2007) o preço do metro cúbico do carvão, em média foi de US\$ 43,65, isto é aproximadamente US\$ 189,78 por tonelada. Porém, o carvão vegetal injetado pelas ventaneiras é material que apresenta granulometria abaixo da especificada, material esse que foi gerado durante o seu manuseio e transporte. Como esses finos são considerados rejeitos pelas siderúrgicas que não apresentam sistemas de injeção de carvão no alto forno, seu preço comercial é inferior ao do carvão granulado. Segundo ASSIS (2006), o preço da moinha de carvão vegetal representa 60 % do custo do carvão injetado. ASSIS (2008) descreve os custos da injeção de carvão vegetal no alto forno da ACESITA, no qual o preço da moinha de carvão vegetal é de US\$ 24,00 por tonelada de carvão pulverizado. Esse valor representa 58,5 % do valor do carvão injetado.

Para produção de uma tonelada de ferro gusa são injetados via ventaneiras 170 kg de finos de carvão mineral. Com valores monetários da tonelada dos carvões minerais importados e nacionais (EPE, 2007) e o carvão vegetal (AMS, 2007), o custo da mistura de 91,82 % CMI, 6,55 % CVSG e 1,63 % CN1, será de US\$ 17,24 por tonelada de ferro gusa produzido. As relações abaixo representam o preço da tonelada da mistura injetada por tonelada de ferro gusa.

- Carvão mineral importado tem preço médio por tonelada de US\$ 108,50 e ao ser injetado numa proporção de 91,82 %, seu custo em dólares por tonelada de ferro produzido é US\$ 16,93, podendo ser descrito pela Equação 11.

$$P_{CMIinj} = Pe_{CI} \times \frac{\%CMI}{100} \times \frac{P_{CMI}}{1000} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

P_{CMInj} = Preço do carvão injetado (US\$/t_{ferro});

Pe_{CI} = Peso do carvão injetado (kg/t_{ferro});

% CMI = Porcentagem de carvão mineral importado na mistura a ser injetada;

P_{CMI} = Preço do carvão mineral importado (US\$/t)

- Carvão mineral nacional tem preço por tonelada de US\$ 16,25 e é injetado numa proporção de 1,63 %. Assim, seu custo em dólares por tonelada de ferro produzido é de US\$ 0,045, podendo ser descrito pela Equação 12.

$$P_{CMInj} = Pe_{CI} \times \frac{\%CN1_{Inj}}{100} \times \frac{P_{CN1}}{1000} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

P_{CMInj} = Preço do carvão injetado (US\$/t_{ferro});

Pe_{CI} = Peso do carvão injetado (kg/t_{ferro});

% CN1_{Inj} = Porcentagem de carvão mineral nacional CN1 na mistura a ser injetada;

P_{CN1} = Preço do carvão mineral nacional CN1 (US\$/t)

- A moinha de carvão vegetal tem preço por tonelada de US\$ 24,00 e ao ser injetada numa proporção de 6,55 %, seu custo em dólares por tonelada de ferro produzido é de US\$ 0,267, podendo ser descrito pela Equação 13.

$$P_{CMInj} = Pe_{CI} \times \frac{\%CVSG_{Inj}}{100} \times \frac{P_{CVSG}}{1000} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

P_{CMInj} = Preço do carvão injetado (US\$/t_{ferro});

Pe_{CI} = Peso do carvão injetado (kg/t_{ferro});

% CVSG_{Inj} = Porcentagem de carvão vegetal Saint Gobain na mistura a ser injetada;

P_{CVSG} = Preço do carvão vegetal Saint Gobain (US\$/t)

Quando se injeta pelas ventaneiras do alto forno apenas carvão mineral importado, as emissões de carbono são de 630,00 kg CO₂ por tonelada de ferro gusa produzido (ver item 3.12). O custo na obtenção de uma tonelada do carvão mineral importado é de US\$ 108,50. O custo da injeção de 100 % de carvão mineral importado por tonelada de ferro produzido é de US\$ 18,44, podendo ser descrito pela Equação 14.

$$P_{CMInj} = Pe_{CI} \times \frac{P_{CMI}}{1000} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

P_{CMInj} = Preço do carvão injetado (US\$/t_{ferro});

Pe_{CI} = Peso do carvão injetado (kg/t_{ferro});

P_{CMI} = Preço do carvão mineral importado (US\$/t)

Baseando-se nos custos estimados de injeção nas duas situações, 100 % de carvão mineral importado de US\$ 18,44 e da mistura CMI + (80 % CVSG – 20 % CN1) de US\$ 17,24, deduz-se que há um ganho econômico de US\$ 1,20 por tonelada de ferro produzido quando se injeta a mistura CMI + (80 % CVSG – 20 % CN1). Outro fator positivo na injeção da mistura CMI + (80 % CVSG – 20 % CN1) é com relação à redução das emissões de carbono, havendo uma redução de 41,26 kg CO₂/t_{ferro}; essa redução nas emissões de carbono quando convertidas em CER's representa US\$ 0,86 por tonelada de ferro produzido (ver página 166).

A Figura 79 representa de forma comparativa os valores monetários, em dólares, dos custos do carvão na injeção da mistura CMI + (80 % CVSG – 20 % CN1) e do carvão mineral importado no alto forno, para produção de uma tonelada de ferro gusa. Mostra também os ganhos com a comercialização do CER's quando se injeta a mistura CMI + (80 % CVSG – 20 % CN1).

