



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP - UEMG



Dissertação de Mestrado

“Estudo do Índice de Excesso de Oxigênio (IEO) e sua relação com injeção de carvão mineral e gás natural em Alto-Forno”



AUTOR: Victor Eric de Souza Moreira
ORIENTADOR: Prof. Dr. Eng. Paulo Santos Assis
COORIENTADORES: Me. Henrique Guilherme Lucas Bastos
Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva

Julho de 2020



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP - UEMG

Victor Eric de Souza Moreira

“Estudo do Índice de Excesso de Oxigênio (IEO) e sua relação com injeção de carvão mineral e gás natural em Alto-Forno”

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Processo de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Eng. Paulo Santos Assis

Coorientadores: Me. Henrique Guilherme Lucas Bastos

Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva

Ouro Preto, julho de 2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M838e Moreira, Victor Eric de Souza .
Estudo do Índice de Excesso de Oxigênio (IEO) e sua relação com
injeção de carvão mineral e gás natural em Alto-Forno. [manuscrito] /
Victor Eric de Souza Moreira. - 2020.
88 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Paulo Santos Assis.

Coorientadores: Prof. Dr. Guilherme Liziero Ruggio da Silva, Me.
Henrique Guilherme Lucas Bastos.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro
Preto. Rede Temática em Engenharia de Materiais. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

1. Altos-fornos. 2. Oxigênio. 3. Gás natural. 4. Carvão - Gaseificação.
I. Assis, Paulo Santos. II. Bastos, Henrique Guilherme Lucas . III. Silva,
Guilherme Liziero Ruggio da . IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V.
Título.

CDU 62-5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB: 1716



REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS UFOP - UEMG

Pós-Graduação em Engenharia de Materiais



“Estudo do índice de excesso de oxigênio (IEO) e sua relação com injeção de carvão mineral e gás natural em Alto-Forno”

Autor(a): Victor Eric de Souza Moreira

Dissertação defendida e aprovada, em 24 de julho de 2020, pela banca
examinadora constituída pelos professores:

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

Prof. Paulo Santos Assis (Dr. Ing.) - Orientador

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

Prof. Carlos Roberto Ferreira (Doutor)
Instituto Federal de Minas Gerais
Campus Ouro Preto

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

Prof. Jorge Luiz Bréscia Murta (Doutor)
Universidade Federal de Ouro Preto

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância dos membros Prof. Carlos Roberto Ferreira e Prof. Jorge Luiz Bréscia Murta e que, depois das arguições e deliberações realizadas, cada participante a distância afirmou estar de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora.

Prof. Paulo Santos Assis
Presidente da Banca

*“Porque Deus amou o mundo de tal maneira
que deu o seu Filho unigênito, para
que todo aquele que nele crê não pereça,
mas tenha a vida eterna”.*

João 3:16

AGRADECIMENTOS

Palavras não podem expressar minha gratidão a Deus, por sua maravilhosa graça, por ter feito por mim além daquilo que pedi ou pensei, a Ele seja a glória para todo o sempre.

Agradeço meus pais, padrasto e madrasta, pois, cada qual com suas peculiaridades, contribuíram para formação do meu caráter, da pessoa e do profissional que sou hoje.

Agradeço minha amiga, namorada e esposa, que esteve sempre ao meu lado me motivando em todas as etapas da minha formação.

Agradeço meu filho por me inspirar todos os dias a ser uma pessoa melhor.

Agradeço meus familiares que sempre desejaram o melhor para mim.

Agradeço meus amigos e colegas que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para este trabalho.

Agradeço meu orientador Dr. Eng. Paulo Santos Assis e aos coorientadores, pela competência, seriedade, apoio e orientação acadêmica.

Agradeço à REDEMAT pela oportunidade, à Gerdau Ouro Branco pela confiança e à CAPES pela bolsa.

Por último, mas não menos importante, agradeço ao IF Sudeste MG, em especial à equipe do Núcleo de Metalurgia, por todo apoio e motivação para conclusão desta pesquisa.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1 Cenário	1
1.2 Justificativa e Hipóteses	1
2. Objetivos	4
2.1. Objetivo geral	4
2.2. Objetivos específicos	4
3. Revisão Bibliográfica	5
3.1 Produção de Gusa em Altos-Fornos a Coque.....	5
3.2 A Zona de Combustão.....	8
3.3 Injeção de combustíveis auxiliares em altos-fornos	9
4. Materiais e Métodos	25
4.1 Especificações do Reator	25
4.2 Metodologia do Equacionamento	25
5. Resultados e discussões	29
5.1 Definição e Avaliação Banco de Dados do Alto-forno A.....	29
5.2 Equacionamento da Taxa de Substituição.....	30
5.3 Equacionamento para determinação do Índice de Excesso de Oxigênio (IEO).....	37
5.4 Cálculo e Análise do Índice de Excesso de Oxigênio (IEO) para o banco de dados do Alto-Forno A.....	43
5.5 Modelagem e otimização do IEO	46
6. Conclusões	78
7. Sugestões para Trabalhos futuros.....	80
8. Referências Bibliográficas	81
9. Anexos	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mudança de patamar de valores de IEO[%] com a injeção de carvão mineral e injeção combinada de carvão e gás natural.....	2
Figura 1.2 - Mudança das variáveis de processo: taxa de injeção de carvão pulverizado (PCI Rate[kg/t]), taxa de injeção de gás natural (Gás Natural Rate [kg/t]) e Oxigênio de enriquecimento [%] no período de 01/01/2016 a 05/06/2017.....	2
Figura 3.1 - Principais partes do alto-forno	5
Figura 3.2 - Apresentação esquemática da redução de óxidos de ferro e temperatura ao longo do alto-forno.....	7
Figura 3.3 - Zona de combustão, seção vertical (à esquerda) e horizontal (à direita).....	8
Figura 3.4 - Efeitos gerais da alteração de alguns parâmetros de processo na temperatura de chama e na temperatura de topo	9
Figura 3.5 - Relação entre consumo específico de coque e taxa de injeção de carvão em altos-fornos pelo mundo	11
Figura 3.6 - Exemplo de Instalação de Injeção de Carvão Pulverizado (ICP)	12
Figura 3.7 - Ilustração e visão real de lanças e sistema de injeção de carvão	13
Figura 3.8 - Fatores de limitação que afetam as condições da zona de combustão com Injeção de Carvão Pulverizado (ICP) (RAFT = Temperatura Adiabática da Chama na Zona de Combustão e Ts = taxa de substituição do carvão injetado).....	14
Figura 3.9 - Utilização de gás natural pelos altos-fornos da América do Norte de 1997-2015, em comparação com os preços do gás natural, tanto industrial como comercial	15
Figura 3.10 - Janela de operação de um alto-forno genérico para temperatura de ar soprado de 900°C (região sombreada), e 1100°C. O limite da temperatura do gás de topo e da temperatura de chama foram definidos como 110°C e 1800°C, respectivamente.....	16
Figura 3.11 - Esquema da decomposição térmica do metano.....	17
Figura 3.12 - Diagrama de predominância de fases Fe-H-O	19
Figura 3.13 - Relação da Taxa de substituição com o percentual de carbono fixo (em base seca livre de cinzas)	23

Figura 3.14 – Relação entre taxa de substituição e taxa de injeção	24
Figura 4.1 - Esquema de melhor região para operação considerando altas taxas de injeção de combustíveis e menor consumo de oxigênio de enriquecimento.....	28
Figura 4.2 – Resumo esquemático da metodologia utilizada no trabalho.	28
Figura 5.1 - Produção, Consumo Específico de Coque e consumo Específico de Combustíveis Injetados em médias diárias no período selecionado para análise.	29
Figura 5.2 - Produção, Consumo Específico de Coque e consumo Específico de Combustíveis Injetados em médias diárias após descon sideração de dados de produção atípica	30
Figura 5.3 - Taxa de substituição considerando o período com injeção de carvão mineral.	32
Figura 5.4 - Taxa de substituição considerando o período com co-injeção de carvão mineral e gás natural.	32
Figura 5.5 - Teste de normalidade para a taxa de substituição (Ts) do processo com co-injeção (a) e com injeção de carvão (b).	33
Figura 5.6 - Análise de Variância – ANOVA para as médias de taxa de substituição (Ts) do processo com co-injeção e com injeção de carvão.....	34
Figura 5.7 - Boxplot (a) e a análise de resíduos (b) para a taxa de substituição (Ts) do processo com co-injeção e com injeção de carvão.....	35
Figura 5.8 – Gráfico de dispersão da taxa de substituição versus taxa de injeção de combustíveis.....	36
Figura 5.9 - Gráfico de dispersão da taxa de substituição versus o percentual de gás natural na co-injeção (em vermelho, linhas apenas para referência da tendência crescente).	37
Figura 5.10 - Comportamento geral dos valores obtidos para o IEO no período em estudo (a linha vertical pontilhada define o limite entre a prática de injeção de carvão e co-injeção de carvão e gás natural).	44
Figura 5.11 - Teste de normalidade para IEO do processo com injeção de carvão (a) e com co-injeção (b).	44
Figura 5.12 - Análise de Variância – ANOVA para as médias de IEO do processo com co-injeção e com injeção de carvão.....	45

Figura 5.13 - Boxplot (a) e a análise de resíduos (b) para IEO do processo com co-injeção e com injeção de carvão.	46
Figura 5.14 - Gráfico de intervalos de IEO para diferentes faixas de produção com apenas injeção de carvão mineral.	47
Figura 5.15 – Regressão múltipla para predição do IEO com injeção de carvão com sete variáveis preditoras.....	48
Figura 5.16 – Gráfico de Efeitos Principais das sete variáveis preditoras no valor de IEO no modelo de regressão para processo com injeção de apenas carvão mineral.	49
Figura 5.17 – Gráfico de dispersão da vazão de sopro versus produção com a linha de tendência linear (em vermelho) com R^2 de 0,685 para processo com injeção de carvão mineral.	50
Figura 5.18 – Regressão múltipla para predição do IEO com injeção de carvão com quatro variáveis preditoras.....	51
Figura 5.19 - Gráfico de resíduos da regressão múltipla para predição do IEO com injeção de carvão com quatro variáveis preditoras.	52
Figura 5.20 – Gráfico de dispersão do IEO dos dados amostrado versus o IEO do modelo com a linha de tendência linear (em vermelho) com R^2 de 0,631 para processo com injeção de carvão mineral.	53
Figura 5.21 - Análise de Variância – ANOVA para as médias de IEO do modelo e do IEO dos dados amostrados para processo com injeção de carvão mineral.	54
Figura 5.22 - Gráfico de resíduos da análise de variância das médias de IEO do modelo e do IEO dos dados amostrados para processo com injeção de carvão mineral.	55
Figura 5.23 – Gráfico de Efeitos Principais das quatro variáveis preditoras no valor de IEO no modelo de regressão para processo com injeção de apenas carvão mineral.	56
Figura 5.24 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7000t e temperatura de chama de 2150°C para processo com injeção de carvão mineral.	57
Figura 5.25 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7200t e temperatura de chama de 2150°C para processo com injeção de carvão mineral.	58
Figura 5.26 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7400t e temperatura de chama de 2150°C para processo com injeção de carvão mineral.	58

Figura 5.27 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7600t e temperatura de chama de 2150°C para processo com injeção de carvão mineral.	59
Figura 5.28 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7800t e temperatura de chama de 2150°C para processo com injeção de carvão mineral.	59
Figura 5.29 – Gráfico de Intervalos de temperatura de topo para a faixa de IEO entre 2,0 e 2,5 e de temperatura de topo de todo o período para processo com injeção de carvão mineral.	61
Figura 5.30 – Gráfico de Intervalos de taxa de substituição (Ts) para a faixa de IEO entre 2,0 e 2,5 e de taxa de substituição de todo o período para processo com injeção de carvão mineral.	62
Figura 5.31 - Gráfico de intervalos de IEO para diferentes faixas de produção com processo de co-injeção.	63
Figura 5.32 – Regressão múltipla para predição do IEO com co-injeção com sete variáveis preditoras.....	64
Figura 5.33 – Gráfico de Efeitos Principais das sete variáveis preditoras no valor de IEO no modelo de regressão para processo com co-injeção.....	65
Figura 5.34 – Gráfico de dispersão da vazão de sopro versus produção no processo de co-injeção com a linha de tendência linear (em vermelho) com R^2 de 0,685.....	66
Figura 5.35 – Regressão múltipla para predição do IEO com co-injeção com quatro variáveis preditoras.....	67
Figura 5.36 - Gráfico de resíduos da regressão múltipla para predição do IEO com co-injeção com quatro variáveis preditoras.	68
Figura 5.37 – Gráfico de dispersão do IEO dos dados amostrado versus o IEO do modelo para processo de co-injeção com a linha de tendência linear (em vermelho) com R^2 de 0,661.....	69
Figura 5.38 - Análise de Variância – ANOVA para as médias de IEO do modelo e do IEO dos dados amostrados para processo com co-injeção.....	70
Figura 5.39 - Gráfico de resíduos da análise de variância das médias de IEO do modelo e do IEO dos dados amostrados para processo com co-injeção.	71
Figura 5.40 – Gráfico de Efeitos Principais das quatro variáveis preditoras no valor de IEO no modelo de regressão para processo com co-injeção.....	72

Figura 5.41 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7000t e temperatura de chama de 2150°C no processo com co-injeção.	73
Figura 5.42 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7200t e temperatura de chama de 2150°C no processo com co-injeção.	74
Figura 5.43 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7400t e temperatura de chama de 2150°C no processo com co-injeção.	74
Figura 5.44 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7600t e temperatura de chama de 2150°C no processo com co-injeção.	75
Figura 5.45 – Gráfico de Intervalos de temperatura de topo para a faixa de IEO entre 1,34 e 1,51 (Temperatura do Topo [°C] FxIEO) e de temperatura de topo de todo o período com co-injeção (Temperatura do Topo [°C]).	76
Figura 5.46 – Gráfico de Intervalos da taxa de substituição (Ts) para a faixa de IEO entre 1,34 e 1,51 (Ts Co-injeção FxIEO) e de taxa de substituição de todo o período com co-injeção (Ts Co-injeção).	77

LISTA DE TABELAS

Tabela III.1. Efeito de cinco tipos de injeção em parâmetros do alto-forno, baseado em modelo matemático	10
Tabela III.2: Composição do gás natural considerado nesse estudo.....	15
Tabela III.3: Composição da mistura gasosa gerada pela reação $\text{CH}_4 \leftrightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ (% em volume)	18
Tabela III.4: Informações sobre a injeção de gás natural (GN) nos altos-fornos a coque, da COSIPA em 1997	23
Tabela IV.1 - Principais especificações do reator utilizado no estudo de caso	25
Tabela V.1: Valores médios do período base (all coke).....	31
Tabela V.2: Fatores de correção utilizados no modelo matemático que descreve a taxa de substituição pré-estabelecidos pela empresa.....	31
Tabela V.3: Intervalo de valores de IEO para 5 níveis de produção média considerando o processo de injeção de apenas carvão mineral.....	47
Tabela V.4: Intervalo de valores de IEO para 5 níveis de produção média considerando o processo de co-injeção.....	63

LISTA DE NOTAÇÕES

IEO: Índice de Excesso de Oxigênio.

