

CRISMEIRE ISBAEX

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL NA PRODUÇÃO
DE FERRO GUSA**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

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

T

Isbaex, Crismeire, 1987-
I76i Influência da densidade do carvão vegetal na produção de
2018 ferro gusa / Crismeire Isbaex. – Viçosa, MG, 2018.
 xv, 107 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Márcio Lopes da Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Carvão vegetal - Transporte - Custos. 2. Redes Neurais
(Computação). 3. Siderurgia. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 22. ed. 634.98675

CRISMEIRE ISBAEX

**INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL NA PRODUÇÃO
DE FERRO GUSA**

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

APROVADA: 08 de outubro de 2018.



Fabricio Vilela Parreira



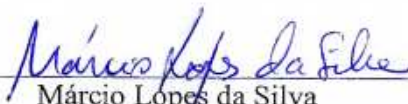
José Márcio Costa



Sebastião Renato Valverde
(Coorientador)



Helio Garcia Leite



Márcio Lopes da Silva
(Orientador)

ORAÇÃO DA GRATIDÃO

Deus, obrigada por tudo em minha vida neste momento, neste dia e por toda a eternidade.

Obrigada, porque sei que nunca irá me desamparar, mesmo nos momentos mais difíceis da minha vida, o Senhor sempre estará presente.

Eu seguro minha mão na sua, uno meu coração ao seu, para que juntos possamos fazer aquilo que sozinho não consigo.

Obrigada pelas decepções, elas me ensinaram que não devo colocar todo o meu coração em nada que existe aqui na terra e que fazendo isso sofrerei menos quando algo não dá certo.

Obrigada pelas lágrimas, pois elas lavam a minha alma e me fazem enxergar as coisas de forma diferente.

Obrigada Senhor, por me conceder a serenidade necessária para aceitar as coisas que não posso modificar, coragem para modificar aquelas que posso e sabedoria para distinguir uma das outras.

Obrigada por colocar em meu coração o dom de perdoar e assim sendo, sei que sempre serei perdoada por Ti.

Obrigada Senhor pelo amanhecer, ele me mostra que sempre posso recomeçar.

Obrigada também pelo anoitecer, pois me faz lembrar que tudo nessa vida é passageiro e que nenhum momento da vida seja bom ou ruim durará para sempre.

Obrigada pela consciência que tenho de que tudo nesta vida depende unicamente de Ti e que um dia todos possam enxergar que sem Ti não somos nada.

Amém

AGRADECIMENTOS

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

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

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

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

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

Ao orientador, Marcio Lopes da Silva, pela orientação, compreensão e ensinamentos durante todo este período de convivência, no qual levo a amizade e admiração por toda vida.

A Professora Angélica de Cássia e Sebastião Renato Valverde, pelo apoio e atenção na coorientação deste trabalho.

A Aperam South América por fornecer o apoio para realização desta pesquisa e abrir meus olhos para uma nova paixão que é a Siderurgia a carvão vegetal.

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

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

A University of New South Wales, Sydney- Austrália e a Tongji University, Shanghai – China por todo o enriquecimento cultural e visão de que é possível viver em um mundo melhor e que existe oportunidades melhores na vida do que imaginamos.

Aos meus amigos que estão espalhados pelo mundo, e, em especial, ao Patric, Mailane e Mailson, grandes guerreiros que me acolheram na Austrália, no qual, sou eternamente grata.

Os amigos Lyvia, Simone, Ricardo Neto, Letícia, Gabriel, Guilherme e Camila pelos momentos de estudos, apoio, cafés, desabafos em todo tempo de caminhada em Viçosa e na vida.

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

MUITO OBRIGADA

BIOGRAFIA

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

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

Em março de 2012, ingressou no programa de Pós-graduação em Ciência Florestal pela Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde obteve o título de Mestre em Ciências Florestais em 19 de fevereiro de 2014. Em Agosto de 2014, ingressou no doutorado na mesma instituição e programa de pós-graduação.

Em 2017, realizou doutorado sanduíche para School of Materials Science and Engineering da University of New South Wales (UNSW) – Sydney, Australia.

Em 2018, foi contemplada com uma bolsa de estudos da CEIE Summer Academic Scholarship para realizar CEIE Academic Mobility Program, na Tongji University – Shanghai, China. Neste mesmo ano, obteve o título de doutora em Ciência Florestal em 08 de outubro de 2018.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	x
LISTA DE DEFINIÇÕES	xi
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1.INTRODUÇÃO	1
2.OBJETIVOS	6
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1.Desenvolvimento Histórico.....	7
2.1.1.Siderurgia antes dos altos fornos.....	7
2.1.2.Siderurgia no Brasil.....	10
2.2.Conceitos Operacionais.....	13
a)O Equipamento.....	14
b)Zonas Internas do Alto Forno.....	16
2.3.Redes Neurais Artificiais.....	19
3.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
.	
CAPÍTULO 1: RELAÇÕES ENTRE A DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL E A PRODUÇÃO DE FERRO GUSA	28
RESUMO	28
1.INTRODUÇÃO	29
2.MATERIAIS E MÉTODOS	30
2.1.Descrição do equipamento de redução.....	30
2.2.Fonte de dados.....	31
2.2.1.Preparação do carvão vegetal.....	31
2.3.Recebimento do carvão vegetal na usina siderúrgica.....	32
2.4.Cenários.....	34
3.RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
3.1. Propriedades do carvão vegetal.....	36
3.2.Influência da densidade do carvão vegetal no consumo de carvão vegetal, carga metálica e produtividade de ferro gusa.....	38
3.3.Influência da densidade do carvão vegetal na permeabilidade do leito de fusão do alto forno e produção de ferro gusa.....	43
3.4.Influência da densidade do carvão vegetal na eficiência do alto forno.....	49
3.5.Análise entre cenários.....	57
4.CONCLUSÕES	60
5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
.	
CAPÍTULO 2: INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL NA PRODUÇÃO DE FERRO GUSA: UMA APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	64
RESUMO	64
1.INTRODUÇÃO	65
2.MATERIAIS E MÉTODOS	67

2.1. Descrição dos dados.....	67
2.2. Definição das variáveis do modelo.....	68
2.3. Modelagem dos dados.....	69
2.4. Avaliação das estimativas geradas pelas redes neurais artificiais.....	69
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
3.1. Interações entre as variáveis.....	71
3.2. Produção de ferro gusa	74
4. CONCLUSÕES.....	83
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
CAPÍTULO 3: ANÁLISE DO CUSTO DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DO CARVÃO VEGETAL DE DIFERENTES DENSIDADES	86
RESUMO.....	86
1. INTRODUÇÃO.....	87
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	89
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	92
3.1. Distribuição das classes de densidade de carvão vegetal.....	92
3.2. Efeitos da densidade do carvão vegetal na quantidade de carbono fixo transportado.....	94
3.3. Efeitos da densidade no peso de carvão e carbono fixo transportado.....	96
3.4. Efeitos da densidade do carvão nos custos de transporte de carvão vegetal e de carbono fixo.....	97
4. CONCLUSÕES.....	102
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
CONCLUSÕES GERAIS.....	106
RECOMENDAÇÕES.....	107

LISTA DE FIGURAS

INTRODUÇÃO	1
Figura 1: Produção total de ferro gusa no Brasil em toneladas.	2
Figura 2: Método de fundição egípcia, cerca de 1500 a.C.	8
Figura 3: Modelo de forno de redução do início do século XIV.	9
Figura 4: Modelo de alto forno do século XIX.....	9
Figura 5: Perfil de um alto forno.	15
Figura 6: (A) Visão geral do processo em contracorrente. (B) Zonas de reação e perfis de temperatura e grau de redução no alto-forno. a) Redução indireta Fe_2O_3 e Fe_3O_4 ; b) Redução indireta de Fe_xO ; c) Redução direta da reação de wustita e Boudouard; d) fusão de ferro e escória; e) Redução de metalóide e FeO na escória; f) Combustão na frente das ventaneiras; g) cadinho.....	17
Figura 7: Neurônio biológico.....	19
Figura 8: Modelo não-linear de um neurônio.	21
Figura 9: (A) Exemplo de rede <i>feedforward</i> de camada simples composta por de x entradas e m saídas. (B) Exemplo de rede <i>feedforward</i> de camada múltiplas composta por x entradas, duas camadas ocultas e uma camada de saída.	23
CAPÍTULO 1	28
Figura 1: Fluxograma de recebimento de carvão vegetal e abastecimento do alto forno na siderúrgica.....	33
Figura 2: Porcentagem de carvão vegetal de tamanho médio e grosso consumido em função das faixas de densidade de carvão.....	40
Figura 3: Consumo de carga metálica (CM) em relação ao consumo de carbono total (CT) em função da densidade a granel do carvão vegetal.	41
Figura 4: Produção de ferro gusa em função da densidade a granel do carvão vegetal.	43
Figura 5: Valores diários da permeabilidade da carga em função das faixas de densidade de carvão vegetal.	44
Figura 6: (A) Porcentagem de fração fina de carvão vegetal em relação ao limite de especificação (LE). (B) Umidade do carvão vegetal, Limites Superior (LS) e Limite Inferior (LI) para o alto forno.....	47
Figura 7: Produção média de ferro gusa em função do comportamento da permeabilidade do leito de fusão, durante o período de teste.....	48
Figura 8: Consumo de carvão vegetal por tonelada de ferro gusa e a composição do gás de topo com dióxido de carbono e monóxido de carbono.	51
Figura 9: Valores médios de temperatura de gás de topo em relação à porcentagem de monóxido e dióxido de carbono.....	52
Figura 10: Eficiência do alto forno em função da densidade a granel de carvão vegetal.	55
Figura 11: Valores médios da produção de ferro gusa em relação à eficiência do alto forno.	56
Figura 12: Economia de carvão vegetal e ganho em receita bruta por ano, ao optar pela faixa de alta densidade de carvão vegetal.	58
Figura 13: Ganho em receita bruta anual com a produção de ferro gusa em função da faixa de densidade disponível.....	58
CAPÍTULO 2	64
Figura 1: Frequência percentual (eixo y) dos erros percentuais (eixo x) das estimativas das RNA para projeção da produção de ferro gusa no treinamento, teste e validação das redes 1 a 5, respectivamente.....	76

Figura 2: Treinamento, teste e validação da produção de ferro gusa entre as das cinco redes RNA testadas e a RNA 4.	80
Figura 3: Produção de ferro gusa estimada (eixo y) e Produção de ferro gusa observada (eixo x) por tonelada dia, na validação da RNA 4.	81
Figura 4: Comparação entre os valores previstos e observados da produção de ferro gusa, pela rede RNA 4.	82
CAPÍTULO 3	86
Figura 1: Exemplo de um veículo articulado composto por um cavalo-mecânico 6x4 e semirreboque de 3 eixos.	90
Figura 2: Distribuição das classes de densidade de carvão vegetal (kg/m^3).	92
Figura 3: Efeito da densidade a granel na quantidade de carvão vegetal e carbono fixo em um mesmo volume.	95
Figura 4: Custo médio do transporte de carvão vegetal (CT_{CV}) e de carbono fixo (CT_{CF}) por trecho (R\$/t).	98

LISTA DE TABELAS

INTRODUÇÃO	1
Tabela 1: Propriedades do carvão vegetal comparado ao coque.....	4
CAPÍTULO 1	28
Tabela 1: Parâmetros técnicos do alto forno 1.....	30
Tabela 2: Valores médios de densidade a granel do carvão vegetal (kg/m^3) por clones.....	32
Tabela 3: Propriedades do carvão vegetal por faixa de densidade aplicada.....	36
Tabela 4: Estatística descritiva do consumo médio de carbono, carvão vegetal, carga metálica e produção de ferro gusa, por faixa de densidade.	39
Tabela 5: Valores de permeabilidade do leito de fusão ($\text{Nm}^3/\text{bar}\cdot\text{min}$), em função das classes de densidade de carvão vegetal.....	44
Tabela 6: Estatística descritiva da fração fina ($< 9,52\text{mm}$) e o teor de umidade do carvão vegetal.....	46
Tabela 7: Estatística descritiva da porcentagem de dióxido e monóxido de carbono do gás de topo.	49
Tabela 8: Eficiência do alto forno e produção de ferro gusa, durante o período de teste no alto forno.....	54
Tabela 9: Economia no consumo médio de carvão vegetal de topo entre os cenários... ..	57
CAPÍTULO 2	64
Tabela 1: Valores médios de densidade a granel do carvão vegetal (kg/m^3) por clone.....	67
Tabela 2: Variáveis de entrada e de saída para modelagem neural.	68
Tabela 3: Coeficiente de correlação de Pearson e valores significantes.....	73
Tabela 4: Característica e precisão das redes neurais artificiais selecionadas para estimar da produção de ferro gusa.....	74
Tabela 5: Configuração das redes neurais artificiais após o treinamento.	74
CAPÍTULO 3	86
Tabela 1: Intervalo das classes de densidade a granel selecionadas.....	89
Tabela 2: Peso médio transportado de carvão vegetal e carbono fixo por cenários.	96
Tabela 3: Economia média no transporte de carvão vegetal e carbono fixo por cenários.	99

LISTA DE SÍMBOLOS

Al₂O₃: Óxido de Alumínio;
CH₄: Metano;
CO: Monóxido de Carbono;
CO₂: Dióxido de Carbono;
Fe₂O₃: Hematita;
Fe₂O₄: Magnetita;
Fe: Elemento ferro;
FeO: Wustita;
FOB: Free On Board; livre a bordo;
H₂: Hidrogênio;
Kg/m³: Quilograma por metro cúbico;
Mn: Manganês;
N₂: Nitrogênio;
O₂: Oxigênio;
P: Fósforo;
Si: Silício;
SiO₂: Dióxido de Silício, sílica;
t: Tonelada métrica equivalente a 1000 kg;
US\$: Dólar americano.

LISTA DE DEFINIÇÕES

Álcalis: são elementos que entram no alto forno em forma de carbonatos e silicatos presentes no minério, aglomerados, fundentes e combustíveis. As principais substâncias são sódio e o potássio. Parte dos álcalis é eliminada pela escória, enquanto alguns seguirão o gás superior como poeira e gás. Outra porção é absorvida pelo revestimento refratário.

Arriamento: é a descida descontrolada e rápida da carga. O arriamento causa uma redução insuficiente das camadas de minério e o prolongamento da zona de fusão, formando novas pontes para um novo engaiolamento se nada for feito.

CRI: Coke Reaction Index (índice de reatividade do coque) mede o ataque químico ou resistência à reação ao CO₂. Mede a reatividade e a perda de massa sobre uma atmosfera 100% de CO₂ a 1100 °C.

CSR: Coke Strength after Reaction (Resistência do coque após reação). Mede a perda de massa sob ataque de CO₂ e a resistência mecânica contra a abrasão.

Engaiolamento: ocorre quando a carga para de descer, ou seja, as sondas permanecem no mesmo nível. Constata-se na ocorrência de um engaiolamento, um aumento da resistência de carga à passagem dos gases, ou seja, ocorre uma diminuição da permeabilidade, implicando numa elevação de pressão, uma diminuição do volume de sopro e conseqüentemente do gás de topo.

Equilíbrio térmico: controle da temperatura necessária para obter um ferro gusa de qualidade especificada, nas condições mais econômicas.

Escória: A escória de alto-forno pode ser considerada basicamente como uma mistura dos óxidos de cálcio (CaO), de magnésio (MgO), de silício (SiO₂), de alumínio (Al₂O₃) e de outros elementos em menor escala;

Fenômenos aerodinâmicos: A velocidade de um gás no interior de um leito granulado sendo maior que a velocidade a vácuo, as partículas que possuem dimensões superiores aquelas que são auto-peneiráveis podem retornar no alto forno, no meio da carga sem serem arrastadas pelos gases, para os coletores de pó. Estas partículas se acumulam, no alto da cuba e chegam a formar um “tampão” quase impermeável aos gases. Este “engaiolamento” do alto da cuba e os materiais não descem mais. Uma ou diversas variações na vazão do ar serão necessárias para fazer descer este “tampão” suficientemente baixo na cuba para que ele não tenha oportunidade de retornar e seja consumido pelo processo normal do alto forno. Este fenômeno pelas razões anteriores, aliado a alta higroscopicidade do carvão vegetal, ocorre com maior frequência em altos fornos que operam com este tipo de combustível. Altas porcentagens de água no carvão dificultam o peneiramento e conduzem ao seu fendilhamento, reduzindo-o a pequenas dimensões quando ocorre a saída rápida pelo aquecimento;

Fenômenos hidrodinâmicos: Os fenômenos de amolecimento prematuro do leito de fusão podem ocorrer em altos fornos a coque e carvão vegetal. Na zona inferior ao alto forno logo acima da ventaneira a escória e a gusa escoam do cadinho através da camada de coque e carvão vegetal ainda sólido em contra corrente ao gás da cuba. Com uma grande produção e conseqüentemente uma vazão de ar elevada a corrente gasosa e a corrente de fase líquida se travam mutuamente podendo resultar uma “retenção” de líquidos nos vazios da camada de coque e carvão vegetal, e o mesmo um refluxo, ou seja, retorno de líquido do sentido do topo do alto forno. Este estado se manifesta no alto forno por “engaiolamento”.

Ferro gusa: é uma liga obtida no estado líquido, composta de ferro (92 a 95%), carbono (3 a 4,5%) e outros elementos químicos.

Fluidização da carga: A velocidade do gás de cuba é tal que a carga é posta em suspensão pelo gás de alto-forno. As sondas penetram na carga, o material incandescente da região das ventaneiras pode ser projetado para o topo, enquanto que os materiais frios do topo podem atingir o cadinho e provocar o seu esfriamento.

Fundentes: são materiais cuja composição química seja tal que, quando adicionados a carga de um alto forno, reagem com seus constituintes indesejáveis (álcalis e ganga), formando compostos estáveis que, no próprio aparelho se separarão do banho metálico, para constituir a escória do processo. Na redução do minério de ferro as partes indesejáveis estão contidas na própria carga metálica ou nas cinzas do combustível: sílica, alumina, fósforo e enxofre.

Ganga: impurezas contidas no minério.

Limite de especificação: Limites de aceitação de alguma característica do material ou produto.

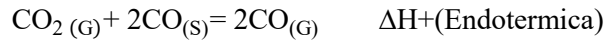
Nível de carga: à medida que a distribuição entre a borda do cone grande e a parede, no qual, auxilia a visualização de formação de marchas periféricas ou centrais.

Pelota: são aglomerados de finos de minério de ferro – pellet feed – gerados na lavra. Possuem distribuição uniforme de tamanho (na faixa de 10 a 15 mm de diâmetro).

Produção de ferro gusa: quantidade de combustível queimado na Raceway em uma unidade de tempo e a quantidade de carvão de topo necessária para produzir uma unidade de ferro gusa (t ferro gusa/dia).

Produtividade de ferro gusa: Toneladas de ferro gusa produzida por dia por unidade de volume útil do alto forno.

Reatividade: A reatividade de um redutor é a velocidade a qual uma determinada temperatura, indica o momento em que o carbono irá reagir com um gás contendo oxigênio (em alto forno é o dióxido de carbono - CO₂), para gerar monóxido de carbono (CO). Esta reação é conhecida como Reação de *Boudouard* ou *Solution Loss*. Esse comportamento pode ser observado na equação a seguir. Neste caso, a reatividade pode ser denominada como “*Carboxireatividade*”.

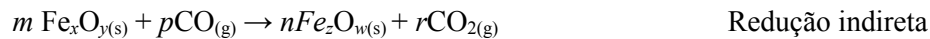


Em um alto forno, o efeito da maior ou menor reatividade do redutor promove uma variação (abaixamento ou elevação) na temperatura da Zona de Reserva, ou seja, $T^{\circ}\text{C}_{\text{sólido}} = T^{\circ}\text{C}_{\text{gases}}$. Portanto, para uma mesma carga metálica, o efeito da menor temperatura da zona de reserva é o de aumentar o consumo específico de carbono do reator. A maior temperatura da zona de reserva está relacionada com a menor reatividade do redutor, no que implica na redução do seu consumo;

Redução direta: ocorre na zona de amolecimento e fusão, próxima a região das ventaneiras. As reações sólido-sólido requer apenas 1 (um) mol de carbono para reduzir uma molécula de óxido de ferro (FeO). Esta reação é altamente endotérmica (>950°C).



Redução indireta: ocorre nas zonas menos quentes da cuba (500 a 900 °C), denominadas de "zona de reserva térmica", onde ocorre a reação de Boudouard. Nesta região, as reações gás-sólido ocorrem pelo CO contido na mistura CO/CO₂, dentro dos gases em fluxo ascendente.



Reserva térmica: o gás quente, formado na sua maior parte pela combustão do carbono nas ventaneiras, cede seu calor à carga, mas não se resfria completamente e sai pelo topo com temperatura superior à do ambiente em torno de 100°C. As temperaturas da carga sólida e do gás - se tornam praticamente iguais a uma temperatura em torno de 900 a 1000 °C em altos-fornos a coque e 600 a 850 °C para altos-fornos a carvão vegetal e permanece assim. Essas temperaturas indicam o início das Reações de *Boudouard*. A temperatura é definida pelas condições de reação do CO₂ com o carbono. A condição mais importante é reatividade do redutor;

Siderurgia: é um ramo da indústria metalúrgica dedicado à transformação do minério de ferro em ferro e aço.

RESUMO

ISBAEX, Crismeire, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2018. **Influência da densidade do carvão vegetal na produção de ferro gusa.** Orientador: Márcio Lopes da Silva Coorientadores: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro e Sebastião Renato Valverde.

Em 2017, o Brasil produziu cerca de 20% do ferro gusa através de altos fornos a carvão vegetal de pequeno porte (volume útil $< 560 \text{ m}^3$). Um dos grandes gargalos é a alta variabilidade das propriedades químicas e físicas do carvão. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência da densidade do carvão vegetal nos custos de transporte e na produção de ferro gusa. Devido à inexistência de trabalhos nesta linha em escala operacional, a pesquisa assume um caráter inédito e pioneiro. No Capítulo 1, objetivo deste trabalho foi avaliar as relações entre uso do carvão vegetal com diferentes densidades no processo de produção do ferro gusa. As densidades a granel aplicadas no alto forno foram classificadas em faixa de alta, média e baixa. Os parâmetros do alto forno foram comparados entre si para avaliar a eficiência em função de cada faixa. Concluiu-se que a faixa de alta densidade proporciona melhor desempenho do equipamento de redução, economia no consumo de carvão e maior retorno financeiro. No Capítulo 2, foi configurada e validada uma rede neural artificial (RNA) para estimar a produção futura de ferro gusa a carvão vegetal utilizando a densidade do carvão vegetal e parâmetros numéricos de um alto forno. Foi possível concluir que as redes são eficientes para estimar a produção de ferro gusa sendo uma ferramenta útil para aprimorar o desempenho do alto forno. No Capítulo 3, o objetivo foi avaliar e quantificar a influência da densidade do carvão vegetal nos custos de transporte do carvão. Concluiu-se que quanto maior a densidade do carvão, maiores quantidades de carbono fixo foram transportadas e descarregadas na usina siderúrgica.

ABSTRACT

ISBAEX, Crismere, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2018. **Influence of the charcoal density on the production pig iron.** Adviser: Márcio Lopes da Silva
Co-advisers: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro and Sebastião Renato Valverde.

In 2017, Brazil produced around 20% of the pig iron through small blast furnaces based-charcoal (useful volume $< 560 \text{ m}^3$). One of the major bottlenecks is the high variability of the chemical and physical properties of char. The objective of this work was to evaluate the influence of the charcoal density on the transportation costs and the production of pig iron. Due to the inexistence of works in this line in an operational scale, the research assumes an unpublished and pioneering character. In Chapter 1, the objective of this work was to evaluate the relationships between the use of charcoal with different densities in the pig iron production process. Bulk densities applied in the blast furnace were classified as high, medium and low. The blast furnace parameters were compared to each other to evaluate the efficiency production of each strip. It is concluded that the high density range provides better reduction equipment performance, savings in char consumption and greater financial return. In Chapter 2, an artificial neural network (RNA) was configured and validated to estimate the future production of pig iron using the charcoal density and numerical parameters of a blast furnace. It was possible to conclude that the networks are efficient in estimating pig iron production as a useful tool to improve blast furnace performance. In Chapter 3, the objective was to evaluate and quantify the influence of charcoal density on the transportation costs. It was concluded that the higher the density of charcoal, the greater the amount of fixed carbon were transported and discharged at the steelwork.

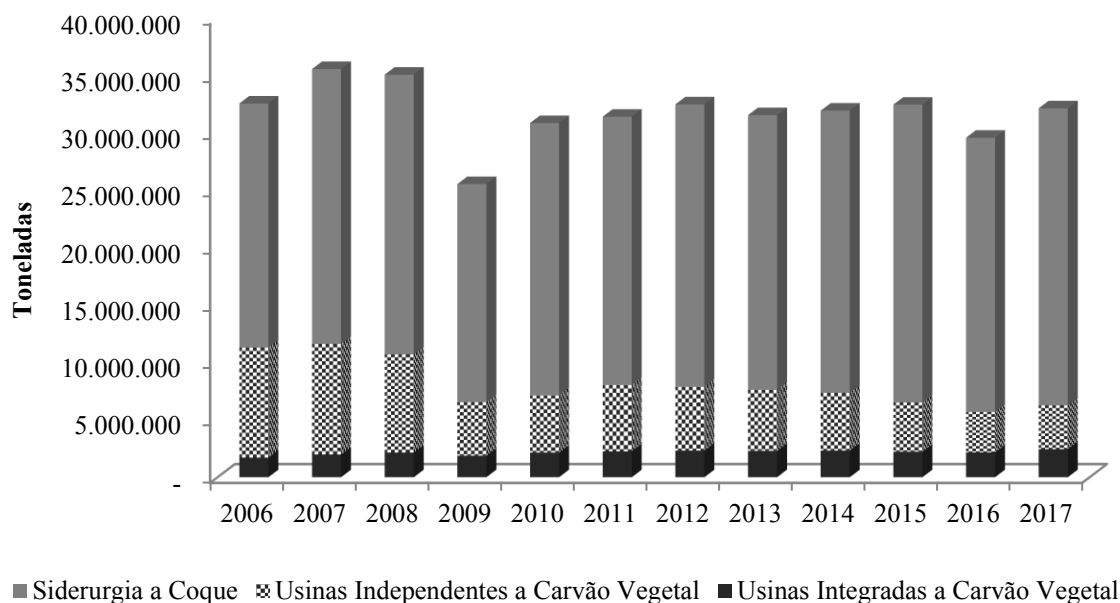
1.INTRODUÇÃO

O carvão vegetal é um dos principais insumos utilizados na fabricação de aço e ferro ligas no Brasil. O país é o único do mundo a manter um parque metalúrgico a carvão vegetal, no qual compete no mercado internacional com o aço produzido a partir de fontes não renováveis.

A atividade siderúrgica mundial encerrou o ano de 2016 com uma produção de 1,629 bilhão de toneladas de aço bruto. A China manteve sua posição de liderança mundial, com 808,4 milhões de toneladas. O Brasil ocupa a nona posição no ranking mundial e produziu cerca de 32.151 milhões de toneladas, com aumento de 7,9% em relação a 2016 (SINDIFER, 2018). O saldo comercial brasileiro do setor siderúrgico, em 2016, apresentou superávit de US\$ 3,9 bilhões, com exportações totalizando cerca de US\$ 5,6 bilhões e importações US\$ 1,7 bilhão. Os Estados Unidos permaneceram como principal destino das exportações brasileiras com participação de 44,0%, com uma evolução de 26,9% entre os anos de 2016 para 2017 (SINDIFER, 2018).

Apesar do aumento das exportações para os Estados Unidos, o Brasil tem reduzido às exportações siderúrgicas desde crise financeira internacional de 2008. Além disso, da recessão econômica e o cenário político-econômico nacional a perda de competitividade sistêmica continuam atingindo as indústrias brasileiras de aço, além de outros fatores como o excesso de capacidade de produção de aço no mundo (Brasil, 2018).

Em 2017, a participação das siderúrgicas a carvão vegetal na produção total de ferro gusa brasileiro, foi de 6,3 milhões de toneladas, com alta de 8,83% em relação ao ano anterior (Figura 1). Essas indústrias consumiram o equivalente a 9.155 milhões de metros de carvão (mdc) em 2017, 22% a mais que no ano anterior. No mesmo período, o estado de Minas Gerais - maior produtor de aço e de carvão vegetal - participou com 61% de todo o ferro gusa produzido no Brasil a base de carvão vegetal (SINDIFER, 2018). Desta forma, as indústrias integradas e independentes do Estado contribuíram para a balança comercial com o equivalente a US\$ 471 milhões (FOB) do total de volume exportado.



Fonte: SINDIFER (2018).

Figura 1: Produção total de ferro gusa no Brasil em toneladas.

Apesar da grande importância da cadeia produtiva do carvão vegetal para o desenvolvimento econômico, social e ambiental, as indústrias consumidoras de carvão vegetal tem como desafio grande competitividade com as indústrias a base de carvão mineral. A diferença entre as siderúrgicas está associada à capacidade de produção entre os altos fornos a coque e a carvão vegetal. Os altos fornos a coque podem ter capacidades de produção superiores a 1.000.000 t ferro gusa/ano, enquanto os altos fornos a carvão vegetal podem atingir taxas de produção de 20 a 50.000 t ferro gusa/ano.

Em 2017, apenas 19,47% do total de ferro gusa produzido no Brasil foram provenientes das siderúrgicas verdes. No entanto, a cadeia produtiva do ferro gusa exerce um papel fundamental em termos de questões sociais, econômicas e ambientais em Minas Gerais. Além de ser uma alternativa econômica viável para as regiões montanhosas e a única capaz de gerar um balanço positivo nas emissões de dióxido de carbono, no número de empregos gerados em Minas Gerais pelas usinas independentes a carvão vegetal e pelo setor florestal vinculado que foi de 21.716 empregos diretos e 61.646 empregos indiretos (SINDIFER, 2018).

Apesar da semelhança de função no interior de um alto forno, o coque e o carvão vegetal se diferenciam por meio da fonte de matéria prima. Enquanto o coque metalúrgico é produzido nas coquearias, a partir da coqueificação do carvão mineral,

o carvão vegetal é oriundo de florestas plantadas e obtido por meio da carbonização da madeira em unidades de produção de energia. Portanto, as emissões de gases de efeito estufa se diferenciam em relação ao tipo de rota.

De acordo com Noldin, (2011) e Gonçalves et al., (2012), desde as plantações florestais de eucalipto até a produção do ferro gusa é possível obter um balanço positivo de 0,203 a 1,56 t de O₂ / t de ferro gusa e sequestrar cerca de 0,890 a 2,42 t de CO₂/ t de ferro gusa. Por outro lado, a produção de aço a partir do uso de agentes redutores baseados em fontes fósseis (por exemplo, carvão mineral, petróleo e gás natural), resultam em altas emissões de CO₂. A produção de uma tonelada de aço nesta rota pode emitir cerca de 2,0 a 2,5 t de CO₂ / t de ferro gusa, dependendo da eficiência tecnológica (Suopajarvi, 2014).

Deste modo, vale ressaltar os benefícios de optar pela rota a carvão vegetal, uma vez que, o redutor é considerado um combustível “carbono neutro”, por sequestrar carbono da atmosfera entre 5 a 10 anos, desde 100 milhões de anos como o carvão mineral. Além disso, os plantios florestais protegem o solo, ocupam áreas degradadas, servem como abrigo para fauna silvestre, reduzem o êxodo rural, gerar emprego e renda no setor florestal e outros setores adjacentes. Ao contrário da rota a coque, possui pouca importância social, e principalmente pouca preocupação com meio ambiente. E a extração do carvão mineral, é um dos processos mais poluentes, uma vez que utilizam drenagem com água sulfurosa ou escavações de grandes volumes de solo rochoso, que geram impactos ambientais visíveis na cobertura vegetal e fauna, rebaixando do lençol freático, entre outros.

No estado de Minas Gerais os plantios de eucalipto destinados à produção de carvão vegetal estão distribuídos em 440 municípios, concentrando-se em algumas regiões como no Vale do Jequitinhonha e Norte de Minas (IBGE, 2018). Nestes locais é possível encontrar espécies como, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. urophylla*, *E. cloeziana* e híbridos como *E. citriodora* x *E. toreliana*, e tricross como híbridos de *E. urophylla* x (*E. camaldulensis* x *E. grandis*), entre outros (Venturini et al. 2014; Viveiro Santa Isabel, 2018).

Na indústria siderúrgica, a escolha do carvão vegetal ou do coque como redutor térmico não altera a dinâmica dos processos químicos e físicos da redução do minério de ferro nos altos-fornos (Malard, 2009). Entretanto, homogeneizar as propriedades físicas, químicas e mecânicas do carvão vegetal ainda é um desafio, pois a heterogeneidade do material torna as operações do alto forno (AF) mais

complexas (Bhattacharya et al., 1988; Matos e Rios, 1982; Gaur e Reed, 1995; Vital et al., 2013). Portanto, quaisquer esforços feitos através de melhoramento genético e estudos de novas tecnologias para melhorar os processos de carbonização (Brotel et al., 2007; Brotel et al., 2010; CGEE, 2014) são válidos para otimizar o abastecimento do alto forno. A Tabela 1 apresenta as propriedades mais importantes do carvão vegetal para a siderurgia em relação ao coque.

Tabela 1: Propriedades do carvão vegetal comparado ao coque.

Propriedades	Unidades	Carvão Vegetal	Preferência de Carvão Vegetal	Coque	Preferência do Coque
Teor de Umidade	%	8-20	<7	1-3	1-6
Carbono Fixo	%	70-80	75-80	88-92	85-88
Densidade	kg m ⁻³	180-350	>250	400-550	-
Material Volátil	%	25-35	max 25	7.8-11	1-3
Cinza	%	1-1.5	<1	9-12	0.1-0.5
Enxofre	%	0.03-0.1	Max 0.03	0.45-0.7	-
Tamanho	mm	9-100	40-50 uniforme	25-80	-
Resistência à Compressão	kg cm ⁻²	10-80	50-100	130-160	100-200
CRI (Coke Reaction Index)	%	8 x maior do que do coque	-	25	-
CSR (Coke Strength After Reaction)	%	57	-	65	-

Fonte: Meyers e Jennings, 1979; Santos, 2008; Rousset et al., 2011; Gonçalves, 2012.

Em um AF à carvão vegetal, o consumo de carbono fixo pode variar entre 570 a 700 kg de redutor / t ferro gusa, com 100 a 200 kg de injeção de finos/ t ferro gusa, em temperaturas de 600 a 1000 °C. Já um AF a coque, pode consumir entre 450 a 500 kg de carbono fixo / t ferro gusa, injetar entre 100 a 170 kg de finos/ t ferro gusa com temperaturas entre 100 a 1300 °C (Feliciano-Bruzual e Mathews, 2015). O maior alto forno a carvão vegetal, localizado em Timóteo, Minas Gerais, possui uma capacidade produtiva de 1,2 mil toneladas de ferro gusa por dia, com consumo de carvão vegetal de aproximadamente 621 quilos por tonelada de gusa produzida (Laguna, 2011). No entanto, ressalta-se que a qualidade das matérias primas, distribuição de carga e monitoramento do processo, são fatores que podem afetar a produtividade de ambas as rotas.