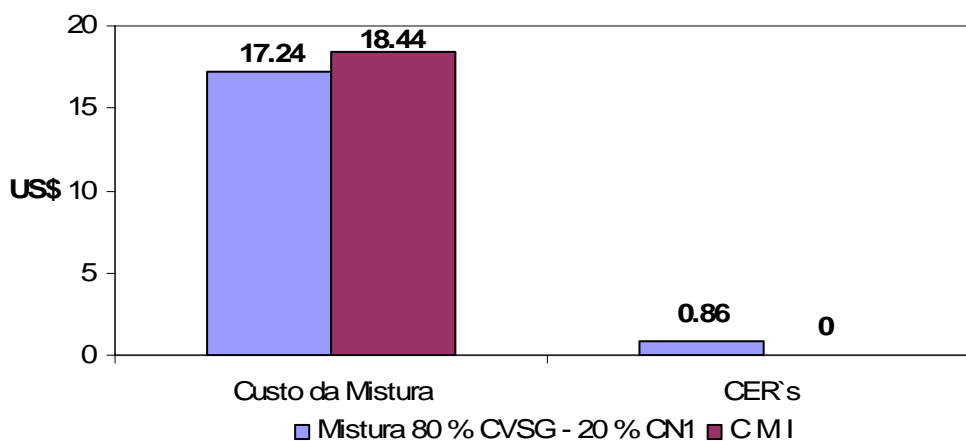


Figura 79. Comparação entre os custos de injeção por tonelada de ferro gusa produzido e os valores monetários na venda de CER's.

Quando se considera os ganhos econômicos mais os ganhos na comercialização dos CER's da mistura CMI + (80 % CVSG – 20 % CN1) chega-se a um valor total de US\$ 2,06 por tonelada de ferro produzido. Esse valor permitirá à siderúrgica obter, além dos ganhos ambientais através do marketing “verde”, ganhos na ordem de US\$ 8.652,00, isto é a produção diária de ferro gusa multiplicado pelo valor monetário comercializado em CER's (Expressão 8).

$$4.200 \frac{t_{ferro}}{dia} \times 2,06 \frac{US\$}{t_{ferro}} = US\$8.652,00 \frac{US\$}{dia} \quad \text{Expressão 8}$$

Os resultados econômicos encontrados reforçam a idéia que a luta contra o aquecimento global se transformou num negócio extremamente lucrativo, que no Brasil, atualmente, já movimenta mais de um bilhão de reais (LOUREIRO, 2008). O valor de US\$ 2,06 por tonelada de ferro produzido é um incentivo à Companhia Siderúrgica Nacional para buscar condições de se adequar ao processo de certificação junto a comissões sobre mudanças climáticas do Ministério de Ciência e Tecnologia e a Organização das Nações Unidas.

Atualmente, existem 1717 projetos aprovados pelo Comitê Executivo de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo, órgão ligado à Comissão de Mudanças Climáticas da ONU. O Brasil é o terceiro colocado no ranking mundial de neutralização das emissões de GEE, com 9

% dos projetos de MDL. Um desses projetos, desenvolvido pela Companhia Siderúrgica de Tubarão, empresa do Grupo Arcelor Mittal, localizada em Vitória- ES, consiste no aproveitamento dos gases dos altos fornos para geração de energia elétrica, gerando um montante de 50 mil créditos de carbono por ano (LOUREIRO, 2008).

Outro ponto importante a se avaliar, refere-se à retomada do crescimento econômico mundial. Essa retomada provocará aumento na produção de aço e conseqüentemente o aumento dos preços internacionais do carvão mineral. Diante dessa situação, a diminuição dos custos de produção de ferro na siderúrgica representa um fator competitivo de mercado.

O marketing ambiental é outro segmento que a Companhia Siderúrgica Nacional poderá se beneficiar com os resultados encontrados, pois o mercado consumidor verá com bons olhos o aproveitamento energético dos finos de carvão vegetal e carvão mineral nacional pela siderúrgica. Não menos importante é o segmento carvoeiro da Região Sul do Brasil; com os resultados encontrados as mineradoras poderão disponibilizar finos de carvão mineral gerados na sua produção para serem comercializados. Essa retomada do consumo de carvão mineral nacional pelas siderúrgicas gerará crescimento social e econômico na região. Todos os segmentos (empresariais, ambientais, sociais e econômicos) serão beneficiados com o aproveitamento dos finos de carvão vegetal e mineral, gerando expectativas positivas, tanto para a Companhia Siderúrgica Nacional quanto para todas as demais empresas envolvidas.

5. CONCLUSÕES

1. Todos os carvões apresentam porcentagem de finos superior a 75 %;
2. Todos os carvões apresentam índices de moabilidade dentro da faixa especificada pelo alto forno;
3. O carvão vegetal apresenta índice de porosidade superior ao dos carvões minerais;
4. Todos os carvões apresentam teores de matérias voláteis dentro dos parâmetros operacionais do alto forno;
5. Os carvões minerais nacionais apresentam teores de cinza superiores aos limites operacionais do alto forno;
6. O teor de enxofre do CVSG é inferior ao limite máximo permitido pelo alto forno;
7. Há uma grande variação na porcentagem de enxofre nos carvões minerais nacionais;
8. Existe uma correlação positiva entre os índices de carbono fixo e o poder calorífico superior dos carvões;
9. O CVSG apresenta elevado índice de álcalis quando comparado aos carvões minerais, fator que influencia na formação de cascões no interior do alto forno;
10. O índice de basicidade do CVSG apresenta valor superior ao limite máximo permitido pelo alto forno;
11. As misturas de carvões vegetal e mineral, importado e nacional, apresentam índices de eficiência de queima que decrescem à medida que se diminui a porcentagem de carvão vegetal na mistura;
12. A mistura que melhor atende aos quesitos técnicos ambientais foi a mistura 80 % CVSG – 20 % CN1;
13. A mistura 80 % CVSG – 20 % CN1 permite uma redução nas emissões de carbono de 504,00 kg de CO₂ / t_{ferro}, e
14. A utilização da mistura 80 % CVSG – 20 % CN1 permite ganhos de US\$ 2,06 por tonelada de ferro produzido