PCI: Pulverized Coal Injection, em português: Injeção de Carvão Pulverizado.

GN: Gás Natural.

PCI Rate: Pulverized Coal Injection Rate, no português: Taxa de Injeção de Carvão Pulverizado.

ICP: Injeção de Carvão Pulverizado.

RAFT: Raceway Adiabatic Flame Temperature, em português: Temperatura Adiabática da Chama na Zona de Combustão

Ts: Taxa de substituição do combustível injetado.

α : Índice de Excesso de Oxigênio [-];

C_o : Taxa de carbono do coque queimado em frente a ventaneira [kg/kg de gusa];

S_1 : Consumo de gás Natural [m³/kg de gusa];

S_2 : Consumo de Carvão pulverizado [kg/kg de gusa];

V'_{bl} : Volume de ar [m³/kg C_o];

V_1, V_2 : Volume de ar [m³/m³ gás natural] e [m³/kg de carvão pulverizado];

ω : conteúdo de oxigênio no ar [-];

m : consumo teórico de oxigênio para combustão de 1m³ de gás natural [m³];

n : consumo teórico de oxigênio para combustão de 1kg de carvão pulverizado [m³];

C^w : teor de carbono no carvão mineral pulverizado;

H^w : teor de hidrogênio no carvão mineral pulverizado;

$\Delta\omega$: incremento de oxigênio no ar [-];

$\Delta\alpha$: incremento no Índice de Excesso de Oxigênio requerido [-];

V'_{bl} : Volume atual de ar [m³/kg C_o];

ΔS_2 = Incremento no consumo de carvão pulverizado [kg/kg de gusa];

ΔS_1 = Incremento no consumo de gás natural [m³/kg de gusa];

$V_{O_2}^{Disponível}$ = Vazão de oxigênio disponível;

$V_{O_2}^{Necessário}$ = Vazão de oxigênio necessário para oxidação dos combustíveis.

RESUMO

A pesquisa propôs definir uma equação para determinar o potencial de oxidação da zona de combustão, denominado como Índice de Excesso de Oxigênio (IEO) e estabelecer uma relação entre este e o percentual de enriquecimento do ar soprado, a taxa de injeção de carvão mineral pulverizado e a taxa de co-injeção de carvão e gás natural em várias faixas de produção. Utilizou-se de modelagem matemática, a fim de se obter qual seria a faixa de valores ótimos dessas variáveis, com foco no melhor aproveitamento do oxigênio que enriquece o ar soprado, maior taxa de injeção de combustíveis auxiliares e menor consumo de coque. Foi possível calcular a taxa de substituição com processos de injeção de carvão mineral e de co-injeção de carvão e gás natural e compara-las. Foi obtido uma fórmula para cálculo do IEO para o Alto-Forno objeto do estudo aplicada tanto para o processo de injeção de carvão mineral quanto para co-injeção, onde foi evidenciado IEO para Injeção de Carvão com média de 2,53 e desvio padrão de 0,20 e IEO para Co-injeção com média de 1,57 e desvio padrão de 0,11. Construiu-se um modelo matemático que relaciona Produção Diária, Temperatura de Chama, Taxa de Injeção de Combustíveis e Percentual de Enriquecimento como variáveis preditoras do valor de IEO, para ambas as práticas de injeção, com aplicabilidade satisfatória. Através do modelo construído, foi possível construir diagramas para identificar a faixa de valores de IEO típica do processo bem como uma faixa alternativa, com valores menores para o IEO, possíveis, e sem grandes impactos na temperatura de chama, na temperatura do topo e na taxa de substituição, auxiliando assim um planejamento otimizado das principais variáveis envolvidas no processo de injeção.

Palavra-chave: Alto-forno, Índice de Excesso de Oxigênio, Injeção de Gás Natural, Injeção de Carvão Mineral Pulverizado, Co-injeção.

ABSTRACT

The research aimed to define an equation to ascertain the oxidation potential of the raceway, called Oxygen Excess Index (OEI) and establish a relation between it and the percentage of enrichment of blast air, the pulverized coal rate and the co-injection rate of coal and natural gas in several ranges of production, through mathematical modelling, in order to obtain the 'optimal values range' of these variables, focusing in the best utilization of oxygen that enriches the blast air, highest rate of auxiliary fuels injection, lowest coke rate and, thus the lowest costs. It was possible to calculate the replacement rate with coal injection and co-injection processes and compare them. The equation obtained for the calculation of OEI to the blast furnace object of the study was applied both to the process of mineral coal injection and the co-injection of coal and natural gas, where it was highlighted OEI to the coal injection with mean of 2.53 and standard deviation of 0.20 and OEI for the co-injection with mean 1.57 and standard deviation of 0.11. It was possible to build a mathematical model that relates daily production, flame temperature, fuel injection rate and percentage of enrichment as predictor variable of OEI for both the practices of injection, with satisfactory applicability. Through the model built it was possible to build diagrams to identify the range of OEI values typical of the process as well as an alternative range, with values lower to the OEI, possible, and without significantly negative impact in the flame temperature, in the top temperature and in the replacement rate, assisting like that an optimized planning of the main variables involved in the injection process.

Keyword: Blast Furnace, Oxygen Excess Index, Natural Gas Injection, Pulverized Coal Injection, Co-injection.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Cenário

O alto-forno siderúrgico é um reator cujo principal produto é o ferro-gusa, matéria-prima para produção do aço. A eficiência em redução dos óxidos de ferro por este processo tem perpetuado seu uso mundialmente ^[1]. Um dos desafios da operação de altos-fornos é determinar práticas operacionais que maximizem a produção, com segurança operacional e de pessoas e mínimo desgaste dos equipamentos ^[2].

A injeção de combustíveis auxiliares é uma prática consolidada e que pode melhorar a performance do reator, aumentando a produtividade, facilitando o controle térmico do processo e, conseqüentemente, promovendo estabilidade operacional, entretanto, se parâmetros assertivos não forem estabelecidos, tal injeção pode ser deletéria, alterando a marcha produtiva do alto-forno além da possibilidade de ocasionar acidentes operacionais ^[3].

Ter estudos e modelos de cálculo para planejamento do consumo de combustíveis de injeção em altos-fornos, que possibilite ajustes às especificações do reator e promovam a eficiência do processo é um diferencial, uma vez que a injeção dos combustíveis auxiliares e o consumo de oxigênio é impactante no custo do gusa e conseqüentemente na competitividade da empresa frente ao mercado ^[4].

1.2 Justificativa e Hipóteses

Em análises preliminares no Alto-forno objeto de estudo desse projeto, no período de 01/01/2016 a 05/06/2017, foram observadas significativas alterações no Índice de Excesso de Oxigênio (IEO), (definido no Capítulo 3) na prática de produção somente com injeção de carvão mineral pulverizado (PCI) em comparação a períodos de injeção combinada de carvão mineral pulverizado e gás natural (GN). Na Figura 1.1 é demonstrada, em destaque, a mudança de patamar do IEO e na Figura 1.2 é demonstrado o período mais longo a fim de se ver a alteração no consumo de oxigênio de enriquecimento, a inclusão do gás natural e a redução da taxa de injeção de carvão pulverizado (PCI Rate).

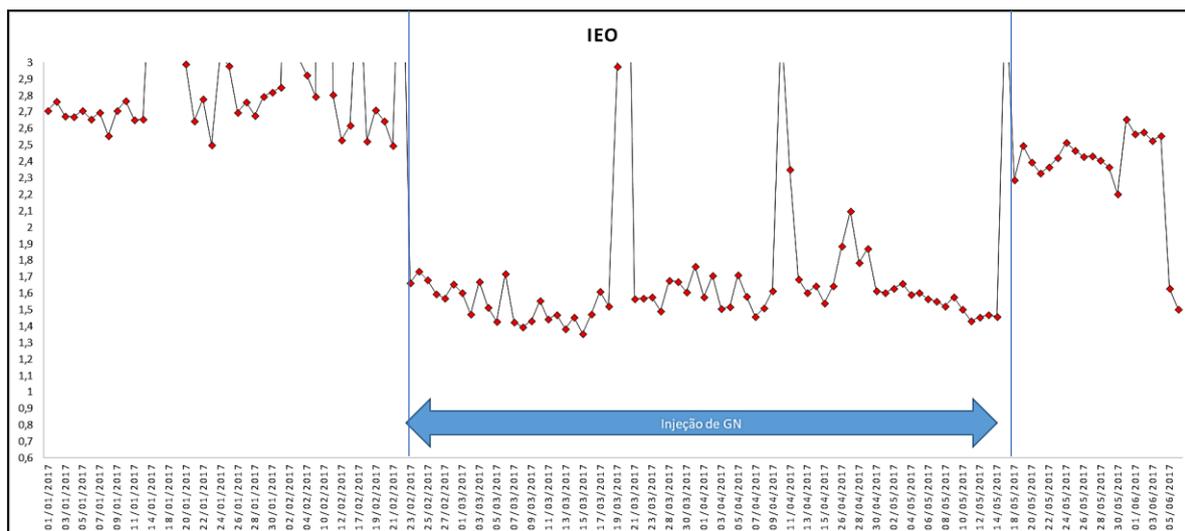


Figura 1.1 - Mudança de patamar de valores de IEO[%] com a injeção de carvão mineral e injeção combinada de carvão e gás natural.

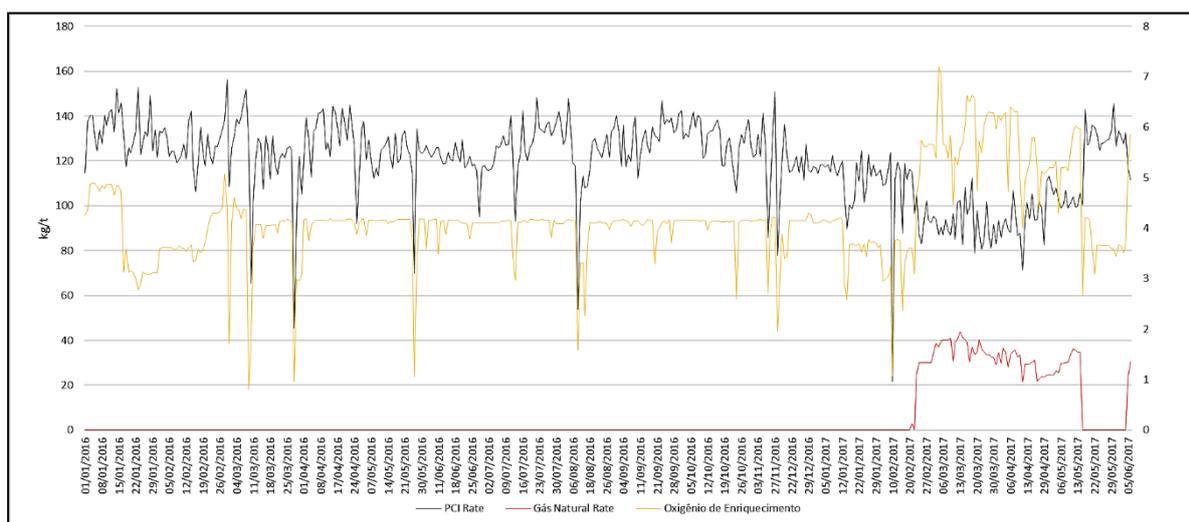


Figura 1.2 - Mudança das variáveis de processo: taxa de injeção de carvão pulverizado (PCI Rate[kg/t]), taxa de injeção de gás natural (Gás Natural Rate [kg/t]) e Oxigênio de enriquecimento [%] no período de 01/01/2016 a 05/06/2017.

Nota-se que, apesar do aumento do consumo de oxigênio de enriquecimento (linha amarela na Figura 1.2), o IEO é menor quando se faz o uso combinado de GN e carvão mineral se comparado com a operação com somente injeção de carvão mineral (Visto na Figura 1.1). No Capítulo 3, Revisão Bibliográfica, ver-se-á que o aumento da necessidade de oxigênio é justificável com a utilização de GN, entretanto, a diferença entre o índice de excesso de oxigênio dessas duas práticas operacionais é algo curioso, uma vez que não foi encontrado

trabalhos publicados que tratem da análise e otimização desse índice frente às demais variáveis do processo de produção de ferro-gusa através de altos-fornos.

Nessa análise preliminar levantou-se a necessidade de compreensão e definição de valores de referência para este parâmetro, sendo assim, a pesquisa partiu da hipótese de que há uma “faixa de valores” ótima na relação entre Taxa de injeção de combustíveis auxiliares (carvão mineral e gás natural), Índice de Excesso de Oxigênio e oxigênio que enriquece o ar soprado, sem comprometimento da taxa de substituição desses combustíveis (que remete diretamente ao consumo de coque) e da temperatura no topo do alto-forno.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Estabelecer uma relação entre Índice de Excesso de Oxigênio, Percentual de Enriquecimento do Ar Soprado, Taxa de Injeção de Carvão Pulverizado, Taxa de injeção de Gás Natural e seu impacto na Taxa de Substituição desses combustíveis, na temperatura do topo do alto-forno e na temperatura de chama.