O quanto maior a densidade da madeira maior a densidade do carvão vegetal produzido (Moutinho et al., 2016; Meyers et al., 1979; Oliveira e Almeida, 1980; Oliveira, 1990; Okumura et al., 2009; Santos et al., 2011; Pereira et al., 2012; Pereira et al., 2013; Noumi et al., 2015; Downie et al., 2009). É a densidade do carvão vegetal que determina o volume ocupado no AF, consumo de redutor, tempo de

residência carga metálica e eficiência do equipamento de redução (Assis, et al., 1982; FAO, 1987; Santos, 2008; Feliciano-Bruzual e Mathews, 2015).

De acordo com Silva e Quintão (1991), o carvão vegetal é responsável por ocupar cerca de 70% a 80% do volume útil de um equipamento e associado a grandes variabilidades deste insumo, torna-se imprescindível o conhecimento de suas propriedades, para aumentar a produtividade dos equipamentos de redução. Deste modo, o tipo de redutor é o que define o tamanho do equipamento de redução e conseqüentemente o volume de trabalho. Assim, o bom desempenho dos equipamentos de redução se atingirá quando as funções do carvão vegetal forem atingidas na sua plenitude, o que influencia diretamente nas pesquisas sobre o genótipo de origem, e nas tomadas de decisões sobre o manejo e planejamento da silvicultura, colheita, transporte e carbonização.

Apesar da importância econômica, social e ambiental da cadeia produtiva do carvão vegetal, o setor florestal ainda carece de informações sobre os efeitos da densidade do carvão vegetal em um alto forno. A análise é fundamental para avaliar o consumo de matérias primas e produção de ferro gusa em função da distribuição eficiente da carga no interior do forno, assim como, equilíbrio térmico, balanço de massa e qualidade das matérias primas.

2.OBJETIVOS

Os objetivos deste estudo foram:

Avaliar o desempenho do alto forno e a produção de ferro gusa em função da densidade do carvão vegetal;

Avaliar e estimar a produção de ferro gusa via redes neurais artificiais;

Avaliar a influência da densidade do carvão vegetal no custo de transporte rodoviário.

2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.Desenvolvimento Histórico

2.1.1.Siderurgia antes dos altos fornos

A história da fabricação do ferro acompanha os primeiros estágios da civilização humana. A primeira evidencia da utilização do ferro foram descobertas no antigo Egito, onde uma ferramenta de ferro foi encontrada em uma junta entre duas pedras em uma pirâmide. A origem de muitos implementos de ferro pré-históricos era provavelmente de ferro meteórico. Pelos Assírios e Babilônios o ferro era denominado de *parzillu*, *barsa* pelos Sumérios e Caldeus, *barzel* pelos Hebreus e *ba-en-pet* pelos Egípcios. No entanto, a tradução mais popular para esses termos antigo é “o metal que veio do céu” (Ricketts, 1999).

Ao logo da história, foram encontrados vários artefatos antigos de ferro. Há registros no Irã de uma bola de ferro de 5000 a.C; pontas de lanças e ornamentos no Antigo Egito de cerca de 4000 a. C.; grande pirâmide de Gizé construída por volta de 2900 a.C; no túmulo em Abydos, Egito, datado de aproximadamente 2600 a.C; aos redores do Mar Mediterrâneo; nos túmulos em Pylos, na península do Peloponeso da Grécia, continham argolas de ferro datadas de cerca de 1550 a.C., assim como, outros registros próximos a Gaza, Palestina bíblica e na Síria (Wakelin e Ricketts, 1999).

Não há registros de como o homem aprendeu a extrair o ferro do minério. De acordo com Wakelin & Ricketts (1999), o aprendizado pode ter ocorrido acidentalmente, ou por da observação em lareiras rústicas construídas de rocha com ferro. No entanto, a primeira representação gravada de um processo de fundição foi encontrada na parede de uma tumba egípcia datada de cerca de 1500 a.C. (Figura 2). Os egípcios usavam um poço com minério e com um combustível desconhecido, onde, o fogo era intensificado com foles operados pelo pé. Por outro lado, a primeira menção sobre a fabricação do ferro está descrito na Bíblia, em Gênesis 4: 22 “E Zilá também deu à luz a Tubalcaim, mestre de toda a obra de cobre e ferro”. Outras escrituras significativas referentes ao uso de ferro foram encontradas na Babilônia; e escritores como Heródoto e Daimachus, contemporâneo de Alexandre, o Grande, relatam o uso do ferro pelo povo de Chalybians e o uso de quatro diferentes tipos de aço, respectivamente. A tecnologia de processamento de ferro se espalhou do

extremo leste do mar Mediterrâneo, da Grécia a Roma, por volta de 300 a.C. e finalmente para a Espanha por volta de 200 a.C (Wakelin e Ricketts, 1999).

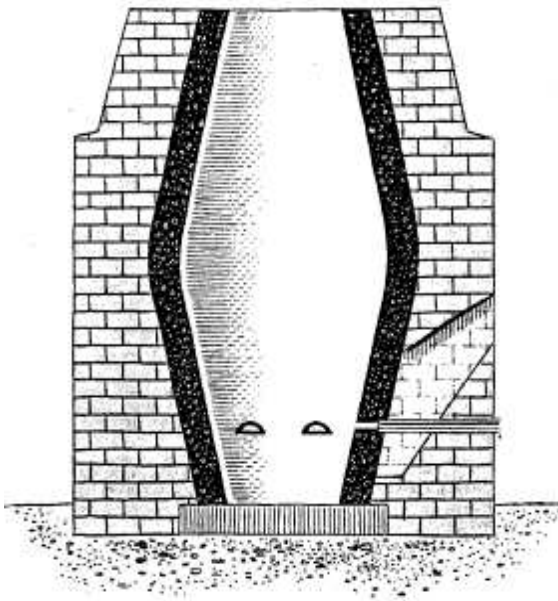


Fonte: Wakelin e Ricketts (1999).

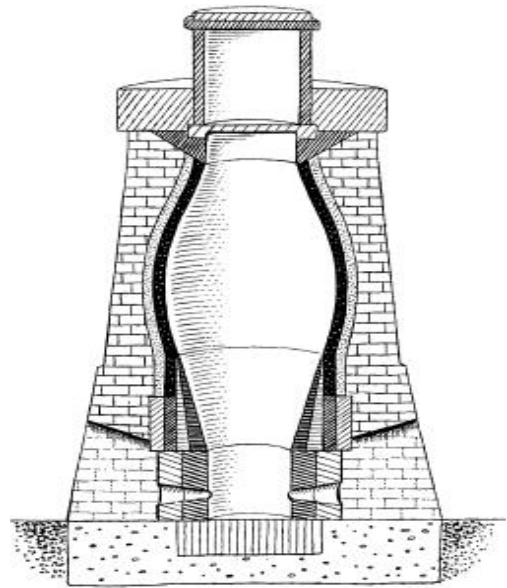
Figura 2: Método de fundição egípcia, cerca de 1500 a.C.

Os desenvolvimentos de técnicas de fundição do ferro foram sendo aprimoradas ao longo dos séculos em diversas regiões distintas. Os fornos de redução africanos 600 a.C.; o buraco no chão usado por vários países do mediterrâneo na idade do bronze; os fornos de exaustão natural desenvolvidos pelos gregos, entre outros foram tecnologias de aprimoramento para chegar ao modelo das forjas catalãs, na Catalunha – Espanha, no século VIII, onde, seu uso se espalhou para a França, Bélgica, Inglaterra e Alemanha (Ricketts, 1999).

No início do século XIV, a fundição de grade porte, chamada de Stückofen, foi o desenvolvimento mais significativo na fabricação de ferro. O Stückofen entrou em uso na Alemanha e foi reconhecido como o primeiro alto forno. A fundição era realizada em um poço com foles movido a água. O Stückofen foi construído como dois cones truncados com um em cima do outro, como mostrado na Figura 3, e possuía uma altura de 15 metros e um diâmetro de 5 metros na seção mais larga (Singer et al., 1956). Com o aperfeiçoamento do modelo de Stückofen, no início do século XIX, na Escócia, tubos de ferro e ventaneiras refrigeradas a água foram usados pela primeira vez para introduzir o ar em altos fornos, conforme mostra a figura 4 (Wakelin e Ricketts, 1999).



Fonte: Singer et al., (1956)



Fonte: Wakelin e Ricketts (1999).

Figura 3: Modelo de forno de redução do início do século XIV.

Figura 4: Modelo de alto forno do século XIX.

O processo Siemens – Martins foi desenvolvido no final do século XIX, para produzir aço em um forno regenerativo de soleira aberta e tecnologias para o reaproveitamento de sucata de ferro. Desta maneira foi possível construir o grande monumento que foi a Torre Eiffel, em 1889. Nesta mesma época, tanto nos Estados Unidos quanto a Europa operavam grandes altos fornos com mais de 20 metros de altura, produzindo cerca de 180 toneladas por dia. Foi durante o século XX, que aconteceu o desenvolvimento de tecnologias e pesquisas que melhoram o desempenho dos altos fornos. Como o processo de sinterização e injeção de óleo combustível, gás e carvão pelas ventaneiras. Em 1970, o programa nacional de desenvolvimento do Japão, promoveu a substituição dos altos fornos por outros mais modernos. Com a desativação destes reatores, foi desenvolvido o experimento mais ousado em grande escala, que foi a descoberta da chamada zona coesiva nos altos fornos, a região com material semifundido, o que mudou radicalmente a maneira de pesquisa sobre o fluxo de materiais nos altos fornos (Mourão e Gentile, 2007).

2.1.2.Siderurgia no Brasil

As primeiras iniciativas de produção de ferro na Colônia datam de 1532, quando Martim Afonso de Sousa – nobre e militar português – fundou a primeira vila do país, a Vila de São Vicente, na corrida pela procura de ouro. Posteriormente, por volta de 1591, o bandeirante Afonso Sardinha deu início à industrialização do ferro no Brasil, por meio de uma pequena forja a carvão vegetal, que se tornou a primeira usina siderúrgica reconhecida no Brasil, próxima ao rio de Jeribatiba, região de Sorocaba – São Paulo. As forjas então construídas operaram até 1628, uma vez que, o ferro produzido por eles não chegava à fase líquida, sendo apenas transformado em ferro maleável. Nessa época, a siderurgia brasileira passou por um século de estagnação (IAB, 2013).

Com o advento da família real ao Brasil, em 1808, a indústria siderúrgica iniciou seu desenvolvimento com maior vigor, devido à formação institucional do Brasil como nação de língua portuguesa nas Américas e a necessidade de abertura de vias mais largas, construção de habitações, criação de novos espaços urbanos, bem como a implementação da infraestrutura de serviços. Por meio da carta régia, editada por Dom João VI, estimulou a criação de fábricas e o processamento de ferro, pequenas forjas. Desta forma, em 1831, foi construído, a usina do Morro do Pilar em Minas Gerais, o primeiro alto-forno do Brasil, sendo fundido ferro gusa líquido pela primeira vez no Brasil. Além dessa, foram construídas outras usinas em Congonhas, Caeté e São Miguel de Piracicaba, todas em Minas Gerais. Apesar do impulso no começo do século XIX, a siderurgia pouco se desenvolveu durante a monarquia (Iglesias, 1992).

Durante o Império até a Independência do Brasil em 1822, à Proclamação da República em 1889, a produção do aço ainda era formada por pequenas produções em forjarias, onde, de acordo com o relatório de Eschwege, descreve que naquela época o Brasil possuía em 1821, cerca de 30 forjas em Minas Gerais, com uma produção de 100 a 400 arrobas cada – cerca de 120 toneladas por ano. Em 1864 havia, em funcionamento, 120 forjas, produzindo 1.550 toneladas anualmente (Baer, 1970). Neste mesmo período, a presença do engenheiro francês Jean Antoine Felix Dissandes de Monlevade, fez florescer em Minas Gerais a Escola de Minas de Ouro Preto (1876), na cidade de mesmo nome. A instituição foi fundada, com o propósito de desenvolver a siderurgia brasileira e formar engenheiros de minas, metalurgistas e

geólogos. Em busca do progresso e facilidade do transporte e livre comércio das mercadorias, o trem, foi outro ponto importante para a siderurgia brasileira. Em 1854, foi construída a primeira estrada de ferro, pelo empresário Irineu Evangelista de Sousa, o Barão de Mauá, com capital estrangeiro (IAB, 2013).

No século XX, entre 1917 e 1930, ocorreu um surto industrial, que acarretou avanços na siderurgia nacional. O censo organizado pelo Centro Industrial do Brasil em 1907 apurou que a indústria brasileira já atendia a 78% das necessidades nacionais. Na ocasião, existiam cerca de 3.250 indústrias, que empregavam mais de 150 mil pessoas (Iglesias, 1992). O avanço na siderurgia deu mais um passo, com o governo de Getúlio Vargas, a partir de 1930. O processo de industrialização fez nascer a Companhia Siderúrgica Mineira, em Sabará – MG, posteriormente, Companhia Siderúrgica Belgo Mineira – CSBM e atual Arcelor Mittal Brasil. Com o início do funcionamento de suas novas usinas de laminação, em janeiro de 1940, a Belgo Mineira se tornou a maior siderúrgica da América Latina. Também naquela década foram inauguradas a Companhia Siderúrgica de Barra Mansa e Companhia Metalúrgica Barbará. O Brasil, ainda dependia de produtos importados (IAB, 2013).

Ainda no Governo de Getúlio Vargas, a criação do plano siderúrgico nacional foi um marco de grande importância para o Brasil. O cenário de permanente dependência brasileira de produtos siderúrgicos importados começou a mudar após o início do Estado Novo. Era uma das metas de Getúlio Vargas fazer com que a indústria de base brasileira crescesse e se nacionalizasse. De forma gradativa, o Estado foi assumindo a responsabilidade pela produção de determinados insumos básicos. Assim, através do Decreto-lei nº 2.054, assinado em 4 de março de 1940, foi criada a Comissão Executiva do Plano Siderúrgico Nacional, diretamente subordinada ao Presidente da República (IAB, 2013).

A partir dos anos 40, o cenário começou a mudar. Foi inaugurada a Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, em Volta Redonda, que começou a produzir seu próprio coque metalúrgico. Além dos altos-fornos, a empresa possuía aciaria e laminações, que marcaram o início da autonomia brasileira em ferro e aço. Para Vargas, o desenvolvimento da produção siderúrgica em grande escala era primordial para o processo de industrialização do país. Em 1950, a produção nacional de aço alcançou 788 mil toneladas, passando a 5,5 milhões de toneladas em 1970 (IBS, 2018). Nesta mesma década, foi criada a Vale do Rio Doce (CVRD) com o intuito de reduzir a dependência de manufaturados vindos do exterior. Por meio do Decreto nº

4.352 de 1º de junho de 1942, sancionado pelo presidente Getúlio Vargas, foi instituída a empresa de capital misto, que objetivava explorar as jazidas de minério de ferro da região de Itabira, conhecida como Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. Sua criação fez parte de um projeto de desenvolvimento econômico que visava à industrialização do país e estava relacionada à criação da CSN (IAB, 2013). Além disso, em 1944, um povoado conhecido como “Ribeirão do Timóteo”, à beira da estrada de ferro Vitória-Minas, foi fundada a Companhia Acesita – Aços Especiais Itabira, pelos engenheiros Amyntas Jacques de Moraes, Percival Farquhar e Athos Lemos Rache. Em 1949, entrava em operação o alto forno nº 1, maior equipamento de redução a carvão vegetal do mundo, com capacidade de produção de 200 t/dia. O empreendimento integrado de siderurgia e aços especiais foi pioneiro na América Latina e tinha sua produção voltada para o abastecimento do mercado interno (IAB, 2013).

Ao longo da história, foi instalada em 1952 a Companhia Siderúrgica Mannesmann, atual Vallourec, em Minas Gerais, a pedido do governo brasileiro, para atender à necessidade do fornecimento de tubos de aço sem costura à indústria petrolífera nacional em crescente desenvolvimento. A Mannesmann foi o primeiro investimento de uma empresa alemã fora da Alemanha depois da Segunda Guerra. A criação da Petrobrás neste período foi essencial para a permanência de uma fábrica de tubos no país. Nesta mesma década, foi criada pelo presidente Juscelino Kubitschek a USIMINAS - Usinas Siderúrgicas de Minas Gerais, no Vale do Rio Doce (IAB, 2013).

Outro marco legal que ocorre foi o Decreto nº 60.642, que criou o Grupo Consultivo da Indústria Siderúrgica (GCIS), ligado ao Ministério da Indústria e do Comércio, durante o período militar em 1967. Na área econômica, Costa e Silva procurou fortalecer o setor industrial e determinou que o Grupo, compostos por presidentes de companhias siderúrgicas, tinha o prazo de 60 dias para sugerir um programa de expansão da siderurgia nacional. As recomendações propostas pelo GCIS forneceram as diretrizes para a criação do Conselho Consultivo da Indústria Siderúrgica (Consider) em 1968. O conselho tinha por objetivos estabelecer as diretrizes básicas do desenvolvimento da indústria siderúrgica nacional, coordenar e complementar os estudos, visando ao estabelecimento de um sistema de administração integrada das empresas siderúrgicas, nas quais o governo possuía participação majoritária, além de supervisionar os programas de expansão e a política

de comercialização e de preços da indústria siderúrgica nacional (Brasil, 1968). Órgão ligado ao Ministério da Indústria e do Comércio, em 1970, o Consider se transformou em conselho deliberativo e se denominou Conselho Nacional da Indústria Siderúrgica, no qual, elaborou expansão da capacidade de produção de aço no Brasil, por meio do Plano Siderúrgico Nacional, em 1971.

No início da década de 70, as empresas estatais respondiam por 70% da produção, com exclusividade nos produtos planos. Parte da produção já era exportada. Em 1973, foi inaugurada a primeira usina integrada, com redução de aço baseada no gás natural: Usina Siderúrgica da Bahia – USIBA. Em 1986, a Companhia Siderúrgica Tubarão – CST, entrou em operação e, teve início o funcionamento da Açominas em Ouro Branco – Minas Gerais (IAB, 2013).

A década de 80 ficou marcada pela profunda crise no País, no qual ficou conhecida como “década perdida”, caracterizada por inflação alta, aumento da dívida externa e esgotamento do modelo de desenvolvimento, que se notabilizava pela intervenção do Estado na economia (Neves et al., 2011). Com retração no mercado interno, o país voltou-se para a exportação de aço. Porém, a crise tinha amplitude mundial e em muitos países havia restrições às importações. Neste período, a siderurgia permaneceu estagnada, devido ao desaquecimento da economia mundial e também vulnerável com a competitividade do aço estrangeiro (IAB, 2013).

No início da década de 90, o parque siderúrgico nacional contava com 43 empresas, sendo cinco integradas a coque, nove a carvão vegetal, duas integradas a redução direta e 27 semi-integradas. Os produtores independentes de gusa a carvão vegetal totalizavam 120 altos-fornos. Atualmente, o parque produtivo brasileiro é um dos mais modernos do mundo, sendo constituído por 25 usinas, sendo 11 integradas e 14 semi-integradas (IAB, 2013).

2.2. Conceitos Operacionais Básicos

Esta sessão foi baseada em algumas literaturas como de Silva e Quintão (1991), Geerdes et al., (2009), Mourão e Gentile, (2007); Fernandes, (2012) e USIMINAS (2012) e Quites (2012).

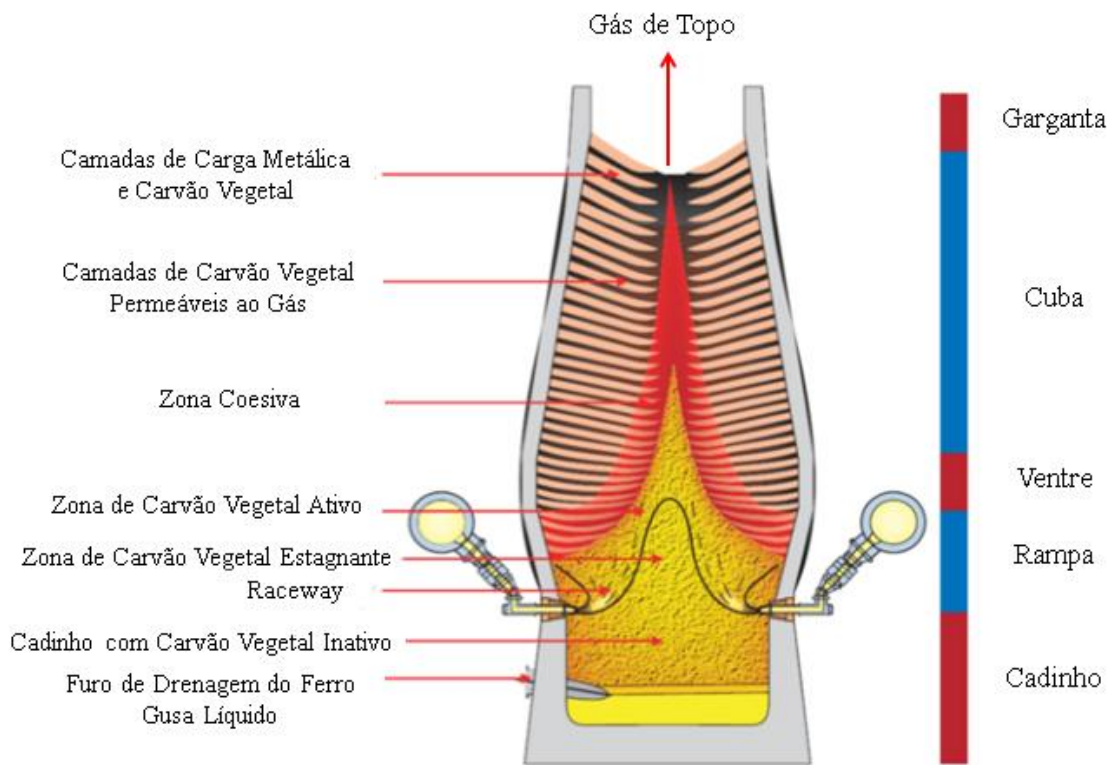
a) O Equipamento

O alto forno é o principal equipamento utilizado na metalurgia para a obtenção do ferro gusa líquido. O ferro gusa é uma liga metálica a base de ferro (Fe – 90% a 95%) e carbono (C- 3,5% a 5,0%), no qual a qualidade da matéria prima e controle do processo de produção interferem na qualidade química e física do produto.

O alto forno é um sistema em contracorrente utilizado para obter o primeiro estágio do aço a partir de óxidos de ferro, denominado de ferro gusa. Em estado líquido e a uma temperatura em torno de 1500 °C, o ferro gusa deve possuir qualidade e quantidade necessárias para o bom andamento dos processos produtivos subsequentes.

Resumidamente, o alto forno é um reator a contracorrente, onde os óxidos metálicos (minério de ferro granulado, sinter e/ou pelota), combustível sólido (carvão vegetal ou coque) e os fundentes (calcário, dolomita) são carregados à temperatura ambiente pelo topo do equipamento, que por gravidade, se movimento em direção à base. Neste movimento, a carga é aquecida pelos gases ascendente ate atingir o ponto de amolecimento e fusão. Os gases quentes são produzidos pelo ar quente soprado pelas ventaneiras, que com o auxilio de combustíveis, gera energia suficiente para as reações diretas e indiretas, responsáveis por produzir o ferro gusa e a escória.

O alto forno é uma estrutura cilíndrica, de grande altura e diferentes volumes. Esta, por sua vez, é constituída de três partes essenciais: cadinho, rampa e cuba, no qual abrigam as regiões de maior variação térmica. A Figura 5 mostra o corte esquemático de um alto forno.



Fonte: Geerdes (2009) adaptado.

Figura 5: Perfil de um alto forno.

O equipamento de redução pode ser dividido em:

- **Topo:** Parte mais alta do equipamento. Nesta região, ficam posicionados os equipamentos de carregamento e distribuição de carga sólida sobre a garganta (throat), diversos sensores que medem o nível da carga, o perfil da carga (burden layers), a temperatura e composição dos gases (top gases) produzidos pelas reações.
- **Cuba:** Compreende a maior parte volumétrica do alto-forno, sendo de formato tronco-cônico, com o maior diâmetro na base inferior. Este formato tem como objetivo facilitar a descida da carga e compensar seu inchamento por aquecimento.
- **Ventre:** Parte cilíndrica situada logo abaixo da cuba, que possui as maiores oscilações de temperatura em função da variação entre os pontos de amolecimento e fusão da carga metálica, denominada zona coesiva.

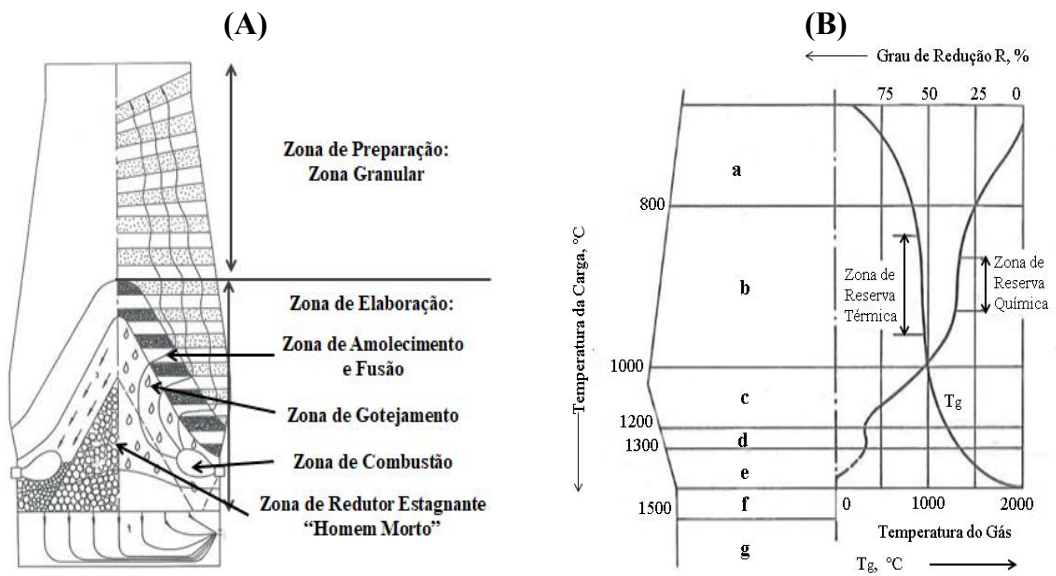
- **Rampa:** Região de tronco - cônico, com o menor diâmetro na parte inferior, sendo que este formato ajuda a sustentação da carga. Nesta região ocorre o gotejamento do ferro gusa e escória entre os espaços da camada do carvão vegetal em direção ao cadinho.
- **Cadinho:** É a parte inferior do alto-forno, e tem como finalidade armazenar e escoar por um período de tempo controlado, o ferro gusa e escória. O ferro gusa e escória proveniente da zona de gotejamento atravessam os poros da zona de carvão vegetal estagnante e decantam na base do cadinho. O processo de separação destes dois produtos ocorre naturalmente por diferença de densidade. A escória possui densidade $2,6 \text{ t/m}^3$ e o ferro gusa $7,0 \text{ t/m}^3$, ou seja, a escória flutua sobre o ferro gusa líquido. No terço superior do cadinho está localizado as ventaneiras. Seu número depende do tamanho do alto forno. Através das ventaneiras o ar pré-aquecido é soprado no interior do alto forno o que origina a zona de combustão, denominada *raceway*.
- **Corridas de gusa e de escória :** O ferro gusa e a escória produzida no interior do alto-forno são armazenados no cadinho e vazados pelo furo de corrida para canais de corrida, com o auxílio de uma perfuratriz. Este mecanismo é denominado de corrida de alto-forno. No canal principal, ocorre a separação do ferro gusa e da escória pela diferença de densidade. Através de canais secundários, o ferro gusa é direcionado para o carro torpedo e a escória para o sistema de granulação de escória. O ferro gusa carregado no carro torpedo é enviado para a aciaria. A granulação de escória consiste em verter a escória líquida sobre um jato de água, o que proporciona a granulação e o resfriamento da mesma.

b) Zonas internas do alto forno

Com base em estudos de dissecação de altos-fornos realizados na década de 70 no Japão, onde equipamentos em operação, totalmente carregados de matérias-primas como se estivesse em operação normal, foram congelados e dissecados (McMaster University, 1999). Após o resfriamento utilizando-se água, fez-se amostragem desde o topo até o cadinho para se estudar as características dos materiais carregados em cada região do forno. Além da sondagem, foi possível observar a formação bem definidas de cinco zonas internas no alto forno, no qual, estavam distribuídas entre a zona de preparação - é a região que o carvão vegetal não

apresenta reações gasosas - e zona de elaboração - é a região em que ocorre a reação de Boudouard, e o consumo de carvão no forno-, conforme indica a Figura 6.

Os resultados obtidos revolucionaram os conhecimentos científicos do estado da carga no interior do forno, por identificar as características principais de cada zona interna do alto forno, assim como, às reações, perfis de temperatura e grau de redução. Além disso, o conhecimento sobre as zonas do alto forno introduziu consideráveis modificações, não só nas práticas operacionais bem como na própria concepção do aparelho.



Fonte: Silva e Quintão (1991) adaptado.

Fonte: Ottow et al., (1989)

Figura 6: (A) Visão geral do processo em contracorrente. (B) Zonas de reação e perfis de temperatura e grau de redução no alto-forno. a) Redução indireta Fe_2O_3 e Fe_3O_4 ; b) Redução indireta de Fe_xO ; c) Redução direta da reação de wustita e Boudouard; d) fusão de ferro e escória; e) Redução de metalóide e FeO na escória; f) Combustão na frente das ventaneiras; g) cadinho.

- **Zona granular:** Nesta zona o minério (sinter, pelotas, granulados) e o carvão vegetal mantêm a sua configuração em camadas tais como foram carregados, ou seja, camadas alternadas de carvão vegetal e de fonte de minérios. Nesta região existem apenas duas fases (gases e sólidos), portanto a redução dos óxidos de ferro ocorre apenas no estado sólido.
- **Zona coesiva ou zona de amolecimento e fusão:** É constituída de camadas de carvão vegetal e camadas coesivas alternadas. As camadas coesivas são formadas de

massas semifundidas de partículas de minério, praticamente impermeáveis ao fluxo gasoso, que passa preferencialmente através das camadas de coque.

- **Zona de gotejamento:** Esta região contém carvão vegetal na forma sólida, onde o ferro fundido e escória gotejam. Ao encontra a zona de carvão estagnante, importantes reações de incorporação de elementos de químicos ao ferro gusa e escória acontecem durante a travessia em direção ao cadinho.
- **Zona de combustão:** É uma região parcialmente vazia em frente às ventaneiras, devido à elevada energia cinética de sopro do ar quente. À medida que as partículas de carvão vegetal circulam, vão sendo consumidas pela reação com o O₂, gerando o gás redutor e a energia.

Nos últimos 70 anos um número grande de siderurgistas tem se dedicado a estudos teóricos dos diversos fenômenos que ocorrem em um alto forno (Assis et. al, 1982). No entanto, poucos estudos são realizados em escala operacional para avaliar o efeito da qualidade do carvão vegetal na produção de ferro gusa em altos fornos. Os fenômenos de gaseificação do carbono, assim como, fenômenos térmicos e químicos associados à redução do minério de ferro possuem uma grande relação com a qualidade da matéria prima e distribuição de carga no alto forno.

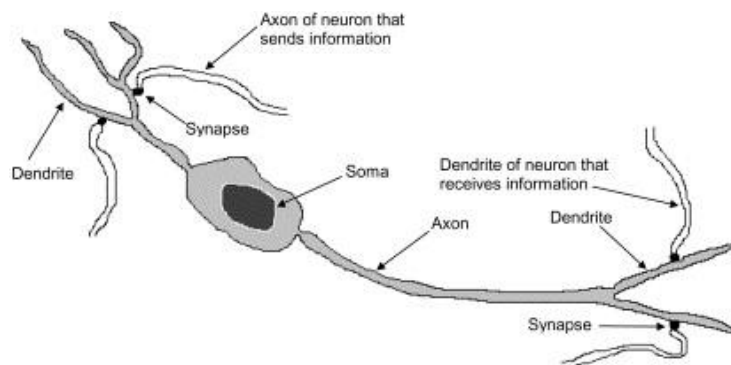
De acordo com Burgess (1985), a avaliação do comportamento da zona de combustão em termos de profundidade, forma, distribuição de temperatura, distribuição da composição do gás e permeabilidade periférica ao fluxo de gás é de grande interesse. É de fundamental importância para as operações de alto-forno que o fluxo de gás quente seja mantido no centro do forno, atuando nas oxidações localizadas na zona de elaboração, a fim de manter as fases de escória e ferro na forma líquida naquele ponto. De acordo com Austin et al., (1998), quanto menor a taxa de emissão de saída de dióxido de carbono, melhor foi o aproveitamento dos gases de redução, reduzindo a taxa de consumo de combustível enquanto aumenta a produtividade do alto forno.

2.3.Redes Neurais Artificiais

As redes neurais artificiais (RNA) estão inseridas dentro da área conhecida como sistemas inteligentes inteligência artificial ou inteligência computacional. Pesquisas com o uso de RNA têm sido motivadas, devido ao reconhecimento de que o cérebro humano é capaz de processar informações altamente complexas, não lineares e paralelas, de uma forma inteiramente diferente do computador digital convencional (Haykin, 2001).

Uma RNA pode ser definida como um modelo computacional inspirado no sistema nervoso dos seres vivos com a capacidade de aquisição e manutenção do conhecimento elevada habilidade em mapear sistemas não lineares e aprendizado empregando informações (medidas, amostras ou padrões) obtidas (Silva et al., 2010).

No processamento de informações do cérebro humano, a célula elementar do sistema nervoso central, denominada neurônio, conduz estímulos elétricos por meio de impulsos sobre determinadas condições de operação (Figura 7). O neurônio é regido com o objetivo de produzir ações apropriadas para cada um de suas funcionalidades, tais como pensar e memorizar. (Yudofsky e Hales, 2014).



Fonte: Kalogirou, (2001)

Figura 7: Neurônio biológico

Um neurônio pode ser dividido em três partes principais: em dendritos, corpo celular (conhecida como soma) e axônio (Yudofsky e Hales, 2014). De acordo com os mesmos autores, os dendritos (*Dendrite*) tem a função de captar os estímulos vindos de diversos outros neurônios (conectores). O corpo de uma célula processa todas as informações advindas dos dendritos a fim de produzir um potencial de ativação que indicará se o neurônio poderá disparar um impulso elétrico ao longo do

axônio (*Axon*). É no corpo celular que se encontram as principais organelas citoplasmáticas (núcleo, mitocôndria, centríolo, lisossomo) do neurônio. O axônio é um prolongamento único que tem a função de conduzir os impulsos elétricos para o próximo neurônio. A transferência deste impulso é realizada pela sinapse (*Synapse*) via terminações com ramificações denominadas de terminações sinápticas. Vale ressaltar que a transferência ocorre sem nenhum contato físico entre suas junções (fendas) sinápticas com os dendritos do neurônio receptor.