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao término da avaliação dos resultados obtidos no presente trabalho é possível fazer sugestões visando à continuidade do estudo, sendo que ainda existem pontos de interesse para uma melhor compreensão da utilização de misturas de carvão vegetal e carvão mineral nacional, quando injetados no alto forno. Para se avançar no conhecimento do tema abordado, sugere-se:

- Realizar testes de eficiência de queima de misturas ternárias de CMI e mistura CVSG/CN1 na proporção ideal.
- Realizar testes com a mistura no alto forno, em condições reais de operação, visando avaliar desempenho do equipamento e a produtividade nestas condições.
- Realizar estudos econômicos com relação ao carvão mineral nacional, visando redução nos custos de logística e tempo de estoque na siderúrgica.
- Realizar estudos econômicos com relação ao carvão vegetal, visando condições de aquisição dos finos.
- Realizar estudos econômicos com relação às certificações ambientais necessárias para a comercialização dos Certificados de Emissões Reduzidas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 8629: Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 8293: Determinação de umidade**. Rio de Janeiro, 1983. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 8739: Determinação do índice de moabilidade (Hardgrove)**. Rio de Janeiro, 1985. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 9165: Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade**. Rio de Janeiro, 1982. 15p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 8290: Determinação do teor de carbono fixo**. Rio de Janeiro, 1987. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 8633: Determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro, 1985. 9p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil, Brasília, 2007. Disponível em: [www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/08-Carvao(2).pdf). Acesso em: 15/04/2008.

AMS – Associação Brasileira dos Recursos Naturais Renováveis. Anuários Estatísticos disponibilizados na internet. Disponível em: www.abracave.com.br/index_anuario.html. Acesso em: 04/08/2007.

ANDRADE, A. M. **Efeitos da fertilização mineral e da calagem na produção e na qualidade da Madeira e do carvão de eucalipto**. 1993, 105p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, M.G., 1993.

ANDRIONI, R. R. SILVEIRA, M. L.; BRZUSZEK, R. K.; VELLOSO, C. M.; SAMPAIO, R. S. A influencia das relações O/H e H/C dos termorreductores utilizadas nos altos fornos operados com proporções significativas de voláteis. In: XXXII SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS, Vila Velha – ES, **Anais...**, p.295-304, 2002.

ARAÚJO, L. A. **Manual de Siderurgia** São Paulo, SP. Editora Arte e Ciência. p.5 –14, 1997.

ASSIS, P. S. **Injeção de materiais pulverizados em altos-fornos**. Curso de Pós-graduação em Metalurgia e Materiais, p.4-15, UFF, Volta Redonda – RJ, 1998.

ASSIS, P. S. **Injeção de Materiais Pulverizados em Altos Fornos**, curso ABM – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2004.

ASSIS, P. S. **Avaliação de Carvões e Minérios de Ferro Para os Novos Processos de Produção de Ferro Primário**. In: Novos processos de produção de ferro primário, Ouro Preto. p.115-149, 2006.

ASSIS, C. F. C. **Caracterização de carvão vegetal para a sua injeção em altos-fornos a carvão vegetal de pequeno porte**. 2008. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, 2008.

BENNETT, P. Using a Blast Furnace Model for the Selection of PCI Coals. In: SECOND INTERNATIONAL MEETING ON IRON MAKING AND FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IRON ORE, Vitória, E.S, 2004, **Proceedings...**, 2004.

BERMANN, C. **Energia no Brasil: para quê? para quem?: crise e alternativas para um país sustentável**. São Paulo: Livraria da Física, 2002.

BLANKENHORN, P.R.; BARNES, D.P.; KLINE, D.E.; MURPHEY, W.K. Porosity and pore size distribution of black cherry carbonizes in inert atmosphere. **Wood Science**,v.1, p.25-39, 1978.

BM&F. Bolsa de mercadorias e futuros. Disponível em: <http://www.bmf.com.br/carbono>. Acesso em: 24/05/2007.

BOAS, E. A. **A indústria siderúrgica na America Latino**. São Paulo, S.P. Editora IPSIS. p.31-43, 1966.

BP Statistical Review of World Energy, jun. 2005.

BP Statistical Review of World Energy, jun. 2008.

BRAGA, R. N. B. **Aspectos tecnológicos referentes a injeção de materiais pulverizados em altos-fornos**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Divisão de Redução de Matérias-Primas Siderúrgicas. Belo Horizonte, MG, p.17-43, 1999.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Estimativa da quantidade de carbono fixado pelas florestas plantadas. Disponível em: www.mct.gov.br/clima. Acesso em: 28/05/2007.

BRITO, J. O. **Princípios de Produção e Utilização de Carvão Vegetal de Madeira**. Documentos Florestais do Departamento de Ciências Florestais da Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Maio de 1990, Piracicaba-SP. p. 1-19.