2.2. Objetivos específicos

- i. Calcular a taxa de substituição do carvão mineral e do gás natural;
- ii. Definir a fórmula para cálculo do Índice de excesso de Oxigênio (IEO);
- iii. Avaliar a relação entre IEO, Taxa de Injeção de Carvão Mineral e Gás Natural, Percentual de Enriquecimento, Taxas de Substituição e a temperatura do topo do alto-forno;
- iv. Obter valores ou faixas em que se tenha melhor aproveitamento do oxigênio, melhor taxa de injeção de combustíveis auxiliares sem impactos negativos no consumo de coque, na temperatura do topo e na temperatura de chama.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Produção de Gusa em Altos-Fornos a Coque

O alto-forno é um reator destinado à produção do ferro-gusa, matéria-prima para produção de aço e ferro fundido. O ferro-gusa é uma solução ferro-carbono composto de 90 a 95% de ferro, 3,0 a 4,5% de carbono, elementos de liga como silício (Si) e manganês (Mn) e elementos residuais, geralmente indesejados, como fósforo (P) e enxofre (S). No alto-forno, o ferro-gusa é obtido a partir da redução de óxidos de ferro e fusão do metal em contracorrente com os gases redutores (CO e H_2) ^[4].

Os principais subprodutos gerados no alto-forno são: escória, gás de alto-forno, pós e lama. A escória é obtida pela fusão e separação da ganga das matérias-primas, dos fundentes e cinzas do redutor. É constituída, em sua maioria, de MgO , CaO , Al_2O_3 e SiO_2 . O gás do alto-forno a coque é constituído de 20 a 25% de CO e 3% de H_2 podendo ser usado como combustível, com um poder calorífico de 700 a 800 kcal/Nm³. Os outros produtos (pó e lama) geralmente são aproveitados na siderurgia como matéria-prima em processos de aglomeração/sinterização de finos de minério de ferro ^[2]. A Figura 3.1 ilustra, esquematicamente, o perfil de um alto-forno e suas principais partes estruturais.

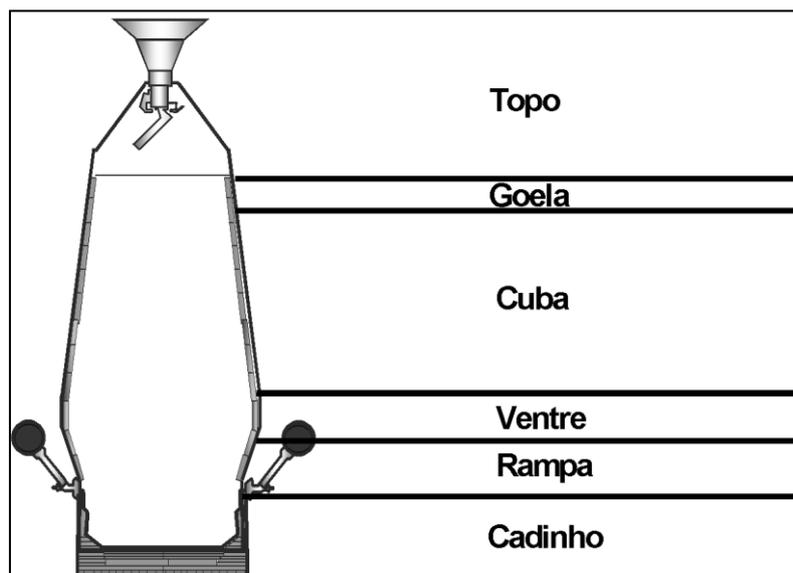


Figura 3.1 - Principais partes do alto-forno ^[5 APUD 4].

O topo é a parte superior do alto-forno, onde a carga é carregada e os gases são coletados para serem conduzidos ao sistema de limpeza de gás.

A cuba possui um formato tronco-cônico, com diâmetro maior na parte inferior. É a maior região volumétrica do alto-forno. O formato é para compensação da expansão da carga devido ao aumento da temperatura. Nessa região ocorrem as principais reações de redução.

O ventre é a região acima da rampa, onde os gases se expandem e se distribuem através da zona de amolecimento e fusão.

A rampa é a região entre as ventaneiras e o ventre. Nela, se tem a zona de combustão, onde os combustíveis de injeção (carvão e/ou gás natural) e o coque reagem com o oxigênio; essa região da origem ao início da zona de amolecimento e fusão.

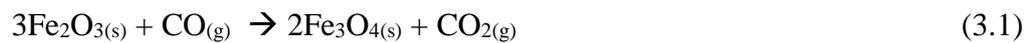
O cadinho é a região inferior do alto-forno onde o material líquido (gusa e escória) é armazenado antes de ser drenado. Tem-se a presença de líquidos, sólidos e gases, o gusa e a escória (líquidos) se separam por diferença de densidade e imiscibilidade ^[4].

Do ponto de vista físico-químico, o alto-forno é um reator que trabalha em contracorrente (carga sólida e líquidos descendentes e gases ascendentes), onde os principais fenômenos são: trocas térmicas e reações químicas. Os gases quentes trocam calor e reduzem a carga metálica ^[6]. Basicamente o ar aquecido a temperaturas da ordem de 1200°C, é soprado, pelas ventaneiras do alto-forno a coque, este entra em contato com o coque no raceway (zona de combustão) ou com combustíveis de injeção (como carvão e gás natural). O oxigênio do ar soprado junto ao carbono dos combustíveis, aquecido a aproximadamente 1500°C, provoca, inicialmente, a reação de formação do dióxido de carbono (CO₂). Essa reação é altamente exotérmica, produzindo grande quantidade de calor. O dióxido de carbono, a temperaturas acima de 950°C (para altos-fornos a coque) reage com o carbono do coque formando monóxido de carbono (CO), segundo a reação de *solution loss* (gaseificação do coque) ou Boudouard ($C_{(s)} + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO_{(g)}$), endotérmica ^[7].

A umidade (H₂O) contida no ar soprado reage com o carbono do coque, gerando os gases redutores CO e H₂, tal reação ocorre em pequenas proporções uma vez que a umidade do ar soprado é muito baixa.

O processo de contracorrente permite que o gás altamente redutor, com teor elevado de monóxido de carbono (CO), entre em contato com a *wustita* (FeO), que apresenta o menor

potencial de oxigênio dos três óxidos principais de ferro, e, após, faz com que a hematita (Fe_2O_3) e a magnetita (Fe_3O_4) sejam reduzidas, nas camadas superiores da carga, por um gás de menor potencial redutor. O CO_2 é o produto gasoso das reações. Essas reações são chamadas de redução indireta, sendo a reação global medianamente exotérmica. Caso alguma *wustita* chegue ao cadinho não reduzida, esta sofre redução direta pelo carbono devido as temperaturas excederem a 1000°C . A seguir são demonstradas as equações (Equação 3.1, 3.2, 3.3, e 3.4) [8].



Na Figura 3.2 observa-se um esquema simplificado da remoção de oxigênio da carga que ocorre com as reações supracitadas, bem como a faixa de temperatura típica e região ao longo da altura do alto-forno em que ocorrem.

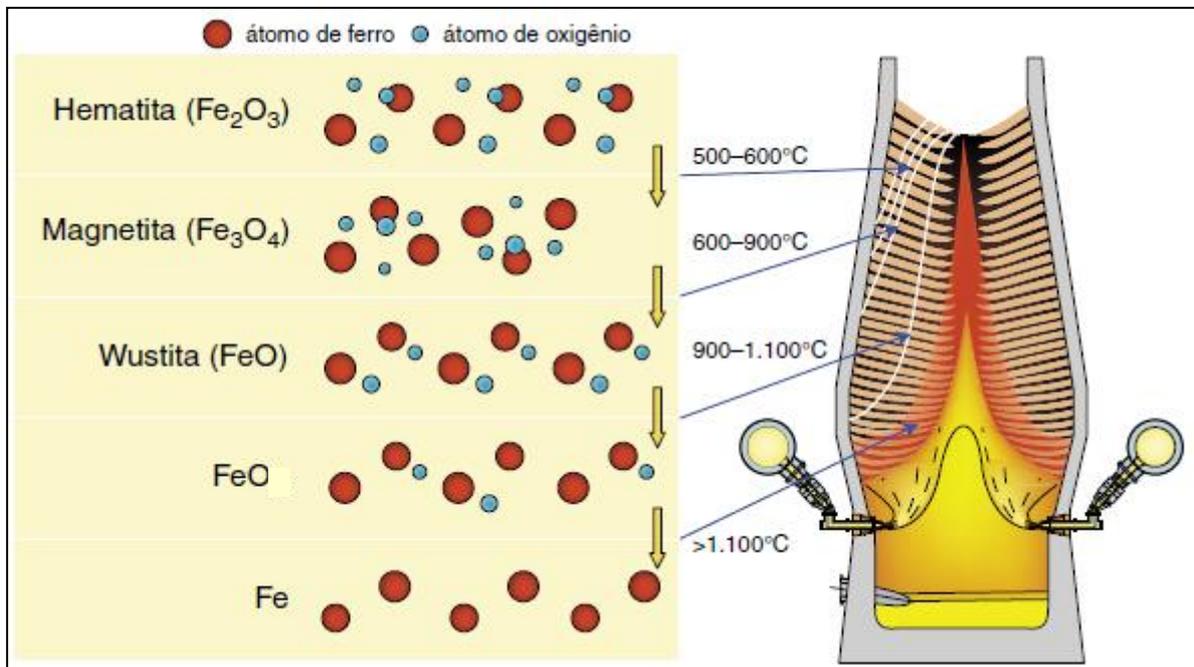


Figura 3.2 - Apresentação esquemática da redução de óxidos de ferro e temperatura ao longo do alto-forno [Adaptado de 9].

3.2 A Zona de Combustão

A zona de combustão é uma região formada em frente as ventaneiras, onde é injetado o ar quente e ocorre a combustão do coque ou do carvão mineral e demais combustíveis injetados no alto-forno. Nessa região são gerados os gases redutores (H_2 e CO) e o N_2 do ar atmosférico é aquecido, estes ascendem aquecendo, reduzindo e fundindo a carga metálica. A Figura 3.3 ilustra essa região. ^[10]

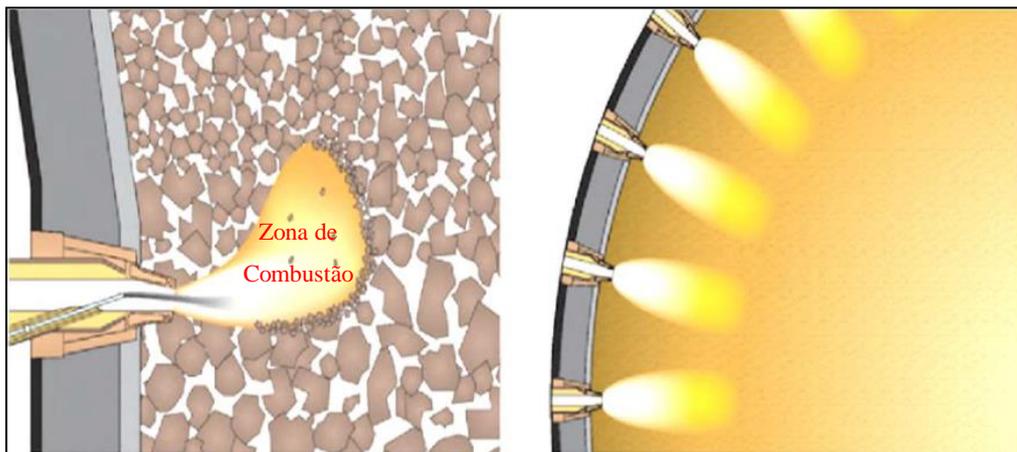


Figura 3.3 - Zona de combustão, seção vertical (à esquerda) e horizontal (à direita) ^[Adaptado de 11].

Um dos parâmetros de controle relacionado a zona de combustão, importante para o processo de produção de gusa, é a temperatura adiabática da chama, ou simplesmente temperatura de chama. A temperatura adiabática da chama na zona de combustão é a temperatura que o gás alcança assim que o oxigênio, umidade e demais voláteis/combustíveis se convertem em CO e H_2 . De um ponto de vista teórico, ela é calculada a partir de um cálculo do balanço térmico na zona de combustão. Em altos-fornos a coque as temperaturas de chama normalmente estão na faixa de 2.000 a $2.400^{\circ}C$. Essa temperatura é influenciada pelas condições da zona de combustão.

Geerdes ^[9] destaca efeitos gerais da alteração de alguns parâmetros de processo na temperatura de chama e na temperatura de topo, apresentados na Figura 3.4.

	Unidade	Mudança	Temperatura da chama (°C)	Temperatura do topo (°C)
Temperatura do vento quente	°C	+ 100	+ 65	-15
Carvão	kg/t	+ 10	- 30	+ 9
Oxigênio	%	+ 1	+ 45	- 15
Umidade	g/m ³ CNTP	+ 10	- 50	+ 9

Figura 3.4 - Efeitos gerais da alteração de alguns parâmetros de processo na temperatura de chama e na temperatura de topo ^[Adaptado de 9].

Percebe-se que a temperatura de chama se altera sensivelmente com o percentual de oxigênio injetado, relação essa que fará parte deste estudo.

3.3 Injeção de combustíveis auxiliares em altos-fornos

A injeção de combustíveis auxiliares é utilizada com os seguintes objetivos ^[15]:

- Diminuir o consumo do coque que é carregado no topo do alto-forno e conseqüentemente reduzir o custo de produção do ferro-gusa, uma vez que, geralmente, os combustíveis auxiliares apresentam custo menor que o do coque pelo fato do carvão coqueificável ter alto custo (cerca de US\$185/t ^[16]);
- Redução nos impactos ambientais, devido as coquerias serem unidades industriais altamente poluidoras ^[17].
- Maior produtividade do alto-forno com relação à produção de gusa por dia, em conjunto com uma boa operação;
- Maior flexibilidade de operação do alto-forno em termos de controle térmico, pois é possível fazer mudanças térmicas mais rapidamente alterando a taxa ou o tipo de combustível injetado em vez de ajustar o combustível via topo (coque).