Apesar de parecer simples, todos os neurônios do cérebro humano, trabalham com um conjunto de sentimentos, sensações, pensamentos, respostas emocionais e motoras, no qual, são canalizadas pelo processo de aprendizagem e comunicação entre os neurônios. Para desenvolver as atividades diárias, estima-se que o cérebro humano possui o equivalente a 10^{12} a 10^{13} neurônios. Cada um forma uma média de 10^3 conexões, o que é uma estimativa mínima, de modo que o cérebro tem na ordem de 10^{15} a 10^{16} sinapses (Yudofsky e Hales, 2014).

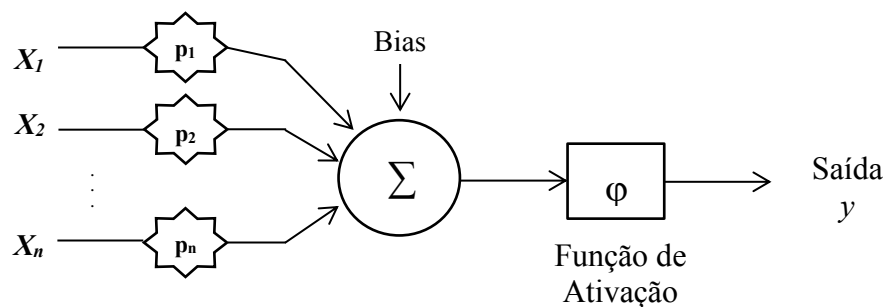
Com base na dinâmica de funcionamento dos neurônios biológicos, as redes neurais artificiais foram desenvolvidas por meio de modelos computacionais que apresentam um modelo matemático inspirado na estrutura neural de organismos inteligentes e que adquirem conhecimento através da experiência. Em 1943, os trabalhos realizados por Warren McCulloch e Walter Pitts, criam a primeira ideia de neurônio artificial com o objetivo de descrever um modelo artificial para um neurônio biológico do sistema nervoso. As redes neurais também são referidas na literatura como *neurocomputadores*, *redes conexionistas*, *processadores paralelamente distribuídos* etc. (Haykin, 2001).

O entusiasmo pela pesquisa neste campo motivou a aplicação das RNA em diversas áreas da ciência e engenharia para solucionar problemas advindos das mais diferentes áreas de conhecimento. As RNA têm sido útil em diversas áreas da ciência e engenharia como: na medicina, robótica, reconhecimento de padrões, previsão, sistemas de energia, manufatura, otimização, processamento de sinais e ciências sociais/psicológicas (Kalogirou, 2001).

Vários pesquisadores utilizaram a RNA em experimentos como Khan et al., (2001) para a predição de câncer com base no perfil genético; previsão do preço do petróleo (Ignácio et al., 2017) e Ghobadian et al., (2009) para previsão de desempenho de um motor a diesel utilizando combustível de biodiesel, entre outros. Na ciência florestal a RNA está sendo aplicada para predição de volume de árvores

(Gorgens et al., 2009; Binoti et al., 2014), na estimativa da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto (Binoti et al., 2013); na redução dos custos de inventário de povoamentos equiâneos de eucalipto (Binoti et al., 2012), entre outros.

De acordo com Haykin (2001), o modelo de neurônio artificial pode ser simplificado conforme a Figura 8. Um neurônio é uma unidade de processamento de informações que é fundamental para a operação de uma rede neural. O modelo engloba as características mais simples de um neurônio biológico, sendo o mais utilizado nas diferentes arquiteturas de RNA.



Fonte: Haykin (2001)

Figura 8: Modelo não-linear de um neurônio.

Os diversos sinais de entrada (variáveis independentes), são representados pelos conjuntos $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, esses são análogos aos impulsos elétricos captados pelos dendritos como no neurônio biológico. Os pesos sinápticos $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ou *elos de conexão* são valores usados para ponderar cada uma das variáveis de entrada da rede, permitindo quantificar suas relevâncias em relação a funcionalidade do respectivo neurônio. Desta forma, cada sinal de entrada x multiplica-se com seu respectivo peso sináptico p (Haykin, 2001). O somador (Σ) possui a função de agregar todos os sinais de origem, ponderados pelas respectivas sinapses do neurônio, para produzir um valor de potencial de ativação. A *função de ativação* (ϕ) ou *função restritiva* (limita) o intervalo permissível de amplitude de sinal de saída a um valor finito. A Figura 8 mostra também uma *bias* aplicada externamente. Assim, a saída (y) consiste em um valor final, produzido pelo neurônio em relação a um determinado conjunto de sinais de entradas, que pode ser utilizado por outros neurônios que estão sequencialmente conectados (Silva et al., 2010).

O *bias* ou *viés* têm o efeito de aumentar ou diminuir a entrada líquida da função de ativação, dependendo se ele é negativo ou positivo, respectivamente. Os *bias* podem ser vistos como um erro aproximado, uma vez que, expressa a incapacidade da rede neural definida pela função $F(x,p)$ de aproximação com precisão a função de regressão (Haykin, 2001).

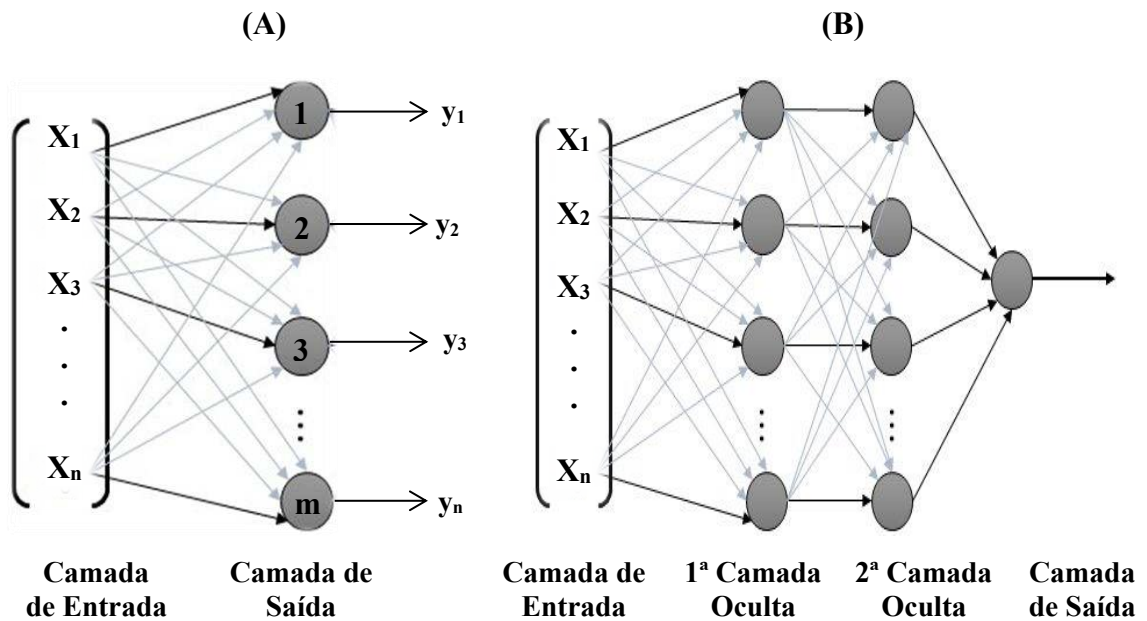
As redes neurais artificiais se diferenciam pela sua arquitetura e pela forma como os pesos associados às conexões são ajustados durante o processo de aprendizado. A arquitetura é definida pela forma como os diversos neurônios estão dispostos, uns em relação aos outros (Silva et al., 2010). O processo de aprendizagem pode ser considerado quando a rede neural é estimulada pelas informações de quando o ambiente passa por modificações nos seus parâmetros livres como resultado da estimulação. Os resultados desta estimulação indicam uma resposta nova ocorrida no ambiente, devido às modificações ocorridas na estrutura interna (Haykin, 2001).

A arquitetura de uma rede neural é dividida em três partes principais que são denominadas de camadas de entrada, uma camada oculta, intermediária ou escondida e uma camada de saída. De modo geral, a camada de entrada é responsável pelo recebimento de dados e informações. Estes dados e informações são normalizados para melhorar a precisão numérica frente às operações matemáticas realizadas pela rede. A camada oculta (compostas por neurônios) é responsável por extrair as características associadas aos dados da camada de entrada. Já a camada de saída (compostas por neurônios) possui a função de apresentar os resultados finais da rede, advindo dos algoritmos de aprendizagem dos neurônios da camada oculta (Silva et al., 2010).

A arquitetura de uma RNA é definida pelo número de camadas, pelo número de nós em cada camada, pelo tipo de conexão entre os nós (feedforward ou feedback – alimentação de frente) e topologia (Haykin, 2001). A topologia é definida como as diferentes formas de composições estruturais que esta possa assumir podendo assumir em uma mesma arquitetura 10 neurônios e outra com 20 neurônios (Silva et al., 2010).

Exemplos são apresentados na Figura 9. A rede representada pela letra (A) apresenta uma camada de entrada diretamente associada a um ou mais neurônios que vão gerar a resposta de saída. Observe que o fluxo de dados segue sempre em direção à camada de saída. Essas são empregadas em problemas de classificação de padrões e filtragem. Já a rede apresentada pela letra (B), é constituída por uma ou mais

camadas escondidas de neurônios. São empregadas em problemas de aproximação de funções, classificação de padrões, identificação de sistemas, otimização, robótica e controle de processos. (Braga et al., 2007).



Fonte: Zagnetto et al., (2015) adaptado.

Figura 9: (A) Exemplo de rede *feedforward* de camada simples composta por de x entradas e m saídas. (B) Exemplo de rede *feedforward* de camada múltiplas composta por x entradas, duas camadas ocultas e uma camada de saída.

Uma das propriedades mais importantes de uma rede neural artificial é a capacidade de aprender por intermédio de exemplos e utilizar o aprendizado para melhorar o seu desempenho. As redes neurais utilizam um algoritmo de aprendizagem cuja tarefa é ajustar os pesos de suas conexões (Braga et al., 2007). As RNA se diferenciam entre si pela forma como é formado o ajuste de um peso sináptico de um neurônio (Haykin, 2001). Uma vez treinada, espera-se que a RNA seja capaz de generalizar o conhecimento sobre os elementos em questão, de modo a classificar - corretamente - futuros exemplos para os quais a classificação ainda é desconhecida.

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arestis, P, Baltar, C T, Prates, D M. Brazilian Economic Performance since the Emergence of the Great Recession: The Effects of Income Distribution on Consumption. *Panaeconomicus*, Vol. 63, Issue 2 (Special Issue), p.157-174, 2016. DOI: 10.2298/PAN1602157A.
- Assis, P. S, Marinho L. Z. A., Porto, F. M. Utilização do carvão na siderurgia. In: Penedo, W. R. (Org.). *Produção e utilização de carvão vegetal*. Belo Horizonte: CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.279-318,1982.
- Austin, P. R, Nogami, H, Yag, J. I. Prediction of Blast Furnace Performance with top gas recycling. *ISIJ International*, 38 (3), p.239-245, 1998.
- Baer, W. *Siderurgia e desenvolvimento brasileiro*. Rio de Janeiro: Zahar, p.78-79, 1970.
- Bhattacharya, S. C, Shrestha, R. M, Sivasakthy, S. *State of the Art for Biocoal Technology*; Asian Institute of Technology: Bangkok, Thailand, 1988.
- Binoti, D. H. B, Binoti, M. L. M. S, Leite, H. G, Silva, A. Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, Recife, v.8, n, p.125-129, 2012.
- Binoti, D. H. B, Binoti, M. L. M. S, Leite, H. G. Configuração de redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. *Ciência da Madeira (Braz. J. Wood Sci.)*, Pelotas, v. 05, n. 01, p. 58-67, 2014.
- Binoti, M. L. M. S, Binoti, D. H. B, Leite, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa, v.37, n.4, p. 639-645, 2013.
- Botrel, M. C. G, Trugilho, P. F, Rosado, S. C. D. S, Silva, J. R. M. D. Genetic improvement of eucalyptus charcoal properties. *Revista Árvore*, 31(3), p.391-398, 2007.
- Botrel, M. C. G, Trugilho, P. F, Rosado, S. C. D. S, Silva, J. R. M. D. Selection of Eucalyptus clones for forest biomass and wood quality. *Scientia Forestalis*, 38 (86), p.237-245, 2010.
- Braga, A. P, Carvalho, A. P. L. F, Ludemir, T. B. *Redes neurais artificiais: teoria e aplicações*. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC Ed., xii, 226 p, 2007.
- Brasil. Decreto nº 62.403, de 14 de mar. de 1968. Cria o Conselho Consultivo da Indústria Siderúrgica (CONSIDER). Brasília, DF, mar. 1968. Disponível em:< <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1960-1969/decreto-62403-14-marco-1968-403518-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 19 ago. 2018.
- Brasil. Ministério de Minas e Energia - MME. *Anuário Estatístico do Setor Metalúrgico*. Ano base 2017. Disponível em:< <http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 25 abr. 2018.
- Burgess, J. M. Fuel combustion in the blast furnace raceway zone. *Energy Combustive Science*, v. 11, p. 61-82, 1985.
- CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. *Análise comparativa das diferentes tecnologias de carbonização e recuperação de subprodutos. Subsídios 2014 ao Plano Siderurgia do MDIC: Modernização da Produção de Carvão Vegetal*. Nota Técnica, Brasília. 28p, 2014.
- Downie, A, Crosky, A, Munroe, P. Physical properties of biochar. In: Lehmann, J, Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London. 2009. pp. 13-32.
- Feliciano-Bruzual, C, Mathews, J. A. Bio-PCI, charcoal injection in blast furnaces: state of the art and economic perspectives. *Revista de Metalurgia*, 49, p.458-68, 2013.
- Fernandes, M. V. *Treinamento para supervisores. Altos fornos da Usiminas*. Departamento de Coquerias e altos fornos . Divisão Técnica de altos fornos. 102p, 2012.

- FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Using charcoal efficiently. In: Simple technologies for charcoal making. Mechanical Wood Products Branch. Forest Industries Division. FAO Forestry Department, Rome, 1987. Disponível em: < <http://www.fao.org/docrep/X5328e/x5328e00.htm#Contents>>. Acesso em: 30 mai. 2018.
- Gaur, S, Reed, T. B. An Atlas of Thermal Data for Biomass and Other Fuels; report NREL/TP-433-7965; National Renewable Energy Laboratory (NREL): Golden, CO, 1995.
- Geerdes, M, Toxopeus, H, Vliet, C. V. D. Modern blast furnace ironmaking— an introduction. 2 nd ed. Amsterdam: IOS Press BV; 2009.
- Ghobadian, B, Rahimi, H, Nikbakht, A. M, Najafi, G, Yusaf, T. F. Diesel engine performance and exhaust emission analysis using waste cooking biodiesel fuel with an artificial neural network. *Renewable Energy*. 34, p.976–82, 2009.
- Gonçalves, J. L, Manella, R, Silva, F. R. The use of coke and chacoal in APERAM South America. In: Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração. Proceedings of 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI; 2012 Oct 14-18; Rio de Janeiro, Brazil. Rio de Janeiro: ABM; 2012.
- Gonçalves, L. J. The use of coke and charcoal in Aperam South America. 2012. 6 Congress on the Science and Tecnology of Ironmaking. Disponível em: <http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/Luiz%20Jos%C3%A9%20Gon%C3%A7alves%20The%20se%20of%20Coke%20and%20Charcoal%20in%20APERAM%20South%20America.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2018.
- Gorgens, E, Leite, H. G, Santos, H, Gleriani, J. Estimação do volume de árvores utilizando redes neurais artificiais. *Revista Árvore*, 33, p.1141-1147, 2009.
- Haykin, S. *Redes neurais: princípios e prática*. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.
- IBGE. Pesquisa da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS). 2018. Disponível em:< <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/289>>. Acesso em: 30 mai. 2018.
- Iglesias, F, Bracher, C. - Do ouro ao aço. Rio de Janeiro: Salamandra, p.19, 1992.
- IAB - Instituto do Aço Brasil Aço Brasil: Uma viagem pela indústria do aço. Belo Horizonte. 2013. Disponível em: http://www.acobrasil.org.br/site2015/files/LIVRO_ACO_BX.pdf. Acesso em 24 de Out. 2018.
- Kalogirou, S. A. Artificial neural networks in renewable energy systems applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.5, (4), p 373-401, 2001.
- Khan, J, Wei, J. S, Ringner, M, Saal, L. H, Ladanyi, M, Westermann, F, Berthold, F, Schwab, M, Antonescu, C. R, Peterson, C, Meltzer, P. S. Classification and diagnostic prediction of cancers using gene expression profiling and artificial neural networks. *Nature Medicine*, vol 7, n 6, p.673–679, 2001.
- Laguna, E. Aperam conclui conversão de usina para uso de carvão vegetal. *Economia. O globo*. 2011. Disponível em: <https://oglobo.globo.com/economia/aperam-conclui-conversao-de-usina-para-uso-de-carvao-vegetal-2697962>. Acesso em 22 jun. 2018.
- Malard, A. A. M. Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do estado de Minas Gerais. 201p. 2009. Dissertação (Mestrado em sustentabilidade sócio-econômica e ambiental). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG; 2009.
- Matos, M, Rios, C. A. Reatividade do carvão vegetal. In: Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.92-111, 1982.

McCulloch, W. S, Pitts, W. A logic calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bull. of Math. Biophys. 5, p 115–133, 1943.

McMaster University. Blast furnace ironmaking. Principles, designs and raw materials - An intensive course. Department of Materials Science and Engineering. Hamilton, Ontario, Canada, v. 1. 511p., 1999.

Meyers H, Jennings, R.F. Charcoal ironmaking—a technical and economic review of Brazilian experience. SEASIS Quarterly, 8 (3), p.38–80, 1979.

Mourão, M. B, Gentile, E. F. Visão geral do processo siderúrgico. In: Mourão, M. B, Yokoji, A, Malynowshyj, A, Leandro, C. A. S, et al. Introdução a siderurgia. ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e materiais, São Paulo, 428p, 2007.

Moutinho, V. H. P, Tomazello, M, Brito, J. O, et al. Influence of the wood physical properties on the charcoal physical and mechanical properties,” *Sci. For.*, vol. 44, no. 111, p. 557–561, 2016.

Neves, Osias Ribeiro; Neves, Isabella Verdolin; Camisasca, Marina Mesquita. GMMLE: 50 anos da história da metalurgia e da mineração em Minas Gerais. Belo Horizonte: Escritório de Histórias, p. 100, 2011.

Noldin, J. H. Energy efficiency and CO₂ reduction in the Brazil steel industry. In: Proceeding of 6th European coke and ironmaking congress. Düsseldorf, Germany; 2011.

Noumi, E. S, Blin, J, Valette, J, Rousset, P. Combined effect of pyrolysis pressure and temperature on the yield and CO₂ gasification reactivity of acacia wood in macro-TG. *Energy & Fuels*, 29, p. 7301-7308, 2015.

Okumura, Y, Hanaoka, T, Sakanishi, K. Effect of pyrolysis conditions on gasification reactivity of woody biomass-derived char. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 32, p. 2013–2020, 2009.

Oliveira, L. T, E Almeida, M. R. Avaliação do carvão vegetal. In: Penedo, W. R. (Org.). *Uso da madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte: CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.43-54, 1980.

Oliveira, E. Correlations between quality parameters of *Eucalyptus grandis* (Whill ex-Maiden) wood and charcoal. *Technical Bulletin, SIF* 2, 1990.

Ottow, M, Meller, H, Wessiepe, K, et al. Ullmann’s. *Encyclopedia of Industrial Chemistry*. A 14 Iron.VCH. Weinheim. 5th ed., 132p, 1989.

Pereira, B. L. C, Carneiro, A. de C. O, Carvalho, A. M. M. L, Colodette, J. L, Oliveira, A. C, Fontes, M. P. F. Influence of chemical composition of eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. *BioResources*, 2013, vol. 8, no. 3, p. 4574–4592.

Pereira, B. L. C, Oliveira, A. C, Carvalho, A. M. M. L, Carneiro, A. D. C. O, Santos, L. C, , Vital, B. R. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. *International Journal of Forestry Research*, 2012.

Quites, E. E. C. Curso de distribuição de carga em altos fornos. Usinimas. (Material Impresso). 57p, 2012.

Ricketts, J. A. Historical development and principles of the iron blast furnace. In: *Blast furnace ironmaking – Principles, design and raw materials* McMaster University, Canada. v1, p.1-14, 1999. 1999.

Rousset, P, Figueiredo, C, Souza, M, Quirino, W. Pressure effect on the quality of *Eucalyptus* wood charcoal for the steel industry: a statistical analysis approach. *Fuel Process Technology*. 92(10):1890–1897, 2011.

- Santos, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: UFMG, editor. Fórum Nacional Sobre Carvão Vegetal, 1. Belo Horizonte, Brasil. 2008.
- Santos, R. C. D, Carneiro, A. D. C. O, Castro A. F. M. et al. Correlation of quality parameters of wood and charcoal of clones of eucalyptus. *Forest Sciences*, no. 90, p. 221–230, 2011.
- Silva, I. N, Spatti, D. H, Flauzino, R. A. Redes neurais artificiais para engenharia e ciência aplicadas. Curso prático. Artliber. São Paulo. 400 p, 2010.
- Silva, M. A. M, Quintão, M. A. Especificações do carvão vegetal e seus efeitos na operação do alto forno. In: Carvão vegetal: produção, propriedades e aplicações na siderurgia. ABM – Associação brasileira de metais. Belo Horizonte, p.110- 162, 1991.
- SINDIFER - Sindicato da indústria de ferro gusa do estado de Minas Gerais. Anuário estatístico 2017. 2018. Disponível em: <http://www.sindifer.com.br/institucional/anuario/anuario.php>. Acesso em 02 jun. 2018.
- Singer, C, Holmyard, E. J, Hall, A. R, Williams, I. A. A history of technology. Oxford: Clarendon Press, v2. 1956.
- Suopajärvi, H. Bioreducer Use in Blast Furnace Ironmaking in Finland. Techno Economic Assessment and CO₂ Emission Reduction Potential. ACTA. Universitatis Ouluensis. C 513. Oulu 2014. 100p.
- USIMINAS – Usina Siderúrgica de Minas Gerais. Utilização do minério de ferro na siderurgia. 162 p, 2012.
- Venturini, N, Campinho Junior, E, Macedo, R. L. G, Venturini, R. P. Histórico. In: Vale, A.B, Machado, C. C, Pires, J. M. M, Vilar, M. B, Costa, C. B, Nacif, A. P. (Orgs.). Eucaliptocultura no Brasil: Silvicultura, Manejo e Ambiente. Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, p. 1-37, 2014.
- Vital, B. R, Carneiro, A. C. O, Pereira, B. L. C. Qualidade da madeira para fins energéticos. In: Santos, F, Colodete, J, Queiroz, J. H. Bioenergia e biorrefinaria – Cana-de-açúcar e espécies florestais. Viçosa-MG: Super Gráfica e Editora Ltda. 322-354p, 2013.
- Viveiro Santa Isabel. As mudas. Disponível em:< <http://viveirosantaisabel.com/textos1/As-Mudas/4/>>. Acesso em: 02 jun. 2018.
- Wakelin, D. H, Ricketts, J. A. The nature of ironmaking. In: The making, shaping and treating of steel. Chapter 1, 11th Edition. AISE, USA, p. 01-35, 1999.
- Yudofsky, S. C, Hales, R. E. Fundamentos de neuropsiquiatria e ciências do comportamento. Porto Alegre: Artmed, 2 ed, 2014.
- Zagnetto, C, Aguiar, L. H. M, Zaghetto, A, Vidal, F B. Projeto e implementação de uma rede neural artificial para detecção do mal-posicionamento rotacional de dedos em dispositivos de captura de impressões digitais multivista sem toque. XI Brazilian Symposium on Information System. Goiânia. p 211-218, 2015.

CAPÍTULO 1

RELAÇÕES ENTRE A DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL E A PRODUÇÃO DE FERRO GUSA

RESUMO

A heterogeneidade das propriedades físicas e químicas do carvão vegetal interfere na produtividade de um alto forno a carvão vegetal. Dentre as diversas características, a densidade do carvão vegetal é a de maior influência na ocupação do volume útil de um alto forno. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar as relações entre uso do carvão vegetal com diferentes densidades no processo de produção do ferro gusa. Devido à inexistência de trabalhos em escala operacional, este trabalho tem caráter inédito e pioneiro. Em um alto forno que produz em média 650 toneladas por dia, foram aplicadas três faixas de densidade de carvão vegetal, com um período de 13 dias em cada uma delas. A primeira foi a Faixa de Alta Densidade (FAD), variando entre 250, $1 \geq 280$ kg/m³; a segunda foi com Faixa de Média Densidade (FMD) entre 220 ≥ 250 kg/m³ e por último a Faixa de Baixa Densidade (FBD) variando entre 190 ≥ 210 kg/m³. Para cada faixa, avaliou-se o consumo de matéria prima, a permeabilidade do leito de fusão, a eficiência do alto forno e a produção de ferro gusa. Além disso, foram construídos cenários de avaliação de economia nas faixas aplicadas. Concluiu-se que, quanto maior a densidade do carvão vegetal maior a eficiência do alto forno, menor o consumo de carvão e de carbono de topo por tonelada de ferro gusa e melhor a permeabilidade do alto forno. Ao optar em utilizar um carvão de alta densidade foi possível atingir um ganho em receita bruta anual de 5.8 milhões de dólares, ao substituir a faixa de média densidade pela alta densidade, assim como, um ganho de 3.6 milhões de dólares/ano, caso a empresa deixe de consumir um carvão de baixa densidade e opte por consumir apenas um carvão de alta densidade.

Palavra-chave: Termorreductor; propriedade do carvão vegetal; ferro gusa.

1.INTRODUÇÃO

Em siderúrgicas a carvão vegetal, ter o conhecimento sobre as propriedades físicas e químicas das matérias primas, se tornou cada dia mais importante para obter maiores resultados de eficiências nos altos fornos e redução nos custos de produção do ferro gusa.

O carvão vegetal é o insumo que pode compor entre 25 a 40% dos custos de produção de uma tonelada de ferro gusa (Banco Mundial, 2009; Raad, 2015), devido a sua natureza heterogênea e ocupar mais de 50% do volume de um alto forno. Como forma de melhorar as propriedades físicas e químicas do carvão vegetal, vários estudos em melhoramento genético e avaliação de clones (Brotel et al., 2007; Assis, et al., 2012) e controle do processo de carbonização (Vieira et al., 2013; Souza et al., 2016) tem sido reportado na literatura, para que este insumo ofereça melhor permeabilidade do leito de fusão, sustentação mecânica e capacidade de troca térmica.

A densidade do carvão vegetal é uma das propriedades físicas de maior destaque que está diretamente relacionada com a produtividade do alto forno. Além disso, a oferta de carbono por unidade de volume está relacionada com a quantidade de carbono fixo em função da temperatura final de carbonização. Portanto, a qualidade do carvão vegetal é afetada pela densidade e teores de lignina da madeira e controle do processo carbonização (Santos et al., 2016). Quanto mais elevado esses valores, maior é a concentração de carbono por unidade de volume, o que aumenta a sua capacidade redutora, permanência da carga metálica e utilização do alto forno. A densidade do carvão vegetal possui estreita relação com densidade básica da madeira de origem, onde sua interação entre as características intrínsecas da madeira e a interferência do processo de carbonização, tem sido citada na literatura (Pereira et al., 2016).

Em virtude de que as siderúrgicas ainda recebem um carvão vegetal com alta variabilidade e buscam alternativas para se manter competitivas no mercado, obter informações sobre o desempenho do termorreduzidor nos altos fornos é essencial para obter ganhos e redução dos custos de produção em toda a cadeia produtiva. Desta forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar as relações entre uso do carvão vegetal com diferentes densidades no processo de produção do ferro gusa.

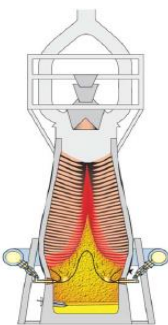
2.MATERIAL E MÉTODOS

O teste no alto forno foi desenvolvido em parceria com empresa produtora de carvão vegetal e uma usina integrada produtora de aço inox, aço elétrico e aços especiais, ambas localizadas no Estado de Minas Gerais. O alto forno utilizado na aplicação do teste está localizado no município de Timóteo, (Lat. 19°34'58" S, Long. 42°38' 38"O), Minas Gerais. As plantações florestais e as Unidades de Produção de Energia (UPE's) estão localizadas na região do Vale do Jequitinhonha. Essa região é caracterizada por possuir uma precipitação pluviométrica média de 1.160 mm, com temperatura média de 21°C. O clima é tropical de altitude (Cwa) com a predominância de Latossolo vermelho-amarelo distrófico típico com textura média. A região possui chapadas planas com vegetação nativa típica de cerrado e com altitude de 1.070 metros acima do nível do mar (ArcelorMittal, 2009).

2.1.Descrição do equipamento de redução

O alto forno da usina produz ferro gusa 100% a base de carvão vegetal, onde possui capacidade produtiva de 650 toneladas por dia, com capacidade de produção de 220.000 toneladas ano de ferro gusa. O equipamento consome em média o equivalente a 390 quilos de carbono por tonelada de ferro gusa. Os parâmetros técnicos estão listados na Tabela 1. A proporção de carga metálica foi à mesma utilizada durante todo o experimento onde foi composta por 43% de pelota e 57% de minério granulado.

Tabela 1: Parâmetros técnicos do alto forno 1.

	Parâmetros	Unidade	Alto-forno
	Ano de Fabricação	ano	1949
	Volume Interno Total	m ³	375,46
	Volume Útil	m ³	328
	Altura Total	m	19.80
	Altura Útil	m	17.40
	Número de Ventaneiras	n°	12
	Sistema de Abastecimento	-	Doble Bell
	Sistema de Carregamento	-	“Skip”

Fonte: Dados internos da empresa.

2.2.Fonte de Dados

2.2.1.Preparação do carvão vegetal

Foram selecionados povoamentos de clones de eucalipto com sete anos de idade, de espaçamentos distintos sob regime de alto fuste. As espécies selecionadas foram provenientes de onze cultivares pertencentes ao gênero *Eucalyptus* e uma cultivar pertencente ao gênero *Corymbia*.

Desde a colheita até o enchimento dos fornos de carbonização, todo o material utilizado foi estratificado em duas sessões, com objetivo de reduzir a variabilidade das características da madeira. O método de estratificação consiste em dividir o fuste em parte inferior (base da árvore até à sessão central) e superior (sessão central a ponta da árvore). Isto permite maior controle do processo de carbonização, assim como, da qualidade do carvão em função da diminuição da heterogeneidade do diâmetro. Os fornos utilizados para a carbonização da madeira foram o modelo RAC 700, localizados nas unidades de produção de energia. O forno de alta produtividade possui capacidade de 700 st de madeira, funcionamento mensal girando em torno de 1,76 fornadas. A carbonização foi monitorada e controlada por meio de sensores infravermelhos e sistema supervisório.

Além dos 12 genótipos, no momento da expedição foram formuladas cargas de carvão vegetal denominadas de “Mix”. A mistura ou “*Blend*” de carvão vegetal de vários clones configuraram cargas de carvão vegetal, capazes de suprir as faixas de densidade estudadas. Na Tabela 2, pode-se observar com maior detalhe os clones utilizados e suas respectivas densidades a granel, no qual, foi determinada pelo volume do caminhão (m³) e a diferença entre o peso carregado e a tara da composição veicular de transporte.

Tabela 2: Valores médios de densidade a granel do carvão vegetal (kg/m³) por clones.

Cultivar	Máximo	Mínimo	Média	CV (%)
1	297,69	220,52	259,77	5,43
2	209,80	201,09	207,19	1,99
3	233,00	203,58	226,62	3,34
4	230,84	188,04	202,75	8,39
5	211,06	181,93	203,58	3,83
6	232,93	178,71	206,15	5,21
7	272,47	193,78	225,25	9,38
8	238,51	166,15	214,32	7,30
9	233,94	178,47	209,78	6,49
10	209,16	174,89	198,28	5,84
11	288,18	225,35	249,67	9,80
12	278,73	252,31	263,02	4,28
<i>MIX</i>	238,82	185,00	224,93	5,51

Fonte: Dados internos da empresa.

As análises de teor de carbono fixo, materiais voláteis, cinzas, umidade, tamanho médio e resistência a compressão, foram realizadas pelo laboratório da empresa.

A execução da pesquisa foi realizada em função do planejamento da empresa. A expedição do carvão vegetal e tempo de realização do teste no alto forno foram definidos pelos especialistas da área de produção de carvão vegetal e pelos especialistas da área de redução da usina siderúrgica.

2.3.Recebimento do carvão vegetal na usina siderúrgica

Todas as cargas de carvão vegetal provenientes das unidades de produção de energia eram direcionadas para o pátio de recebimento de matéria prima da usina siderúrgica. Neste local, os caminhões descarregam o carvão vegetal em uma plataforma suspensa onde o material é direcionado para os silos de armazenamento e peneiras para classificação granulométrica.

No peneiramento, o carvão é submetido a três principais peneiras com malha de 9,5 mm, 25,4 mm e 152,4 mm, no qual são separados os tiços, carvão para o alto forno e os finos para injeção, respectivamente. Na fase final de peneiramento, o carvão vegetal destinado para compor a carga do alto forno é separado em duas granulometrias. O carvão médio possui um tamanho médio objetivado de 20,65 mm e o carvão grosso, possui tamanho médio objetivado de 41,38 mm. Tanto o carvão vegetal quanto a carga metálica são transportados até o topo do equipamento de redução via carros *skippers*.

Os finos de carvão injetados à frente das ventaneiras são provenientes da *Injection Plant Carbon* (ICP) para a produção de energia. O ferro gusa líquido e a escória são obtidos por meio de um furo no cadinho realizado pela perfuratriz hidráulica, no qual, o ferro gusa é depositado nos carro torpedo e a escória segue por outro canal para solidificação. Na Figura 1 observa-se o *layout* de abastecimento de carvão e planta de redução na usina siderúrgica.