BRITO, J. O. **Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico**. IPEF, Instituto de Estudos e Pesquisa Florestais, Circulação Técnica nº 181, outubro de 1993. 6p.

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**. IPEF – Instituto de Estudos e Pesquisas Florestais. Circular Técnica nº 14, Piracicaba, S.P. p.9-20, 1980a.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: II - Densidade da madeira X**

densidade do carvão vegetal. IPEF- Instituto de Estudos e Pesquisas Florestais. Circular Técnica nº 15, Piracicaba, SP, p.121-126, 1980b.

BROWING, B. L. The composition and chemical reactions off wood. In: BROWING,B.L. **The chemistry of wood.** Winsconsin, Academic Press, p.57-102, 1974.

BROWNE, F. L. **Theories of the combustion of wood and its control.** Madison, A Survey of the Literature, FPL - Forest Products Laboratory, 1958. 68p.

BUONGIORNO, J.; GILLESS, J. I. **Forest management and economics: a primer in quantitative methods.** Macmillan Publishing Company. New York. 285p. 1984.

CALDEIRA, J.G. **Injeção de carvão em altos fornos com alta produtividade.** Santos, São Paulo – Curso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2006.

CAMPOS, V. F.; SILVEIRA, R. C. Utilização de finos de carvão vegetal. São Paulo, SP, ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, **Revista Metalúrgica**, v.33, p.497-501, 1977.

CARNEIRO, R. T. S., GIUDICE, F. D. P., CASTRO, J. B. Metodologia de Seleção de Carvões para Injeção em Altos-fornos. In: II CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS, São Paulo, 1997, **Anais...**, ABM, p.15, 1997.

CARNEIRO, R. T. S. **O papel do coque no alto-forno.** Programa de educação continuada. São Paulo: ABM, jun., 2003. p.1-9.

CARVALHO, C. H. B. Oportunidades de Negócios no Setor Elétrico com Uso do Carvão Mineral Nacional. In. SEMINÁRIO DE BALANÇO ENERGÉTICO GLOBAL E UTILIDADES, São Paulo, 2005, **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, v. 26, p.25-37, 2005.

CASTRO L. F. A., TAVARES R. P. Operação de Altos Fornos com Altas Taxas de Injeção de Carvão Pulverizado. In. SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO DA ABM, Belo Horizonte, 1998, **Anais...** Associação Brasileira de Metalúrgica e Materiais, v. 29, p.787-803, 1998.

CASTRO, L. F. A., TAVARES, R. P. Efeitos da Injeção de Carvão Pulverizado nas Condições Operacionais do alto-forno. In: CONGRESSO TECNOLOGIA METALÚRGICA E MATERIAIS, Belo Horizonte, 2006, **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, v. 53, p.204-216, 2006.

CAVALIERO, C. K. N.; JANNUZZI, G. M. A importância do segmento siderúrgico nas emissões de CO₂ nacional e do estado de São Paulo. In. SEMINÁRIO DE BALANÇO ENERGÉTICO GLOBAL E UTILIDADES, São Paulo, 1998, **Anais...** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p.53-67, 1998.

CHAER, M. Protocolo de Quito quer converter carbono em dólares. Disponível em: <http://www.romeroconsultores.com.br/artigo13.htm>. Acesso em: 21/05/2007.

CORREA, S. Z. The rank evaluation of South Brazilians Gondwana coal on the basis of different chemical and physical parameters. **International Journal of Coal Geology**, n.13, p.214-239, 1989.

COSTA, A. **Volta Redonda – Ontem e hoje**. 1.ed. Volta Redonda, RJ. Editora Lux Ltda. p. 42 – 59, 1978.

DEFENDI, G. A. **Caracterização da Cinética de Reação e Comportamento das Cinzas dos Carvões Minerai Injetados através das Ventaneiras dos Altos-Fornos da CST**. Belo Horizonte, MG. UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. 78p. Dissertação (Mestrado).

DE LUCA, F. J. **Modelo cluster eco-industrial de desenvolvimento regional: o pólo da mineração do carvão de Santa Catarina**. 2001, 147p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2001.

DNPM - Departamento Nacional de Pesquisa Mineral – **Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico/MME**

Disponível em:

<http://www.dnpm.gov.br/assets/galeriaDocumento/SumarioMineral2008/carvaomineral.pdf>.

Acesso em: 03/02/2007.

ELDER, T. J. J. **The characterization and potencial utilization of the fenolic compounds found in pyrolytic oil**. 1979, 91p. Tese (Doutorado). A & M University, Austin, Texas, 1979.

EKONO, O. Y. **Power and heat plants study prepared for the FAO portifolio of small-scale forest industries for developing contries**. Helsinki, Finland, 1980

EPE - Empresa de Pesquisas Energética. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 02/06/2009.

EXC - European Climate Exchange. Relatório Mensal de Julho de 2009. Disponível em: <http://www.ecx.eu>. Acesso em: 10/08/2009.

FERREIRA, O. C. Emissão de Gases de Efeito Estufa na produção e no uso do carvão vegetal na Siderurgia. **Revista Economia & Energia**, n. 20, p.19, 2000.

FERREIRA, O.C. Futuro do carvão vegetal na siderurgia. Disponível em: <http://www.ecen.com/eee20/emiscar2.htm>. Acesso em: 4/08/2007.

FONSECA, A. O. L; SANTOS, S. V. A, GAZANI, F. H. R. Mudanças Climáticas, Efeito Estufa: Implementação do MDL no Brasil. **Revista Economia & Energia**, n. 22, p.25, 2001.