O coque, além de ser o combustível principal atua como permeabilizante da carga, sendo assim, existem sempre limites nessa substituição. ^[4,12]

Assis ^[13] destaca que os principais combustíveis injetados através das ventaneiras de altos-fornos são carvão vegetal, carvão mineral, óleo e gás natural. Dentre estes, este estudo focará na injeção de carvão mineral e gás natural, por serem estes os principais combustíveis injetáveis no reator em estudo. Vê-se na Tabela III.1 o impacto da injeção destes combustíveis na temperatura de chama e no consumo específico de coque (quilogramas de coque consumido para produção de uma tonelada de ferro-gusa), denominado como “coque-rate”.

Tabela III.1. Efeito de cinco tipos de injeção em parâmetros do alto-forno, baseado em modelo matemático ^[13].

Parâmetro	Unidade	Valor	Alteração na temperatura de chama [°C]	Alteração no “coque-rate” [kg/t de gusa]
Carvão Vegetal	kg/t de gusa	+100	-155	-83,0*
Antracito	kg/t de gusa	+100	-162	-91,0
Carvão alto volátil	kg/t de gusa	+100	-218	-76,1
Óleo	kg/t de gusa	+100	-321	-98,4
Gás Natural	kg/t de gusa	+100	-513	82,6
	Nm ³ / t de gusa	+132		

* Consumo específico de carvão vegetal enforado

A injeção de carvão mineral como combustível auxiliar é a mais comum em altos-fornos a coque tanto no Brasil quanto no mundo. É comprovada que esta reduz o consumo de coque metalúrgico, como pode ser visto na Figura 3.5 a seguir, onde maiores taxas de injeção proporcionam, de modo geral, menor consumo específico de coque.

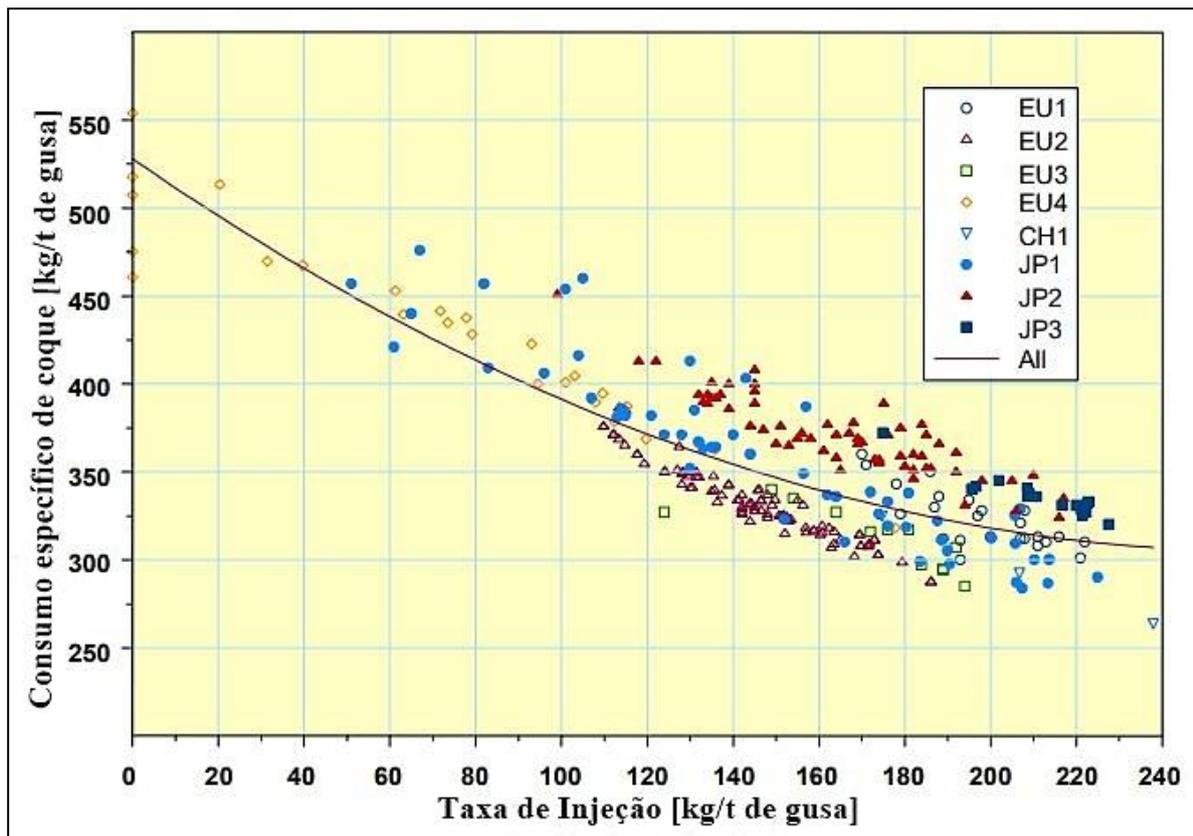


Figura 3.5 - Relação entre consumo específico de coque e taxa de injeção de carvão em altos-fornos pelo mundo ^[Adaptado de 14].

O sistema comum de injeção de carvão mineral consiste em ^[9,13]:

- Moagem do carvão: O tamanho típico de carvão pulverizado é aproximadamente $60\% < 75\mu\text{m}$;
- Secagem do carvão: O carvão contém umidade de 8% até mais de 10%. Uma vez que a injeção de carvão úmido aumenta o consumo de combustível, a umidade deve ser removida ao máximo possível;
- Transporte do carvão pelas tubulações: geralmente realizado por nitrogênio pressurizado.
- Injeção de carvão pulverizado: Onde, idealmente, em cada ventaneira, a relação ‘Injeção de carvão pulverizado/Vazão de ar’ é constante sob um consumo de coque baixo e alta produtividade.

O arranjo físico de um sistema de preparação e injeção de carvão pulverizado é ilustrado por Geerdes ^[9] na Figura 3.6.

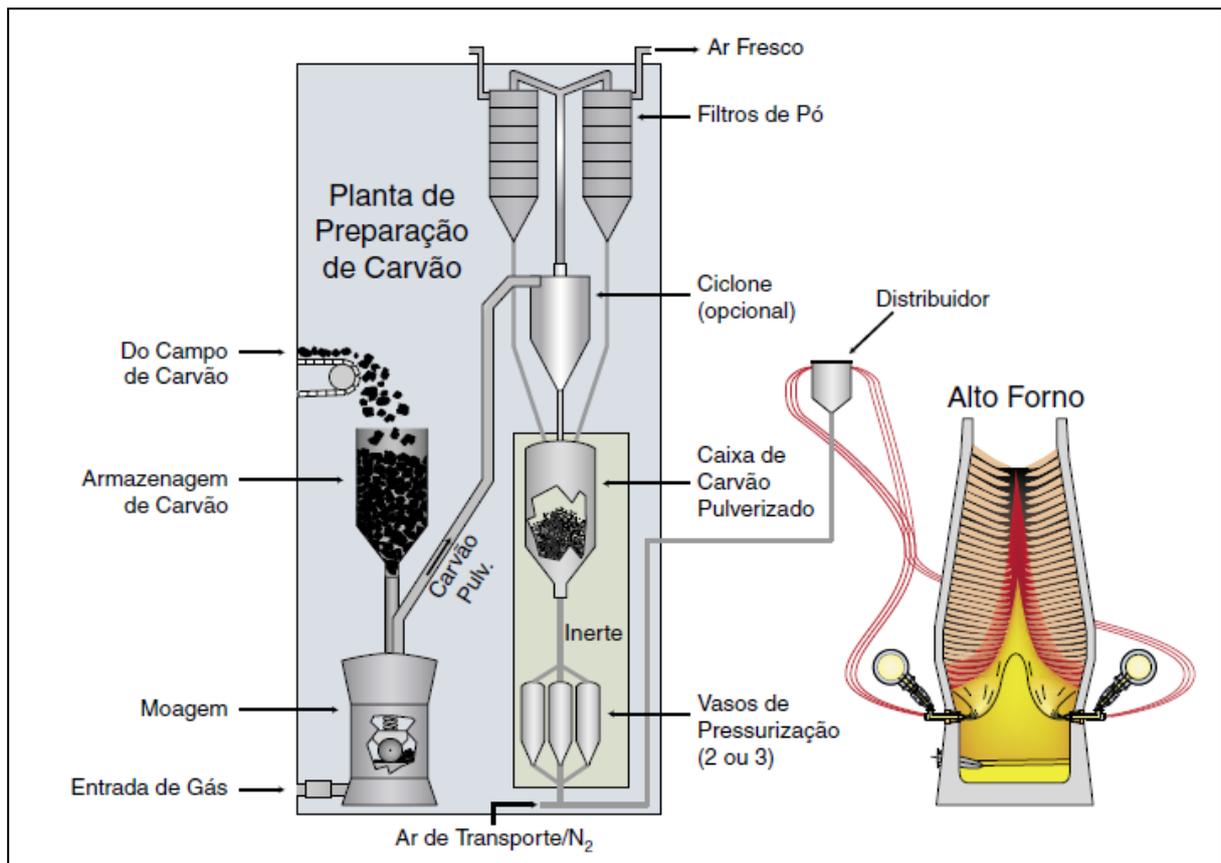


Figura 3.6 - Exemplo de Instalação de Injeção de Carvão Pulverizado (ICP) ^[9].

O carvão mineral adentra o alto-forno através da ventaneiras por intermédio da injeção via lanças, essas lanças podem ser simples, arranjo com somente uma lança, dupla, em arranjos com duas lanças ou ainda coaxiais, dependendo do projeto. A Figura 3.7 ilustra o sistema de injeção através de lanças simples e demonstra imagens reais de sistemas de injeção com lança dupla e simples do ponto de visão do algaraviz.

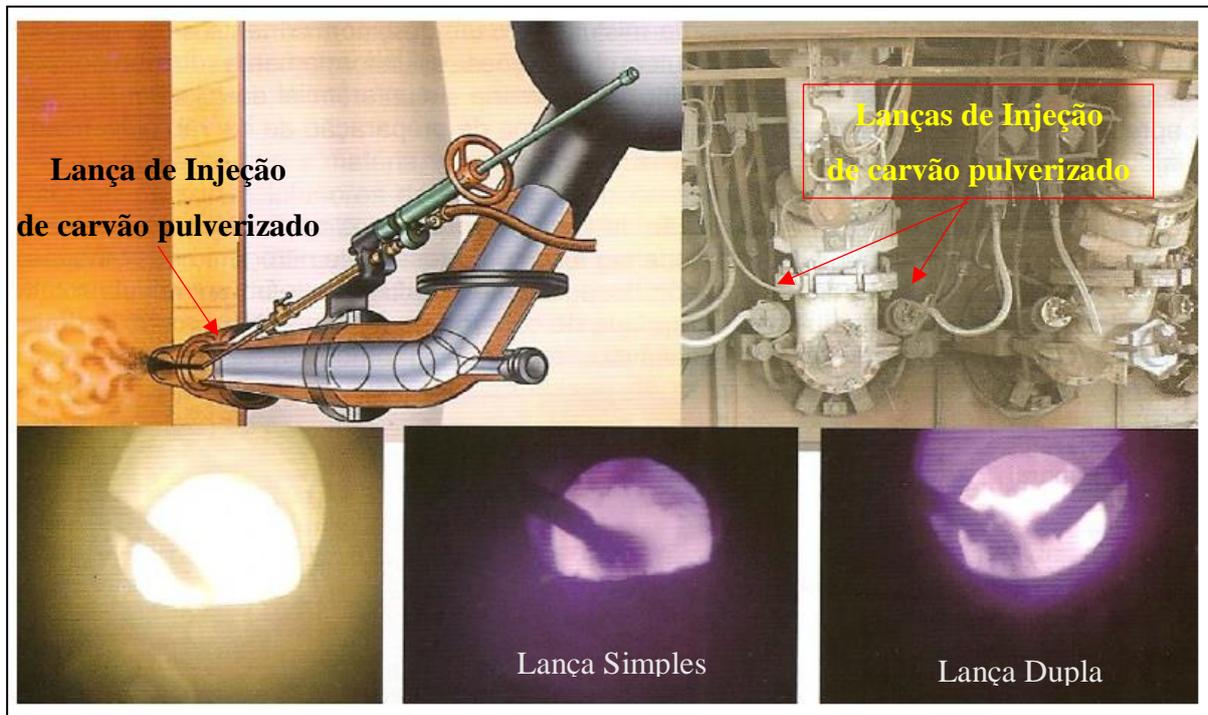


Figura 3.7 - Ilustração e visão real de lanças e sistema de injeção de carvão [adaptado de12].