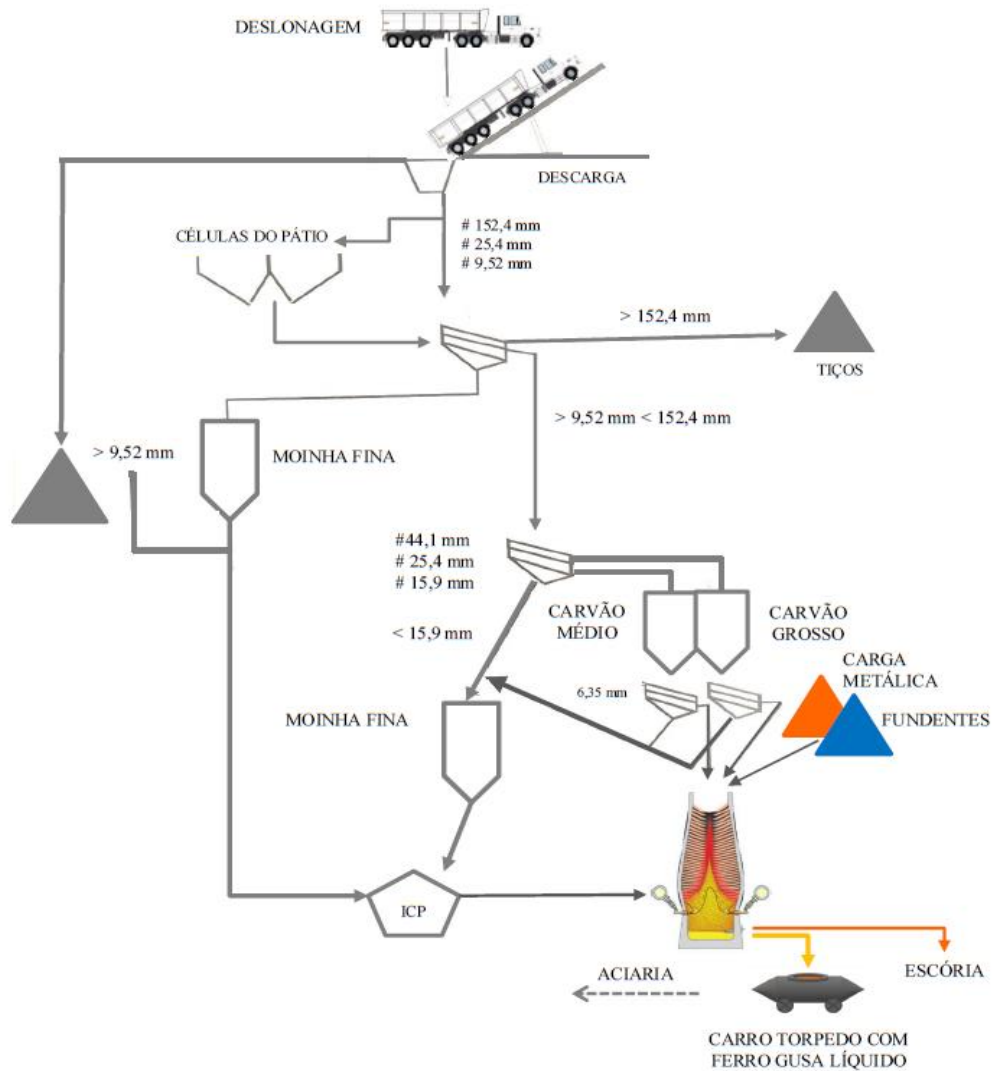


Figura 1: Fluxograma de recebimento de carvão vegetal e abastecimento do alto forno na siderúrgica (Isbaex, 2018).

A primeira faixa de densidade aplicada no alto forno foi a de alta densidade (FAD), no qual seus valores variaram entre $250,1 \geq 280 \text{ kg/m}^3$. A segunda faixa de média densidade (FMD) obteve valores variando de $220 \geq 250 \text{ kg/m}^3$ e a última

variou de $190 \geq 210 \text{ kg/m}^3$ definindo a faixa de baixa densidade (FBD). A avaliação do desempenho operacional do equipamento foi realizada durante 39 dias, no qual, a cada 13 dias eram feitas a troca de faixa de densidade de carvão vegetal.

Neste trabalho, foram analisados apenas os principais parâmetros verificados pelos especialistas da área de redução. Diariamente, a produtividade do alto forno é avaliada em função da densidade do carvão vegetal, consumo de matéria prima, rendimento de gás de topo, e permeabilidade. A pesquisa foi aplicada em uma rotina operacional, sujeito a oscilações dos parâmetros operacionais do alto forno e a períodos de chuvas. Desta forma, todos os parâmetros do equipamento foram controlados pelo operador do alto forno experiente, por questões de segurança. Os resultados foram submetidos a análises de estatística descritiva, por meio de planilhas eletrônicas.

2.4.Cenários

Com base nos valores médios de consumo de carvão vegetal (kg/t ferro gusa) e produção de ferro gusa (t), obtidos no teste, foram construídos cenários para analisar a economia e ganhos em receitas entre as faixas de densidade de carvão vegetal estudadas.

Este método de estudo é abordado por Tellis, (1997), como sendo uma das metodologias que permite explorar e compreender questões complexas, particularmente quando é necessário uma investigação holística e aprofundada. Através de um estudo de caso, um pesquisador é capaz de ir além dos resultados estatísticos quantitativos e entender as condições comportamentais através da perspectiva do ator. Ao incluir dados quantitativos e qualitativos, o estudo de caso ajuda a explicar tanto o processo quanto o resultado de um fenômeno por meio de observação completa, reconstrução e análise dos casos sob investigação (Tellis, 1997).

Portanto, os Cenários 1 e 2 foram construídos com base na mudanças de densidade do carvão vegetal carregada no alto forno. Desta forma, considerou-se a faixa de alta densidade como sendo a ótima, uma vez que, o ganho em densidade do carvão vegetal proporcionou maior produtividade e eficiência do processo. Sendo assim, no Cenário 1, a empresa opta em não receber um carvão de densidade média e estabelece que o carregamento do alto forno será apenas de carvão com alta densidade. Já o Cenário 2, foi construído quando a empresa estabelece uma política

de não receber um carvão com baixa densidade e carrega no alto forno, apenas um carvão que apresente alta densidade.

Nesta análise, o preço do carvão vegetal foi de US\$156,00/t¹ (AMS, 2017), referente ao mês de julho de 2017. No mesmo período, o preço do ferro gusa utilizado foi de US\$359,00/t (Steel on the net, 2018). Na avaliação anual, foi considerado um período de 360 dias, retirando os períodos de paradas para manutenção. Os dados primários foram tabulados em planilha eletrônica e analisados por meio de estatística descritiva.

¹ AMS considerou taxa de cambio de R\$3,20.

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1.Propriedades do carvão vegetal

Dos parâmetros que regulam a composição química e física do carvão vegetal, a temperatura de carbonização, assim como as propriedades da madeira, são os que contribuem para o ganho em qualidade do carvão vegetal. A Tabela 3 apresenta as propriedades do carvão vegetal utilizadas no teste.

Tabela 3: Propriedades do carvão vegetal por faixa de densidade aplicada.

Parâmetros	Faixas de Densidade (kg/m ³)	Máximo	Mínimo	Média	Coefficiente de Variação (%)
Teor de Carbono Fixo (%)	Alta	78,89	75,89	77,70	1,19
	Média	78,43	76,40	77,41	0,70
	Baixa	77,97	74,09	76,84	1,37
Teor de Materiais Voláteis (%)	Alta	22,81	20,81	21,74	3,00
	Média	22,81	20,97	21,80	2,51
	Baixa	23,08	18,15	21,50	5,71
Teor de Cinza (%)	Alta	1,46	0,99	1,15	13,71
	Média	1,56	0,87	1,23	17,08
	Baixa	2,08	1,22	1,50	15,67
Teor de Umidade (%)	Alta	8,19	4,03	5,17	23,84
	Média	7,29	5,02	6,04	10,36
	Baixa	6,76	4,19	5,23	14,02
Teor de Finos (%)	Alta	11,14	6,29	8,58	19,03
	Média	11,30	8,05	9,66	10,32
	Baixa	13,85	8,83	11,81	12,47
Tamanho Médio (mm)	Alta	39,93	35,16	37,41	3,64
	Média	40,81	37,61	39,00	2,36
	Baixa	40,79	37,71	39,11	2,42
Resistência a Compressão (kg/cm ²)	Alta	63,00	60,23	61,36	1,73
	Média	65,02	60,23	62,57	2,74
	Baixa	65,69	60,22	62,42	2,53

Em termos de teores de carbono fixo não houve grandes variações em função da faixa de densidade aplicada no teste. Isto ocorreu devido ao controle da entrada de oxigênio e da temperatura final de carbonização, via sistema supervisorio.

Com relação às matérias voláteis, observa-se maior variação nos teores da faixa com baixa densidade de carvão. A concentração dos voláteis do carvão também está numa relação direta com a temperatura final de carbonização. No processo de carbonização o efeito da eliminação dos voláteis modifica as características físicas do carvão (porosidade, diâmetro médio dos poros, densidade, etc.), o que pode alterar o

seu comportamento nos aparelhos de redução (Oliveira e Almeida, 1982). Os materiais voláteis influenciam na composição do gás do alto forno, reflete diretamente no seu poder calorífico, devido ao teor elevado de hidrogênio e hidrocarbonetos (Silva e Quintão, 1991).

Na faixa de alta densidade, observou-se que o teor de cinza teve menor variação do que nas faixas de média e baixa densidade. Um dos aspectos mais importantes no teor de cinzas está relacionado com sua composição, uma vez que algumas substâncias inorgânicas presentes nos materiais carbônicos funcionam como catalisadores e/ou inibidores da reação $C - CO_2$. As substâncias que mais afetam a reatividade do carvão são CaO ; Fe_2O_3 ; MgO e K_2O (Álcalis) (Silva e Quintão, 1991). No caso do carvão vegetal, o volume de cinzas é baixo, o seu efeito sobre a composição final da escória não causam grandes impactos (Mendes et al., 1982).

Apesar da faixa de alta densidade apresentar maiores teores de umidade, o carvão apresentou menores teores de finos e menor variação em termos de resistência a compressão. Isto significa que o aumento em densidade da madeira, contribui para o aumento em propriedades de carvão vegetal em processos de carbonização supervisionados. No entanto, os especialistas da área de redução relataram que, o uso de algumas espécies geram maiores teores de finos do que outras. Desta forma, observa-se que ainda há uma lacuna a ser explorada, em termos de seleção de genótipos com maior densidade, porosidade e resistência mecânica.

Em termos de tamanho médio e resistência a compressão o carvão vegetal apresentou valores dentro da faixa de preferência, conforme exposto na Tabela 1, Item 1. Em relação à resistência do coque, a resistência do carvão vegetal é um dos fatores que limita a capacidade dos altos fornos. O carvão é o elemento estrutural da carga do alto forno, o que requer resistência suficiente para suportar a compressão proveniente da carga sobre o mesmo (Silva e Quintão, 1991). A baixa resistência mecânica, umidade elevada e alto teor de voláteis do carvão vegetal, levam a degradação do carvão vegetal. Além de gerar maiores quantidades de finos durante o transporte e manuseio, o carvão vegetal altera a distribuição granulométrica, reduzindo, assim, a permeabilidade da carga no interior do alto forno (Mendes et al., 1982).

Apesar de que a princípio, não há grandes diferenças entre as propriedades do carvão vegetal, é necessário avaliar as relações entre a qualidade do carvão vegetal com os parâmetros do alto forno. O alto forno é um equipamento complexo e sensível a mudanças de qualidade da matéria prima, o que reflete diretamente no consumo e ganhos em produção de ferro gusa.

3.2. Influência da densidade do carvão vegetal no consumo de carvão vegetal, carga metálica e produção de ferro gusa.

Na Tabela 4 observa-se os valores de consumo das principais matérias primas da produção de ferro gusa em função da faixa de densidade de carvão vegetal. Dentre as faixas de densidade avaliadas, a faixa que apresentou menor consumo de carvão e carbono total com maior produção de ferro gusa foi a de alta densidade.

Tabela 4: Estatística descritiva do consumo médio de carbono, carvão vegetal, carga metálica e produção de ferro gusa, por faixa de densidade.

Parâmetros	Faixa de Densidade (kg/m ³)	Máximo	Mínimo	Média	Coefficiente de Variação (%)
Carvão de Topo (kg/t FG)	Alta	408	377	391	2,07
	Média	487	392	412	5,95
	Baixa	437	386	410	4,16
Carbono de Topo (kg/t FG)	Alta	294	273	283	2,36
	Média	343	287	298	5,17
	Baixa	317	279	296	3,50
ICP (kg/t FG)	Alta	107	76	92	9,85
	Média	107	55	90	15,90
	Baixa	116	82	101	9,65
Carbono Total* (kg/t FG)	Alta	393	352	375	3,35
	Média	403	383	389	1,56
	Baixa	421	368	396	4,11
Carga Metálica (t/dia)	Alta	1.559	1.518	1.541	0,92
	Média	1.557	1.501	1.534	1,10
	Baixa	1.566	1.518	1.534	0,84
Produção de Ferro Gusa (t/dia)	Alta	648	593	622	2,52
	Média	624	555	583	3,24
	Baixa	634	559	599	3,72

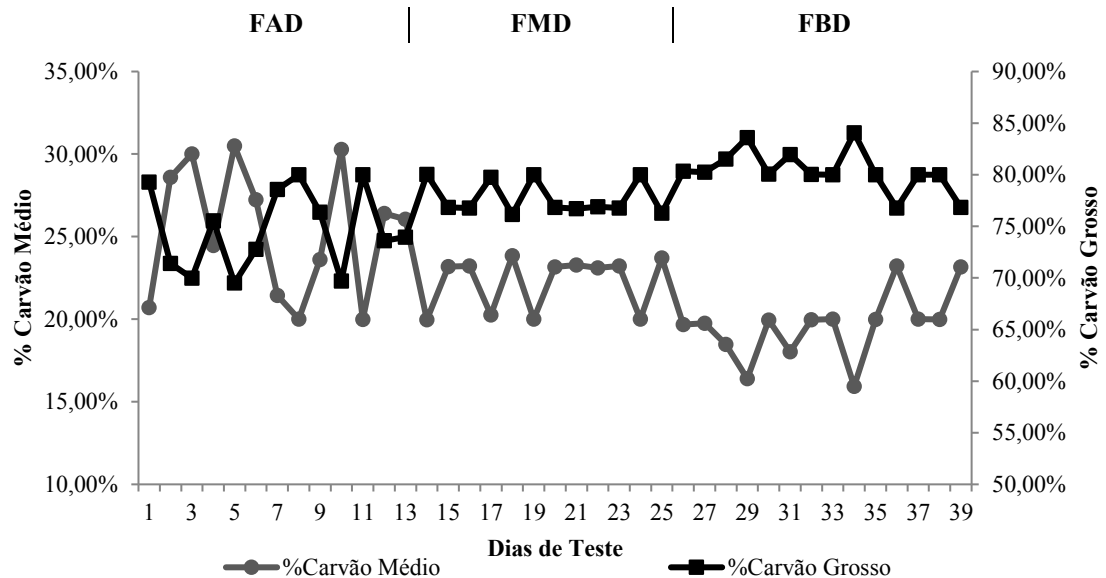
* Carbono total= Carbono de topo + Injeção de Carbono Pulverizado (ICP).

Durante o período de avaliação, observou-se que foi consumido um total de 9.477,250 toneladas de carvão vegetal para uma produção total de 23.452,000 toneladas de ferro gusa. Ao verificar o consumo total médio de carvão vegetal por tonelada de ferro gusa, por faixa de faixas de densidade, observou-se que foi possível reduzir o consumo de carvão em 254 e 282 quilos, ao comparar a faixa de alta com baixa densidade e alta com média densidade, respectivamente.

Observa-se que a faixa de baixa densidade teve maior produção que a faixa de média densidade. O aumento na produção de ferro gusa está relacionado a maior taxa de injeção de finos, que foi 33% maior que na faixa de média densidade. Além disso, características intrínsecas da madeira carbonizada, podem ter influenciado na maior oferta de porosidade, o que possibilita maior contato dos gases de redução.

Além da redução do consumo de carvão, outro ponto observado foi que a porcentagem de consumo de carvão médio e grosso no interior do alto forno. Conforme a Figura 2, após o período de teste do carvão de alta densidade (FAD),

houve um aumento no consumo de carvão grosso. Esta mudança está relacionada com a manutenção da permeabilidade do leito de fusão e balanço de massa de carbono do alto forno. Enquanto a faixa de alta densidade possuía um percentual médio de 74,67% de carvão grosso para 25,33% de carvão médio, as faixas de média e baixa densidade tiveram um aumento no percentual médio de carvão grosso de 77,95% e 80,39%, respectivamente, reduzindo a participação do carvão médio dentro do alto forno.



Legenda: FAD: Faixa de Alta Densidade (kg/m^3); FMD: Faixa de Média Densidade (kg/m^3) e FBD: Faixa de Baixa Densidade (kg/m^3).

Figura 2: Porcentagem de carvão vegetal de tamanho médio e grosso consumido em função das faixas de densidade de carvão.

A granulometria do carvão vegetal é uma característica física fundamental que compõe a estrutura permeabilizaste entre as camadas de minério. Segundo Assis et al., (2016) o tamanho da partícula do carvão vegetal permite a vazão dos gases de redução sem perigo de fluidização do reductor. A distribuição granulometria exerce um papel fundamental na distribuição dos gases de redução no alto forno, no qual, os fenômenos perturbadores podem ocorrer devido ao impedimento da passagem desses gases, como fenômenos aerodinâmicos (formação de caminhos preferenciais; fenômeno de fluidização) e fenômenos hidrodinâmicos (refluxo; retorno de líquido do sentido do topo do alto forno; engaiolamento) (Silva e Quintão, 1991). Além disso, o aumento na porcentagem de carvão grosso nas faixas de média e baixa densidade pode ter sido provocado pela diminuição da resistência mecânica. De

acordo com Brito (1993) a resistência mecânica do carvão vegetal tem implicações diretas sobre a sua granulometria, pois um carvão menos resistente degrada com maior facilidade, diminuindo seu tamanho médio no interior do alto forno.

Os resultados obtidos com a faixa de maior densidade estão de acordo com Mendes et al., (1982), Brito (1993), Neves et al., (2011), Carneiro et al., (2013), que relatam que quanto maior a densidade do termorreductor, maior a produtividade dos altos fornos, devido a menor utilização do volume útil com reductor. Ao adicionar um carvão vegetal de maior densidade, observa-se menor consumo de carbono total por tonelada de ferro gusa, o que permitiu maior entrada de carga metálica no alto forno (Figura 3).

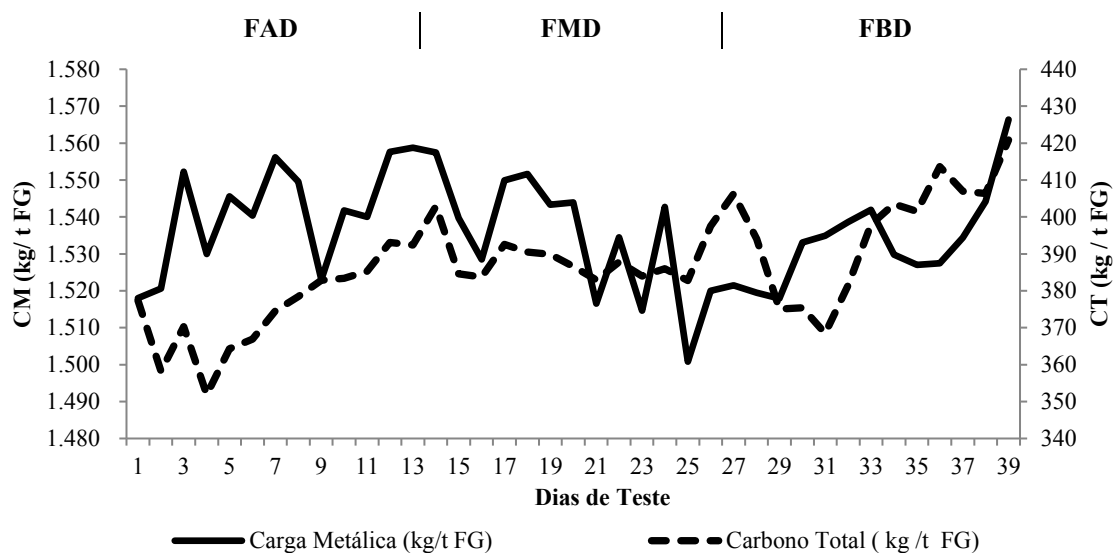


Figura 3: Consumo de carga metálica (CM) em relação ao consumo de carbono total (CT) em função da densidade a granel do carvão vegetal.

No entanto, ao aplicar um carvão com menor densidade, foi necessário maior quantidades de carbono pela mesma tonelada de ferro gusa. Este efeito se deve ao fato de maiores quantidades de carbono fixo por unidade de volume para carvão vegetal de maior densidade e vice-versa.

Um dos motivos de maior produtividade do alto forno, esta relacionado com a composição da carga metálica. Neste estudo, a carga metálica foi composta por 43% de pelota de minério enquanto o restante foi composto por minério granulado. De acordo com Fernandes (2012), a participação de cada um destes materiais na carga do forno, depende dos parâmetros operacionais, dimensão do forno, disponibilidade, quantidade e custo do produto final.

Em termos médios, ao avaliar os cenários entre o consumo de um carvão com alta e média densidade, o ganho de 30 kg/m³, resultou em um consumo médio de 6,95 kg de carga metálica para cada tonelada de ferro gusa produzida, com acréscimo de 22 toneladas de ferro gusa por dia. Por outro lado, ao comparar a diferença entre o melhor e o pior cenário – entre as faixas de alta com a baixa densidade – foi possível observar que houve um ganho em densidade de 58 kg/m³, no qual foi possível adicionar 7,48 kg de carga metálica por tonelada, o que resultou em um ganho em produção de 23 toneladas de ferro gusa por dia.

Ao avaliar o consumo de carbono entre as faixas de alta e baixa densidade, verificou-se que houve uma redução no consumo de aproximadamente 15 kg de carbono de topo com um aumento de 25 quilos de carbono de injeção por tonelada de gusa. Por outro lado, ao verificar o consumo de carbono entre as faixas de alta e média densidade, houve uma redução no consumo de 7 quilos de carbono de topo, com um aumento na injeção de 52 quilos por tonelada de ferro gusa. Portanto, foi possível observar com mais clareza que ao reduzir o carbono de topo é possível injetar mais carbono na forma de finos, o que impacta diretamente a composição dos custos com carvão vegetal por tonelada de gusa.

De acordo com Assis et al., (1982), a injeção de finos de carvão pelas ventaneiras implica na redução do consumo de carvão pelo topo e que à elevação da taxa de injeção de finos corresponde a um maior tempo de residência da carga metálica, para um mesmo nível de produção (Assis et al., 1982). A alteração da taxa de finos afeta fatalmente a produção em um alto forno, onde, o aumento na injeção, eleva a produção de ferro gusa e vice versa. Portanto, a injeção de finos de carvão vegetal é extremamente vantajosa, uma vez que, permite economia na fabricação do ferro gusa, devido à redução do consumo de carvão vegetal bruto, isto é, a quantidade de carvão de topo (Assis et al., 1982).

Contudo, foi possível observar que a densidade do carvão vegetal influencia no consumo de redutor, carbono e carga metálica que reflete diretamente na produtividade do alto forno. A Figura 4 apresenta a produtividade média de ferro gusa em função da densidade de carvão. Ao comparar a produtividade média entre as faixas de baixa para alta densidade, durante o período de avaliação, observa-se um ganho em produção de 294 toneladas de ferro gusa e entre as faixas de média para alta densidade houve um ganho de 512 toneladas de ferro gusa. Além do ganho em produtividade, vale ressaltar que durante o período de teste com o carvão de alta

densidade, a equipe da área de redução executou suas tarefas diárias com menos stress em relação às outras faixas, devido a maior estabilidade dos parâmetros do equipamento de redução.

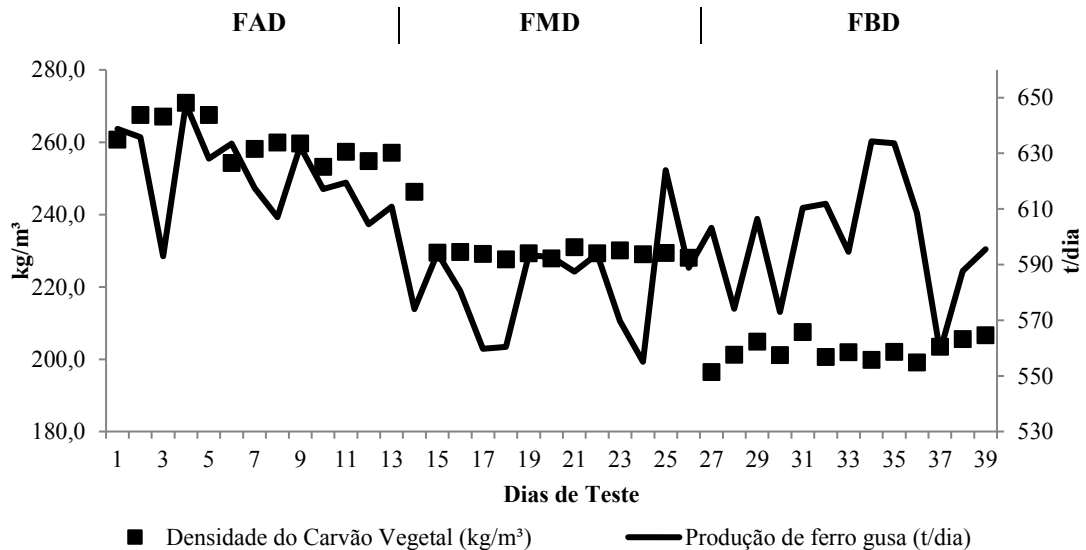


Figura 4: Produção de ferro gusa em função da densidade a granel do carvão vegetal.

Observa-se que nos dias de teste 2 e 24, há uma brusca redução na produção de ferro gusa sem registro de fenômenos aerodinâmicos ou hidrodinâmicos. A redução no abastecimento de carga metálica pode ser sido ocasionadas por mudança de turno de trabalho e problemas operacionais no sistema de abastecimento do alto forno.

Desta maneira, o ganho em produtividade foi observado em meio a todas as adversidades que uma rotina operacional pode trazer. Isto pode significar que em um ano, o impacto dessas diferenças podem representar ganhos econômicos e mudanças nas tomadas de decisão no setor florestal e siderúrgico.

3.3. Influência da densidade do carvão vegetal na permeabilidade do leito de fusão do alto forno e produção de ferro gusa.

Na rotina operacional de produção de ferro gusa, o alto forno é preenchido com camadas alternadas de carvão e carga metálica. Devido às diversas camadas em seu interior, a permeabilidade do carvão vegetal é melhor que a permeabilidade do minério. Isso se deve ao fato de que o termorreductor possui uma camada mais

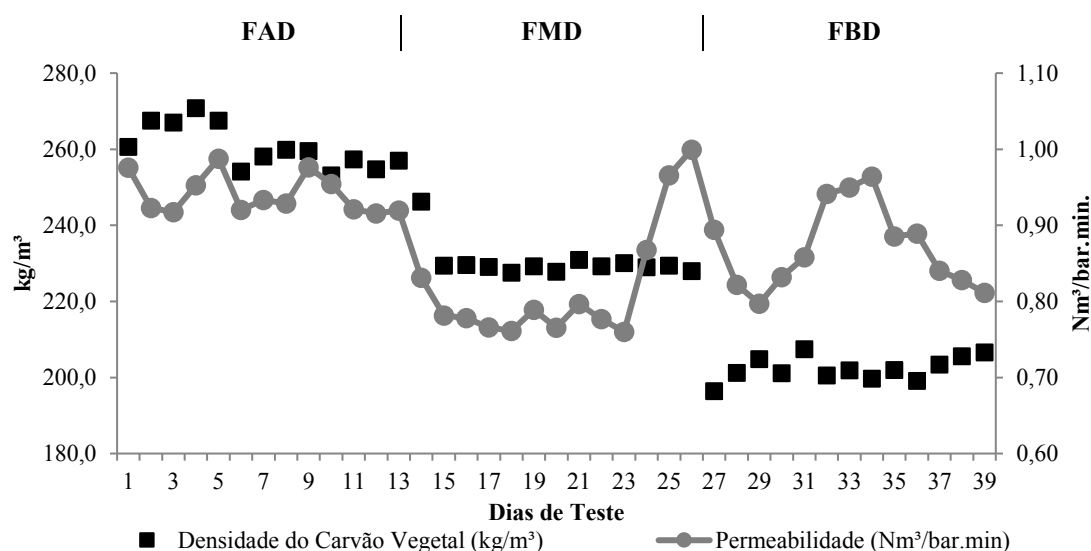
volumosa que o sinter, granulado ou pelota, o que permite uma maior fração de vazios.

Na Tabela 5, são apresentados os valores da permeabilidade no leito de fusão em função das faixas de densidade aplicadas e composição da carga metálica. Nota-se que na faixa de alta densidade, a permeabilidade obteve menor coeficiente de variação, ou seja, a vazão volumétrica de gás (Nm^3) se manteve maior e mais estável dentro do forno em uma determinada pressão, em relação às outras faixas (Figura 5), o que indicou uma maior facilidade de passagem dos gases de redução.

Tabela 5: Estimativas de permeabilidade do leito de fusão ($\text{Nm}^3/\text{bar}\cdot\text{min}$), em função das classes de densidade de carvão vegetal.

Faixas de Densidade (kg/m^3)	Máximo	Mínimo	Média	Coefficiente de Variação (%)
Alta	0,99	0,92	0,94	2,74
Média	1,00	0,76	0,82	9,69
Baixa	0,96	0,80	0,87	6,36

De acordo com Geerdes et al. (2009), a permeabilidade pode ser analisada entre 0 a 1, onde, 1 se refere a maior fração de vazios em função da distribuição do tamanho das partículas e quanto mais próximo de zero, menor os espaços vazios entre as partículas. Furnas e Joseph (1930) foram os primeiros a apontarem este estudo de que quanto maior o tamanho da partícula menor a resistência do fluxo de gás.



Legenda: FAD: Faixa de Alta Densidade (kg/m^3); FMD: Faixa de Média Densidade (kg/m^3) e FBD: Faixa de Baixa Densidade (kg/m^3).

Figura 5: Valores diários da permeabilidade da carga em função das faixas de densidade de carvão vegetal.

Observa-se que na faixa de baixa densidade há um aumento nas estimativas de permeabilidade. Este aumento pode estar relacionado à distribuição da carga e desequilíbrio térmico no interior do alto em função da mudança de faixa de densidade do carvão vegetal. Entre os dias 26 e de 31 a 34 do teste, houve seis fenômenos de engaiolamento de carga, sendo necessário reduzir a perda de carga (bar), vazão de ar (Nm^3/h) e temperatura de chama.

Dzermejko, (1999) e Zhou et al., (2005), explicam que a permeabilidade do alto forno pode ser afetada pela distribuição de tamanho das partículas. O fluxo de sólidos do alto forno possui uma relação íntima com o controle da permeabilidade, em grande parte, governa o fluxo das outras fases (Zhou et al., 2005). As partículas finas tendem a ocupar vazios entre grandes partículas, reduzindo assim a fração total de vazios. Por outro lado, Geerdes et al., (2009), explica que um AF pode ser composto por 35 a 45 camadas de material metálico e coque. A camada de minério é a que possui uma resistência de quatro a cinco vezes maior, ao fluxo de gás do que a do coque, o que dificulta o fluxo de gases de redução entre as camadas de matéria prima.

Devido à semelhança no processo de produção de ferro gusa a base de carvão vegetal e a base de coque, observa-se que a composição da carga metálica e carvão vegetal podem interferir na permeabilidade, assim como a porcentagem de fração fina da pelota de minério e a do carvão vegetal. A avaliação desses parâmetros é extremamente essencial para o bom funcionamento do alto forno, uma vez que o não monitoramento pode resultar em perda de produtividade do alto forno e maior consumo de matéria prima, aumentando os custos do ferro gusa.

Em uma rotina de recebimento de matéria prima, os materiais tendem a degenerar devido às condições climáticas e à manipulação repetitiva de empilhamento, correias de transporte, baldeio de ponte de minério, etc. A Tabela 6 apresenta a fração fina e teor de umidade do carvão vegetal. Este efeito foi devido à própria diferença de granulometria e teor de umidade onde a deficiência de peneiramento e/ou qualidade do carvão vegetal e condições climáticas da época, podem ter influenciado nos valores de coeficiente de variação. De acordo com Dzermejko, (1999), o monitoramento do teor de umidade e manutenção das peneiras vibratórias são essenciais para eliminar a maior parte dos finos nas caixas de armazenamento de coque ou carvão vegetal, sinterização e pelotas.

Tabela 6: Estatística descritiva da fração fina (< 9,52mm) e o teor de umidade do carvão vegetal.

Parâmetro	Faixas de Densidade (kg/m ³)	Máximo	Mínimo	Média	Coefficiente de Variação (%)
Fração Fina do Carvão Vegetal (mm)	Alta	25,34	15,78	21,38	14,52
	Média	21,50	14,98	17,90	11,95
	Baixa	21,49	14,89	18,24	10,03
Umidade do Carvão Vegetal (%)	Alta	7,45	4,55	6,34	12,43
	Média	7,67	5,02	6,14	12,15
	Baixa	6,99	4,54	5,77	12,13

Na produção de carvão vegetal, as frações finos e teor de umidade são parâmetros que também pode interferir no desempenho de um alto forno. A umidade da madeira enforada, comprimento, diâmetro e controle da taxa de aquecimento do forno são os principais fatores de maior geração de finos, devido à formação de fissuras na peça (Oliveira et al., 1982; Coutinho, 1988; Brito 1990; Carneiro et al., 2013). Em termos de teor de umidade, a higroscopicidade do carvão vegetal pode variar em função da umidade relativa do ar durante as estações do ano e período de estocagem.

Nota-se que, em termos de fração fina de carvão vegetal, apenas 1,8% estavam fora dos limites de especificação (LE), enquanto que 48,72% dos valores do teor de umidade estavam acima do limite inferior (LI), determinado para a estação seca do ano (Figura 6). Portanto, por mais que o uso de carvão mais denso tenha gerado maiores quantidades de finos, os valores não foram suficientes para gerar um impacto significativo no alto forno.

Grandes volumes de finos de carvão vegetal acima dos limites especificados para cada equipamento de redução podem acumular na frente das ventaneiras acarreta em uma mudança na zona de coesão e na permeabilidade, o que aumenta as perdas térmicas nas paredes do forno e causam irregularidades na remoção da escória e gusa (Assis et al., 1982). De acordo com Oliveira et al., (1982) a umidade do carvão penaliza a operação do alto forno e compromete a sua produtividade e consumo de reductor. O valor médio de teor de umidade referência do setor siderúrgico é de 4%, no qual, deve variar entre 1 a 6% (Carneiro et al., 2013).