FREITAS, P. C. O papel do aço brasileiro nos projetos de créditos de carbono. **Renabio – Biomassa & Energia**, v.2, n^o 2, p. 49, 2005.

GHIGGI, M. L. F., OSÓRIO, E., VILELA, A. C. F. Estudo de Reatividade de Misturas de Carvão do Faxinal e Coque de Petróleo para uso em PCI. In: SEMINÁRIO DE REDUÇÃO

DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, 2006, Ouro Preto – MG, **Anais...**, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p.213-222, 2006.

GOLDEMBERG, J. The Case for Energy Renewables. In: INTERNACIONAL CONFERENCE FOR RENEWABLE ENERGIES, 2004, Bonn – Alemanha, **Proceedings...**p.54-68, 2004.

GOLDSTEIN, I. S. Degradation and protection of wood from thermal attack. In: NICHOLAS, D.D. **Wood deterioration and its prevention by preservative treatment**. Syracuse, N.Y. - Syracuse University, 1973, 380p.

GOMES, M. L. I.; OSÓRIO, E.; VILELA, A. C. F. Estudos Preliminares da Viabilidade Técnica da Utilização de Carvões Gaúchos para PCI. In: XXXII SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS PRIMAS, 2002, Vila Velha - ES, **Anais...** p.209-217, 2002.

GOMES, A. P.; CRUZ, P. R.; BORGES, L. P. Recursos Minerais Energéticos: Carvão e Urânio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2008, Curitiba – PR. **Anais...** p.34-42, 2008a.

GOMES, A. P.; FERREIRA, J.A.F.; ALBUQUERQUE, L.F.; SÜFFERT, T. Carvão Fóssil. Estudos Avançados. Porto Alegre, p.89-106. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ea/v12n33/v12n33a06.pdf>. Acesso em: 21/11/2008b.

GRANDIN, H. C. G. Política de reflorestamento determina o futuro do carvão vegetal na siderurgia brasileira. São Paulo, SP, ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, **Revista Metalurgia & Materiais**, v.49, n.416-20, Abril, 1993.

GUTMAN, J. **Emissões de gases de efeito estufa no setor siderúrgico no período 1980-1995 e cenários futuros**. 1998. 148f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1998.

LEÃO, R. M. **A floresta e o homem**. IPEF. Ed. Edusp, Piracicaba, 2000. 434p.

LeVAN , S.L. & WINANDY, J.E. Effects of fire retardants treatment on wood strent: a review. **Wood Science and Techonology**, (22):1, p.113-131, 1990.

LOUREIRO, U. Efeito estufa gera R\$ 1bilhão. Caderno de Economia **Jornal do Brasil**, Rio de Janeiro, p.A16, 24 ago 2009.

HALL, D. O.; RAO, K. K. **Fotossíntese**. Editora Pedagógica e Universitária, São Paulo, 1980. 89p.

HUR, N. S. 7ª Years experiences of coal injetion practice at Kwangyang works. In: CONGRESSO ANUAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 1993, **Anais...**, n.40, p.26-42, Jul, 1993.

HUTNY, W. P.; GIROUX, L.; MACPHEE, J. A.; PRICE, J. T., Evaluation and selection of coals for blast furnace injection, CANMET Energy Technology Centre/Natural Resources, Canadá, Junho, 2003. Disponível em: < <http://www.nrcan-rncan.gc.ca/com/index-eng.php>>. Acesso em: 10/05/2008.

IBS - Instituto Brasileiro de Siderurgia. Disponível em: www.ibs.org.br/siderurgia_usos_producao.asp. Acesso em: 26/08/2007.

IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia – Mercado Brasileiro de Aço: Análise Setorial e Regional. Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro de Siderurgia, Maio, 2007. Disponível em: < http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/Folder_Institucional_AcoBrasil.pdf> Acesso em: 03/07/2008.

ISHII, K., **Advanced pulverized coal injection technology blast furnace operation**, Editora Elsevier Science, USA, 2001, 225p.

JAMALUDDIN, A. S.; WALL, T. F.; TRUELOVE, J. S. Mathematical modelling of combustion in blast furnace raceway including injection of pulverized coal, iron making and steel making. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, v.30, p. 91-99, 1996.

JONSOHN, K. Injeção de materiais pulverizados em altos fornos. Belo Horizonte, MG, Associação Brasileira de Metalurgia e Matérias, **Revista Metalurgia & Materiais**, v.83, n.185-205, Agosto, 1999.

JUNK, K. W.; BROWN, R. C., A Model of coal combustion dynamics in a fluidized bed combustor, **Combustion and Flame**, v.113, Issue 09, p.219-228, 1993.

KOLLMAN, F. F. P.; COTÊ, J. W. A. **Principles of wood science and technology, I. Solid wood**. Editora Springer – Verlag, Berlim, 1988. 592p.

KYOTO PROTOCOL. Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>> Acesso em: 12/07/2007.

LAMONICA, H. Geração de energia elétrica a partir da biomassa de cana. In: SEMINÁRIO DE BIOELETRICIDADE - A Segunda Revolução Energética da Cana-de-Açúcar, 2005, Rio de Janeiro – RJ, **Anais...**, 2005.

LAU, C. W.; NIKSA, S. The Combustion of Individual Particles of Various Coal Types. **Combustion and Flame**, v.90, p.45-70, 1992.