O percentual de oxigênio no ar soprado pelas ventaneiras pode ser usado para equilibrar as necessidades térmicas do alto-forno. O equilíbrio (balanço) é dependente da situação local. Ele depende, por exemplo, da qualidade da carga e do coque, e do tipo de carvão usado. Para o equilíbrio existem algumas limitações técnicas e tecnológicas, as quais são apresentadas como um exemplo na Figura 3.8. Para taxas de injeção mais altas, é necessário mais oxigênio. As limitações são dadas por:

- Temperatura baixa do gás do topo; o limite inferior da temperatura de topo é definido pela condensação do vapor, ou seja, a temperatura de orvalho, se a temperatura do gás do topo se tornar muito baixa, a carga levará muito tempo para secar, prejudicando a zona de preparação;
- Temperatura de chama muito alta; se temperatura de chama se tornar muito alta, a descida da carga poderá ficar descontrolada piorando a permeabilidade dos gases no alto-forno, gerando gaiolas e/ou arriamentos.
- Limitações técnicas ou econômicas; com relação ao enriquecimento de oxigênio permitido ou disponível para enriquecimento, tal como as de segurança. [9]

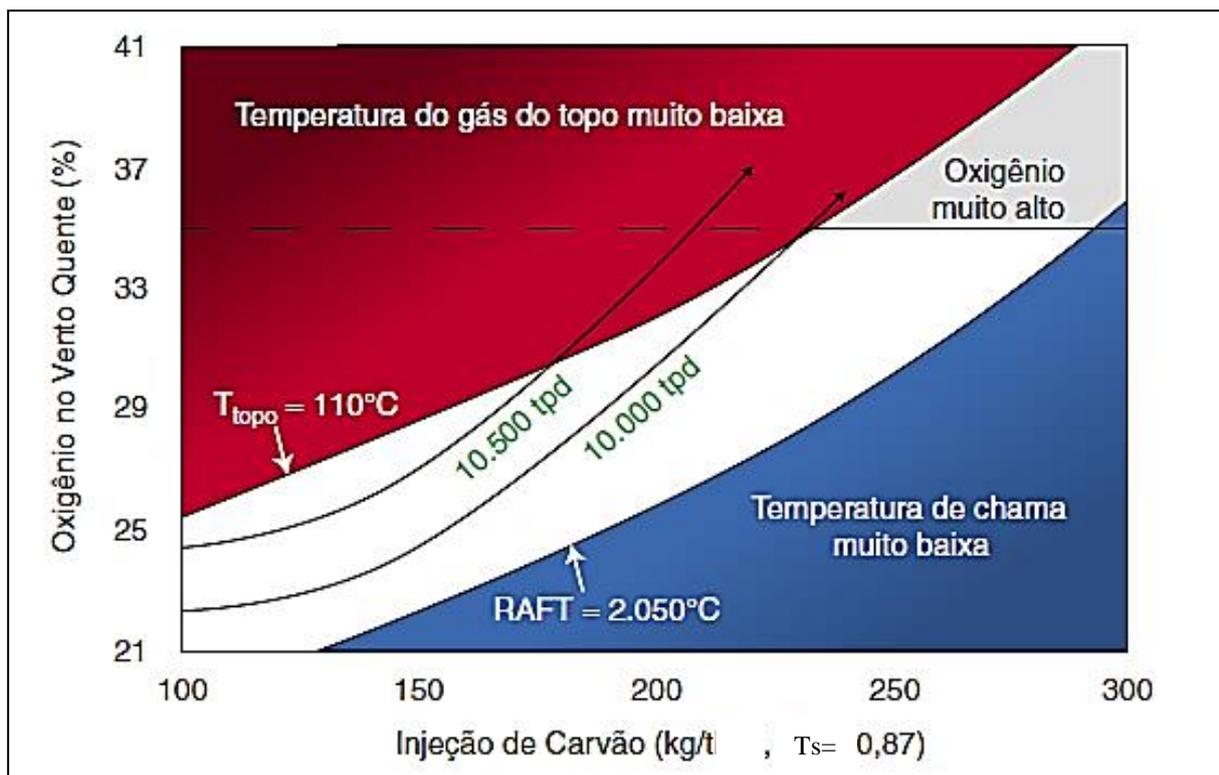


Figura 3.8 - Fatores de limitação que afetam as condições da zona de combustão com Injeção de Carvão Pulverizado (ICP) (RAFT = Temperatura Adiabática da Chama na Zona de Combustão e T_s = taxa de substituição do carvão injetado) ^[9].

Outro combustível auxiliar a ser injetado no alto-forno, não tão comum no Brasil quanto o carvão mineral, é o gás natural (GN). Sua utilização em altos-fornos é totalmente dependente do preço deste insumo no mercado frente aos demais combustíveis.

Uma composição que pode ser considerada típica de gás natural, que será utilizada neste trabalho, pode ser vista na Tabela III.2.

Tabela III.2: Composição do gás natural considerado nesse estudo.

Substância	% em volume	Massa (g)	% em peso	Massa de Carbono	Massa de Hidrogênio
CH ₄	92,57	661	84,96	63,72	21,24
C ₂ H ₆	4,21	56	7,20	5,76	1,44
C ₃ H ₈	1,07	21	2,70	2,21	0,49
C ₄ H ₁₀	0,47	12	1,54	1,27	0,27
N ₂	0,64	8	1,03		
CO ₂	1,02	20	2,57	0,70	
	1m ³	Densidade: 778 kg/Nm ³			

O uso total de gás natural, em bilhões de libras, pelos altos-fornos norte-americanos durante o período entre 1996 e 2015 é mostrado na Figura 3.9. Para fins de comparação, os preços comerciais do gás natural, durante o período de 2001-2015 e 1997-2015 também foram plotados no mesmo gráfico. É interessante notar a tendência quase espelhada visível durante a maior parte do período, fica nítido que quando os preços caíram, a utilização aumentou.

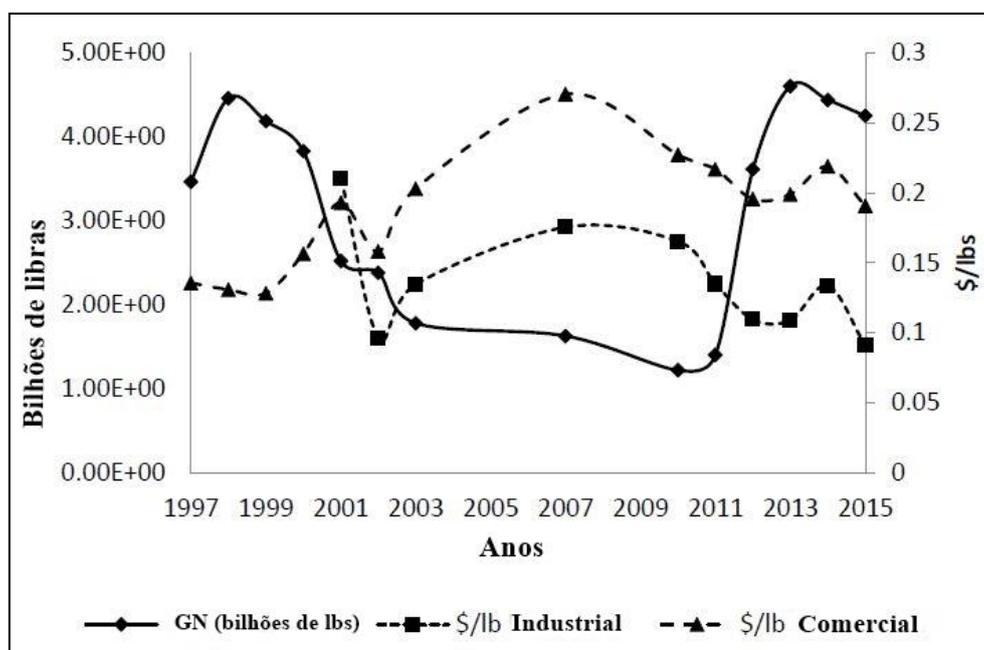


Figura 3.9 - Utilização de gás natural pelos altos-fornos da América do Norte de 1997-2015, em comparação com os preços do gás natural, tanto industrial como comercial [Adaptado de 20].

A injeção de gás natural nas ventaneiras tem um efeito endotérmico na temperatura da chama, limitando fortemente a quantidade de gás natural que pode ser injetada. Para compensar esta redução na temperatura da chama, o ar soprado deve ser enriquecido com oxigênio [22], entretanto, o aumento no teor de oxigênio reduz o teor de nitrogênio, que por sua vez faz com que a temperatura do gás no topo do alto-forno caia, sendo que esta, deve estar sempre acima do ponto de orvalho para evitar qualquer condensação indesejável do gás no topo do alto-forno. Sendo assim, a relação entre percentual de oxigênio no ar soprado, temperatura no topo do alto-forno e quantidade de gás natural injetado deve ser analisada criteriosamente, pois influenciam fortemente na estabilidade da produção [13].

Para controle das variáveis citadas, pode-se traçar janelas operacionais, como demonstrado na Figura 3.10, calculadas considerando um alto-forno com temperatura de sopro de 900°C e 1100°C. Para estes cálculos, a temperatura do gás de topo limite considerada foi 110°C, e o limite da temperatura de chama 1800°C. Pode-se ver que temperatura do gás de topo seria maior do que o valor mínimo se o enriquecimento de oxigênio for maior do que o valor limite mostrado pela linha traçada; a temperatura de chama seria maior do que o valor mínimo, se enriquecimento de oxigênio for maior do que os valores da linha "Limite da Temperatura de Chama". Nesse caminho, a região entre as duas linhas nos dá a janela de operação. [21]

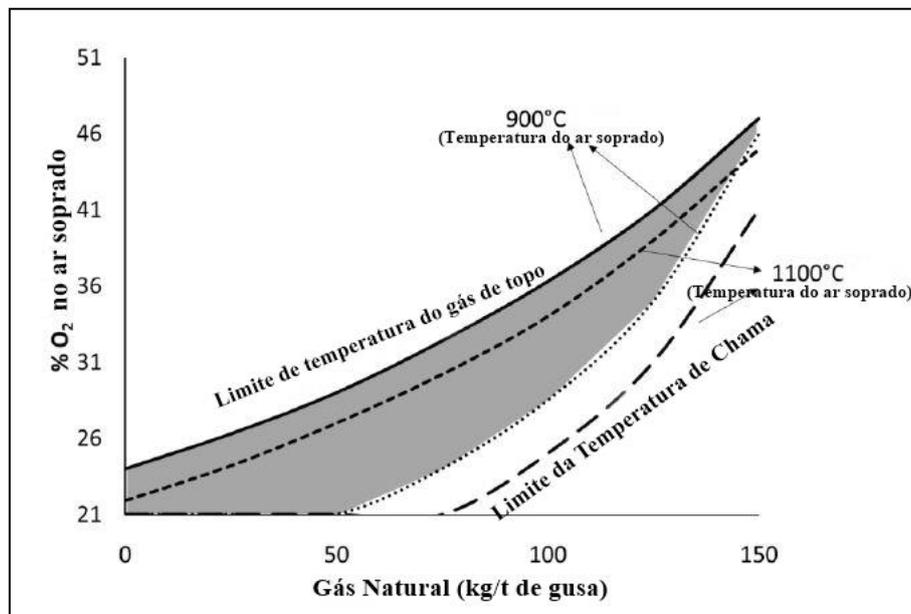


Figura 3.10 - Janela de operação de um alto-forno genérico para temperatura de ar soprado de 900°C (região sombreada), e 1100°C. O limite da temperatura do gás de topo e da temperatura de chama foram definidos como 110°C e 1800°C, respectivamente [21].

O Gás Natural injetado através das ventaneiras reage parcialmente no interior desta e completa sua queima na zona de combustão. A razão entre gás natural e oxigênio contido no ar soprado é de fundamental importância para a eficiência da combustão nessa região e mitigação da geração de fuligem.

A combustão do Gás Natural gera majoritariamente $\text{CO}_{(g)}$ e $\text{H}_{2(g)}$ nas condições da zona de combustão, fazendo com que, apesar do poder calorífico do gás natural ser menor que o do carvão mineral pulverizado, a alta concentração de hidrogênio na fase gasosa promove redução eficiente da carga sólida com menor consumo de energia comparado ao gás CO gerado pelo carvão injetado e o coque^[24].

Semyonov^[33 apud 25] apresentou uma teoria sensata para a combustão de gás natural nas condições termodinâmicas da zona de combustão, referida como uma série de reações em cadeia. O esquema da decomposição térmica do gás metano, principal componente do gás natural, em demais componentes gasosos, pode ser descrito como apresentado através da Figura 3.11.

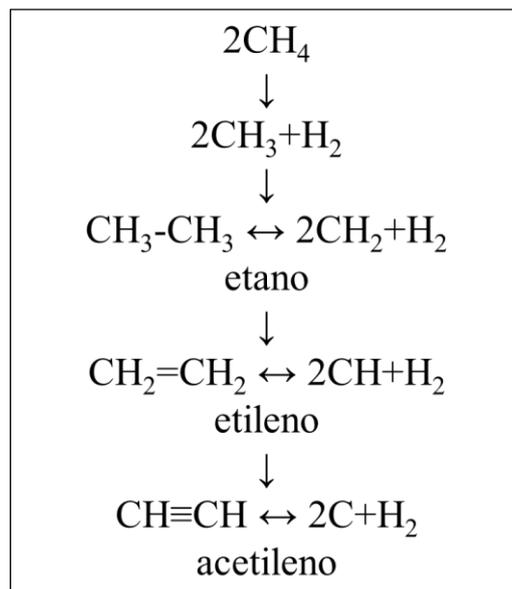


Figura 3.11 - Esquema da decomposição térmica do metano^[33 apud 25].

Outro mecanismo é a oxidação térmica, onde a oxidação por pirólise dos produtos intermediários ocorre simultaneamente com a decomposição do metano (Equações 3.5 e 3.6)

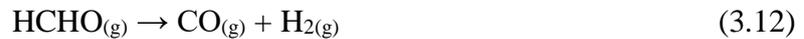


Além dessa, há duas alternativas: (Equação 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12):

Varição 1:



Varição 2:



Kazantsev ^[34 Apud 21] em análises das constantes de equilíbrio para essas reações em conjunto com os dados da Tabela III.3 testemunhou que o metano se decompõe completamente a temperaturas acima de 1100°C, ou seja, na zona de combustão ocorre decomposição completa do metano, posteriormente, haverá oxidação parcial do Carbono e do H₂.

Tabela III.3: Composição da mistura gasosa gerada pela reação $\text{CH}_4 \leftrightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ (% em volume) ^[34 Apud 21]

Temperatura (°C)	CH ₄	H ₂
300	96.90	3.10
400	86.16	13.84
500	62.53	37.47
550	46.69	53.37
600	31.68	68.32
700	11.07	88.93
800	4.41	95.59
1 000	0.50	99.50
1 100	0.20	99.80

O gás natural como combustível gasoso não gera escória, ao contrário do coque e do carvão pulverizado, que demandam energia adicional para fundir as cinzas além de piorar as condições de fluxo devido à geração de líquidos que irão competir com o espaço para passagem gasosa ^[24].

Para análise da redução dos óxidos de ferro pelos gases da co-injeção, Siqueira apresentou em seu trabalho o diagrama de predominância de fases Fe-H-O. As diferentes fases dos óxidos de ferro podem ser vistas em equilíbrio com as misturas H₂/H₂O através das linhas tracejadas para diferentes temperaturas na Figura 3.12.