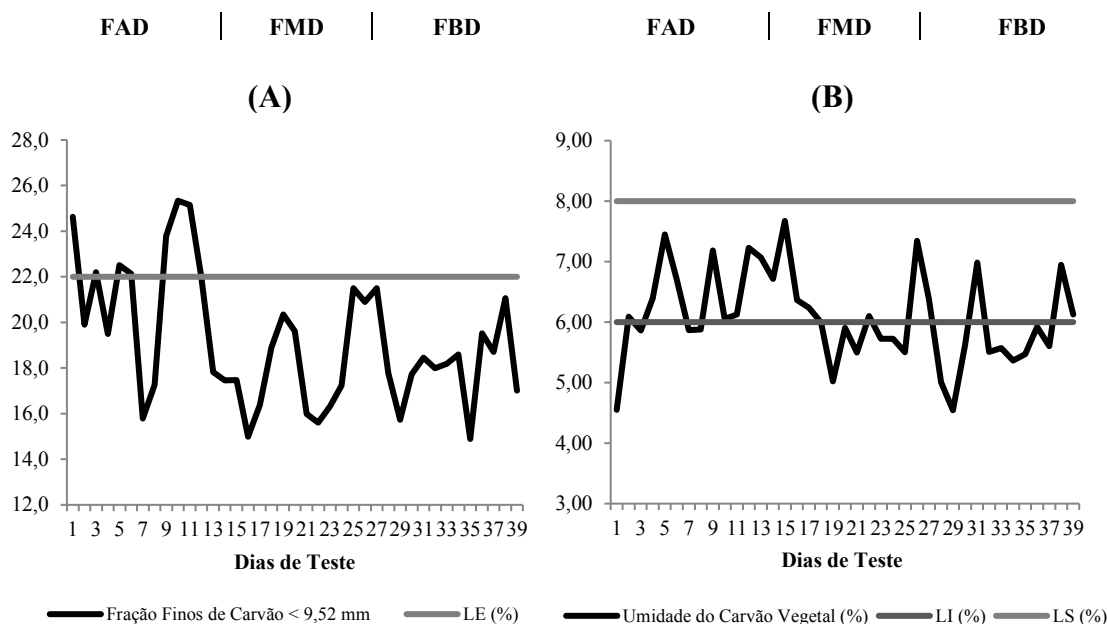


Figura 6: (A) Porcentagem de finos de carvão vegetal em relação ao limite de especificação (LE). (B) Umidade de carvão vegetal; Limites Superior (LS) e Limite Inferior (LI) de especificação para o alto forno.

De modo geral, a permeabilidade do alto forno deve fornecer uma quantidade de vazios suficiente para garantir um bom contato gás-sólido e gás-líquido, de modo que as reações necessárias possam ocorrer. De acordo com o Geerdes et al., (2009), na região da cuba a permeabilidade da carga ao gás é determinada pela quantidade de finos da pelota (< 5 mm) e redutor. Caso haja finos em que ultrapasse os limites de especificação, a fração de vazios usada para o transporte do gás de redução irá diminuir e afetará o “fluxo bruto de gás” pela carga. A maior porcentagem de finos pode estar relacionada com uma deficiência do peneiramento, degradação física durante o transporte e o carregamento, método de distribuição de carga utilizada e degradação das partículas sob baixas temperaturas, fenômenos de engaiolamento e arriamento e perda térmica.

Além disso, muitos problemas no alto-forno são consequência da baixa permeabilidade das camadas de minério ao longo do diâmetro do forno (Geerdes et al., 2009). A permeabilidade de uma camada de minério é largamente determinada pela quantidade de finos (abaixo de 5 mm) na camada. De maneira geral, os finos tendem a se concentrar em anéis no forno, no ponto de impacto onde a carga é

carregada (Geerdes et al., 2009). Os finos também podem ser gerados na zona de redução de baixa temperatura, no qual ocorre a desintegração via contato gás-sólido.

De acordo com Thomsen (2005), quanto maior o valor da permeabilidade, maior a produtividade do alto forno. No entanto, vale ressaltar que a produção de ferro gusa foi resultante da interação de 21 parâmetros de AF além do fator humano. É o operador do alto forno que monitora o fluxo de matéria prima e controla as variáveis do processo. Neste caso, sistemas de monitoramento automático seria uma alternativa para auxiliar no controle e monitoramento de variáveis do alto forno.

Assim, foi possível observar que a produção de ferro gusa segue uma tendência de responder a permeabilidade do alto forno, uma vez que, ao permitir uma maior passagem dos gases de redução, mais minério de ferro é transformado em ferro gusa (Figura 7). Nota-se que ocorreu uma queda da produção média de ferro gusa em função da queda da permeabilidade, expondo a sensibilidade da eficiência do alto forno em função da mudança de faixa de densidade do carvão vegetal.

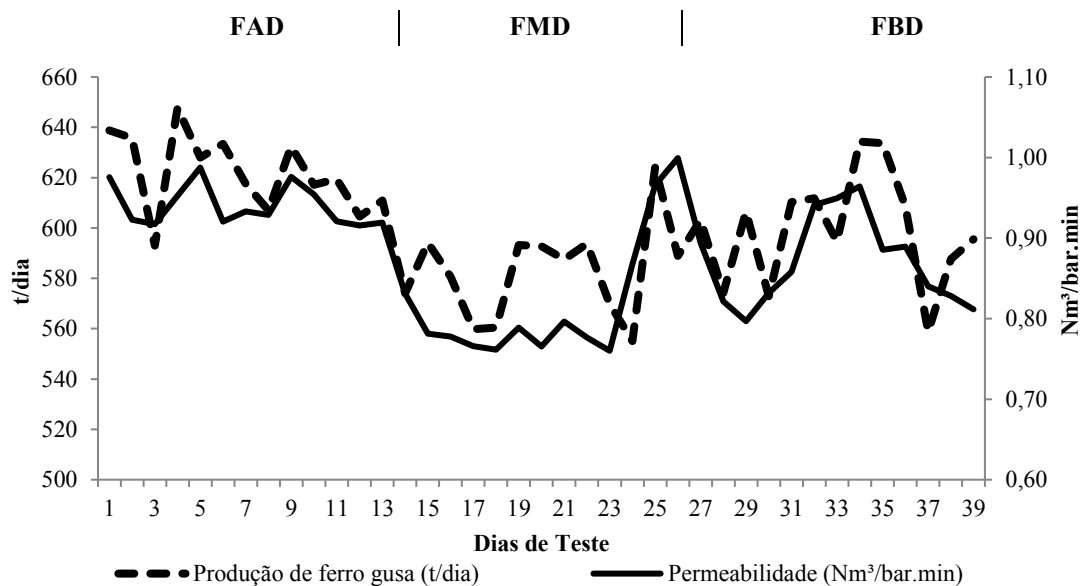


Figura 7: Produção média de ferro gusa em função do comportamento da permeabilidade do leito de fusão, durante o período de teste.

Por isso, é importante o controle de qualidade da matéria prima enforada. Um dos fatores que pode ocasionar a oscilação da produção de ferro gusa é a permeabilidade do “homem morto” o que reduz o escoamento a passagem do liquido para o cadinho (USIMINAS, 2012). Na zona de redutor estagnante, tanto o coque quanto o carvão vegetal devem ser capaz de suportar o peso da carga com baixa

degradação. De acordo com Dzermejko, (1999), um redutor resistente tende a resultar em uma zona estagnante mais permeável, no qual, permitir o fluxo de metal derretido através dos espaços ou das janelas entre as partículas do carvão. Se a qualidade e o tamanho do redutor forem ruins, a permeabilidade do homem morto é diminuída à medida que a vazios entre as peças é reduzido. Essa perda de permeabilidade prejudica a eficiência do alto forno, pois, a redução dos vazios gera uma massa de redutor impermeável, o que penaliza de vida do refratário, além de problemas operacionais. Ao atingir o cadinho, os finos de redutor impedem a passagem do ferro e escória líquida, provocando o aumento na frequência de corridas e variações na composição química e temperatura do ferro gusa (Assis et al., 1982).

3.4. Influência da densidade do carvão vegetal na eficiência do alto forno.

A produção eficiente de um alto forno, geralmente é avaliada pelo consumo de redutor por tonelada de ferro gusa e pelo monitoramento contínuo da composição química do gás de topo. A eficiência também é denominada como utilização de gás ou rendimento de gás de topo, representada pela razão $CO_2/(CO+CO_2)$. Desta forma, vale a pena converter a maior quantidade possível de CO em CO_2 no processo, uma vez que a produção do ferro gusa é realizada nas zonas de maior temperatura do alto forno (Geerdes et al., 2009). Neste sentido, a Tabela 7, mostra a estatística descritiva de coleta dos percentuais de CO e CO_2 provenientes da análise de gás de topo, durante a realização do teste.

Tabela 7: Estatística descritiva da porcentagem de dióxido e monóxido de carbono do gás de topo.

Parâmetros	Faixa de Densidade (kg/m ³)	Máximo	Mínimo	Média	Coefficiente de Variação (%)
%CO ₂	Alta	24,38	23,54	24,11	1,05
	Média	23,95	21,85	22,73	2,45
	Baixa	23,58	21,92	22,85	1,95
%CO	Alta	23,46	22,59	22,94	1,05
	Média	24,25	23,02	23,68	1,67
	Baixa	25,05	23,65	24,24	1,61

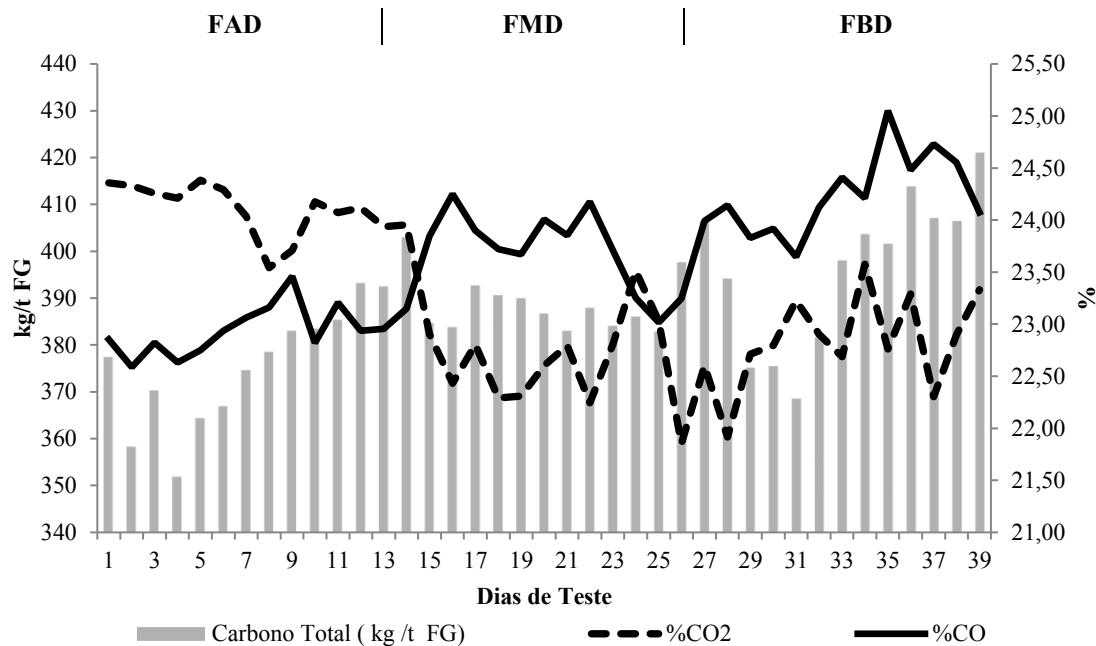
De acordo com a Thermo Fisher Scientific, (2007) o monitoramento da composição dos gases de topo - CO, CO₂, H₂, N₂, CH₄ e O₂ - se faz necessário, uma vez que, o cálculo de eficiência do gás é uma maneira de detecção precoce de

possíveis vazamentos, o que resulta em uma enorme economia nos custos de combustível, e tempos de retorno de medição. A quantidade total de gases CO e CO₂ por volume no gás AF é de cerca de 40% a 45% do volume total de gás, onde esta relação pode variar de acordo com o equipamento de redução (Toledo, 2015).

Nota-se que ao usar um carvão mais denso a geração dos gases foi mais estável, indicando que as reações de redução no alto forno foram mais eficientes. Já nas outras faixas, a produção de dióxido de carbono foi mais instável, o que indica uma ineficiência do processo, devido a outras variáveis operacionais que interferiram na reação gás-sólido, gás-líquido. Como visto no itens anteriores, a permeabilidade e a qualidade de matéria prima, foi um dos parâmetros avaliados que influenciaram no processo de redução da carga metálica.

De acordo com Gasparini et al. (2017) a proporção de gás carbônico é a variável com maior impacto no consumo de carbono. Satapleton (1942), ao avaliar diferentes equipamentos de redução, observou que os altos fornos que operam eficientemente têm baixas relações de CO/CO₂ nos anéis externos do topo do forno. Desta forma, ao monitorar os gases de topo é possível observar que quanto maior a porcentagem de CO maior o impacto no consumo de carbono na zona de elaboração. Por outro lado, quanto maior a quantidade de dióxido de carbono, menor o consumo de carbono.

Quanto menor a densidade do carvão vegetal aplicada, maiores quantidades de carbono foram adicionadas para suprir as reações de redução. Este efeito foi visível quando a quantidade de CO ultrapassa a quantidade de CO₂ produzida, ao trocar de faixa de densidade – entre as faixas de alta (FAD) e média (FMD) densidade de carvão vegetal (Figura 8). Ao aumentar a quantidade de CO em um alto forno, os efeitos operacionais ficam mais claros durante a operação. A heterogeneidade das propriedades do carvão vegetal é uma das causas de desequilíbrio em termos de balanço de massa e equilíbrio térmico, o que afeta diretamente a produtividade e qualidade química do ferro gusa.



Legenda: FAD: Faixa de Alta Densidade (kg/m^3); FMD: Faixa de Média Densidade (kg/m^3) e FBD: Faixa de Baixa Densidade (kg/m^3).

Figura 8: Consumo de carbono total por tonelada de ferro gusa e a composição do gás de topo com dióxido de carbono e monóxido de carbono.

Vale ressaltar que grandes concentrações de CO torna o gás AF mais perigoso, uma vez que, muitas vezes, o CO é quase imperceptível, tóxico e inflamável (Drager, 2017). Babich et al., (2008) relatam a possibilidade em trabalhar com processos de redução com baixa temperatura, uma vez que, uma diminuição na temperatura de equilíbrio entre o gás redutor e a wustita mudaria a composição do gás redutor para um teor mais baixo de CO e maior de CO_2 . Essa mudança melhoraria a eficiência de utilização de gás, resultando em menor consumo de agente redutor.

Ao adicionar um carvão de baixa densidade há um aumento no desequilíbrio térmico, enquanto que, na faixa de alta densidade há uma melhor estabilidade na temperatura (Figura 9). Além disso, observou-se que quanto maior a temperatura de topo, maior foi a chance de o alto forno estar com falta de distribuição de carga em seu interior, reduzindo sua produtividade. Babich et al., (2008) explica que a temperatura e composição do gás através da seção do topo são caracterizadas pela distribuição da carga e gás.

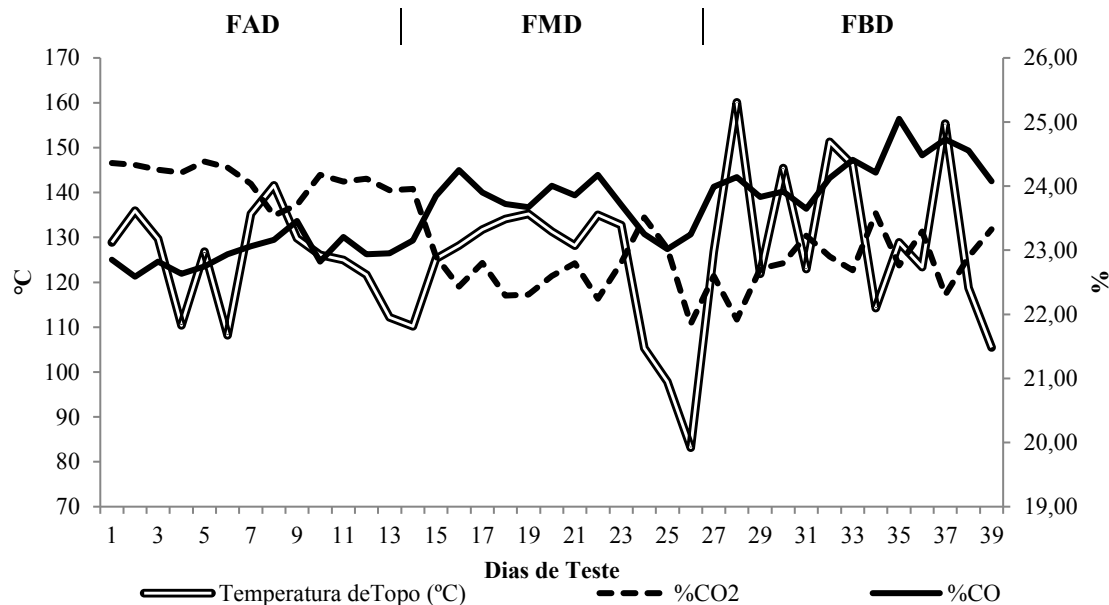


Figura 9: Valores médios de temperatura de gás de topo em relação à porcentagem de monóxido e dióxido de carbono.

Para um nível de carga e mesma marcha, ou seja, no mesmo ritmo de produção de ferro gusa, a elevação da temperatura do topo se causa um desequilíbrio térmico do forno, provocado por meio do arriamento de carga, por exemplo. Do mesmo modo, a variação das porcentagens de CO e CO₂ também é um indicador importante da marcha do forno. A queda da porcentagem de CO₂ é indicio de piora de marcha como arriamento. Um aumento brusco da porcentagem de CO₂ é um sinal de engaiolamento (Fernandes, 2012).

Durante o período de avaliação, verificou-se a presença dos fenômenos de engaiolamento nas faixas de alta, média e baixa, e fenômenos de arriamentos nas faixas de média e baixa densidade. O período mais crítico desses fenômenos foi entre os dias 15 a 19 do teste, onde, verificou-se a ocorrência de 14 engaiolamentos e dois arriamentos. O impacto dos fenômenos podem ser observados pela presença de *outliers* durante o período de teste.

A composição dos gases, o equilíbrio térmico e o consumo de redutor também estão associados à reatividade do carbono ao gás de redução, também conhecida como reação de *Boudouard*, ou *Solution loss*. Desde a zona granular do alto forno até a zona de preparação as camadas de matéria primas são atingidas e aquecidas pelos gases ascendentes, onde a temperatura pode variar de acordo com a natureza da operação e com o leito de fusão. Desta forma, quando o material carbonáceo atingir a temperatura de reatividade (850°C), o carvão vegetal passa por poucas reações químicas, sem afetar de maneira significativa a resistência e tamanho na região da cuba do forno. À medida que o carvão atinge temperaturas mais altas (acima de 850°C) as reações químicas com o dióxido de carbono gerado da redução dos óxidos de ferro, se iniciam de modo progressivo, onde se regenera para monóxido de carbono (reação de *Solution loss*), substituindo a redução indireta dos óxidos de ferro pela redução direta (Carvalho et al., 2007).

A reatividade do carvão vegetal é influenciada pelas características intrínsecas da madeira e pelo processo de carbonização. Segundo Gomes e Oliveira (1980) a porosidade está relacionada com a densidade do carvão, e esta, por sua vez, está relacionada com a densidade da madeira. Além desta propriedade física, quanto maior o teor de lignina na madeira maior o rendimento em carbono fixo e rendimento gravimétrico. Desta forma, quanto menor a densidade, maior a quantidades de poros disponíveis para aumentar a cinética de redução, provocadas pela maior área de contato com o gás. Machado et al., (2010) ao compararam a reatividade do carvão vegetal, carvão mineral brasileiro e carvão mineral importado e suas misturas verificaram que o carvão vegetal possui maior reatividade, uma vez que, a alta reatividade do carbono está relacionada à estrutura de carbono porosa e altamente desordenada. Maior reatividade do carvão mineral brasileiro em relação ao carvão importado foi explicada pela baixa qualidade.

Portanto, o sucesso de uma operação do alto-forno, depende de uma boa permeabilidade e estabilidade do alto forno, onde a redução e fusão da carga metálica no interior do AF dependem do contato direto do gás com a fonte de ferro. Desta forma, quanto maior a capacidade de remoção dos gases ascendentes, maiores quantidades de óxidos são removidos da fonte de ferro, obtendo maior eficiência no processo. Na Tabela 8 são apresentas as análises de estatística descritiva do rendimento de gás do alto forno, consumo de carga metálica e produção de ferro gusa, durante a aplicação do teste.

Tabela 8: Eficiência do alto forno e produção de ferro gusa, durante o período de teste no alto forno.

Parâmetros	Faixas de Densidade (kg/m ³)	Máximo	Mínimo	Média	Coefficiente de Variação (%)
Eficiência do Alto forno (%)	Alta	51,80	50,32	51,27	0,95
	Média	50,86	47,88	48,97	1,85
	Baixa	49,55	47,39	48,49	1,47
Produção de Ferro Gusa (t/dia)	Alta	647,72	592,97	621,98	2,52
	Média	624,01	555,07	582,62	3,24
	Baixa	634,32	558,81	599,40	3,72

Ao avaliar a eficiência do alto forno em função do limite objetivo do alto forno 1 (igual ou maior que 50%), verificou-se que 59% dos dados ficaram fora do limite de especificação do alto forno. Ao observar por faixa de densidade aplicada, a faixa com alta densidade obteve 100% dos dados da faixa de alta densidade, tiveram eficiência superior a 50%. No entanto, para as faixas de média e baixa densidade, 77% e 100% dos valores ficaram fora do limite objetivado, respectivamente. Desta forma, aplicação de um carvão vegetal mais denso, obteve melhores resultados operacionais, no que tange a eficiência.

Embora vários fenômenos ocorram simultaneamente dentro do alto forno, a densidade do carvão vegetal foi um dos parâmetros que influenciaram indiretamente na eficiência do processo. De acordo com Assis et al., (1982), quando a densidade aparente é muito baixa, acarreta uma menor utilização do volume do alto forno e uma menor produção por unidade de volume. O aumento em densidade de 80 kg/m³ resulta em uma redução de 5,7 kg de carvão por tonelada de gusa. (Assis e Braga, 1981). Por outro lado, os mesmos autores complementam que o aumento na densidade do carvão resulta em um aumento na oferta de carbono fixo, onde, o acréscimo de 16% no teor de carbono fixo implica na redução de 4,3 kg de carbono por tonelada de gusa. De acordo com a Thermo Fisher Scientific, (2007), o aumento de 1% na eficiência do gás a uma redução direta constante pode resultar em uma diminuição do consumo de coque de 8 kg/tonelada de ferro gusa e um aumento no rendimento de 3,5% de ferro gusa. A produtividade do alto forno aumenta à medida que a quantidade de combustível usada por tonelada de metal quente diminui (Geerdes et al., 2009).

Nas Figuras 10 e 11 são apresentados os valores médios de eficiência do alto forno. Observou-se que quanto maior a densidade de carvão, maior o rendimento de gás de redução, resultando em maior produtividade de ferro gusa para uma mesma unidade de volume.

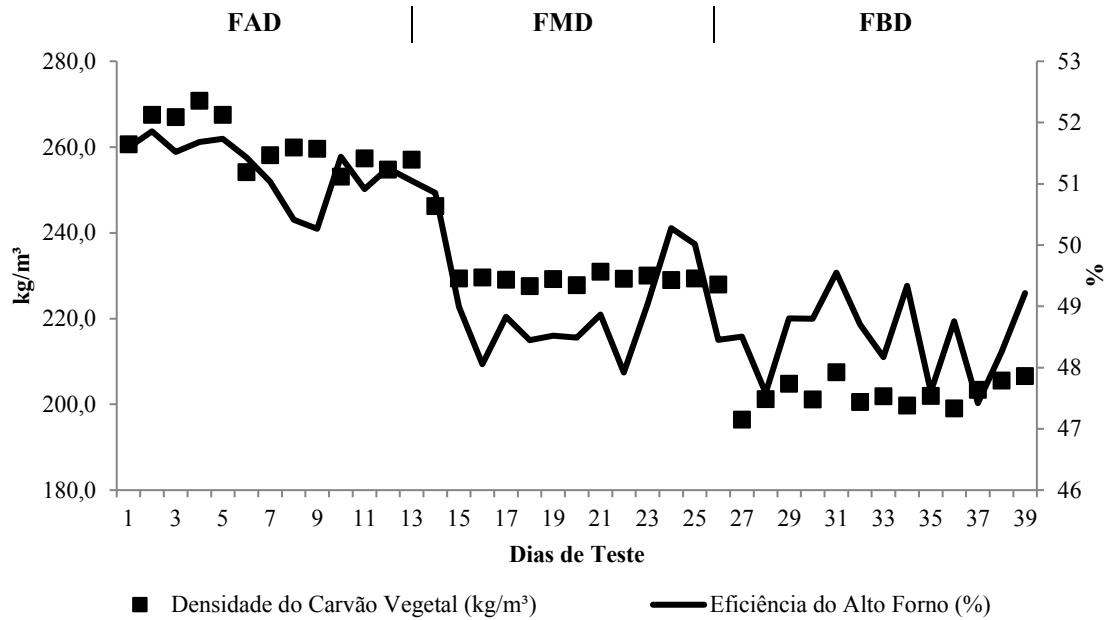


Figura 10: Eficiência do alto forno em função da densidade a granel de carvão vegetal.

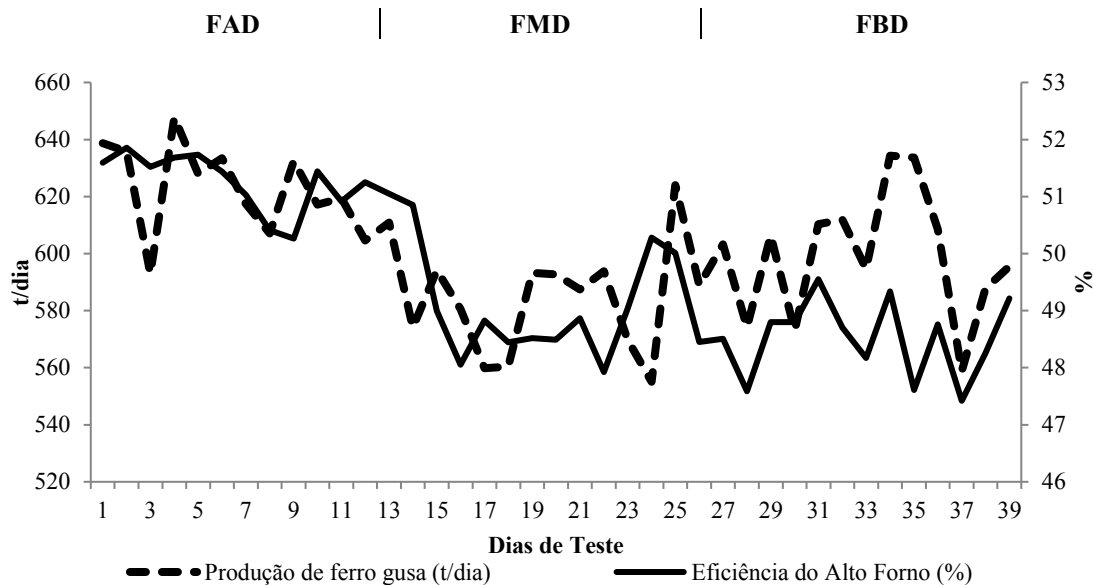


Figura 11: Valores médios da produção de ferro gusa em relação à eficiência do alto forno.

Verificou-se que o efeito da quantidade de carbono fixo presente no carvão vegetal reflete, principalmente, na utilização do forno por unidade de volume. Isso significa um aumento no tempo de residência do forno e, conseqüentemente, uma maior produção por unidade de volume (Oliveira e Almeida, 1980). O aumento da densidade do carvão, traz como benefício imediato o maior tempo de residência de carga metálica na temperatura da zona de reserva térmica do alto forno, e diminuição do consumo específico de carbono, aumentado à produtividade de ferro gusa (Assis et al., 1982).

Um das vantagens de usar o carvão vegetal na siderurgia é a capacidade de reduzir a fonte de minério de ferro em baixas temperaturas (100 a 150 °C a menos que a coque), com um balanço de emissões de gases de efeito estufa (Assis et al., 1982). Além do grande papel social e econômica, o carvão atualmente, quase 10 milhões de toneladas de aço brasileiro são obtidos por altos fornos a carvão vegetal (50-568 m³) (Birat et al., 2003; Gonçalves et al., 2012). Noldin (2011) afirmou que 203 kg O₂ por tonelada de ferro gusa são liberados enquanto 890 kg por tonelada de ferro gusa serão capturados por plantação florestais, quando o carvão vegetal for usado para produção de ferro gusa.

3.5. Análise entre cenários

Ao avaliar a economia no consumo de carvão vegetal, observou-se que no Cenário 1, o ganho em densidade de 30 kg/m³, pode proporcionar uma economia de 757.856 mil dólares por ano, quando a empresa opta em utilizar apenas um carvão de alta densidade desde outra com média densidade. No Cenário 2, observou-se que o ganho em densidade de 58 kg/m³, a economia anual pode ser equivalente a 682.217 mil dólares (Tabela 9). O preço da tonelada do carvão vegetal foi de 130 dólares.

Tabela 9: Economia no consumo médio de carvão vegetal de topo entre os cenários.

Cenários	(kg/dia)	Dia (US\$)	Mês (US\$)	Ano (US\$)
1	13.495	2.105	63.155	757.856
2	12.148	1.895	56.851	682.217

Apesar dos valores entre os cenários serem próximos, vale ressaltar que a quantidade de carvão vegetal analisada foi referente ao total de carvão médio e grosso, carregados no alto forno. Os valores podem ser ainda maiores quando analisados antes da fase de classificação granulométrica.

Por outro lado, ao observar o ganho em receita bruta no Cenário 1, foi possível verificar que o ganho em densidade, proporcionou um ganho na produção de gusa de 39 toneladas por dia. Isto significa que o ganho em receita bruta poderia ser de US\$14.132/dia. Em um mês, o ganho médio pode atingir cerca de US\$423.954, que em um ano atinge o equivalente a 5.087 milhões de dólares. Já no Cenário 2, o ganho em produção de gusa foi de 23 toneladas, 41% a menor que no Cenário 1. O ganho diário poderia atingir cerca de US\$8.108, onde em um ano, poderia atingir o equivalente uma receita média de 2.918 milhões de dólares (Figura 12).

Desta forma, observou-se que o ganho em densidade causa maior impacto na eficiência do processo e principalmente, nos ganhos totais no final de um ano. A mudança da densidade média pela densidade alta (Cenário 1) apresentou ser mais vantajosa que a troca da densidade baixa pela alta (Cenário 2). Entre os cenários, observa-se um acréscimo na receita anual total foi de 38%, ou seja, uma diferença média de 2.244 milhões de dólares.

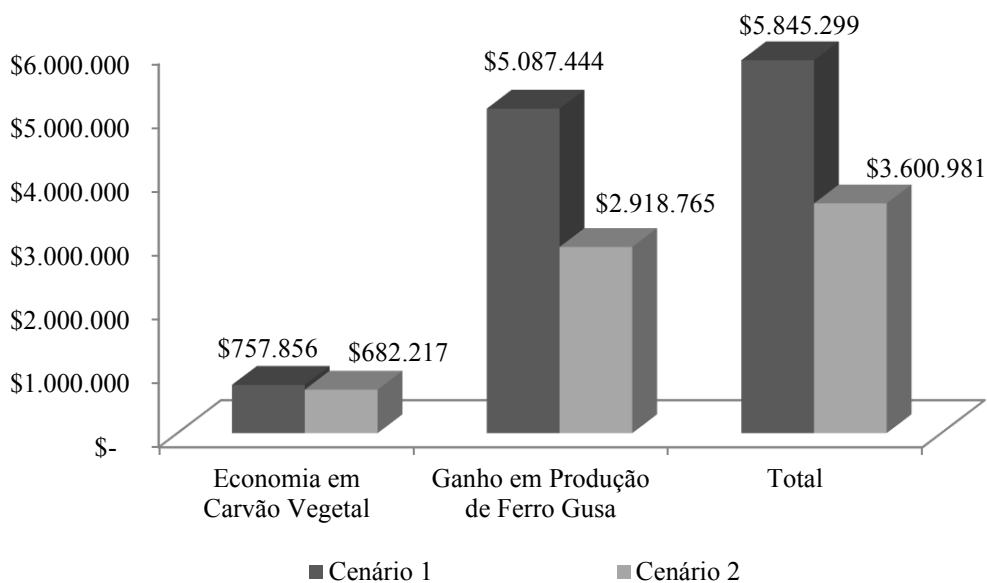


Figura 12: Economia de carvão vegetal e ganho em receita bruta por ano, ao optar pela faixa de alta densidade de carvão vegetal.

Ao avaliar produção de ferro gusa total de cada faixa de densidade aplicada, foi possível notar que, caso a empresa tenha disponível um carvão de alta densidade, o ganho anual com a venda de ferro gusa, poderia atingir cerca de 80 milhões de dólares. Por outro lado, caso a siderúrgica tenha a disponível um carvão vegetal na faixa de média densidade, o ganho na receita anual pode ser equivalente a 75 milhões de dólares, 6,33% menor que a faixa de alta densidade e 2,80% menor que na faixa de baixa densidade (Figura 13).

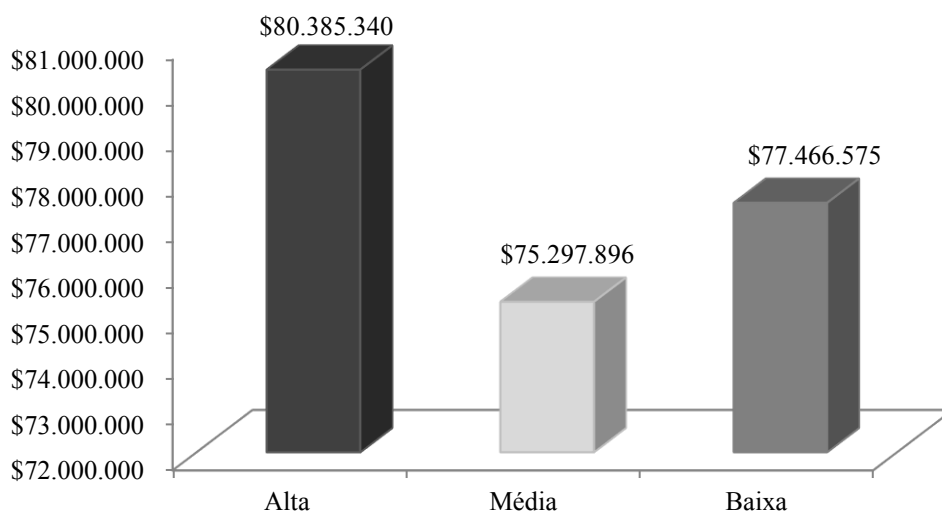


Figura 13: Ganho em receita bruta anual com a produção de ferro gusa em função da faixa de densidade disponível.

O carvão vegetal de alta densidade permitiu que o alto forno operasse em uma faixa próxima da capacidade produtiva e com menor coeficiente de variação dos parâmetros analisados. Além disso, vale ressaltar que o teste foi aplicado em uma rotina operacional, sujeito a oscilações dos parâmetros operacionais do alto forno e períodos de chuvas. Desta forma, o trabalho aponta vários pontos que ainda devem ser melhorados, tanto na seleção genética de materiais para a produção de carvão vegetal, quanto no controle do processo de carbonização.

Diante do exposto, foi possível observar que o uso de clones mais densos para a produção de carvão podem proporcionar não somente uma economia no carvão vegetal de topo, mas sim uma economia em toda a cadeia produtiva. Dependendo da escala da indústria siderúrgica, a mudança do padrão de densidade recebida podem causar impactos econômicos significativos.

4.CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível concluir em escala operacional que:

O aumento da densidade proporcionou menor consumo de carvão de topo e maiores taxas de injeção de finos, assim como, maiores carregamentos de carga metálica para um mesmo volume, contribuindo diretamente para maiores produtividades do alto forno.