LeVAN, S. L.; WINANDY, J. E. Effects of fire retardants treatment on wood stent: a review. **Wood Science and Technology**, v.22, p.113-131, 1990.

LEGGETT, J. K. **Aquecimento global : o relatório do Greenpeace**. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 2002, 185p.

LIMA, W. P. **O reflorestamento com eucalipto e seus impactos ambientais**, Ed. Art Press, São Paulo, 1987, 114p.

LIMA, W. P. **O eucalipto seca o solo?** Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – v. 20, n° 1, janeiro/abril, p. 13-17,2004.

LINGIARDI, O. **Introducción al processo del alto forno** Ed. Verlag Stahleisen, Buenos Aires, 2004, 135p.

MACEDO, I. E CORTEZ, L. A. B Processamento Industrial da Cana-de-açúcar no Brasil. In ROSILLO-CALE, BAJAY E ROTHMAN - **Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira**. Campinas, São Paulo. Editora da UNICAMP, 2005.

MACHADO J. G. **Estudo do Comportamento de Misturas de Carvão Mineral, Biomassa e Gás Natural na Zona de Combustão do Alto Forno**. 2006. 53f. Qualificação (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

MAGALHAES, J. G. R. **A energia que vem da floresta**. In: Biomassa: Energia dos Trópicos em Minas Gerais, Editora UFMG, Belo Horizonte, M.G. – 1ª Edição, p.133-144, 2001.

MARRECO, J. M.; PEREIRA J. R, Perspectivas para Geração Termelétrica a Carvão. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, Brasília, 2006, **Anais...**, 2006.

MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: PENEDO, W.R. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, M.G. CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.9-26, 1982.

MATARELLI, F. A.; LOPES, L. E. F.; CASTRO, L. F. A. **Siderurgia a carvão vegetal**. Editora UFMG, Belo Horizonte, M.G. – 1ª Edição, p.145-162, 2001.

MCT – Ministério de Ciências e Tecnologia. (1998) **Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima: Centexto**. 15/01/1998. Acessado em 16/03/2009 <http://www.mct.gov.br/gabin/cpmg/climate/programa/programa/port/leaflet.htm>

MELLO, M. G. **Biomassa – Energia dos Trópicos em Minas Gerais**. Editora UFMG, Belo Horizonte, M.G. – 1ª Edição, p17-23, 2001

MINAS AMBIENTE. **Pesquisa Tecnológica para Controle Ambiental em Unidades Independentes de Produção de Ferro Gusa**. Diagnóstico. Belo Horizonte: CETEC, FEAM, UFMG, 1998, 104p.

MOLINA, M.; MOLINA, L.T. Megacities and Atmospheric Pollution. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v.54, p. 644-680, 2004.

MORA, A. L.; GARCIA, C. H. **A cultura do eucalipto no Brasil**. Sociedade Brasileira de Silvicultura, São Paulo, 2000, 112p.

MOUTINHO, P.; BUENO, M. Inventário brasileiro de emissões e o desmatamento na Amazônia. **Clima em Revista**, v.2, n.3, p.17, 2002.

NUNES, W. H. **Utilização do estirpe de *Euterpe edulis Matius* para a produção de carvão, de celulose e de chapa de partículas.** 1998. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 1998.

OBST, J. R. Analytical pyrolysis of hardwood and softwood lignin and its use in lignin-type determination of hardwood vessel elements. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v.4, p.377-397, 1990.

OLIVEIRA, E. **Correlação entre parâmetros de qualidade madeira e do carvão de *Eucalyptus grandis*.** 1988. 147p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1988.

OLIVEIRA, J. B. **Propriedades e controle de qualidade do carvão vegetal.** Belo Horizonte, M.G., CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.77-89, 1982.

OLIVEIRA, J. C.; GUSHIKEN, J. L. **Injeção de materiais pulverizados em altos fornos.** Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Divisão de Redução de Matérias-Primas Siderúrgicas, Belo Horizonte, MG, p.207-240, 1999.

OSÓRIO, E. Carvão da Mina do Leão: Influencia do grau de beneficiamento sobre a pirólise e a reatividade com vista ao seu emprego na redução direta do minério de ferro. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE CARVÃO, Porto Alegre, 1989, **Anais...**, p.595-619, 1989.

PHILLIP, R. G., BENNET, A , **Advantages of Low Volatile Coals for PCI**, Report – Department of Mines and Energy – Q Therm Project, Brisbane QLD, 1997.

PINHO, M.; SILVEIRA, J. M. **Os efeitos da privatização brasileira sobre a estrutura industrial da siderurgia brasileira.** Campinas: IE-UNICAMP, n° 10, junho, p.81-100, 1998.

PORTO, F. M.; BRAGA, R. N. B. Injeção de finos de carvão vegetal em altos fornos. In: SIMPÓSIO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, 1993, Cubatão – SP, **Anais...**p.54-9, 1993.

POUNDS, N. J. G. **Geografia do ferro e do aço.** Rio de Janeiro, RJ, Editora Zahar, p. 7-12, 1966.

REIS, H. M. B. Mapeamento de coque de alto forno. In: SEMINÁRIO DE REDUCAO DE MINÉRIO DE FERRO DA ABM, 30ª SEMINÁRIO DE CONTROLE QUÍMICO EM METALURGIA. Belo Horizonte – MG, 1999, **Anais...** p.93-110, 1999.

REZENDE, D.; MERLIN, S.; SANTOS, M. **Seqüestro de carbono – Uma experiência concreta.** 2ª Ed. Palmas: Instituto Ecológica, 2001, 178p.