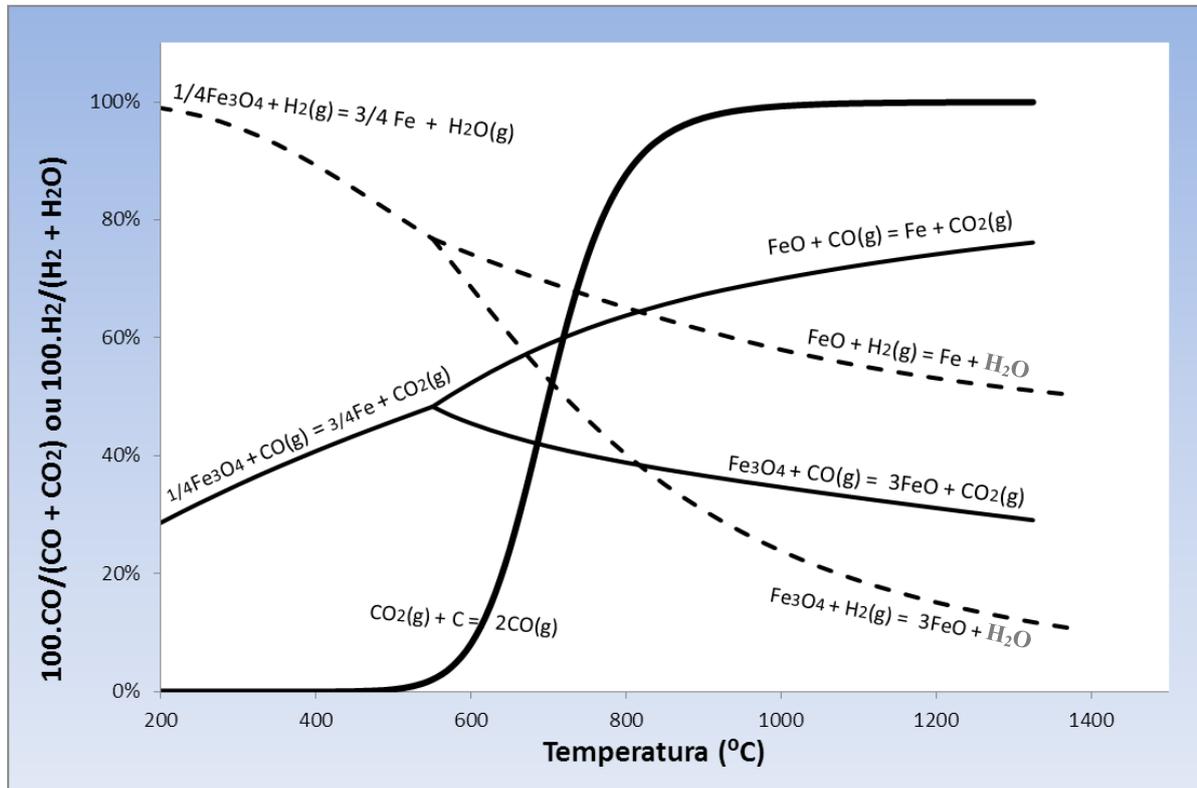


Figura 3.12 - Diagrama de predominância de fases Fe-H-O [36, 37 apud 35].

É possível verificar a diferença entre o poder redutor do monóxido de carbono e o hidrogênio e notar que a curva correspondente a redução por CO e por H₂ se interceptam a uma temperatura de 821°C, onde ambos gases possuem o mesmo poder redutor sobre o FeO. Para baixas temperaturas, menores teores de CO são necessários para redução do Fe₃O₄ para FeO e de FeO para Fe, cotejados ao uso do hidrogênio.

O consumo de hidrogênio para redução da magnetita e da wustita é bem menor quando comparado com aquele associado ao monóxido de carbono, em temperaturas acima de 821°C [36, 37 apud 35].

Turns [38] afirma que em várias aplicações, a razão entre oxigênio e combustível é um fator determinante na performance de sistemas de combustão. O consumo dos combustíveis

auxiliares injetados em altos-fornos não é diferente, e sua combustão completa na zona de combustão é limitada pelo potencial de oxidação da chama.

O valor do potencial de oxidação da chama pode ser dado pelo Índice de Excesso de Oxigênio na zona de combustão, determinada por Babich ^[25] conforme a Equação 3.13:

$$\alpha = \frac{(C_o V'_{bl} + S_1 V_1 + S_2 V_2) \omega}{m S_1 + n S_2} \quad (3.13)$$

Onde:

α : Índice de Excesso de Oxigênio [-];

C_o : Taxa de carbono do coque queimado em frente a ventaneira [kg/kg de gusa];

S_1 : Consumo de gás Natural [m³/kg de gusa];

S_2 : Consumo de Carvão pulverizado [kg/kg de gusa];

V'_{bl} : Volume de ar [m³/kg C_o];

V_1, V_2 : Volume de ar [m³/m³ gás natural] e [m³/kg de carvão pulverizado];

ω : conteúdo de oxigênio no ar [-];

m : consumo teórico de oxigênio para combustão de 1m³ de gás natural [m³];

n : consumo teórico de oxigênio para combustão de 1kg de carvão pulverizado [m³].

O coeficiente “m” é calculado pela Equação 3.14:

$$m = 2CH_4 + 3,5 C_2H_6 + 5 C_3H_8 + \dots \quad (3.14)$$

Onde CH₄, C₂H₆, C₃H₈ ... correspondente ao metano, etano, propano e outros componentes do gás natural.

O coeficiente “n” é calculado pela Equação 3.15:

$$n = 1,8667C^w + 11,2H^w \quad (3.15)$$

Onde C^w e H^w são o teor de carbono e hidrogênio no carvão mineral pulverizado.

O menor valor teórico permitido de α é 1,0. Como a mistura perfeita do combustível injetado com o ar é impossível de se manter, na prática, o valor mínimo é de 1,25 a 1,30. De acordo com a Equação 3.13, o potencial de oxidação da chama depende da quantidade de oxigênio que entra no processo e do necessário para combustão do carvão e do gás natural [25].

Uma das formas comuns de aumentar o potencial de oxidação é o enriquecimento do ar soprado com oxigênio. O incremento necessário na concentração de oxigênio neste caso é determinado a partir da Equação 3.16: [25]

$$\Delta\omega = \frac{(mS_1+nS_2)}{V'_{bl}} \Delta\alpha \quad (3.16)$$

Onde:

$\Delta\omega$: incremento de oxigênio no ar [-];

$\Delta\alpha$: incremento no Índice de Excesso de Oxigênio requerido [-];

V'_{bl} : Volume atual de ar [m³/kg C_o].

A pesquisa de Babich [25] nos diz que cálculos realizados para uma ampla faixa de parâmetros combinados de combustão mostraram que para aumentar 0,1 no Índice de Excesso de Oxigênio é necessário o enriquecimento de 1,5 a 4,0%, isso nos leva a pensar se mutatis mutandis o inverso não é verdadeiro, se considerarmos que um reator esteja trabalhando com o índice de excesso de oxigênio com valores altos.

Em uma operação com concentração de oxigênio constante, o potencial de oxidação da chama pode ser mantido ou mudado, controlando a injeção de gás natural e carvão pulverizado, de acordo com a Equação 3.17 [25]:

$$\Delta S_2 = -\frac{m}{n} \Delta S_1 \quad (3.17)$$

Onde:

ΔS_2 = Incremento no consumo de carvão pulverizado [kg/kg de gusa];

ΔS_1 = Incremento no consumo de gás natural [m³/kg de gusa].

A análise dessa equação, por Babich ^[25], demonstrou que, para um potencial de oxidação constante, mudanças de 10kg no carvão mineral injetado podem ser compensadas por 7-8m³ de gás natural.

Agarwal *et all* ^[26] conclui em seu trabalho que a injeção de gás natural e carvão mineral pulverizado simultânea pode aumentar a produtividade de um alto-forno em mais de 12% e que a taxa de substituição de coque foi de no mínimo 1,1lb/lb (~0,5kg/kg) para o alto-forno estudado.

O parâmetro utilizado para avaliar a economia de coque será denominado neste trabalho como Taxa de Substituição (Ts), que, de modo geral, pode ser considerada como a quantidade de coque economizada (kg/t de gusa) para cada kg de carvão injetado por tonelada de gusa ou cada Nm³ de gás natural injetado por tonelada de gusa.

A Ts irá variar com a quantidade de carvão injetado, os custos e suas propriedades. De modo geral, há aumento na Ts com aumento da relação C/H do carvão e aumento no *rank* do carvão ^[18]. Estes resultados podem ser vistos na Figura 3.13, onde é mostrando uma série de resultados de desempenho de altos-fornos modelados e reais. ^[15,13]

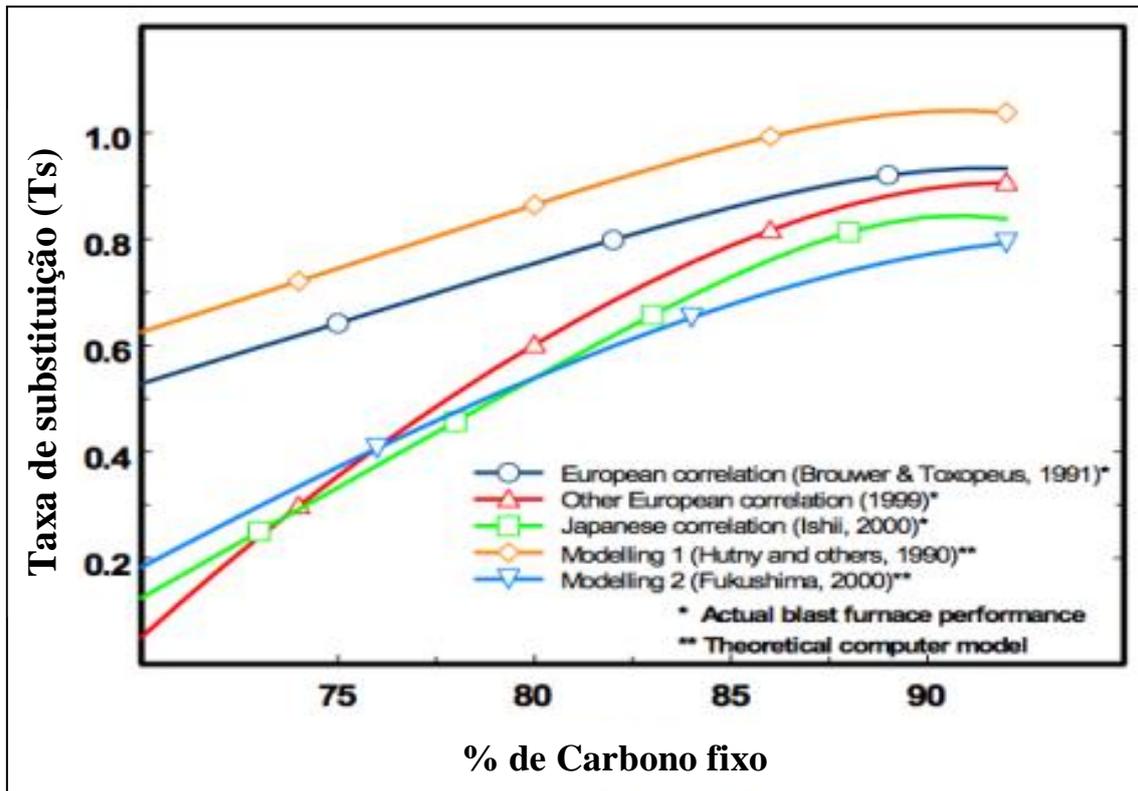


Figura 3.13 - Relação da Taxa de substituição com o percentual de carbono fixo (em base seca livre de cinzas) [Adaptado de 18].

Em termos de substituição de coque por gás natural, a literatura cita os seguintes dados [27]:

- Até 70 Nm³/t ferro-gusa: 1,0 a 1,4kg de coque por Nm³ de gás natural;
- Acima de 70 Nm³/t ferro-gusa: 0,7 a 1,0kg coque por Nm³ de gás natural.

Cavaliero e Jannuzzi [28] mostraram, em seu trabalho (Tabela III.4), resultados alcançados com a injeção de gás natural nos altos-fornos da COSIPA, onde obtiveram uma taxa de substituição de 1,20t de coque por t de gás natural.

Tabela III.4: Informações sobre a injeção de gás natural (GN) nos altos-fornos a coque, da COSIPA em 1997 [28].

Dados	Alto forno 1	Alto forno 2
Produção de ferro-gusa com injeção [tgusa]	1.449.580	2.206.834
Consumo específico de coque com injeção e aumento de produtividade [tcoque/tgusa]	0,484	0,467
Taxa de injeção [tGN/tgusa]	0,0231	0,0282
Taxa de substituição [tcoque/tGN]	1,20	1,20
Aumento de produtividade	0,07	0,09

Altas taxas de injeção não significam necessariamente alta produção nem alta economia de coque ^[29]. Merece destaque a existência de uma relação entre a quantidade de injeção de carvão pulverizado e a taxa de substituição, onde altas taxas de injeção, geralmente promovem menores taxas de substituição, como pode ser visto na Figura 3.14 ^[31 apud 30].

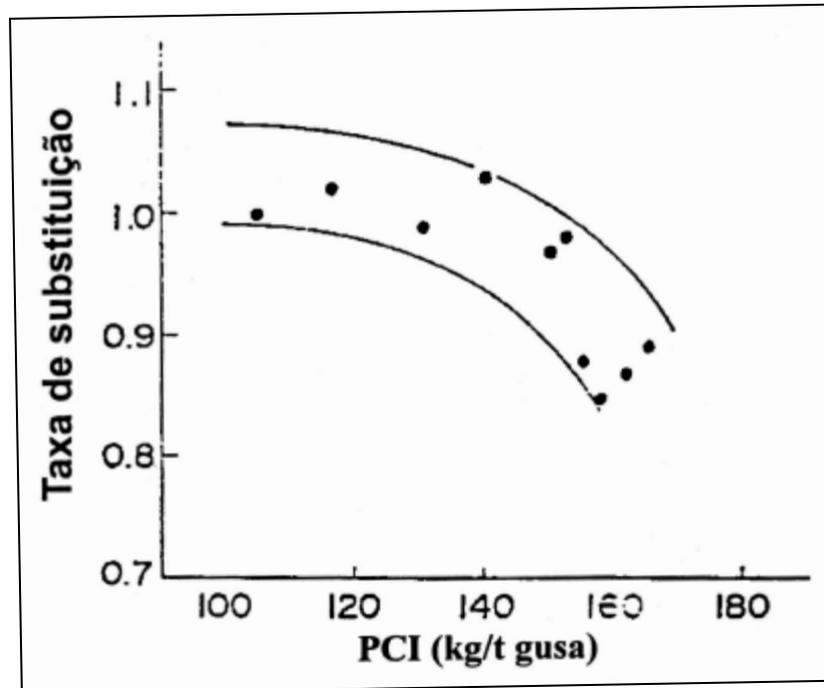


Figura 3.14 – Relação entre taxa de substituição e taxa de injeção ^[30].