O ganho médio em produção de ferro gusa entre as faixas de média para alta densidade de carvão vegetal foi de 6,2%;

O ganho médio em produção de ferro gusa entre as faixas de baixa para alta densidade de carvão vegetal foi de 3,7% ao dia;

O aumento em densidade de carvão vegetal contribuiu para uma melhor permeabilidade do alto forno;

Quanto maior a permeabilidade do alto forno, maior a produção de ferro gusa;

O ganho em densidade do carvão vegetal contribui com maior produção de dióxido de carbono em relação ao monóxido de carbono.

Quanto maior a densidade de carvão vegetal, maior a eficiência do alto forno.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abouzeid, A Z M., Seddik, A A. Effect of iron ore properties on its balling behaviour. Power Technology. vol. 29, p.233 – 241, 1981.
- AMS. Associação Mineira de Silvicultura. Preço médio do carvão vegetal no estado de Minas Gerais, 2017. Disponível em: <www.silviminas.com.br>. Acesso em 22 abr. 2018.
- ArcelorMittal BioEnergia Ltda Produção de madeira em região de déficit hídrico. 2009. Acesso em 15 jun. 2018. Disponível em: http://www.ipef.br/eventos/2009/melhoramento5/02-ArcelorMittal_BioEnergia.pdf.
- Assis, M R.; Protásio, T P.; Assis, C O.; Trugilho, P F.; Santana, W M S. Qualidade e rendimentos do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis X Eucalyptus urophylla*. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, 2012. DOI: 10.4336/2012.pfb.32.71.291
- Assis, P S. & Braga, R N B. Impacto da tecnologia de produção de carvão vegetal nos altos-fornos - experiência da ACESITA. Metalurgia ABM, 37 (287), p.565-570, 1981.
- Assis, P S., Marinho L. Z de A., Porto F M. Utilização do carvão na siderurgia. In: Penedo, W. R. (Org.). Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte: CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.279-318, 1982.
- Babich, A, Secnk, D, Gudenau, H W. Ironmaking Textbook. RWTH Aachen University. Germany. 400p. 2008.
- Banco Mundial. Perfil do Ferro-Gusa. Relatório Técnico 59. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA-MME. 58p, 2009.
- Birat J P, Harnot F, Danloy G. CO₂ mitigation technologies in the steel industry- a benchmarking study based on process calculation. Stahl. Eisen. 123(9), p.69–72, 2003.
- Botrel, M. C. G.; Trugilho, P. F.; Rosado, S. C. D. S.; & Silva, J. R. M. D. Genetic improvement of eucalyptus charcoal properties. Revista Árvore. 31(3), p.391-398, 2007.
- Brito, J O. Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico, IPEF, Circular Técnica. n 181. 1993.
- Carlos Silva A. Aglomeração Mineral. Curso de Especialização em tratamento de minérios. 2013. Disponível em: https://cetm_engminas.catalao.ufg.br/up/596/o/aglomeracao_3.pdf. Acesso em 14 jun. 2018.
- Carneiro A C, Vital B R, Oliveira A C, Pereira B L. Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. In: Santos, F. (Ed.). Bioenergia e Biorrefinaria: cana de açúcar e espécies florestais. Viçosa: Os Editores, p.429–482, 2013.
- Carvalho, J S., Fernandes, M V., Velloso, C M. Considerações sobre a operação do alto forno. Usiminas. Belo Horizonte. 2007. (Material Impresso).
- Coutinho, A. dos R. Determinação da friabilidade do carvão vegetal em função do diâmetro das árvores e temperatura de carbonização. IPEF. n.38, p.33-37, 1988.
- Drager. Os desafios do alto forno. 2017. Acesso em 17 jun. 2018. Disponível em: https://www.draeger.com/Library/Content/small-case-arcelor-mittal-ebk-dgt-739-2017-pt-br_.pdf.
- Dzermejko, A. J. Ironmakig refractories: considerations for creating successful refractory systems. In: Blast Furnace Ironmaking: Principles, design and raw materiais. McMaster University. Hamilton, Ontario, Canada, v.1, p.306-356, 1999.
- Fernandes, M V. Treinamento para supervisores. Altos fornos da Usiminas. Departamento de Coquerias e altos fornos . Divisão Técnica de altos fornos. 102p, 2012.
- Furnas C C. and Joseph T L. Stock Distribution and Gas-Solid Contact in the Blast Furnace", U.S. Bureau of Mines Technical Paper. 476, 1930.
- Geerdes, M., Toxopeus, H., Vliet C. V. D. Modern blast furnace ironmaking— an introduction. 2nd ed. Amsterdam: IOS Press BV; 2009.

- Gomes, P A., Oliveira, J B. Teoria da carbonização da madeira. In: Penedo, W. R. (Org.). Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte: CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.27-42, 1980.
- Gonçalves, L. J. The use of coke and charcoal in Aperam South America. 2012. 6 Congress on the Science and Tecnology of Ironmaking. Disponível em: <http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/Luiz%20Jos%C3%A9%20Gon%C3%A7alves%20The%20use%20of%20Coke%20and%20Charcoal%20in%20APERAM%20South%20America.pdf> . Acesso em: 17 jun. 2018.
- Gruner, M L. Studies of Blast Furnace Phenomena, translated by L.D.B. Gordon, Henry Carey Baird, Publisher, 1874.
- Machado, J G M S., Osorio, Vilela, A C F., Babich, A, Senk, D, Gudenau, H W. Reactivity and conversion behaviour of Brazilian and imported coals, charcoal and blends in view of their injection into blast furnaces. *Steel Res. Int.* 81 (1), p.9-16, 2010.
- Mendes, A P C S.; Chiappetti, A A.; Rezende, L F M. Reator de Carbonização de Madeira. In: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. Produção e utilização de carvão vegetal. Belo Horizonte, p.91 – 112, 1982.
- Neves, T A, Protássio, T P, Couto, A M, Trugilho, P F, Silva, V O, and Vieira, C M M. Evaluation of Eucalyptus clones in different places seeking to the production of vegetal charcoal. *Brazilian Journal of Forestry Research.* vol. 31 (68), p.319– 330, 2011.
- Noldin J H. Energy efficiency and CO₂ reduction in the Brazil steel industry. In: Proceeding of 6th European coke and ironmaking congress. Düsseldorf, Germany; 2011.
- Oliveira J B., Gomes P A., Almeida M G. Propriedades do carvão vegetal. In: Penedo, W. R. (Org.). Carvão vegetal: Destilação, carvoejamento, propriedades, controle de qualidade. Belo Horizonte: CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.39-62,1982.
- Oliveira, L T., E Almeida, M R. Avaliação do carvão vegetal. In: Penedo, W. R. (Org.). Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte: CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.43-54, 1980.
- Pereira, B L C; Carvalho, A M M L; Oliveira, A C; Santos, L C; Carneiro, A C O; Magalhães, M A. Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de Eucalyptus. *Ciência Florestal.* v. 26, n. 2, p.545-557, 2016.
- Raad. T. J. Modernização da produção de carvão vegetal no Brasil: subsídios para revisão do Plano Siderurgia, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2015 Brasília.
- Santos, RC dos; Carneiro, A C O; Vital, B V; Castro, R V O; Vidaurre, GB; Trugilho, P T; Castro, A F N M. Influência Das Propriedades Químicas E Da Relação Siringil/Guaiacil. *Ciência Florestal.* v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.
- Silva, M. A. M. & Quintão, M. A. Especificações do carvão vegetal e seus efeitos na operação do alto forno. In: Carvão vegetal: produção, propriedades e aplicações na siderurgia. ABM – Associação brasileira de metais. Belo Horizonte, 110- 162, 1991.
- Souza N D, Amodei, J B, Xavier, C N, Dias, A F Jr, Carvalho, A M. Estudo de caso de uma planta de carbonização: avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico. *Floresta e Ambiente,* 23(2), p.270-277, 2016.
- Stapeton, J & Member, A I. M E. Results Obtained from Surveys of Gas at Furnace Tops. American Institute Of Mining And Metallurgical Engineers. Technical Publication. No. 1541. 29p, 1942.
- Steel On the Net. Pig Iron Export Prices - dollars per tonne. Steelmaking input costs - historic price trends. 2018. Disponível em:< <https://www.steelonthenet.com/files/pig-iron.html>>. Acesso em: 20 mai. 2018.
- Tellis, W. Introduction to Case Study. The Qualitative Report.1997. 3 (2). Acesso em 20 jun. 2018. Disponível em: <http://www.nova.edu/ssss/QR/QR3-2/tellis1.html>.
- Thermo Fisher Scientific. Blast Furnace Process Monitoring Using the Thermo Scientific Prima δB. 2007. Disponível em: http://thermo.com.cn/Resources/200802/productPDF_1267.pdf. Acesso em 17 jun. 2018.

Thomsen, E. P. Da R. Controle de Processo de Produção do Alto Forno por meio de Técnicas Estatísticas Multivariadas em Tempo Real. 2005. 100p. Dissertação (Mestrado em Estatística). UFMG, Belo Horizonte, 2005.

Toledo M. Blast furnace gas, its characteristics and safety requirements. 2015. 2018. Disponível em: <http://ispatguru.com/blast-furnace-gas-its-characteristics-and-safety-requirements/>. Acesso em 17 jun.

USIMINAS. Utilização do minério de ferro na siderurgia. (material impresso). 2012, 162 p.

Vieira, R. Da S.; Lima, J.T.; Monteiro, T.C.; Selvatti, T. De S.; Baraúna, E.E.P.; Napoli, A. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. *Cerne*, v.19, p.59-64, 2013. DOI: 10.1590/ S0104-77602013000100008.

Zhou, Z., Zhu, H., Yu, A., Wright, B., Pinson, D., Zulli, P. Discrete particle simulation of solid flow in a model blast furnace. *ISIJ International* 45, p.1828–1837, 2005.

CAPÍTULO 2

INFLUÊNCIA DA DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL NA PRODUÇÃO DE FERRO GUSA: UMA APLICAÇÃO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS

RESUMO

A densidade do carvão vegetal é uma das propriedades mais importantes que afetam produtividade de um alto forno. O carvão vegetal é uma fonte de energia renovável e um insumo fundamental para o desenvolvimento da indústria siderúrgica de base florestal. O uso de redes neurais artificiais, para prever a produção de ferro gusa a base de carvão vegetal é inexistente, o que torna o trabalho de caráter inédito. O objetivo deste trabalho foi construir e validar um modelo de redes neurais artificiais (RNA) para estimar a produção futura de ferro gusa a carvão vegetal utilizando a densidade do carvão vegetal e parâmetros numéricos de um alto forno como variável de entrada. Por meio da análise de dados de um alto forno a carvão vegetal, que foi abastecido por diferentes faixas de densidade de carvão, uma rede *Multilayer Perceptron* (MLP), foi aplicada para estimar a produção de ferro gusa. Com apenas 70 dados de produção de ferro gusa, foi possível treinar rede neural artificial com eficiência. Essa rede pode ser utilizada como ferramenta preditiva para estimar o desempenho esperado do alto-forno, com variação periódica dos parâmetros de entrada.

Palavra-chave: Densidade do carvão vegetal; redes neurais; ferro gusa.

1.INTRODUÇÃO

Em um alto forno, os processos de transformação do minério de ferro em ferro gusa são complexos de difícil modelagem matemática uma vez que o modelo deve captar as interações entre sólido, líquidos e gasosos, que ocorrem no interior do equipamento. O emprego de redes neurais artificiais (RNA) nas indústrias siderúrgicas tem sido cada vez mais frequente, como parte do componente efetivo do sistema de automação de fabricação do aço. Schlang et al., (1997), utilizaram a RNA para controle de laminadores de aços planos e fornos elétricos; Radhakrishnan e Mohamed, (2000), que empregaram uma RNA para identificar e controlar a qualidade do ferro gusa do alto forno e Mitra (2016), utilizou a técnica para modelagem da distribuição de carga em um alto forno. No entanto, na literatura existente constam trabalhos direcionados apenas a cadeia produtiva do aço a base de coque ou carvão mineral. O uso de RNA para prever a produção de ferro gusa a base de carvão vegetal, não tem sido comum, o que torna o trabalho de caráter inédito.

Os processos atuais de produção de ferro gusa em altos fornos são controlados por operadores e especialistas experientes (Chen, 2001). Para melhorar o desempenho do alto forno, é preciso utilizar modelos processuais para descrever com exatidão o efeito da matéria prima no processo. Apesar dos parâmetros do reator ser de alto grau de não linearidade e flutuações aleatórias, alguns autores como Omiri, (1987); Adema, (2014); Kuang et al., (2018), desenvolveram alguns modelos matemáticos como forma de alcançar pelo menos um conhecimento aproximado de seu comportamento (Jiménez et al., 2004).

Em muitos desses modelos analíticos utilizam equações de sistemas numéricos são utilizados para explicar e resolver os princípios básicos da termodinâmica e fenômenos de transporte. Porém, devido à alta complexidade das interações químicas e físicas que ocorrem no processo de fabricação de ferro gusa, esses modelos, não tem sido eficientes, uma vez que um alto-forno industrial pode apresentar mais ruídos do que as previsões desse modelo (Agarwal et al., 2010). Além disso, esses modelos devem capturar a realidade do processo com precisão ao determinar certo valor de um parâmetro. Para gerar um modelo confiável, é necessário criar um modelo de alto forno utilizando informações operacionais de longo prazo (Agarwal et al., 2010).

Um dos grandes gargalos na siderurgia é modelar a complexidade dos processos de transferência de calor e massa juntamente com um grande número de reações gás-sólido, sólido-sólido e sólido-líquido, processos de combustão e transferência de massa entre fases. Peacey e Davenport (1970) modelaram o balanço de massa e calor em estado estacionário muito extenso do alto-forno. O modelo pode ser usado para determinar as taxas de matéria prima necessárias para uma determinada taxa de produção de ferro gusa. No entanto, ele não pode prever as composições químicas de ferro gusa e escória, que são parâmetros de entrada do modelo. Ufret e Williams (1981) construíram um modelo combinando o equilíbrio térmico, balanços de massa e dados cinéticos com relações empíricas para o equilíbrio de fases no sistema ferro gusa e escória. As equações possuíam relações não lineares complexas, onde não foram capazes de prever alguns parâmetros, como a taxa de produção de ferro gusa e a basicidade da escória. Neste contexto, a RNA se torna uma técnica atraente.

As redes neurais artificiais acomodam diferentes relações entre as variáveis, captando o máximo de informações dos dados em menor tempo. Uma das vantagens é que elas não exigem conhecimento prévio de distribuição de dados para realizar análises, e isso as diferencia da análise estatística convencional (Castro, 2001). Em um ambiente dinâmico, as RNA são flexíveis e necessitam de pouco conhecimento estatístico (Castro, 2001). O desempenho das redes neurais é superior aos modelos de regressão, por apresentar estrutura massiva e, paralelamente, distribuída (camadas); habilidade de aprender e generalizar que as tornam capazes de resolver problemas complexos; tolerância a falhas e ruídos; possibilidade de modelar diversas variáveis e suas relações não lineares; possibilita a modelagem com variáveis categóricas (qualitativas), além das numéricas (quantitativas); e analogia neurobiológica, por serem inspiradas no cérebro humano (Lek et al., 1996; Silva et al., 2010).

Os dados acumulados pelas empresas podem ser utilizados na elaboração de projetos de gestão para estimar a produtividade do alto forno a carvão vegetal sem o uso de equações complexas. O objetivo do trabalho foi construir e validar um modelo de RNA para estimar a produção futura de ferro gusa a carvão vegetal utilizando a densidade do carvão vegetal e parâmetros numéricos de um alto forno.

2.MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Descrição dos dados

O carvão utilizado foi proveniente de áreas com plantios florestais de sete anos de idade. Desde a colheita até o enchimento dos fornos de carbonização, todas as madeiras utilizadas na carbonização, são estratificadas duas sessões, com objetivo de reduzir a variabilidade das características da madeira. A estratificação consiste em dividir a tora em parte inferior (base da árvore até à sessão central) e superior (sessão central a ponta da árvore). Os fornos utilizados para a carbonização da madeira foram o modelo RAC 700, localizados nas unidades de produção de energia. A carbonização foi monitorada e controlada por meio de sensores infravermelhos e sistema supervisorio. As espécies selecionadas foram provenientes de 14 cultivares pertencentes ao gênero *Eucalyptus* e uma cultivar pertencente ao gênero *Corymbia*.

A Tabela 1 apresenta com maior detalhe os clones e amplitude das densidades a granel, obtidas pelo volume do caminhão (m³) e diferença entre o peso carregado e a tara da composição veicular de transporte. No total, a densidade foi proveniente de 15 clones e um “Mix”. A mistura foi resultante de um processo de composição de carga feita por carvão vegetal de vários clones.

Tabela 1: Valores médios de densidade a granel do carvão vegetal (kg/m³) por clone.

Cultivar	Máximo	Mínimo	Média	CV(%)
1	302,33	210,16	251,55	6,63
2	209,80	201,09	207,19	1,99
3	233,00	203,58	222,81	3,97
4	230,84	188,04	209,77	6,92
5	211,06	181,93	203,58	3,83
6	232,93	178,71	206,15	5,21
7	272,47	193,78	226,02	9,66
8	280,43	166,15	222,87	8,24
9	233,94	178,47	209,78	6,49
10	209,16	174,89	198,28	5,84
11	288,18	225,35	249,67	9,80
12	252,08	204,90	229,45	6,18
13	277,79	251,23	265,01	4,62
14	256,56	224,86	237,70	4,24
15	278,73	205,86	244,05	9,44
MIX	263,35	185,00	232,11	5,57

Fonte: Dados internos da empresa.

2.2. Definição das variáveis do modelo

Foram utilizados dados de todos os parâmetros de um alto forno a carvão vegetal, localizado em uma indústria siderúrgica integrada, em Timóteo, Minas Gerais, coletados durante 70 dias. Uma análise de correlação de Pearson foi utilizada para reduzir o número de variáveis do processo. A descrição do equipamento pode ser visualizada no item 2.1 do Capítulo 1. Desta forma, oito parâmetros numéricos do alto forno foram selecionados para compor o modelo, como mostra na Tabela 2.

Dentro das variáveis de entrada, foi incluída uma variável categórica para a densidade, no qual, foi classificada em três faixas. A faixa de alta densidade referiu-se a valores entre $250,1 \geq 302 \text{ kg/m}^3$, onde, estão relacionadas com as maiores densidades do carvão vegetal. A faixa de média densidade abrangeu as densidades de $220 \geq 250 \text{ kg/m}^3$ e a faixa de baixa densidade incluíram valores entre $166 \geq 210 \text{ kg/m}^3$.

Tabela 2: Variáveis de entrada e de saída para modelagem utilizando redes neurais artificiais.

Camadas	Variável	Parâmetros	Unidade
Entrada	Variáveis Operacionais	Densidade a granel	(kg/m^3)
		Carbono Total	(kg/t ferro gusa)
Carga Metálica		(kg/t ferro gusa)	
Eficiência do Alto Forno		(%)	
Permeabilidade		($\text{Nm}^3/\text{bar}\cdot\text{min}$)	
Oxigênio Enriquecido		(Nm^3/h)	
Vazão de ar		(Nm^3/h)	
		Temperatura de Topo	($^{\circ}\text{C}$)
	Variável Categórica (Faixa de Densidade a granel)	Alta Média Baixa	-
Saída	Variável Dependente	Produção de Ferro gusa	(t/dia)

As variáveis numéricas foram normalizadas e equalizadas, uma vez que, estas apresentam diferentes ordens de grandeza. Tais dados, não podem ser usados diretamente para treinar uma RNA, pois, a variável com maior magnitude pode afetar os pesos em comparação a uma variável com menor magnitude. Neste trabalho, as variáveis numéricas foram normalizadas para o intervalo de 0 a 1, conforme equação a seguir:

$$X_n = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

em que: X_n = Valor normalizado; X_{\min} = Valor mínimo; X_{\max} = valor máximo.

2.3. Modelagem dos dados

Os dados foram separados aleatoriamente para treinamento (40%), teste (30%) e validação (30%). A separação dos dados de treinamento e teste garante que os pesos não convergem para um mínimo local (Silva et al., 2010). Após o teste, a rede foi novamente treinada usando o conjunto de dados de validação. No conjunto de validação, os pesos finais obtidos na fase treinamento foram utilizados como pesos iniciais e quando o erro converge nesta fase, a rede treinada foi usada como o modelo de processo. Para o processo de aprendizagem da RNA foram selecionadas as cinco melhores redes de 1.000 redes treinadas.

A rede neural configurada foi de no mínimo 10 e no máximo 11 neurônios da camada, como arquitetura do tipo *Multilayer Perceptron* (MLP). A faixa estreita foi utilizada para evitar sub ou super treinamento da rede (overfitting). A função de ativação foi escolhida dentre identidade, logística, tangencial hiperbólica ou exponencial. As análises foram feitas utilizando o software Statistica 12.0 (Stat Soft, Inc., Tulsa, Oklahoma-USA).

2.4. Avaliação das estimativas geradas pelas redes neurais artificiais

A avaliação das estimativas geradas pelas redes neurais, nas três etapas, treinamento, teste e validação, foram feitas via estatísticas, com raiz quadrada do erro médio (RMSE), coeficiente de variação entre os valores os observados e estimados ($r_{\hat{y}y}$) e gráficos dos erros relativos percentuais (ER%) (Campos e Leite, 2017), sendo:

$$RMSE\% = \frac{100}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}}$$

em que: quanto menor o RMSE, melhor a precisão da estimativa (Mehtätalo et al., 2006), sendo \bar{Y} a média da saída observada e n é o número total de dados.

$$r_{\hat{Y}Y} = \frac{\text{cov}(Y, \hat{Y})}{\sqrt{S^2(Y) S^2(\hat{Y})}}$$

onde, permite inferir sobre a qualidade da prognose ou estimação. Quanto mais próxima de 1, maior a correlação entre as variáveis, sendo S^2 a variância e cov a covariância.

$$ER\% = \frac{(\hat{Y} - Y)}{Y} 100$$

em que, Y é a saída observada do parâmetro e \hat{Y} a saída estimada pela RNA.

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Interações entre as variáveis

Nas correlações de Pearson os níveis de significância para o conjunto de dados, apresentados na Tabela 3, informa a natureza de suas interações. Um valor entre 0,0 e 0,09 (ou entre 0,09 e 0,0) indicaria total falta de correlação, um valor na faixa de 0,1 a 0,3 (ou 0,3 a 0,1) indicaria uma pequena correlação, o intervalo entre 0,3 a 0,5 (ou 0,3 a 0,5) é considerado médio, enquanto as variáveis fortemente correlacionadas mostrariam os valores na faixa de 0,5-1,0 (ou 1,0 a 0,5) (Jha et al., 2014).

Os resultados da Tabela 3 indicam que as variáveis apresentam uma correlação média a baixa. Uma ideia clara sobre a extensão da correlação também é fornecida pelos valores de significância fornecidos na tabela. O valor de significância denota a probabilidade de a correlação ocorrer apenas por acaso. Quanto menor o valor de significância maior é a precisão da correlação. Aqui, a maioria dos valores de significância estão no lado inferior, justificando as observações mencionadas. Deste modo, parece não haver nenhuma variável que seja totalmente independente das outras, limitando o emprego de modelos de regressão e justificando a aplicação de métodos mais robustos capazes de compreender as relações não lineares com a variável de entrada e saída de um alto forno, com redes neurais artificiais.

As correlações apresentaram sinais positivos e negativos sobre suas interações. Foi possível observar que o ganho em densidade reduz a necessidade de consumir maiores quantidades de carbono. Além disso, com a redução do carbono total, tem-se um aumento no consumo de carga metálica, eficiência do alto forno e permeabilidade, fato esse, associado ao ganho em produção de ferro gusa.

O efeito na redução do carbono total pode ser associado à correlação negativa entre permeabilidade com enriquecimento de oxigênio e vazão de ar. Como o enriquecimento de oxigênio reflete principalmente na taxa de injeção de carvão, e uma injeção maior de carvão significa uma menor taxa de carvão vegetal, a permeabilidade do gás diminui e a perda de pressão aumenta com uma maior razão de minério/carvão vegetal na zona granular e coesiva. Isto significa que a carga do alto forno deve ter uma permeabilidade suficiente para dar suporte aos gases ascendentes e manter as operações estáveis. A vazão de ar e oxigênio enriquecido são essenciais para controle de temperatura de chama e aumento da produtividade de

alto forno. Este efeito pode ser observado pelos maiores valores dessas duas variáveis com a produção de ferro gusa.

Deste modo, ao apresentar um cenário de interações complicadas, a aplicação de modelos de regressão se torna restrita, complexa e morosa. Isto justifica a aplicação de métodos mais robustos capazes de compreender as relações não lineares com a variável de entrada e saída de um alto forno.

Tabela 3: Coeficiente de correlação de Pearson e valores significantes.

		Densidade a Granel (kg/m ³)	Carbono Total (Kg/t)	Carga Metálica (kg/t)	Eficiência do Alto Forno (%)	Permeabilidade (Nm ³ /bar.min)	Oxigênio Enriquecido (Nm ³ /h)	Vazão de ar (Nm ³ /h)	Temperatura de Topo (°C)	Produção de Ferro gusa (t/dia)
Densidade a Granel (kg/m ³)	C. Pearson	1	-,324**	,024	,648**	,229	-,081	,041	,002	,301*
	Sig.		,006	,845	,000	,056	,506	,736	,986	,011
Carbono Total (Kg/t)	C. Pearson	-,324**	1	-,143	-,505**	-,270*	,132	,203	-,071	-,118
	Sig.	,006		,238	,000	,024	,278	,092	,559	,329
Carga Metálica (kg/t)	C. Pearson	,024	-,143	1	,118	,249*	-,009	-,357**	-,295*	-,321**
	Sig.	,845	,238		,332	,037	,944	,002	,013	,007
Eficiência do Alto Forno (%)	C. Pearson	,648**	-,505**	,118	1	,448**	,011	-,306**	-,232	,317**
	Sig.	,000	,000	,332		,000	,929	,010	,054	,008
Permeabilidade (Nm ³ /bar.min)	C. Pearson	,229	-,270*	,249*	,448**	1	-,290*	-,374**	-,368**	,217
	Sig.	,056	,024	,037	,000		,015	,001	,002	,071
Oxigênio Enriquecido (Nm ³ /h)	C. Pearson	-,081	,132	-,009	,011	-,290*	1	,430**	,189	,432**
	Sig.	,506	,278	,944	,929	,015		,000	,116	,000
Vazão de ar (Nm ³ /h)	C. Pearson	,041	,203	-,357**	-,306**	-,374**	,430**	1	,261*	,534**
	Sig.	,736	,092	,002	,010	,001	,000		,029	,000
Temperatura de Topo (°C)	C. Pearson	,002	-,071	-,295*	-,232	-,368**	,189	,261*	1	-,107
	Sig.	,986	,559	,013	,054	,002	,116	,029		,377
Produção de Ferro gusa (t/dia)	C. Pearson	,301*	-,118	-,321**	,317**	,217	,432**	,534**	-,107	1
	Sig.	,011	,329	,007	,008	,071	,000	,000	,377	

** . p ≤ 0,01; * p ≤ 0,05.

3.2. Estimação da produção de ferro gusa

Por meio do processo de aprendizagem, foram obtidas as cinco melhores RNA, que mais se ajustaram as características dos dados (Tabela 4). Além das funções de ativação, a rede neural ajustou todos os pesos de forma que, o erro entre a saída desejada e a saída real fosse minimizado. O algoritmo mais adequado foi o Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno – BFGS (Shanno, 1970) (Tabela 5).

Tabela 4: Característica e precisão das redes neurais artificiais selecionadas para estimar da produção de ferro gusa.

Redes	Arquitetura	Treino		Teste		Validação	
		r_{yy}	RMSE%	r_{yy}	RMSE%	r_{yy}	RMSE%
RNA 1	11-10-1	0,96	1,40	0,89	2,57	0,88	2,20
RNA 2	11-11-1	0,98	1,00	0,88	2,88	0,89	3,70
RNA 3	11-10-1	0,95	1,45	0,88	2,66	0,89	2,25
RNA 4	11-10-1	0,96	1,38	0,90	2,50	0,91	2,03
RNA 5	11-10-1	0,97	1,17	0,85	2,94	0,88	2,35

Tabela 5: Configuração das redes neurais artificiais após o treinamento.

Redes	Algoritmo/ N° de ciclos	Função de Ativação	
		Camada Oculta	Camada de Saída
RNA 1	BFGS 18	Exponencial	Logística
RNA 2	BFGS 41	Logística	Identidade
RNA 3	BFGS 22	Logística	Logística
RNA 4	BFGS 19	Exponencial	Logística
RNA 5	BFGS 26	Exponencial	Identidade

A rede que apresentou melhor correlação com o menor erro foi a rede RNA 4. O valor $r_{yy} = 0,96$ para treinamento da rede neural indica que 96% da variação na produção de ferro gusa poderiam ser explicados usando o modelo proposto. Para o teste e validação da rede neural, os valores calculados de r_{yy} são superiores a 0,90, o que indica adequação do modelo proposto para estimação da produção de ferro gusa a carvão vegetal.

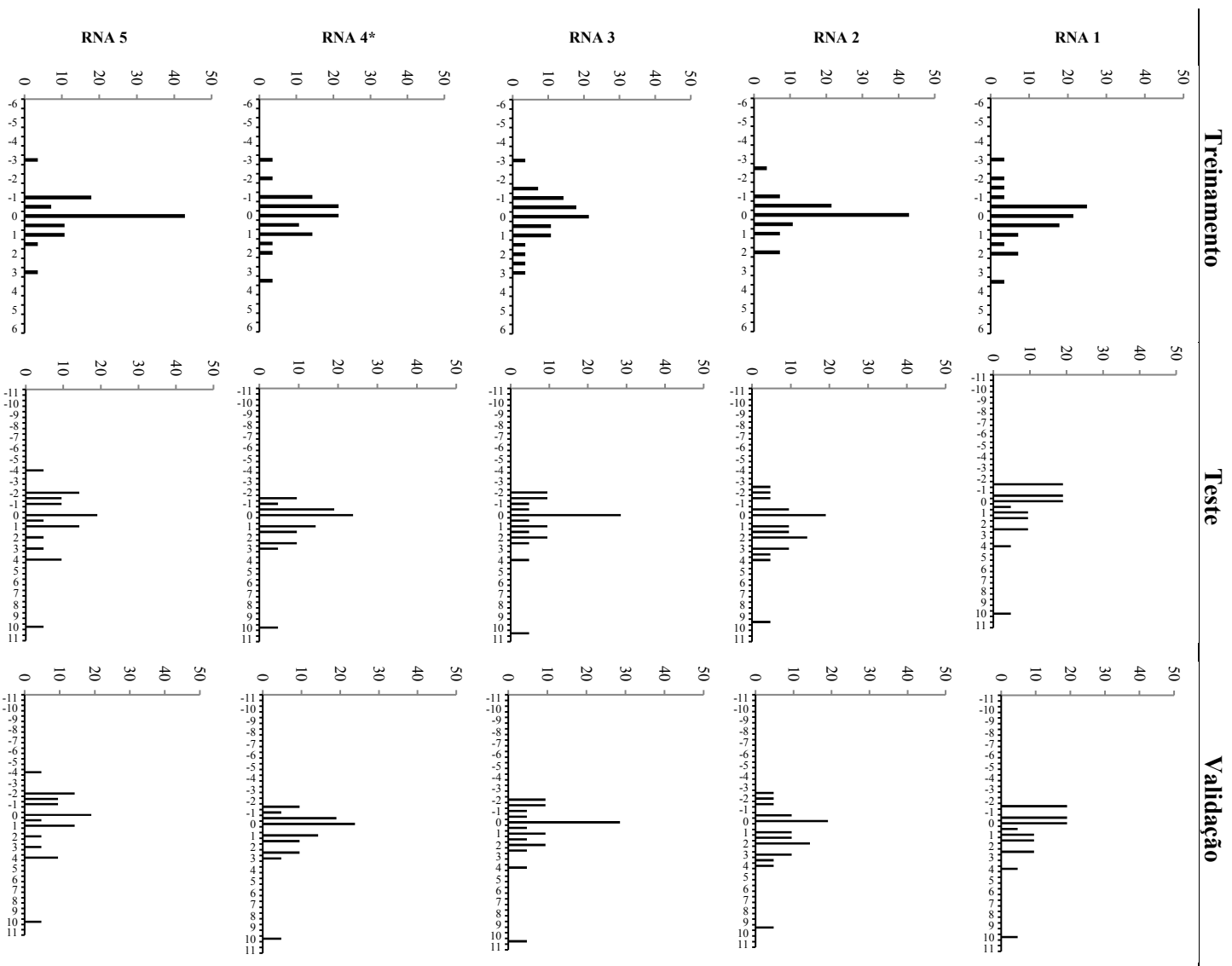
A arquitetura da RNA 4, indicada pelo melhor modelo MLP, possuiu 11 neurônios na camada de entradas, 10 neurônios na camada oculta e 1 saída. Em cada ciclo de treinamento, todo o conjunto de treinamento foi passado pela rede e seu erro foi calculado. As funções de ativação escolhidas nas camadas oculta e de saída são a função exponencial e logística, respectivamente. As funções de ativação dos

neurônios são necessárias para introduzir a não linearidade na rede e sem elas, as RNA multicamadas não se tornariam poderosas (Cox et al., 2002). Apesar da RNA 4 possui arquitetura semelhante a da RNA 2; 3 e 5, nota-se que a condição estatística que define entre as redes testadas, que a RNA 4 seja a melhor.

O Algoritmo BFGS é eficiente na solução de problemas de otimização não linear sem restrição de otimização (Fletcher, 1987). O algoritmo de retropropagação é um método utilizado para determinar os pesos que são otimizados, movendo-se de uma camada para outra em uma direção oposta à maneira como as atividades se propagam através da rede (Gajic et al., 2016). De acordo com Shanno (1970), o algoritmo BFGS permite obter de maneira mais eficiente, o cálculo das atualizações dos pesos, pois os métodos de Quasi-Newton, que usam as derivadas de segunda ordem em uma matriz de Hessian, são capazes de encontrar a solução ótima em menor tempo.

Para verificar a eficiência na estimação da produção de ferro gusa, os histogramas de frequência e erros relativos percentuais das estimativas das RNA (Figura 1), mostraram que a maioria dos erros se concentrou entre o treinamento e teste. Isto ocorre, uma vez que, 70% dos dados foram selecionados no treino e teste, geraram os pesos sinápticos para a validação do modelo. Desta forma, ao considerar que essas estatísticas foram extraídas de valores médios diários, pode-se inferir que os resultados da validação com a RNA foi altamente satisfatória.

Além disso, pelos histogramas foi possível observar a distribuição dos erros das cinco melhores redes, destacando a RNA 4, como a mais adequada. A frequência de erros do treinamento, teste e validação, foram concentradas em 93%, 95% e 90%, entre as classes de erros de -2 a 2, -1,5 a 3 e -2,5 a 2,5, respectivamente. Nesta rede, os valores de erro são menores e aceitáveis, mostrando evidências de que o treinamento e validação foram confiáveis. Para um conjunto de dados pequeno, complexo e com ruídos, este resultado pode ser considerado de grande sucesso.