RIBAS, M. A; OSÓRIO, E. C. Comportamento dos carvões injetados no alto forno. São Paulo, SP, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, **Revista Metalurgia e Materiais**, v.55, p.513-516, Out./1999.

ROCHA, M. T. **Mudanças climáticas e Mercado de Carbono**. Fixação carbono: atualidade projetos e pesquisas. Curitiba: Editora AM Impresses 2004.

SAITO, M.; SADAKATA M.; SATO M.; SOUTOME T.; MURATA H. Combustion Behavior of Pulverized Coal Particles in a High- Temperature/high-oxygen concentration atmosphere, **Combustion and Flame**, v.85, p.1– 12, 1991.

SAMPAIO, R. S. **Coal Devolatinization in Smelting Slags**. 1990. 142p. Ph.D. Thesis, Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, PA, USA.

SAMPAIO, R. S.; LOPES, L. E. F. A produção de ferro com uso de biomassa plantada. São Paulo, SP, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, **Revista Metalurgia & Materiais**, v.32, p.492-502, Fev/1995.

SAMPAIO, R. S.; ANTUNES REZENDE, M.E., DIAS DE FREITAS, G., CASTELO BRANCO, M.A., ALTHOFF, P. Integrating cultivated biomass with charcoal and steel making for CO₂ fixation and O₂ regeneration. In: FOURTH BIOMASS CONFERENCE OF THE AMERICAS, 1999 Oakland, CA, USA, **Proceedings...**, 1999.

SAMPAIO, R. S.; ANTUNES, M. E. R. **CO₂ – Inventory and fixation capacity in the biomass based foundry pig iron production by Plantar S.A.** Belo Horizonte: Plantar, 2007. (Relatório de Serviços da RS Consultants Ltda para Plantar)

SAMPAIO, R.S.; RESENDE, M.E.A.; PINHEIRO, P.C.C. Vantagens Comparativas e Competitivas do Uso do Biocombustível Sólido na Indústria Siderúrgica Nacional. In: SEMINÁRIO DE AVALIAÇÃO O POTENCIAL DO MDL PARA PROJETOS NO SETOR DE SILVICULTURA E INDUSTRIA DE FERRO GUSA, Belo Horizonte, 2007. **Anais...**, 2007.

SANDOR, R. L.; WALSH, M. J. Some observations on the evolution of the international greenhouse gas emissions trading market. In: KOSOBUD, R. F.; SCHREDER, D. L.; BIGGSS, H.M. **Emissions trade: environmental policy`s new approach**. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2000.

SAUSMIKAT, G.R. **Características de combustão de misturas de coque e carvão vegetal visando a injeção através das ventaneiras do alto forno**. 1994. 66p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Belo Horizonte - MG, 1994.

SCARPINELLA, G. A. **Reflorestamento no Brasil e o Protocolo de Quito**. 2002. 149f. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2002.

SHAFIZADEH, F., DeGROOT, W. F. Combustion characteristics of cellulosic fuels. In: SHAFIZADEH, F.; SARKANEN, K.V.; TILLMAN, D.A. **Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins**. New York, p.1-18, 1976.

SILVA, J. C. **Eucalipto – A Madeira do Futuro**. Revista da Madeira, 114p., Curitiba, Set. 2001.

SILVA, A. M. **Estudo da combustão de carvões e misturas com o coque verde de petróleo injetados em alto fornos.** 2006. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP, 2006.

ULHÔA, M. B., SOUZA, L. O. B., GIUDICE, F. D. P. **Heterogeneidade do coque em fornos horizontais.** In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 44., São Paulo, 1989, **Anais...v. 2** p. 287-301, 1989.

VARKULYA J, R. **Aproveitamento dos resíduos de serraria na geração de energia elétrica no Município de Ulianópolis, Estado do Pará: Estudo de caso para o incentivo à exploração florestal sustentável da Amazônia.** 2004. 159p. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo São Paulo, 2004

WAINER, E. **Siderurgia Brasileira a Carvão Vegetal.** São Paulo, SP, Associação Brasileira de Metais, p.10-26, 1975.

WEBER, S. **Caracterização de misturas de finos de carvão vegetal e carvão mineral para injeção na ventaneiras do alto forno.** 1990. 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, 1990.

WENZL, H. F. J. **The chemical tecnology of Wood.** New York, Academic Press, p.692, 1970.

WORLD ENERGY COUNCIL. Proved recoverable coal reserves: the top ten countries. 2007 Survey of Energy Resources, Londres, 2007. p.1-600. Disponível em: http://www.worldenergy.org/documents/ser2007_final_online_version_1.pdf. Acesso em: 05/08/2008.

YOSHIDA, Y.; TANAKA, K.; TADA, S.; KUWANO, K., High Coal Injection Rate Operation in Kobe n.3 BF. In: IRON MAKING CONFERENCE, **Proceedings...**, p. 517-522, 1991.

8. GLOSSÁRIO

Alto forno - Reator metalúrgico, constituído de uma carcaça metálica, revestido internamente com material refratário. Sua finalidade é reduzir o óxido de ferro a ferro-gusa.

Basicidade - Relação matemática entre o somatório dos óxidos básicos e o somatório dos óxidos ácidos, considerando-se os respectivos pesos moleculares.

Carvão mineral - Substância combustível, sólida, negra. Massa compacta estratificada de matéria vegetal, cujo processo de decomposição durou milhões anos sob ação de temperatura e pressão elevada.