Fica a dúvida das proporções da relação entre taxa de substituição e a co-injeção de carvão pulverizado e gás natural, entretanto, já foi registrada a redução de consumo no coque com a injeção combinada de até 21kg de coque/t de gusa ^[32].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Especificações do Reator

O reator que se refere este trabalho será denominado Alto-Forno A e encontra-se em Minas Gerais. Na Tabela IV.1 estão apresentadas suas principais especificações.

Tabela IV.1 - Principais especificações do reator utilizado no estudo de caso

Dados de Projeto	Alto-Forno A
Fabricante	Davy Ashmore (Inglaterra)
Início de Operação	Jul. /1986
Última Reforma	Jul. /2009 (4 ^a)
Produção Diária (nominal)	7935t/dia
Volume Interno	3051m ³
Volume de Trabalho	2652m ³
Diâmetro do Cadinho	11,5m
Número de Ventaneiras	28
Diâmetro das Ventaneiras	150mm
Sistema de Refrigeração	“Stave cooler” (Água Desmineralizada)
Furo de Gusa	4
Injeção de Combustível (Capacidades Máximas)	Carvão Pulverizado e Gás Natural (180kg/t e 40kg/t)
Distribuição de Carga Regeneradores	“Bell-less top” (PW) 03-Cowpers

Para seleção do banco de dados, considerou-se o período que ocorreu co-injeção no Alto-forno A e um período próximo com apenas injeção de carvão mineral. Os dados foram avaliados para que sejam utilizados apenas os que representam a produção normal próxima a capacidade nominal.

4.2 Metodologia do Equacionamento

Para definir a taxa de substituição do carvão mineral e do Gás Natural, consideraram-se os desdobramentos da Equação 4.1:

$$T_s = \frac{\text{Coque rate padrão} - \text{Coque rate com Injeção do combustível auxiliar}}{\text{Taxa de injeção do combustível auxiliar}} \quad (4.1)$$

A taxa de substituição foi calculada levando em consideração a utilização de injeção de carvão mineral e co-injeção de carvão mineral e gás natural, uma vez que a injeção exclusiva de gás natural, por questões técnicas e econômicas, não foi praticada no reator em questão.

O valor da taxa de substituição considera para base de cálculo o período equivalente às demais variáveis; quando utilizado as médias diárias dos parâmetros operacionais, a taxa de substituição foi calculada levando em consideração os valores médios diários.

Os valores considerados, no período base, para correção da umidade e definição do coque rate padrão foram obtidos através das médias dos parâmetros do reator em estudo durante o período mais recente de produção com apenas coque como combustível (período *all coke*).

Para cálculo do potencial de oxidação da zona de combustão, denominado nesse trabalho como Índice de Excesso de Oxigênio (IEO), considera-se o desdobramento do seguinte conceito (Equação 4.2), à luz de Babich ^[25]:

$$IEO = \frac{V_{O_2}^{Disponível}}{V_{O_2}^{Necessário}} \quad (4.2)$$

Onde:

$V_{O_2}^{Disponível}$ = Vazão de oxigênio disponível;

$V_{O_2}^{Necessário}$ = Vazão de oxigênio necessário para oxidação dos combustíveis.

Na vazão de oxigênio disponível, considera-se toda entrada de oxigênio pelas ventaneiras, ou seja, tanto gasoso, quanto ligado a outros elementos, como o oxigênio presente nos combustíveis injetados, no ar atmosférico soprado, o oxigênio de enriquecimento, e o oxigênio que entra em forma de umidade do ar soprado.

Na vazão de oxigênio necessário, leva-se em conta as reações de oxidação dos combustíveis considerando como produto da zona de combustão CO, H₂ e SO₂, dadas as condições termodinâmicas, independente dos mecanismos de reações.

Na busca de alcançar os objetivos específicos i e ii, realizou-se a análise dos seguintes parâmetros como variáveis regressoras da resposta IEO.

- Produção diária [t]
- Vazão de Sopros [Nm³/min]
- Temperatura de Chama [°C]
- Temperatura de Topo [°C]
- Taxa de injeção de combustível [kg/t]
- Taxa de Substituição [-]
- % de Enriquecimento [%]

Os parâmetros estatisticamente e tecnicamente relevantes foram mantidos no modelo utilizado para otimização. A modelagem e análises foram realizadas distintamente para a prática de injeção de carvão e para a prática de co-injeção, uma vez que estas apresentam necessidade de parâmetros operacionais diferentes para obtenção de uma mesma produção diária.

Foi utilizado o Modelo de Regressão Linear Múltipla para determinação da variável resposta IEO.

Considerar-se-á a melhor faixa de valores de IEO para trabalho a que compreender altas taxas de injeção de combustíveis auxiliares sem comprometimento da taxa de substituição e, de preferência, sem demasiado consumo de oxigênio de enriquecimento, sendo assim, independentemente do nível de produção, o que se busca são combinações de variáveis que promovam baixos valores de IEO com altas taxas de injeção e menores percentuais de enriquecimento, ou seja, conforme o esquema da Figura 4.1, seria menores valores no eixo das ordenadas e maiores valores no eixo das abcissas, promovendo pontos que estejam no extremo inferior direito.

Tal metodologia poderá ser aplicada, com expectativa de sucesso, em outros altos-fornos com especificações técnicas semelhantes ao Alto-Forno A, uma vez que não utiliza-se de aspectos técnicos e estatísticos característicos.

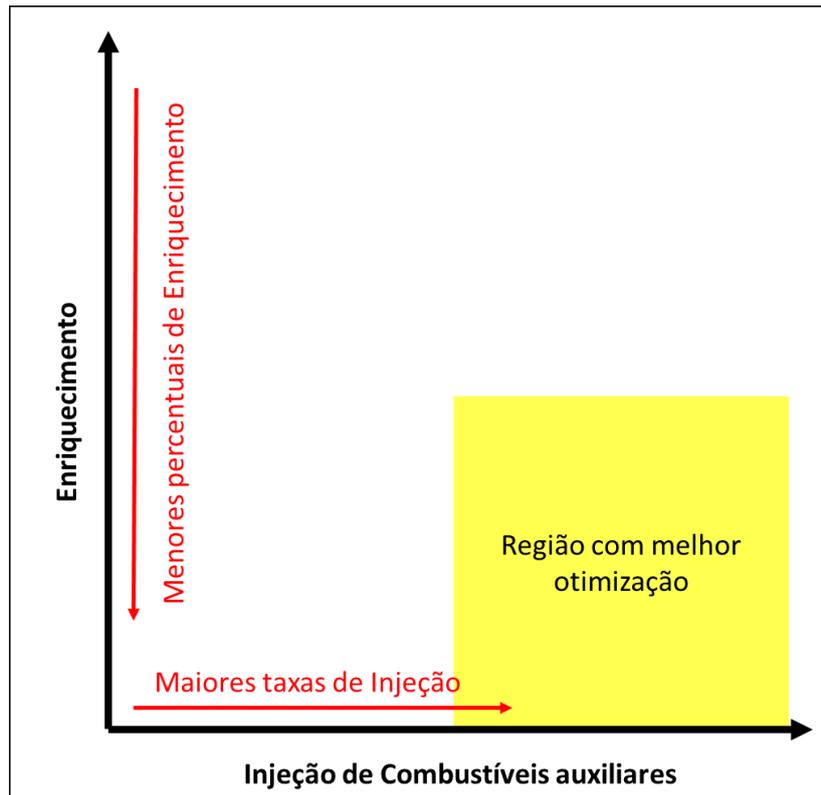


Figura 4.1 - Esquema de melhor região para operação considerando altas taxas de injeção de combustíveis e menor consumo de oxigênio de enriquecimento.

A Figura 4.2 resume a metodologia.

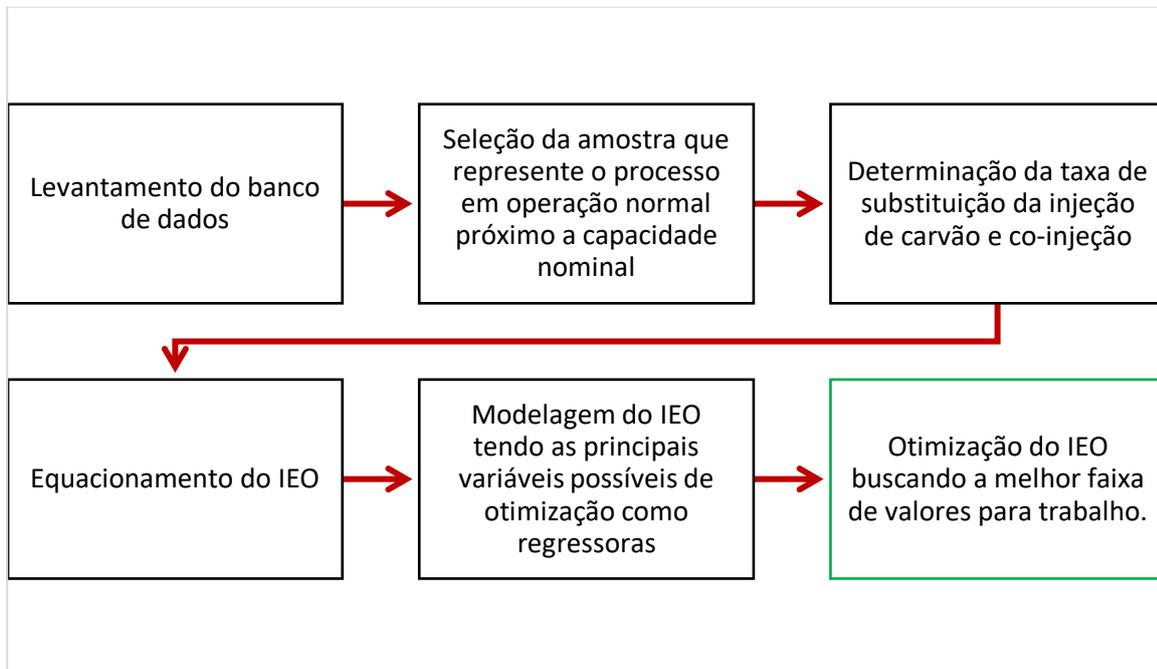


Figura 4.2 – Resumo esquemático da metodologia utilizada no trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Definição e Avaliação Banco de Dados do Alto-forno A

No período entre 21/02/2017 e 07/06/2017 foi praticado a co-injeção de carvão mineral e gás natural no Alto-Forno A, sendo este o considerado para as análises que envolvem co-injeção.

Para análises com injeção de somente carvão mineral, foi considerado um período anterior ao já citado, de 14/10/2016 à 20/02/2017 onde não houve alterações significativas no reator em termos de estrutura física, tecnológica e plano de produção.

Na Figura 5.1 constam as informações de Produção, Consumo Específico de Coque e consumo Específico de Combustíveis Injetados em médias diárias de todo o período considerado.

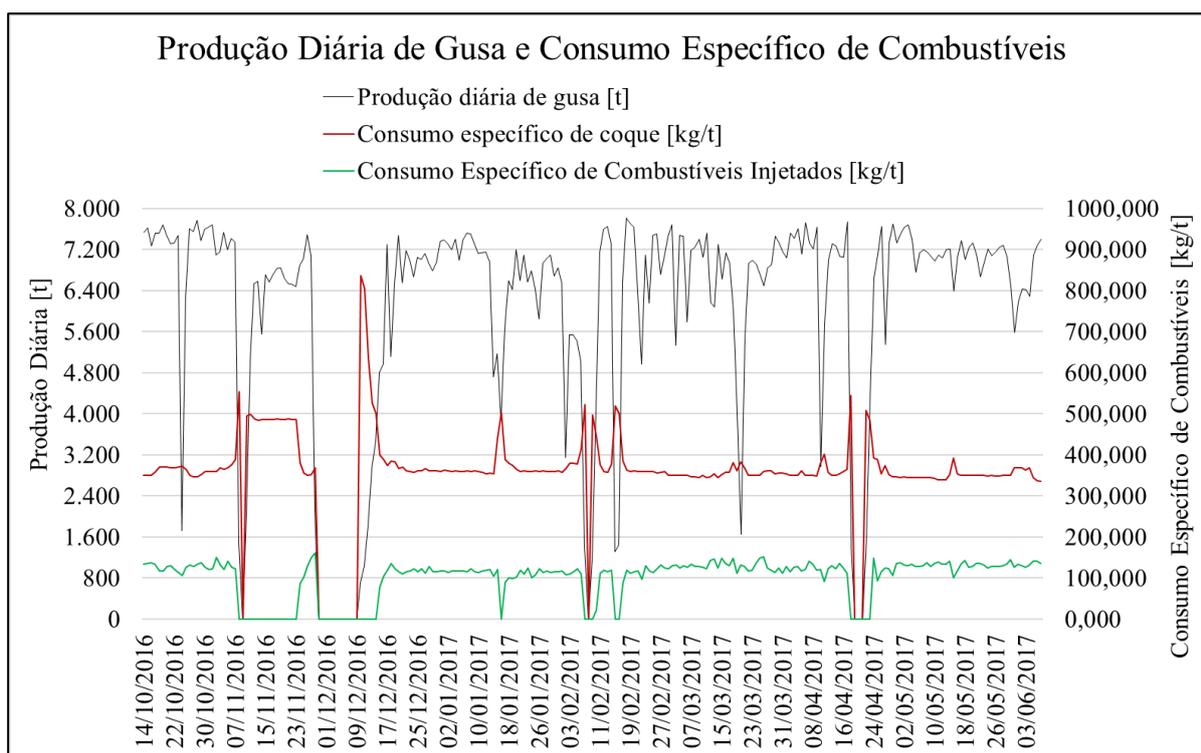


Figura 5.1 - Produção, Consumo Específico de Coque e consumo Específico de Combustíveis Injetados em médias diárias no período selecionado para análise.