*RNA com melhor desempenho.

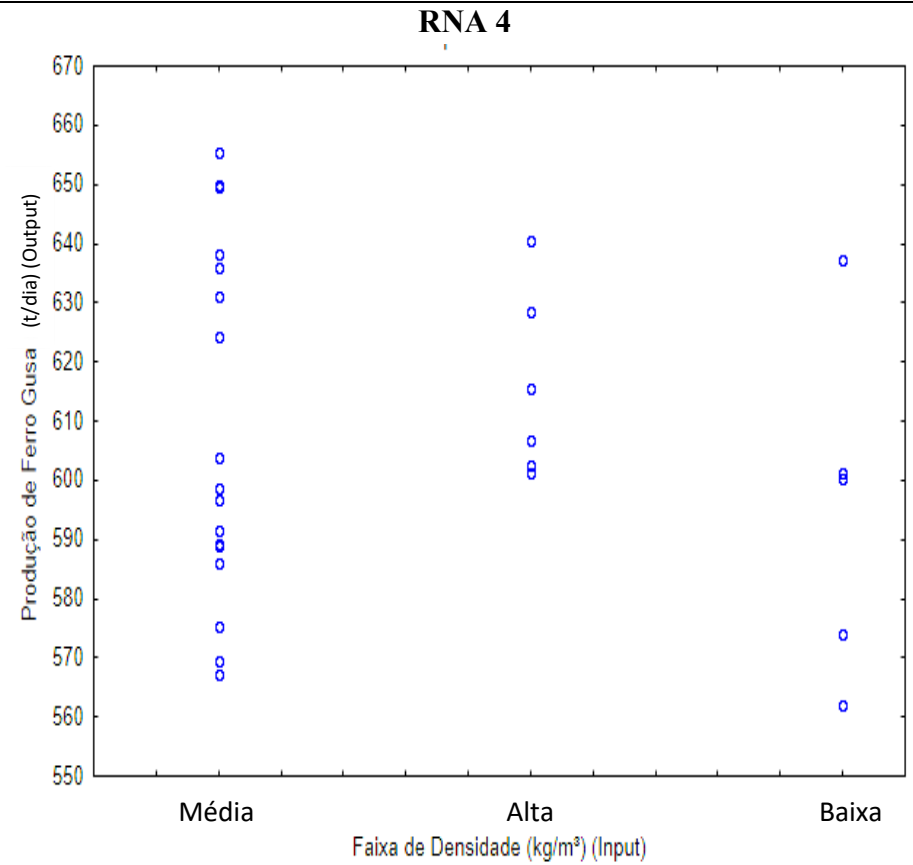
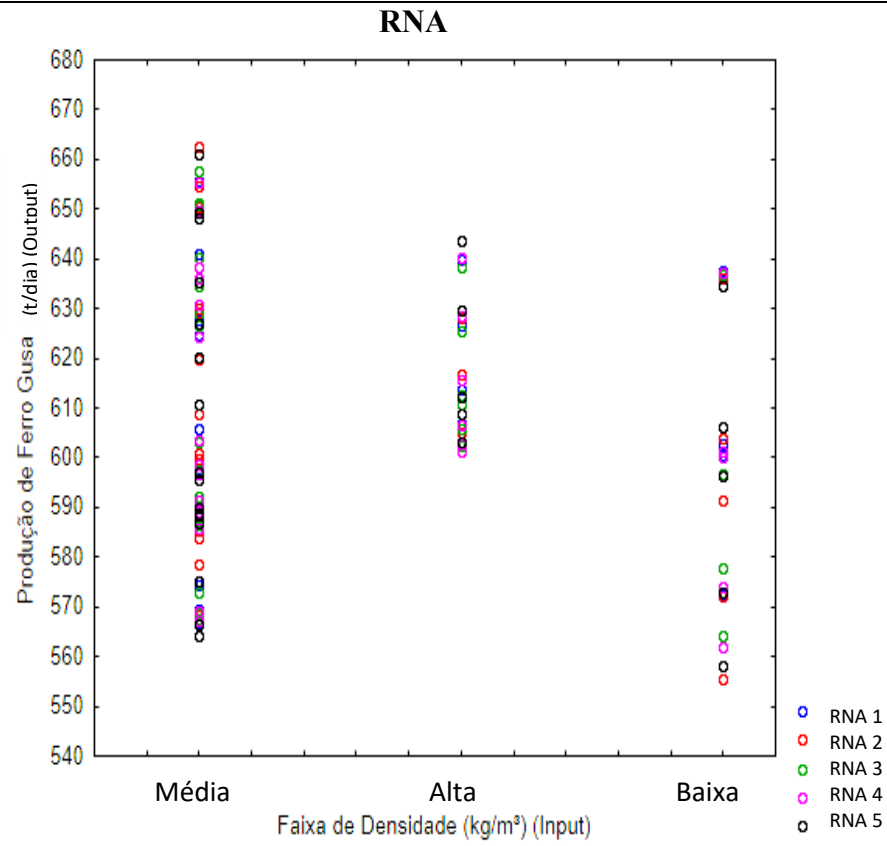
Figura 1: Frequência percentual (eixo y) dos erros relativos percentuais (eixo x) das estimativas das RNA para projeção da produção de ferro gusa no treinamento, teste e validação das redes 1 a 5, respectivamente.

Para qualquer alto-forno a carvão vegetal, o controle da densidade e a quantidade de carbono total, além dos parâmetros do alto forno, são um dos grandes desafios encontrados pelas siderúrgicas. A heterogeneidade do carvão vegetal interfere no volume ocupado no interior do alto forno, assim como, consumo específico de redutor, tempo de residência da carga, controle do nível térmico e qualidade do ferro gusa (Silva e Quintão, 1991). A Figura 2 mostra a influência da faixa de densidade no treinamento, teste e validação da produção de ferro gusa nas cinco redes treinadas e na RNA 4.

Para ambas as RNA a faixa ótima foi a de menor variação em termos de estimativa da produção, obtendo valores acima de 590 toneladas de ferro gusa. Isto mostrar que, o alto forno operou de maneira mais eficiente e estável, resultando em maior produção de ferro gusa. A faixa de maior densidade proporcionou maior eficiência do alto forno, permeabilidade e permitiu maior carregamento de carga metálica e o uso mais eficiente do carbono total, o que contribuiu para maior produção de ferro gusa.

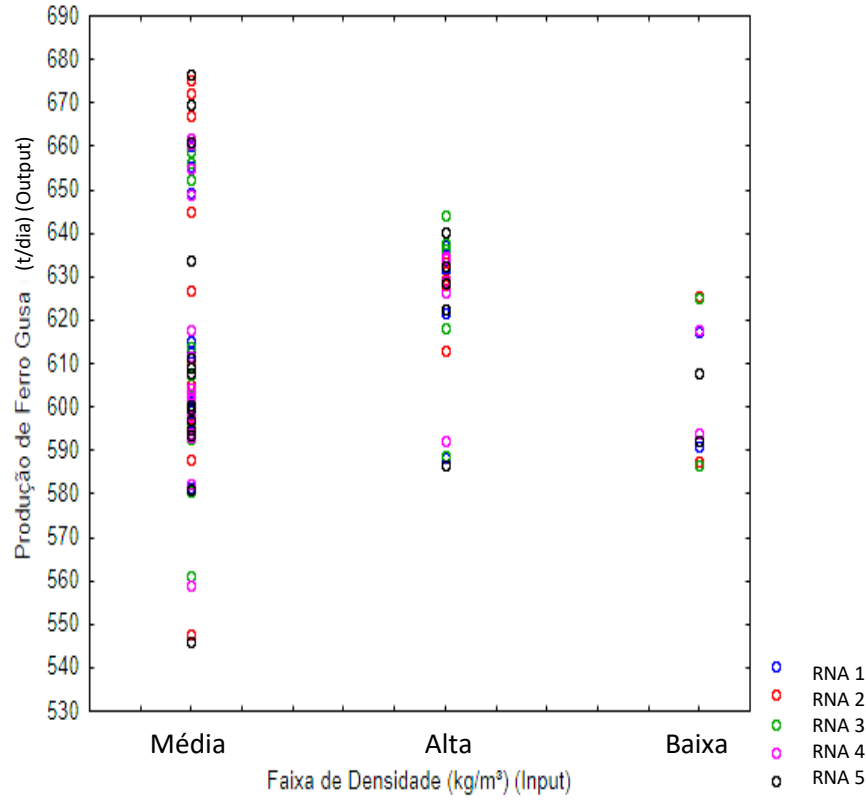
Ao observar as faixas de média e baixa densidade da RNA 4, nota-se que houve uma grande variabilidade na produção de ferro gusa. Isto indica que a nestas faixas, o alto forno operou em uma condição, onde seus parâmetros foram mais instáveis, devido a maior variabilidade na qualidade da matéria prima.

Treinamento

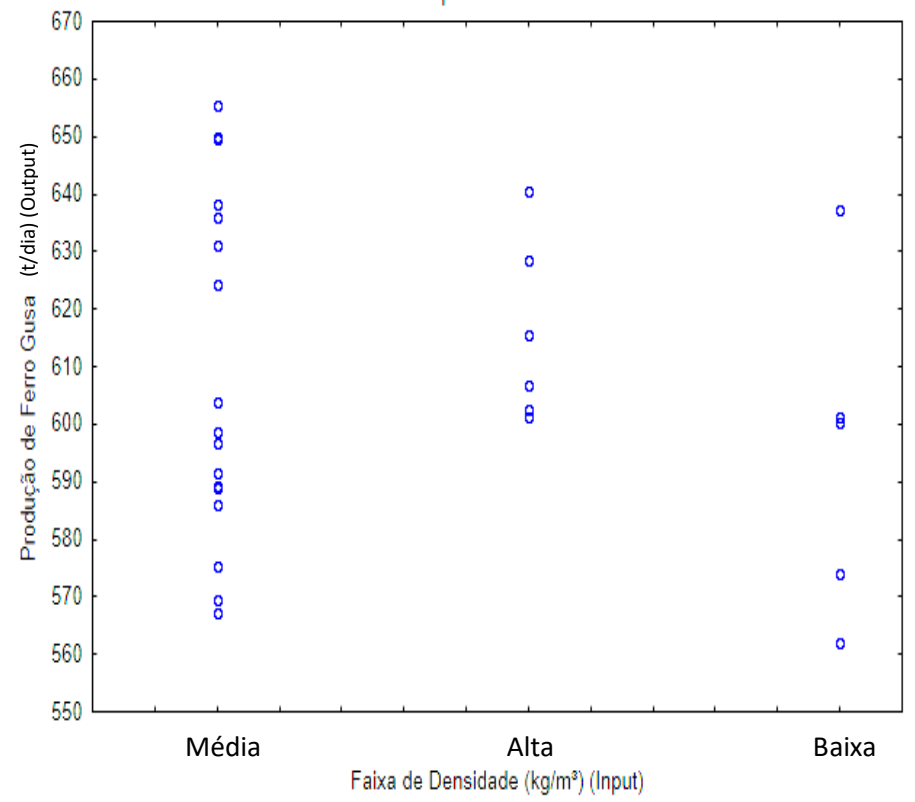


Teste

RNA



RNA 4



Validação

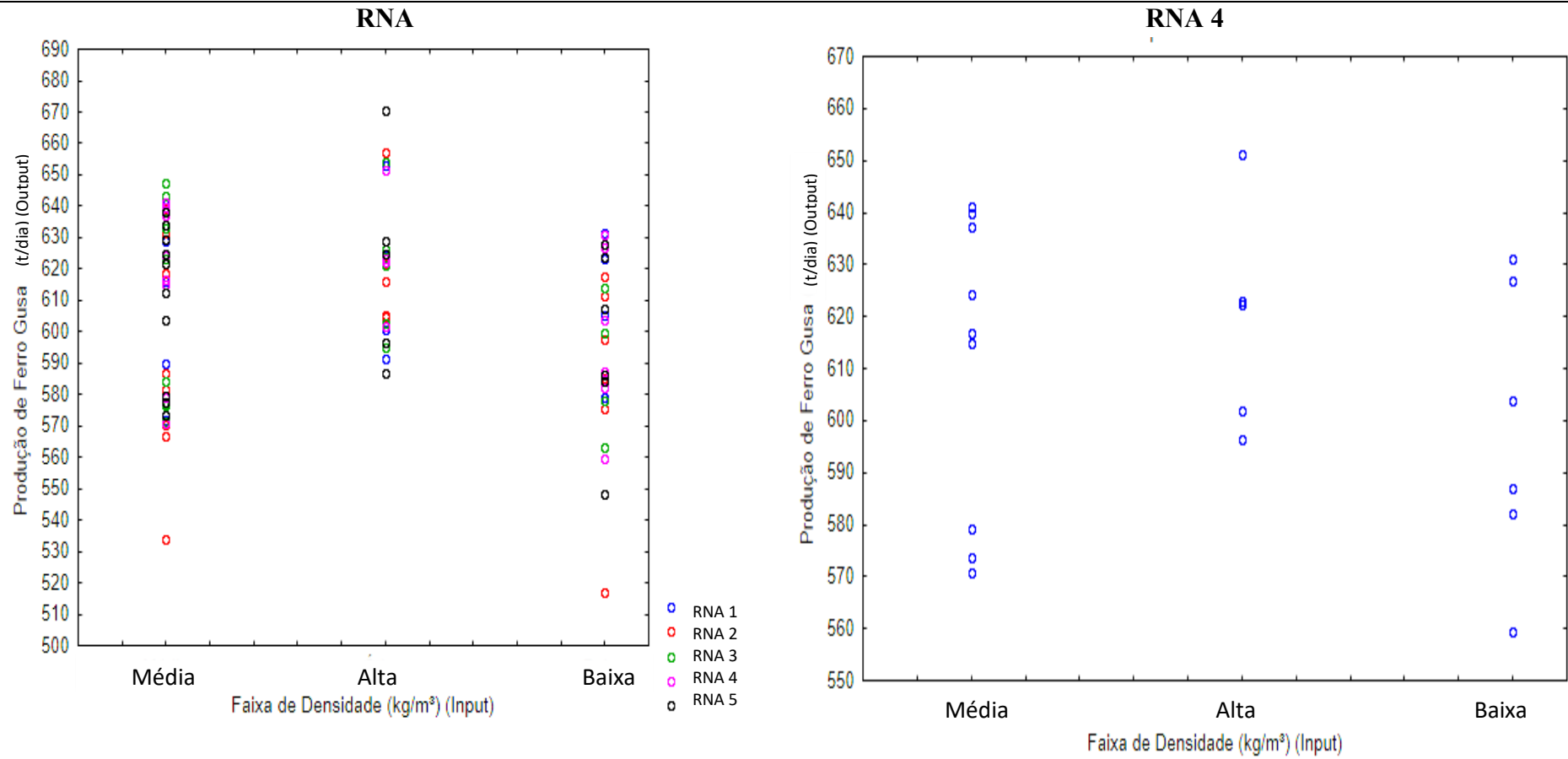


Figura 2: Treinamento, teste e validação da produção de ferro gusa entre as das cinco redes RNA testadas e a RNA 4.

O valor observado da produção de ferro gusa foi representado em relação aos valores estimados obtidos com o modelo da RNA 4 (Figura 3). Foi possível observar que, na validação a rede neural tem uma tendência de subestimar a produção de ferro gusa abaixo de 610 toneladas e superestimar valores acima deste valor. Entretanto, a validação apresentou um coeficiente de correlação de 0,91, sendo no momento o resultado mais relevante encontrado neste trabalho.

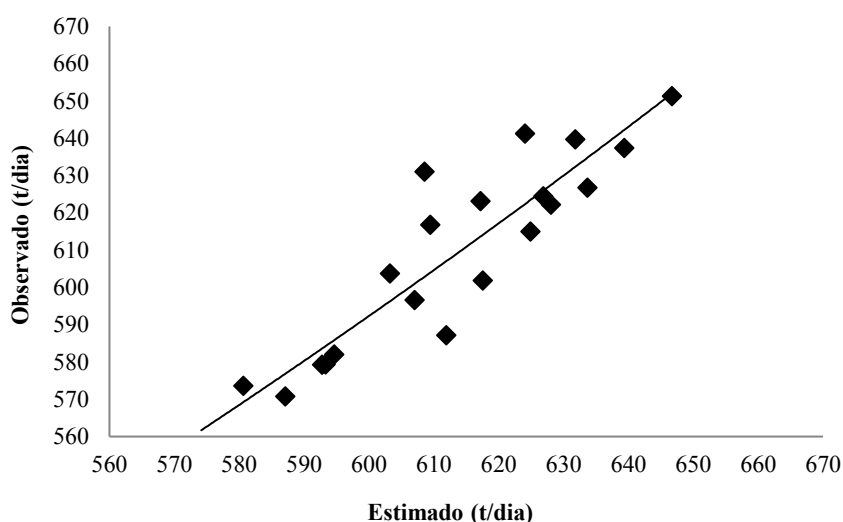


Figura 3: Produção de ferro gusa estimada (eixo y) e Produção de ferro gusa observada (eixo x) por tonelada dia, na validação da RNA 4.

A capacidade de predição do modelo MLP para treinamento, teste e validação é apresentada na Figura 4. A figura mostra a concorrência consistente e valiosa dos valores previstos com os valores reais para todas as faixas de operação da RNA 4. A sensibilidade de modelo robusto para prever os valores de produção de ferro gusa foi alcançada com uma excelente precisão.

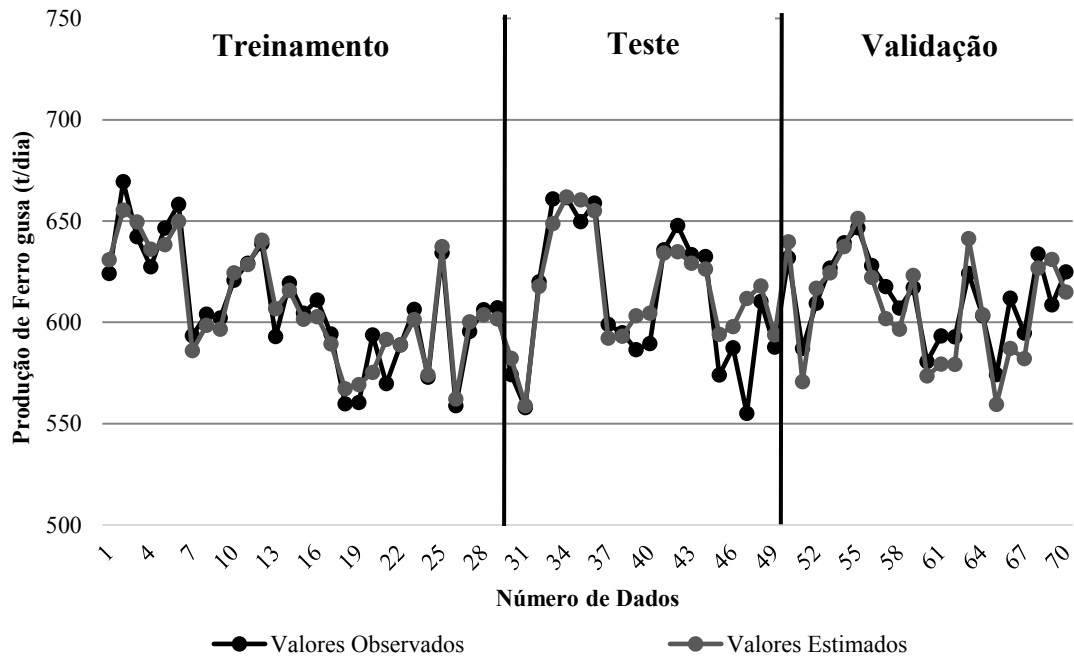


Figura 4: Comparação entre os valores previstos e observados da produção de ferro gusa, pela rede RNA 4.

Neste trabalho, um modelo MLP foi aplicado para prever a produção de ferro gusa em função dos parâmetros de um alto forno 100% a carvão vegetal. Para estimar o efeito dos parâmetros de processo mais importantes de um alto forno, alguns modelos também foram desenvolvidos. Helle et al., (2009) estabeleceu um modelo de otimização do processo de fabricação de ferro de alto-forno com biomassa como redutora auxiliar para o alto-forno, e a minimização do custo de produção foi tomada como objetivo. Os resultados mostraram que a injeção de biomassa pode ser econômica quando seu preço é mais barato do que o preço do minério de coque. Kumar (2015) utilizou redes neurais artificiais para otimizar os parâmetros de saída de um alto-forno a coque. Por meio da coleta de dados operacionais de um mês, foi possível observar a melhoria nos índices de operação e econômicos do alto-forno.

Uma solução para superar algumas dessas deficiências do modelo, consiste em incluir maiores quantidades de dados e treinar novamente a rede neural periodicamente. De acordo com Jiménez et al., (2004), a deficiência de um modelo pode ser superada treinando novas redes neurais toda vez que qualquer entrada exceder o intervalo anteriormente empregado para treinar a rede e re-treinar a rede quando ela começa a lançar previsões ruins.

4.CONCLUSÕES

As redes neurais artificiais são eficientes para estimar a produção de ferro gusa.

O alto forno por ser sistema muito complexo, no qual o gás, o líquido e os sólidos coexistem, a inclusão da variável categórica para a densidade é essencial para avaliar o impacto da densidade do carvão vegetal na produção de ferro gusa.

A rede neural artificial pode ser utilizada como ferramenta preditiva para estimar o desempenho esperado do alto-forno, com variação periódica dos parâmetros de entrada. Além disso, o modelo pode ser utilizado como uma ferramenta de controle de qualidade do carvão vegetal recebido, a fim de aprimorar a relação à economia de material de entrada, produção do alto forno e qualidade do aço produzido. Ela é uma ferramenta útil para aprimoramento de desempenho, que os operadores podem experimentar bastante rotineiramente antes de implementar quaisquer alterações nas condições operacionais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adema, A. Modelling of the Ironmaking Blast Furnace. TU Delft, Delft University of Technology, 2014.
- Agarwal, A, Tewary, U, Pettersson, F, Das, S, Saxen, H, & Chakraborti, N. Analysing blast furnace data using evolutionary neural network and multiobjective genetic algorithms. *Ironmaking & Steelmaking*, v. 37, n. 5, p. 353-359, 2010.
- Braga, A. P, Carvalho, A. P. L. F, Ludemir, T. B. *Redes neurais artificiais: teoria e aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007, 226p.
- Campos, J. C. C, Leite, H. G. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. 5.ed. Viçosa: Editora UFV, 2017, 636 p.
- Castro, M. C. F. *Predição não-linear de séries temporais usando redes neurais RBF por decomposição em componentes principais*. 2001. 186 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
- Chen, J. A predictive system for blast furnaces by integrating a neural network with qualitative analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 14, n. 1, p. 77-85, 2001.
- Cox, I. J, Lewis, R. W, Ransing, R. S, Laszczewski, H, Berni, G. Application of neural computing in basic oxygen steelmaking. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 120, n. 1-3, p. 310-315, 2002.
- Fletcher, R. *Practical methods of optimization* (2nd ed.), New York: John Wiley & Sons, ISBN 978-0-471-91547-8. 1987.
- Gajic, D, Savic-Gajic, I, Savic, I, Georgieva, O, Di Gennaro, S. Modelling of electrical energy consumption in an electric arc furnace using artificial neural networks. *Energy*, v. 108, p. 132-139, 2016.
- Haykin, S. *Redes neurais: princípios e prática*. Porto Alegre: 2001. 900p.
- Helle H, Helle M, Saxen H, Pettersson F. Mathematical optimization of iron- making with biomass as auxiliary reductant in the blast furnace. *ISIJ International*, 49(9), p.1316- 1324, 2009.
- Jha, R, Sen, P. K, Chakraborti, N. Multi-Objective Genetic Algorithms and Genetic Programming Models for Minimizing Input Carbon Rates in a Blast Furnace Compared with a Conventional Analytic Approach. *Steel Research International*, 85, No.2, p.219-232, 2014. DOI: 10.1002/srin.201300074.
- Jimenez, J, Mochón, J, de Ayala, J. S, Obeso, F. Blast furnace hot metal temperature prediction through neural networks-based models. *ISIJ international*, v. 44, n. 3, p. 573-580, 2004.
- Kuang, S, Li, Z, Yu, A. Review on modelling and Simulation of Blast Furnace. *Steel research international*, v. 89, n. 1, p. 1-25, 2018.
- Kumar, D. Optimization of blast furnace parameters using artificial neural network. 2015. 44 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia). National Institute of Technology Rourkela. India. 2015.
- Lek, S, Delacoste, M, Baran, P, Dimopoulos, I, Lauga, J, Aulagnier, S. Application of neural networks to modelling nonlinear relationships in ecology. *Ecological Modelling*, Philadelphia, v. 90, p. 39-52, 1996.
- Medeiros, L. F. *Redes neurais em Delphi*. Florianópolis: Visual Books, 2003, 115p.
- Mehtätalo, L, Maltamo, M, Kangas, A. The use of quantile trees in the prediction of the diameter distribution of a stand. *Silva Fennica*, Vantaa, v. 40, n. 3, p. 501-516, 2006.

Mitra, T. Modeling of burden distribution in the blast furnace. 2016. 89p. These (Doctor of Technology) - Åbo Akademi University, Turku/Åbo, Finland 2016.

Omori Y. Blast furnace phenomena and modelling. London: Elsevier, 1987.

Peacey, J.G, Davenport, W.G. The Iron Blast Furnace. Oxford: Pergamon Press, 1979, 178-180p.

Radhakrishnan, V. R, Mohamed, A. R. Neural networks for the identification and control of blast furnace hot metal quality. Journal of Process Control, v. 10, n. 6, p. 509-524, 2000.

Silva, I N, Spatti, D H, Flauzino, R A. Redes neurais artificiais para engenharia e ciência aplicadas. Curso prático. São Paulo: Artliber, 2010, 400p.

Silva, M. A. M. & Quintão, M. A. Especificações do carvão vegetal e seus efeitos na operação do alto forno. In: Carvão vegetal: produção, propriedades e aplicações na siderurgia. ABM – Associação brasileira de metais. Belo Horizonte, p.110-162, 1991.

Schlang, M, Broese, E, Feldkeller, B, Jansen, M, Poppe, T, Schaeffner, C, Soergel, G. Neural networks for process control in steel manufacturing. In: icassp. IEEE, p. 155, 1997.

Shanno D F. Conditioning of Quasi-Newton methods for function minimization. Math Computation, 24, p. 647-657, 1970.

Ufret, C. M, Williams, T.J. Mathematical model of the blast furnace process, in: D.B. Spalding, N.H. Afgan (Eds.), Heat and Mass Transfer in Metallurgical Systems, Hemisphere Pub Co, Washington, p. 3-27, 1981.

CAPÍTULO 3

ANÁLISE DO CUSTO DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO DO CARVÃO VEGETAL DE DIFERENTES DENSIDADES

RESUMO

Vários são os itens que influenciam nos custos de transporte rodoviários como o tipo de carga, modo de transporte, peso, volume da carga e a distância a ser percorrida. Os custos que ocorrem de maneira independente ao deslocamento do veículo são considerados fixos, enquanto os que variam de acordo com a distância percorrida, são variáveis. O objetivo desse trabalho foi avaliar e quantificar a influência da densidade do carvão vegetal nos custos de transporte. Os dados de densidade a granel (kg/m^3) e teores de carbono fixo (%) foram obtidos em uma usina siderúrgica integrada, no estado de Minas Gerais. Esses variaram entre 302,33 a 166,15 kg/m^3 e 70,00 a 83,87%, respectivamente. O custo de transporte foi calculado em função do peso da carga e preço pago pelo frete e o consumo de combustível, para o mesmo volume (m^3) e distância percorrida (km). Concluiu-se que o quanto maior a densidade do carvão, maiores quantidades de carbono fixo foram transportadas e descarregadas na usina siderúrgica. O acréscimo de 20 kg/m^3 em densidade a granel houve um ganho médio de 2 toneladas de carvão transportado e 1,60 toneladas em carbono fixo. A escolha da composição veicular em função da densidade do carvão seria uma forma de otimizar as frotas de transporte de carvão vegetal para a siderúrgica,

Palavra-chave: Densidade do carvão vegetal; peso e volume de transporte; custo de transporte.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, o carvão vegetal foi o único redutor usado em altos fornos, até que em 1735, Abraham Darby obteve êxito no emprego do coque no processo de fabricação de ferro (Malard, 2009). A inclusão desse insumo levou a um importante aumento na produtividade, uma vez que, o coque apresenta melhor resistência mecânica que permite uso de altos fornos de maior volume. Apesar dos benefícios do uso do coque, o Brasil é um dos únicos que mantem uma siderurgia a base de carvão vegetal em larga escala. Apesar da importância dessa cadeia produtiva do carvão vegetal, os produtores ainda possuem dificuldades na redução dos custos de produção deste insumo, devido à heterogeneidade dos materiais genéticos disponíveis e nível de tecnologia de carbonização empregada.

No manuseio e no transporte do carvão vegetal os custos podem ser mais elevados devido a menor densidade a granel transportada (200 e 400 kg/m³), quando comparada com o carvão mineral (700 e 900 kg/m³) (Perry, 1973). Nas indústrias consumidoras de carvão vegetal, a densidade a granel é o parâmetro mais importante para transporte e manuseio do que a densidade aparente ou verdadeira. Isto ocorre porque enquanto as outras medidas trazem informações sobre mudanças estruturais da biomassa durante a carbonização, a densidade a granel é utilizada para realizar o planejamento com base no volume ou no peso (Weber & Quicker, 2018).

Desta maneira, a inclusão de genótipos com características desejáveis para produção de carvão, como por exemplo, maior densidade básica (kg/m³) com altos teores de lignina, são fatores que, juntos, podem contribuir para o aumento do rendimento de carvão, tornando-os mais competitivos (Sarkanen & Ludwig, 1971; Trugilho et al., 1997; Pereira et al., 2012; Noumi et al., 2015).

Por outro lado, ao reduzir os custos com a logística os grandes produtores e consumidores investiram em eficiência do transporte de carvão vegetal, como forma de melhorar a segurança no trabalho e produtividade. A substituição de carregamento e descarregamento de madeira e enchimento de fornos manual pelo mecanizado é um dos grandes avanços que os custos com logística mais atraente (Lazaretti, 2014). Além disso, a descarga dos fornos, a expedição e o transporte que antes eram manuais, com garfos e “carrinhos rede”, chapas e sacarias, respectivamente, foram substituídos por máquinas pás carregadeiras e por veículos com baú de piso-móvel (descarga automática).

A composição veicular combinada com baú de piso-móvel é a nova tendência para transporte rodoviário de carvão vegetal para substituir os implementos com “gaiolas”. Com piso móvel ou fixo, o novo semirreboque se adequa às novas exigências trabalhistas, combina uma ampla capacidade de carga, possui uma estrutura mais rígida, no qual, reduz o menor custo de manutenção, além do ganho no aumento da velocidade do veículo. A carroceria baú aumenta a produtividade dos veículos, além de ser mais fácil de operar – deslonamento/lonamento e descarregamento (Rodovale, 2015).

Um estudo de caso mais recente na literatura foi realizado por Souza e Silva, (2017), que avaliou e quantificou a influência da densidade do carvão vegetal nos custos de transporte. Além disso, o autor avaliou qual a combinação de veículos de carga mais adequada para realizar o transporte, utilizando-se a Dinâmica de Sistemas. Neste trabalho, verificou-se que um carvão vegetal mais denso influencia na escolha da composição veicular, assim como na capacidade de carga do veículo, reduzindo os custos com o transporte.

Portanto, tendo em vista a necessidade de gerar informações sobre gestão do fornecimento de termorreductor faz-se necessário uma análise sobre o impacto da densidade do carvão vegetal no custo de transporte. Essa avaliação é muito importante, pois o alto custo de transporte é uma das principais barreiras que afeta o desenvolvimento da cadeia produtiva.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de densidade a granel (kg/m^3) e teores de carbono fixo (%) foram obtidos por meio de um banco de dados disponibilizados pela usina siderúrgica integrada, localizada na região do Vale do Aço, município de Timóteo – Minas Gerais. O carvão vegetal descarregado no pátio da usina possuía uma densidade variando de 166,15 a 302,33 kg/m^3 , carbono fixo de 70,00 a 83,87%.

O carvão vegetal foi proveniente de Unidades de Produção de Energia (UPE) da mesma companhia, localizadas nos municípios de Capelinha e Itamarandiba ambas situadas na região mineira do Vale do Jequitinhonha. A distância média das UPE da região de Capelinha e a siderúrgica é de 629 quilômetros (ida e volta).

Como o trabalho foi caracterizado como estudo de caso, os valores coletados na usina siderúrgica foram ordenados em ordem crescente, no qual foi possível observar a amplitude dos valores de densidade a granel recebida e separada em classes, conforme Tabela 1. O teor de umidade médio entre as classes de densidade foi entre 4,8% a 5,8%, sendo irrelevante a sua participação no peso transportado.

Tabela 1: Intervalo das classes de densidade a granel selecionadas.

Classes de Densidade a Granel (kg/m^3)	Centro de Classe (kg/m^3)
170 a 190	180
190,1 a 210	200
210,1 a 230	220
230,1 a 250	240
250,1 a 270	260
270,1 a 290	280
290,1 a 310	300

Para a análise de transporte do carvão vegetal, optou-se pelo método de estudos de caso, devido as variáveis envolvidas ser de natureza complexa e descritiva e desta forma, difíceis de serem captadas em toda sua abrangência por métodos quantitativos. Yin (1994) descreve que a pesquisa pode ser baseada em qualquer combinação de abordagens quantitativas e qualitativas. Normalmente, ela usa várias fontes de dados, incluindo: observações detalhadas diretas, entrevistas e documentos. Além disso, estudos de caso podem envolver casos únicos ou múltiplos.

Desta forma, para caracterizar o transporte rodoviário de carvão vegetal foi utilizado um veículo de carga articulado de maior ocorrência na empresa (Figura 1), no qual, foi composto por um cavalo mecânico de tração 6x4 com um semirreboque

baú de três eixos *tandem* e capacidade de carga útil igual a 34 toneladas com um baú de 110 m³ (14 metros comprimento, 2,60 metros de largura e 3 metros de altura).

Estudos realizados pelo CEL/COPPEAD (2007) verificaram que quanto maior o veículo, maior será a consolidação de carga e, conseqüentemente, maior será o ganho de escala no transporte das mercadorias. Embora a aquisição do equipamento seja mais elevada, os custos são compensados pelo maior volume de carga transportada numa mesma viagem. Desta forma, os custos com frete se tornam, portanto, proporcionalmente menores ao tamanho do veículo.



Fonte: GTC (2018).

Figura 1: Exemplo de um veículo articulado composto por um cavalo-mecânico 6x4 e semirreboque de 3 eixos.