Combustibilidade - Qualidade de combustível, propriedade que o material tem arder ao reagir com oxigênio, gerando luz e calor.

Coque - Produto da destilação do carvão mineral em retorta fechada, com controle de entrada de oxigênio e coleta das substâncias voláteis que se desprendem do carvão.

Cuba - Parte do alto-forno de forma cônica, estreitando-se para cima até o topo.

Dessulfuração - Dessulfurizar; Etapa do processo siderúrgico que consiste em retirar parcialmente o enxofre, através da utilização de agentes dessulfurantes.

Desvolatilizado - Material que passou por aquecimento e desprende substâncias voláteis.

Escória - Resíduo derivado da reação química entre o material inerte do minério, o fundente e a cinza, no interior de fornos metalúrgicos.

Ferro-gusa - Liga de ferro-carbono contendo também outros elementos residuais, tais como silício, manganês, fósforo, enxofre, dentre outros. Matéria-prima principal para a produção do aço.

Ferro-liga - Material à base de ferro e de outros elementos químicos combinados, cuja finalidade é corrigir a composição química do aço.

Friabilidade - Propriedade que os materiais têm de reduzirem-se a fragmentos ou a pó, gerando finos quando submetidos a quedas ou a abrasão.

Fundente - Compostos minerais utilizados para reagir com as impurezas do minério e com a cinza do carvão, facilitando a formação da escória.

Fundição - Processo metalúrgico para a fabricação de peças. Consiste em vaziar o metal líquido em um molde cuja forma é a da peça a ser confeccionada.

Guseiros - Nome dado aos produtores de ferro-gusa, com volumes de produção de pequeno a médio portes.

Hematita - Nome dado ao óxido de ferro, de cor cinza brilhante ao ser fraturada e vermelho marrom depois de certo tempo de exposição às intempéries, contendo em média 69,5 % de ferro puro.

Leito-fluidizado - Leito de partículas sólidas de pequena granulometria. As partículas permanecem em suspensão por meio de uma corrente de gás ascendente, porém, sem haver arrastamento do material sólido pela corrente gasosa.

Moabilidade - Propriedade física dos materiais, que indica a maior ou menor facilidade de ser moído.

Pelotização - Tratamento a que se submete um minério visando a aglomerar suas partículas a fim de proporcionar maior facilidade em operações metalúrgicas subsequentes.

Redução direta - Processo de redução do minério de ferro através de um gás redutor, sem haver a fusão da carga e nem a escorificação da parte inerte do minério. Neste processo fabrica-se o ferro-esponja.

Refratário - Material utilizado para revestir internamente o forno, com propriedades de suportar altas temperaturas sem se deformar. Que pode permanecer em contato com o fogo, ou que suporta calor elevado, sem se alterar.

Siderúrgica integrada – Indústria siderúrgica que extrai o minério de ferro para a produção de aço, passando pelas etapas de tratamento do minério, redução, refino e conformação.

Sinterização - Processo de aglomeração de partículas de minério de ferro que apresenta pequena granulometria. Processo em que duas ou mais partículas sólidas se aglutinam pelo efeito do aquecimento a uma temperatura inferior à de fusão, mas suficientemente alta para possibilitar a difusão dos átomos das duas redes cristalinas.

Termo-redutores - Material carbonoso, vegetal ou mineral, cuja função é gerar calor e promover a redução do óxido de ferro no alto forno.

Ventaneiras - Equipamento auxiliar do alto-forno cuja função é soprar ar pré-aquecido para o interior do alto forno.

ANEXOS

ENSAIOS DE MOABILIDADE DOS CARVÕES

Anexo 1. Resumo da análise de variância para o Grau de Moabilidade dos carvões.

Fontes de variação	G.L.	SQ	QM	F	Significância
TRAT	9	19222,11	2135,790	1925,899	0,00000
Resíduo	90	99,80850	1,108983		
Coef. de variação	1,508				

POROSIDADES DOS CARVÕES

Anexo 2. Resumo da análise de variância para a o Porosidade dos carvões.

Fontes de variação	G.L.	SQ	QM	F	Significância
TRAT	9	15806,78	1756,309	113,026	0,00000
Resíduo	90	1398,504	15,53893		
Coef. de variação	13,365				

ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA DOS CARVÕES

Anexo 3. Resumo da análise de variância para teores de Matérias Voláteis dos carvões.

Fontes de variação	G.L.	SQ	QM	F	Significância
TRAT	9	3852,557	428,0619	400,554	0,00000
Resíduo	90	96.18083	1.068676		
Coef. de variação	3,501				

Anexo 4. Resumo da análise de variância para teores de Cinza dos carvões.

Fontes de variação	G.L.	SQ	QM	F	Significância
TRAT	9	7945,902	882,8780	852,348	0,00000
Resíduo	90	93,22357	1,035819		
Coef. de variação	6,406				

Anexo 5. Resumo da análise de variância para teores de Carbono Fixo dos carvões.

Fontes de variação	G.L.	SQ	QM	F	Significância
TRAT	9	11053,16	1228,129	1346,429	0,00000
Resíduo	90	82,09241	0,9121379		
Coef. de variação	1,746				

BASICIDADE BINÁRIA DOS CARVÕES

Anexo 6. Resumo da análise de variância para Basicidade dos carvões.

Fontes de variação	G.L.	SQ	QM	F	Significância
TRAT	9	10,94119	1.215687	366329,2	0,00000
Resíduo	90	0,3012 E-02	0,3347E-04		
Coef. de variação	2,601				