Neste cenário, o valor do frete de um veículo foi de R\$3.623,04, incluídos os custos fixos, variáveis e complementares para a distância percorrida de 629 km (ida e volta). O preço pago pelo quilômetro foi de R\$5,76, onde, o preço do diesel S10 utilizado na análise foi de R\$3,30 por litro (ANP, 2018), onde o rendimento do veículo foi de 2,40 km/L. O valor do frete por viagem foi realizado pela Calculadora de Fretes, disponível em <http://tabelafrete.transp.net/>. Esta ferramenta realiza os cálculos de frete de veículos de acordo com a tabela de fretes dos preços mínimos da ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestre e atualizada com a Resolução N°5.820, de 30 de maio de 2018.

Diariamente, são descarregadas em média 15 carretas de carvão vegetal no pátio da siderúrgica. Desta forma, por mês são descarregadas cerca de 450 carretas, que em um ano equivalem a 5.400 descarregamentos. Para toda a frota foi considerado o valor fixo de preço mínimo de frete.

Para fins de melhorar a gestão do transporte, foram construídos cenários para os pesos de carvão (t) e pesos em carbono fixo (t) para avaliar o impacto econômico nos custos de transporte. Desta forma, o Cenário1 foi baseado na comparação dos

valores médios dos pesos na classe de alta densidade (Centro de Classe de 300 kg/m³) com a classe de média densidade (Centro de Classe de 240 kg/m³). Da mesma forma, o Cenário 2, foi construído com base em comparação entre os pesos da classe de alta densidade com a classe de baixa densidade (Centro de Classe de 180 kg/m³). Todas as análises foram tabuladas em planilha eletrônica.

3.RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1.Distribuição das classes de densidade de carvão vegetal

De acordo com a distribuição dos dados, foi possível observar que as faixas de maior ocorrência de densidade a granel foram entre 170 a 250 kg/m³. Entre elas a faixa que mais se destacou foi a de 230 a 250 kg/m³ (Figura 2). De acordo com Meyers et al., (1979); Santos, (2008) e Rousset et al., (2011) a faixa de densidade ótima para a siderurgia seria entre torno de 250 a 350 kg/m³, no qual foi possível abordar parte delas neste trabalho.

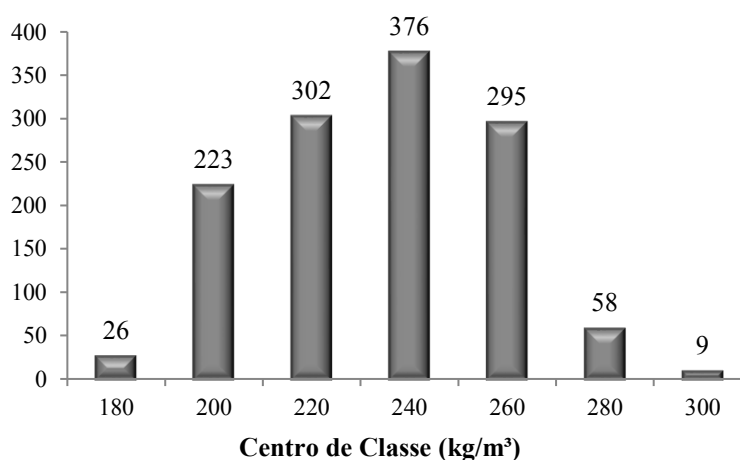


Figura 2: Distribuição das classes de densidade a granel de carvão vegetal (kg/m³).

A escolha dos genótipos e o controle do processo de carbonização influencia na qualidade do carvão vegetal e nos custos de transporte. Moutinho (2013), ao caracterizar espécies de *Eucalyptus sp.* e *Corymbia sp.*, verificou-se que os clones de *C. toreliana x C. citriodora* e *C. citriodora x C. toreliana*, com 5 anos de idade, apresentaram as maiores densidades aparente 0,47 e 0,48 g/cm³, respectivamente, enquanto que o clone de *E. urophylla x E. grandis* e *E. urophylla*, com 6 anos de idade, adquiriu média próxima de 0.31 g/cm³. Tal relação já havia sido relatada em trabalhos anteriores, a citar Brito e Barrichelo (1980), Gomes e Oliveira (1980) e Sturion et al., (1988), entre outros. Frederico, (2009) ao avaliar clones de *Eucalyptus* em várias regiões de Minas Gerais, verificou também que maiores densidade aparente do carvão foi obtida por clones que apresentaram maior densidade básica da madeira. Além disso, os altos teores de carbono fixo foram maiores para aqueles clones que apresentaram maiores teores de lignina (Vital et al., 1986).

Em termos de densidade a granel, um estudo realizado por Picancio (2011), mostrou que 83% do carvão vegetal que foi descarregado na usina, estavam fora dos limites de especificação – Limite Superior de 280 kg/mdc a Limite Inferior de 220 kg/mdc. Por outro lado, ao avaliar a mesma carga em termos de densidade aparente do carvão vegetal, verificou-se que 100% do insumo estavam fora dos limites de especificação - Limite Superior de 560 kg/m³ a Limite Inferior de 480 kg/m³.

Os limites de especificação são importantes porque a densidade a granel possui relação direta com o tempo de residência da carga metálica e eficiência do processo de redução do minério de ferro. De acordo com Silva e Quintão (1991) observaram que quanto maior a densidade do carvão, maior o tempo de residência da carga metálica no interior do alto forno. Quanto maior o contato do gás com a carga, menor o consumo de redutor e maior a produção de ferro gusa. Este efeito só é possível, porque os altos fornos a carvão possuem uma zona de preparação pequena e ao enfiar um carvão de maior densidade obtém menor degradação nesta região.

Desta forma, ao fornecer um carvão vegetal para a siderurgia, é essencial planejar florestas voltadas para a produção de carvão de qualidade e densidade básica da madeira por hectare para melhorar a eficiência do transporte do carvão vegetal desde seu ponto de origem até a usina. A escolha de espécies com madeiras de maior densidade básica proporcionam um carvão mais denso, menos friável devido a maior resistência mecânica (Antal e Mok, 1990; Santos et al., 2011), sendo possível carregar mais carvão por unidade veicular. Além disso, floresta com altos teores de substâncias de natureza aromática, como extrativos e lignina, gera um carvão com maior densidade e maior resistência mecânica (Assis et al., 2016).

O controle dos parâmetros de pirólise, como a temperatura final, a taxa de aquecimento e a pressão, são essenciais para obter um carvão vegetal com maior densidade e resistência mecânica, melhorando a eficiência do termorreductor e contribuindo para um melhor aproveitamento das florestas energéticas. Como consequência, é possível obter ganhos e redução dos custos de produção em toda a cadeia produtiva, ou seja, desde a escolha da espécie, carbonização, transporte e consumo de energia até a produção de ferro gusa.

3.2.Efeitos da densidade do carvão vegetal no montante de carbono fixo transportado

Na indústria siderúrgica, um dos problemas relacionado à utilização do carvão vegetal é sua alta variabilidade em suas propriedades, uma vez que, o rendimento e a qualidade deste produto dependem da qualidade da madeira que lhe deu origem, do equipamento e das condições operacionais da carbonização (Trugilho et al., 2001; Vieira et al., 2013). Essa variabilidade ocasiona grande desperdício de matéria-prima e subutilização da capacidade de transporte, o que contribui para a elevação dos custos de produção do redutor, além de afetar a produtividade dos reatores e qualidade do ferro gusa.

Embora o ganho em carbono fixo seja inversamente proporcional ao ganho em densidade, em função da temperatura final de carbonização, verificou-se que a densidade do carvão vegetal influenciou na quantidade de transportada, ou seja, quanto maior o ganho em peso de carvão, maior a quantidade de carbono fixo por unidade de volume transportada (Figura 3). Nota-se que para um mesmo volume (110 m³ do semirreboque), a carga mínima de carvão foi de 18,28 toneladas com 14,21 toneladas de carbono fixo, a uma densidade a granel de 166,15 kg/m³. Do mesmo modo, ao adicionar um carvão com densidade a granel de 302,33 kg/m³, foi possível ocupar em um mesmo volume de carvão uma carga de 33,26 toneladas com 26,84 toneladas de carbono fixo. Desta forma, o ganho em densidade proporcionou o aumento em 45% de carvão vegetal com 47% de acréscimo em carbono fixo.

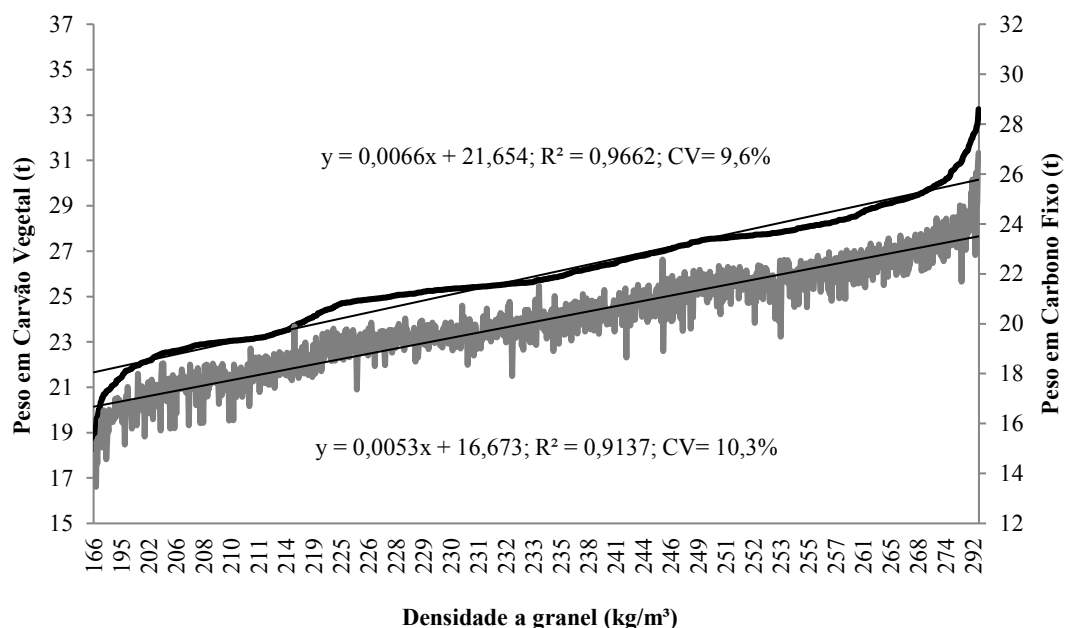


Figura 3: Efeito da densidade a granel na quantidade de carvão vegetal e carbono fixo em um mesmo volume.

Em relação à capacidade de carga do veículo, observa-se que a carreta foi subutilizada nas classes de baixa densidade (220 a 180 kg/m³). Isto significa que a composição veicular poderia ser substituída por outro veículo de menor capacidade de transporte. No entanto, ao transportar uma carga leve em veículos de menores capacidades, ter-se-á necessidade de maior número de movimentação de caminhões nas rodovias. Com o aumento da frota de caminhões, custos adicionais são acrescentados aos custos de transporte e eleva as chances de ocorrências de acidentes devido à precariedade das estradas brasileiras.

Por outro lado, ao avaliar a amplitude das classes de média e alta densidade (240 a 300 kg/m³), observa-se que a composição escolhida atendeu a capacidade necessária de transporte. De acordo com a Resolução CONTRAN N°526/2015, é permitido uma tolerância 5% (cinco por cento) sobre os limites de pesos regulamentares para o peso bruto total (PBT) e peso bruto total combinado (PBTC). Desta forma, o maior peso obtido neste estudo (33,26 toneladas) pode ser transportado na composição avaliada, uma vez que, a tolerância corresponde a um limite de até 34,43 toneladas.

3.3. Efeitos da densidade no peso de carvão e carbono fixo transportado.

Diante das classes de densidade estudadas, foi possível transportar durante um ano, cerca de 109,31; 142,61 e 175,27 toneladas de carvão vegetal entre as classes de 180, 240 e 300 kg/m³, respectivamente. Em termos de carbono fixo, foi possível transportar cerca de 83,47; 110,83 e 134,81 toneladas para o mesmo número médio de descarregamentos anuais, entre as classes de baixa, média e alta respectivamente. Neste contexto, foi possível notar como a escolha do clone e controle do processo de carbonização afetam a eficiência do fornecimento de um insumo de qualidade para a usina siderúrgica.

De modo geral, ao compor os cenários, foi possível observar que ao optar pelo Cenário 1 foi possível descarregar em média cerca de 91 toneladas de carvão vegetal a mais com 67 toneladas de carbono fixo, por dia. Isto significa que em um ano, a empresa poderia ter descarregado cerca de 32.661 toneladas de carvão a mais com 23.978 toneladas de carbono fixo. Por outro lado, nota-se que ao optar pelo Cenário 2, foi possível descarregar em média cerca de 183 toneladas carvão contendo 143 toneladas de carbono fixo, por dia. Em um ano, este acréscimo representou cerca de 65.961 toneladas a mais de carvão vegetal com 51.339 toneladas de carbono fixo. (Tabela 2). Vale ressaltar que durante o período de estudo foram descarregados em média cerca de 15 cargas por dia no pátio da usina siderúrgica, que em um ano, representou 5.400 descarregamentos.

Tabela 2: Peso médio transportado de carvão vegetal e carbono fixo por cenários.

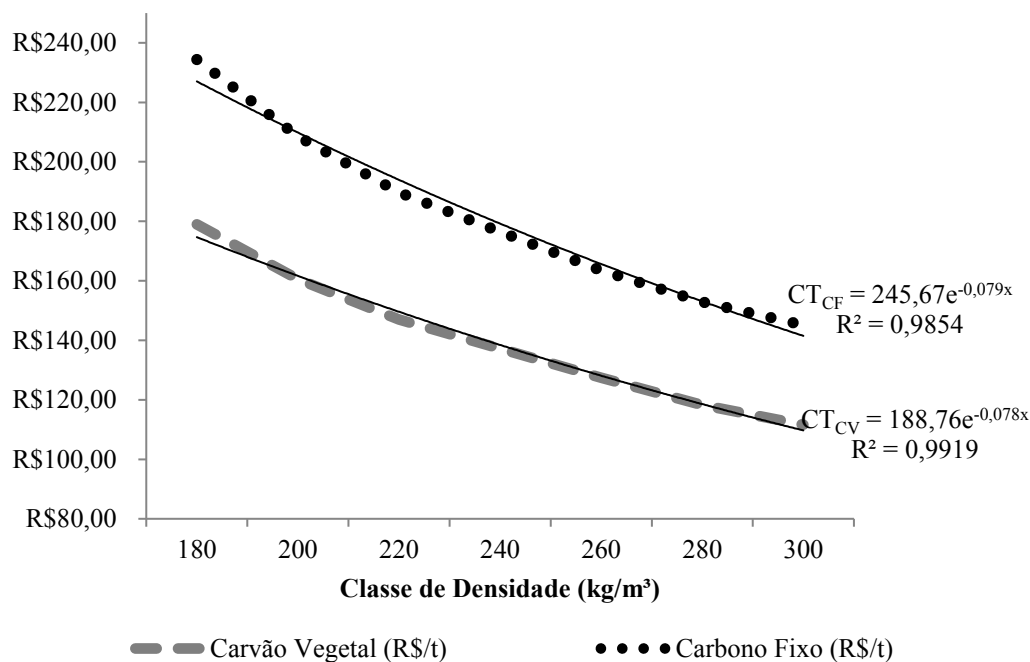
Cenários	Peso Médio/Veículo	Dia	Mês	Ano
Carvão Vegetal (t)				
Cenário 1	6,05	90,73	2.721,79	32.661,42
Cenário 2	12,22	183,23	5.496,77	65.961,29
Carbono Fixo (t)				
Cenário 1	4,44	66,60	1.998,15	23.977,77
Cenário 2	9,51	142,61	4.278,26	51.339,13

Neste sentido, as características intrínsecas da madeira associadas ao rendimento em carbono fixo é uma importante característica quando se pretende indicar um material genético potencial para a produção de carvão. As características do carvão vegetal interferem diretamente na capacidade do transporte e composição veicular, assim como, no rendimento da indústria consumidora. Estudos realizados

por Penedo (1980) apontam que um determinado alto forno consome, em média, 0,5 toneladas de carvão para produzir uma tonelada de ferro gusa. Assim, para um carvão com 80% de CF serão necessários 0,63 toneladas de carvão e para um de 70%, 0,71 toneladas. Portanto, quanto menor a quantidade de CF, maiores a quantidades de carvão enfiado, reduzindo o volume do alto forno ocupado por minério, diminuindo a produtividade.

3.4. Efeitos da densidade nos custos de transporte de carvão vegetal e de carbono fixo.

Ao avaliar o custo de transporte de carvão vegetal em reais por tonelada transportada (R\$/t), observou-se que as classes de maior densidade - centro de classe 260, 280 e 300 kg/m³ – tiveram o menor custo. Por viagem foram gastos em média 127,40; 118,25 e 11,63 R\$/t, respectivamente. Ao avaliar os custos em CF, nestas mesmas classes de densidade, o custo médio de transporte foi equivalente a R\$153,85/t. Neste caso, os valores encontrados foram superiores a do peso, devido as maiores quantidades de CF transportadas por trecho (Figura 4). Por outro lado, ao utilizar o mesmo veículo para transportar um carvão vegetal da classe de 180 kg/m³, o custo com carvão atinge valores médios de R\$178,98/t e em carbono fixo pode atingir valores correspondentes a R\$234,39/t.



Obs: CT_{CF} : Valores de X = (Peso em tonelada de carbono fixo/ Valor do frete).
 CT_{CV} : Valor de X = (Peso em toneladas de carvão/ Valor do frete).

Figura 4: Custo médio do transporte de carvão vegetal (CT_{CV}) e de carbono fixo (CT_{CF}) por trecho (R\$/t).

Ao incluir os custos de transportes de carvão vegetal para cada classe de densidade, observou-se que em um ano, a classe de 180 kg/m³ poderia atingir um custo de R\$ 966.518,00 enquanto que, a classe de densidade de 300 kg/m³ poderia atingir um custo de R\$ 602.776,00 para a mesma composição veicular. Ao avaliar os custos de transporte em carbono fixo, ao optar por um carvão de baixa densidade o custo com transporte poderia equivaler a R\$ 1.265.686,00 enquanto que, para uma classe de alta densidade, o mesmo veículo poderia ter um custo de R\$ 783.680,00. Estas diferenças são essenciais para as tomadas de decisão sobre o transporte de um insumo com características heterogêneas e os cenários a seguir, mostram a importância de avaliar economicamente desses impactos. Vale ressaltar o custo anual com carvão e carbono fixo na classe de densidade média (240 kg/m³) foi de R\$ 740.829,00 e R\$953.223,00, respectivamente.

Sousa e Silva (2017), ao avaliar a influência da densidade nos custos de transporte, entre seis regiões produtoras de carvão vegetal até a usina siderúrgica, verificou-se que o ganho em densidade, proporciona o uso de veículos de maior capacidade de carga (Biminhão: capacidade de carga útil de 34 toneladas). O autor

observou que, ao utilizar o biminhão foi possível economizar cerca de R\$55,33/t, em relação às outras composições avaliadas. Além disso, um veículo de maior capacidade poderia proporcionar uma economia de R\$7.054.425,84 ao ano, ao transportar um carvão de alta densidade ($> 250 \text{ kg/m}^3$). No entanto, vale ressaltar que Sousa e Silva (2017) utilizou a Planilha de Simulação de Custos de Frete para o Transporte Rodoviário de Cargas, disponibilizada pela ANTT, no qual, o cálculo do frete foi realizado em função do preenchimento dos custos fixo, variáveis e distância que a composição veicular percorreu. A Calculadora de Fretes utilizada neste trabalho, inclui a metodologia proposta pela Política de Preços Mínimos do Transporte Rodoviário de Cargas, da Resolução ANTT nº 5820/2018, no qual, possui uma tabela com preços mínimos vinculantes, referentes ao quilômetro rodado na realização de fretes, por eixo carregado.

Desta forma, Evan et al., (2010) relatou que, quanto maior a densidade do carvão vegetal, melhor é a lucratividade em toda a cadeia produtiva. O Cenário 1 mostra que ao optar por um carvão de alta densidade desde um com densidade média, foi possível economizar cerca de R\$ 383,00 por dia com o transporte de carvão e R\$ 471,00 com o transporte em carbono fixo. Diante do Cenário 2, observou-se que ao optar pelo carvão de alta densidade, foi possível economizar por ano, cerca de R\$363.743,00 em carvão vegetal e R\$ 482.006,00 em carbono fixo (Tabela 3). Além da densidade energética transportada, observou-se que a intensidade de descarregamentos diários no pátio da usina siderúrgica foi outro parâmetro-chave na composição dos custos de transporte.

Tabela 3: Economia média no transporte de carvão vegetal e carbono fixo por cenários.

Cenários	Por Veículo (R\$/t)	Dia	Mês		Ano
			Carvão Vegetal (R\$)		
1	25,57	383,48	11.504,48		138.053,79
2	67,36	1.010,40	30.311,89		363.742,67
Cenários	(R\$/t)		Carbono Fixo (R\$)		
1	31,40	470,95	14.128,63		169.543,61
2	89,26	1.338,91	40.167,17		482.006,03

Rogers e Brammer (2009), ao analisarem o custo de transporte de diferentes biomassa, em diferentes distâncias, verificaram que ao utilizar o mesmo tamanho de caminhão (44 t) no transporte de bio-óleo de pirólise rápida e o cavaco de madeira, o

custo de transporte foi menor para o bio-óleo, uma vez que esta biomassa possui maior densidade energética. Este trabalho teve valores próximos ao encontrados por Mota (2013), que ao avaliar o desempenho da cadeia produtiva, verificou que o custo de transporte para empresas de grande porte foi de R\$90/t independentemente do tipo de segmento, no qual, o frete foi um dos fatores de maior custo, dentro da composição dos custos totais da produção de carvão vegetal.

McKendry (2002) relata a importância da densidade a granel na composição dos custos relacionados ao transporte e armazenamento, uma vez que, esta propriedade está associada a requisitos de consumo de combustível, dimensionamento do sistema de manuseio de materiais, assim como, o comportamento durante o processamento subsequente, seja ele termoquímico, biológico como combustível ou matéria-prima. Dados citados pelo *Transport Studies Group*, (1996) já relatavam naquela época, 70% do custo total de biomassa entregue em uma usina, eram gerados pelo custo de transporte rodoviário, uma vez que, ele está presente desde a implantação da cultura até o ponto final do usuário.

Ao otimizar os custos do transporte, a siderúrgica minimiza os prejuízos que um carvão de baixa densidade provoca. De acordo com Hamelinck et al. (2005), devido à baixa densidade de energia da maioria das biomassas, qualquer transporte afeta significativamente o custo resultante da matéria-prima. Na produção de carvão vegetal, onde o investimento em tecnologia é modesto, a participação dos custos das matérias-primas é de 54 a 65% (Suopajarvi, 2014). De acordo com Bruzual, (2015) o custo de transporte do carvão vegetal no Brasil em 2012 era de aproximadamente USD 270/t, a preços mais competitivos que na Alemanha (USD 480/t), Estados Unidos (USD 360/t) e Ucrânia (USD 370/t), no qual são utilizados para aquecimento residencial.

No transporte rodoviário do carvão, o recebimento em peso é uma alternativa para encontrar a melhor relação entre preço e quantidade de energia adquirida. No entanto, a troca de unidade volumétrica para gravimétrica encontra resistência nas empresas quanto ao transporte e recebimento do carvão. Apesar da possibilidade de recebimento de um carvão com baixa qualidade, muito úmido ou contaminado com terra, finos de minério etc., argumenta-se que, esses eventos seriam maiores do que o recebimento em volume. Neste caso, esses desafios só reforçam a necessidade de um efetivo controle de qualidade no recebimento. O investimento em equipamentos (laboratório específico), contratação de pessoal treinado e de confiança, é uma

alternativa para melhorar a gestão, mesmo que para isso, gere um custo adicional. Contudo, acredita-se que este investimento é plenamente justificado quando se consideram as vantagens de se pagar um preço justo pela matéria-prima de maior incidência no custo final do produto, ou seja, o ferro gusa.

Por outro lado, as parcerias entre os setores florestal, industrial e universidades tem obtidos ganhos significativos na busca de matéria-prima que apresente elevada produtividade e potencial energético, ao longo dos anos. Apesar dos avanços, siderúrgicas independentes ainda recebem um carvão vegetal provenientes de clones não selecionados para esta finalidade, devido à deficiência de informação para os produtores florestais. Isto significa que o segmento siderúrgico ainda assume custos significativos por usar uma matéria prima de qualidade inferior. Dessa maneira, os povoamentos florestais destinados à produção de carvão vegetal, devem ser quantificados em toneladas de carvão por hectare, ou toneladas de ferro-gusa, aço, ferroligas e silício metálico por hectare.

4.CONCLUSÕES

Neste trabalho concluir que, quanto maior a densidade do carvão, maiores quantidades de carvão vegetal e de carbono fixo transportados até a usina siderúrgica.

O acréscimo de 20 kg/m³ em densidade a granel houve um ganho médio de duas toneladas de carvão transportado e 1,60 toneladas em carbono fixo, o que afeta os custos de transporte em termos gravimétricos e não volumétricos.

O Cenário 2 foi o que apresentou maior impacto em termos de peso e custo de transporte em relação ao Cenário 1. Para um mesmo volume e distância, 62% dos custos com transporte de carvão vegetal poderiam ser poupados ao transportar um carvão de alta densidade, desde outro pertencente à classe de 180 kg/m³.

As classes de densidade acima de 250 kg/m³ foram as que mais atenderam o orçamento da empresa e a capacidade de transporte útil da composição estudada.

O custo do transporte de uma tonelada foi inversamente proporcional à densidade do carvão e ao teor de carbono fixo. Assim as densidades menores que 250 kg/m³ subutilizaram a capacidade gravimétrica de transporte abaixo de 70%.

A escolha da composição veicular em função da densidade do carvão seria uma forma de otimizar as frotas de transporte de carvão vegetal para a siderúrgica, onde o modal seria composto por outros modelos e capacidades de carga que mais atendam o carvão vegetal transportado em termos gravimétricos.

5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Petróleo - ANP. Sistema de Levantamento de Preços. Síntese dos Preços Praticados - Minas Gerais. Resumo I - Diesel S10 R\$/l. Período: De 26/08/2018 a 01/09/2018. Disponível em: http://anp.gov.br/preco/prc/Resumo_Por_Estado_Municipio.asp. Acesso em: 03 set. 2018.

Antal, Jr, M J, e Mok, W S L. Review of Methods for Improving the Yield of Charcoal from Biomass. *Energy & Fuel*, Vol 4 (3), p.221-225, 1990.

Assis, M. R, Brancheriau, L, Napoli, A, Trugilho, P. F. Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. *Wood Science and Technology*, 50(3), p.519-536, 2016

Brasil. Resolução do CONTRAN nº 526, 29 de abr. 2015. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/download/Resolucoes/Resolucao5262015.pdf>>. Acesso em: 04 set. 2018.

Brasil. Resolução da ANNT nº5.820, de 30 de Maio de 2018. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/cargas/Tabelas_de_Precos_Minimos_do_Transporte_Rodoviario_de_Cargas.html>. Acesso em: 28 ago. 2018.

Brito J. O. & Barrichelo L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão: 2. Densidade da madeira x densidade do carvão. *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais*. (20): 1980.

Bruzual C F. Assessment of CO₂ mitigation potential, biomass use and plantation areas to sustain charcoal-ironmaking. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. São Paulo. 12 (4), p.325-334, 2015.

CEL/COPPEAD. Panorama Logístico – Gerenciamento do Transporte Rodoviário de Cargas – Práticas e Tendências. Relatório de Pesquisa, 2007.

Evans A, Strezov V, Evans T. J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), p.1082–1088, 2009.

Frederico, P. G. U. Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal. 2009. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

Gomes P. A, Oliveira J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: Penedo, W. R. (Org.). *Uso da madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte: CETEC – Centro Tecnológico de Minas Gerais, p.27-41, 1980.

Guia do transporte de carga - GTC. Tipos de veículos e suas capacidades de carga. 2018. Disponível em: http://www.guiadotrc.com.br/guiadotransportador/veiculos_carga.asp. Acesso em: 05 jun. 2018.

Hamelinck CN, Suurs RAA, Faaij APC. International bioenergy transport costs and energy balance. *Biomass Bioenergy*, 29, p.114–34, 2005.

Lazaretti D. S. Logística em operações florestais. A eficiente logística na cadeia do gusa a biorredutor. *Revista Opiniões*. 11(35), Divisão F. 2014.

Malard, A. A. M. Avaliação ambiental do setor de siderurgia não integrada a carvão vegetal do estado de Minas Gerais. 2009. 216p. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade Sócioeconômica e Ambiental). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2009.

McKendry, P. Review paper Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*. 83, p.37–46, 2002.

Meyers, H, Jennings R. F. Charcoal ironmaking - A technical and economic review of Brazilian experience. *SEASIS Quarterly*, 8(3), p.38–80, 1979.

Moutinho, V. H. P. Influência da variabilidade dimensional e da densidade da madeira de *Eucalyptus sp.* e *Corymbia sp.* na qualidade do carvão. 2013. 164p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

Mota, F. C. M. Análise da cadeia produtiva do carvão vegetal oriundo de *Eucalyptus sp.* no Brasil. 2013. 169p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

Noumi, E S., Blin, J, Valette, J, Rousset, P. Combined effect of pyrolysis pressure and temperature on the yield and CO₂ gasification reactivity of acacia wood in macro-TG. *Energy & Fuels*, 29, p.7301-7308, 2015.

Penedo, W. R. Madeira, carvão e gusa. In: Penedo, W. R. (Ed.). *Uso da madeira para fins energéticos*. CETEC: Belo Horizonte, p. 115-142, 1980.

Pereira, B. L. C, Oliveira, A. C, Carvalho, A. M. M. L, Carneiro, A. D. C. O, Santos, L. C, Vital, B. R. Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. *International Journal of Forestry Research*, p. 1-8, 2012.

Picancio, A. C. S. Gestão da qualidade aplicada à melhoria do processo de produção de carvão vegetal. 2011. 86p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa - Viçosa, 2011.

Perry, R, H, Chilton, C. H. *Chemical engineers handbook*. 5th ed. McGraw Hill Kogakusha; 1973.

Rodovale. Inovação em semirreboque para transporte em carvão. 2015. Disponível em: <https://www.caminhoes-e-carretas.com/2015/03/inovacao-em-semirreboque-para-o.html>. Acesso em 26 mai. 2018.

Rousset, P, Figueiredo, C, Souza, M, Quirino, W. Pressure effect on the quality of *Eucalyptus* wood charcoal for the steel industry: a statistical analysis approach. *Fuel Process Technology*, 92(10), p.1890–1897, 2011.

Rogers, J. G, Brammer, J. G. Analysis of transport costs for energy crops for use in biomass pyrolysis plant networks. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, n. 10, p. 1367-1375, 2009.

Santos, R. D, Carneiro, A. C. O, Castro, A. F. M, Castro, R. V. O, Bianche, J. J, Souza, M. M, Cardoso, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. *Scientia Forestalis*, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

Santos, M. A. S. Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In: UFMG, editor. *I Fórum Nacional Sobre Carvão Vegetal*. Belo Horizonte. 2008.

Sarkanen, K. V, Ludwig, C. H. *Lignins: occurrence, formation, structure and reaction*. New York: John Wiley & Sons. 1971.

Silva, M. A. M. e Quintão, M. A. Especificação de carvão vegetal e seu efeito na operação de alto forno. In: *Carvão vegetal: produção, propriedades e aplicações na siderurgia*. Associação Brasileira de Metais. Belo Horizonte, p. 110 – 163, 1991.

Sousa e Silva, W A. Análise de custo do desempenho logístico do transporte de carvão vegetal: um estudo de caso em Minas Gerais. 2017. 96p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

Sturion, J. A, Pereira, J. C. D, Chemin, M. S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. *Boletim de Pesquisa Florestal*, 16, p.55-59, 1988.

Suopajarvi, H. Bioreducer use in blast furnace ironmaking in Finland. Techno-economic assessment and CO₂ emission reduction potential. 2014. 100p. Tese (Doutorado em Training Committee of Technology and Natural Sciences). University of Oulu Graduate School; University of Oulu, Faculty of Technology Acta Univ. Oul. C 513, 2014.

Transport Studies Group. Transport and Supply Logistics of Biomass Fuels, vol. 1. Supply chain options for biomass fuels. ETS. University of Westminster, 1996.

Trugilho, P. F, Regazzi, A. J, Vital, B. R, Gomide, J. L. Aplicação de algumas técnicas multivariadas na avaliação da qualidade da madeira de *Eucalyptus* e seleção de genótipos superiores para a produção de carvão vegetal. *Revista Árvore*, 21 (1), p.113-130, 1997.

Trugilho, P. F, Lima, J. T, Mori, F. A, Lino, A. L. Avaliação de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal. *Revista Cerne*, 7 (12), p.104-114, 2001.

Vieira, R. S, Lima, J. T, Monteiro, T. C, et al. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. *Revista Cerne*, 19 (1), p.59-64, 2013.

Vital, B. R, Jesus, R. M. E, Valente, O. F. Efeito da constituição química e da densidade da madeira de *Eucalyptus grandis* na produção de carvão vegetal. *Revista Árvore*, 10 (2), p.151-160, 1986.

Weber, K, Quicker, P. Properties of biochar. Review article. *Fuel*, v. 217, p.240-261, 2018.

Yin, R. K. Case study research: design and methods. 2nd ed. Thousand Oaks, CA: Sage. 1994.

CONCLUSÕES GERAIS

No Capítulo 1, concluiu-se que com o aumento na densidade, o alto forno opera com maior estabilidade proporcionando maior produção de ferro gusa. Assim, o carvão vegetal de alta densidade gera maior ganho em receita, com menor consumo de carvão vegetal de topo.

No Capítulo 2, concluiu-se que as redes neurais artificiais são eficientes para estimar a produção de gusa e que pode ser uma importante ferramenta para estimar a produção de ferro gusa em função da densidade do carvão vegetal aplicada.

No Capítulo 3, concluiu-se que quanto maior a densidade do carvão vegetal maiores quantidade de carvão carbono fixo foram transportadas, reduzindo os custos da tonelada de carvão vegetal transportada.

RECOMENDAÇÕES

Como continuidade deste trabalho recomenda-se realizar estudos sobre:

- ✓ Cálculo de carbono de “Solution Loss” em altos fornos a carvão vegetal;
- ✓ Uso da análise de componentes principais na produção de ferro gusa;
- ✓ Influência da densidade do carvão vegetal no tempo de residência de carga em um alto forno;
- ✓ Influência da densidade do carvão vegetal no cálculo de base e determinação de uma carga em um alto forno;
- ✓ Influência da densidade do carvão vegetal na porcentagem de silício e de fósforo no ferro gusa;
- ✓ Influência da quantidade de cinza do carvão vegetal na produção de escória de ferro gusa;
- ✓ Influência da densidade do carvão vegetal no PCI do gás de alto forno;
- ✓ Gestão de abastecimento de alto forno em função da densidade do carvão vegetal;
- ✓ Planejamento florestal em função da densidade do carvão vegetal;
- ✓ Automação de altos fornos a carvão vegetal;
- ✓ Estudos sobre a cadeia produtiva do carvão vegetal em relação ao coque – pontos críticos e potencialidades;