Para evitar erros de cálculo e na análise dos resultados, os dados dos Altos-Fornos A foram avaliados com o objetivo de eliminar dados de dias com paradas operacionais, falhas na

instrumentação, injeção de carvão mineral atípica, além disso, para uma análise visando produção normal e mais próxima da capacidade nominal, foram excluídos os dias com produção planejada abaixo de 7000t/dia e produção diária efetiva abaixo de 6500t/dia.

Após desconsideração dos dias que não atenderam aos requisitos estabelecidos para análise, obtiveram-se 58 dias com co-injeção e, em igualdade numérica, foram selecionados os 58 dias mais próximos, anteriores a co-injeção, com injeção de apenas carvão mineral. Os dados de Produção, Consumo Específico de Coque e consumo Específico de Combustíveis Injetados em médias diárias constam na Figura 5.2 na qual a linha pontilhada distingue os períodos de prática de injeção de carvão e co-injeção.

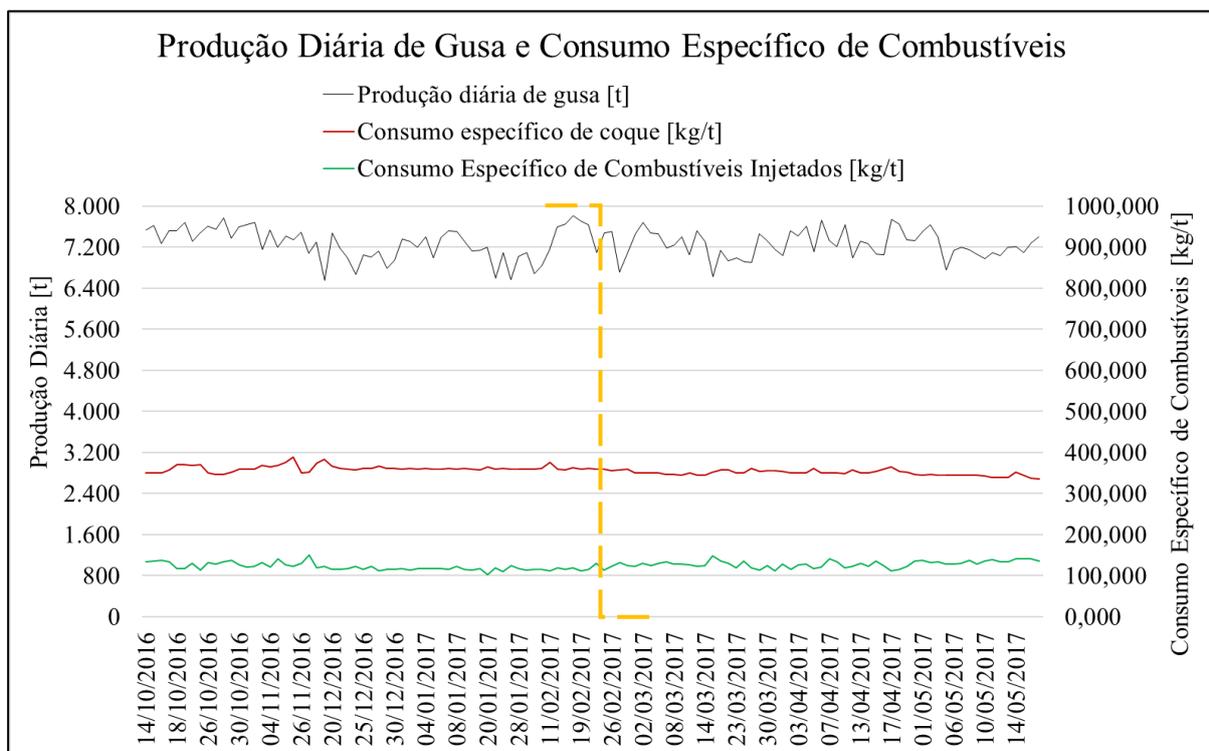


Figura 5.2 - Produção, Consumo Específico de Coque e consumo Específico de Combustíveis Injetados em médias diárias após desconsideração de dados de produção atípica.

5.2 Equacionamento da Taxa de Substituição

Para cálculo da taxa de substituição, considerou-se os parâmetros de período de operação *all coke* mais recente, que foi de 12/11/2016 à 23/11/2016, cujas médias constam na Tabela V.1.

Tabela V.1: Valores médios do período base (*all coke*)

Valores médios do período base (<i>all coke</i>)	
Umidade do ar soprado [g/Nm ³]	36,60
Temperatura do ar soprado [°C]	1120,86
Produção [t]	6543,57
Silício no gusa [%]	0,26
Coke rate base [kg/t de gusa]	486,26
Umidade do Small Coke [%]	11,42
Umidade do coque via laboratório [%]	1,53
Umidade do coque via Kay-Ray [%]	3,69
Percentual de small coke na carga [%]	7,50
Percentual de cinzas no coque [%]	9,32
Temperatura do gusa [°C]	1501
Slag-rate [kg/t]	315,95
Minério na carga [%]	16,43
Volume interno [m ³]	3051
Produtividade [t/m ³ /dia]	2,14

Os fatores de correção utilizados e o modelo matemático que descreve a taxa de substituição foram pré-estabelecidos pela empresa, em informe técnico não publicado, considerando as especificidades do reator, conforme a Tabela V.2.

Tabela V.2: Fatores de correção utilizados no modelo matemático que descreve a taxa de substituição pré-estabelecidos pela empresa.

Fatores de Correção	Variável	Variação no coque rate (kg/t de gusa)
Umidade do ar soprado [g/Nm ³]	+1	0,7
Temperatura do ar soprado [°C]	+1	0,1
Produtividade [t/m ³ /dia]	+1	20
Silício no gusa [%]	+1	68
Temperatura do gusa [°C]	+1	0,1
Percentual de cinzas no coque [%]	+1	7
Slag-rate [kg/t]	+1	0,2
Minério na carga [%]	+1	0,7

Aplicando o modelo matemático de cálculo da taxa de substituição, após ajuste para aplicabilidade com co-injeção, chega-se a um extenso equacionamento que, por conveniência, se encontra no Anexo I.

Os valores obtidos para a taxa de substituição constam na Figura 5.3, considerando apenas o período com injeção de carvão mineral, e na Figura 5.4, considerando o período de co-injeção.

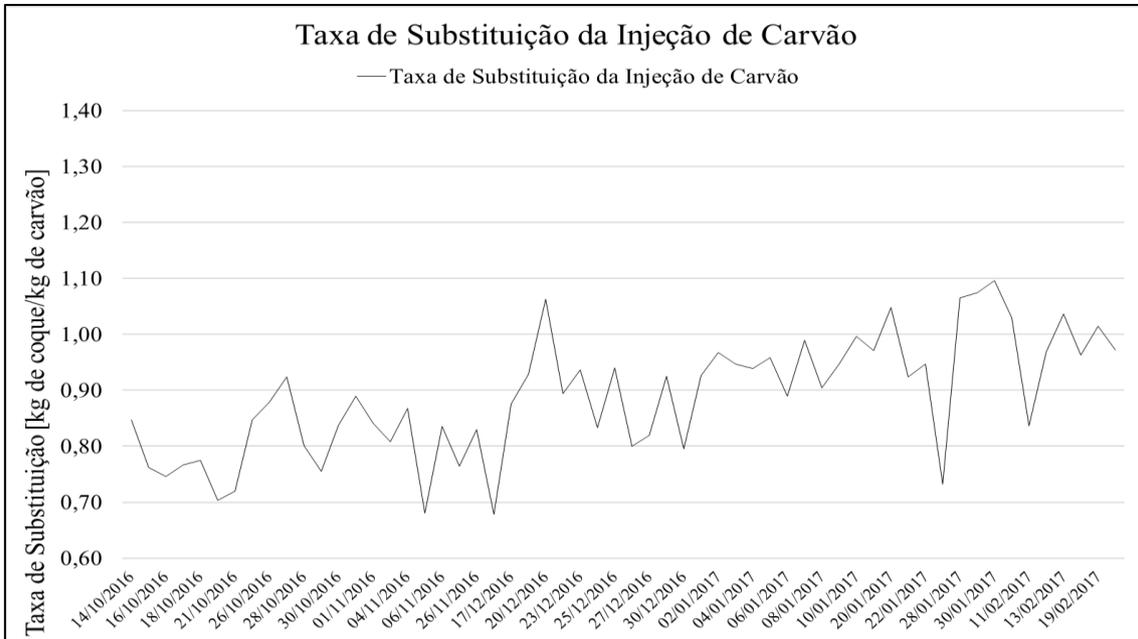


Figura 5.3 - Taxa de substituição considerando o período com injeção de carvão mineral.

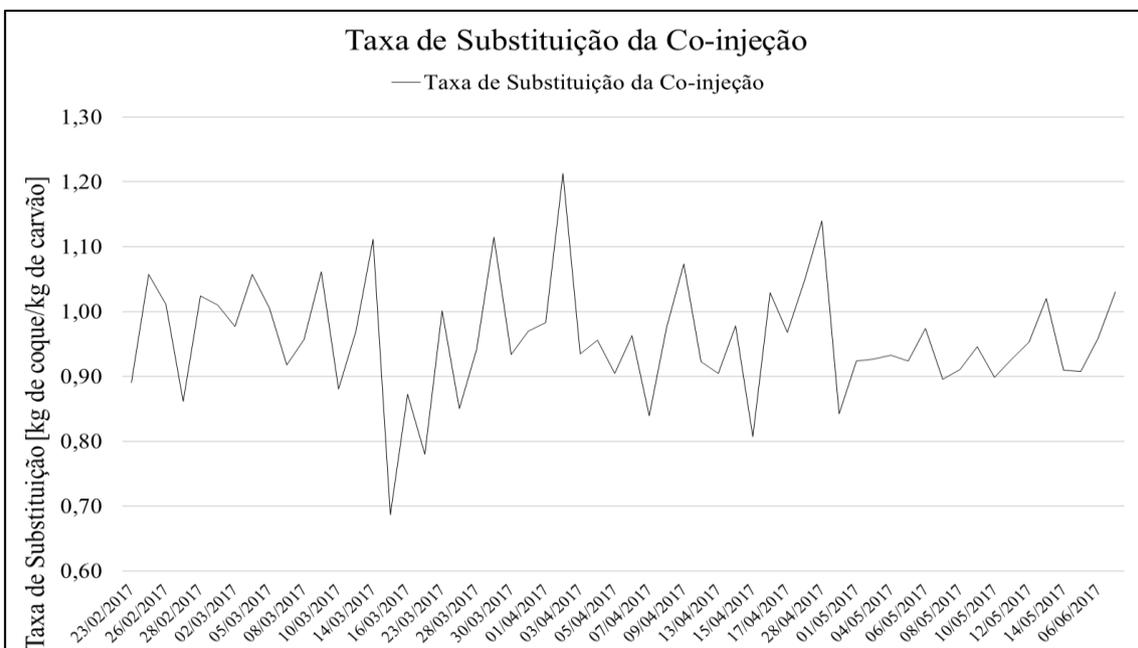


Figura 5.4 - Taxa de substituição considerando o período com co-injeção de carvão mineral e gás natural.

Visualmente, observando as figuras acima, há a hipótese que os dias com co-injeção, em média, apresentam maiores taxas de substituição, sendo assim, continuam-se as análises para confirmação.

Foi realizado o teste de normalidade nos dados, cujo resultado está na Figura 5.5.

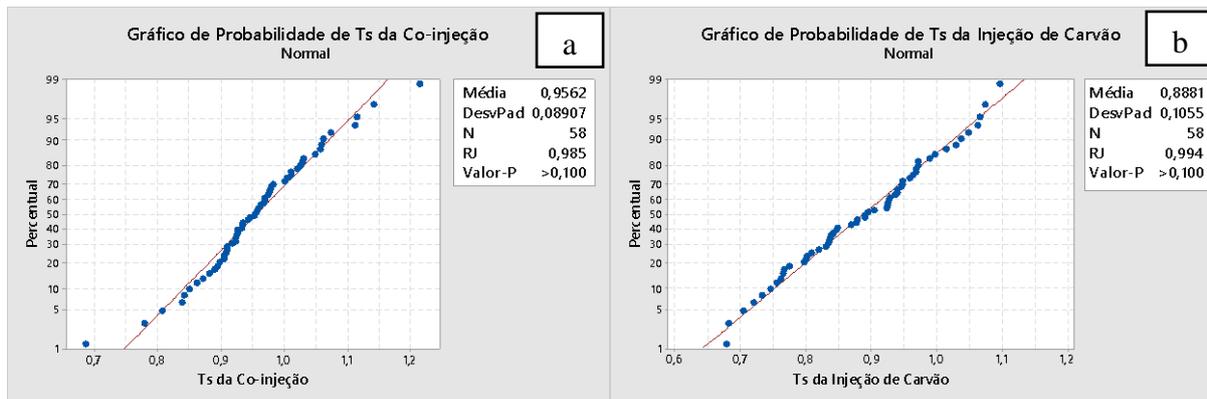


Figura 5.5 - Teste de normalidade para a taxa de substituição (Ts) do processo com co-injeção (a) e com injeção de carvão (b).

Nota-se que o Valor-p foi maior que nível de significância, logo, não é possível concluir que os dados não seguem uma distribuição normal (não deve rejeitar a hipótese nula), ou seja, considerar-se-ão os dados com distribuição normal.

Realizando então a análise de variância dos dados para análise das médias a fim de verificar se há diferenças significativas das taxas de substituição dessas duas práticas de injeção, obtiveram-se as informações contidas na Figura 5.6.

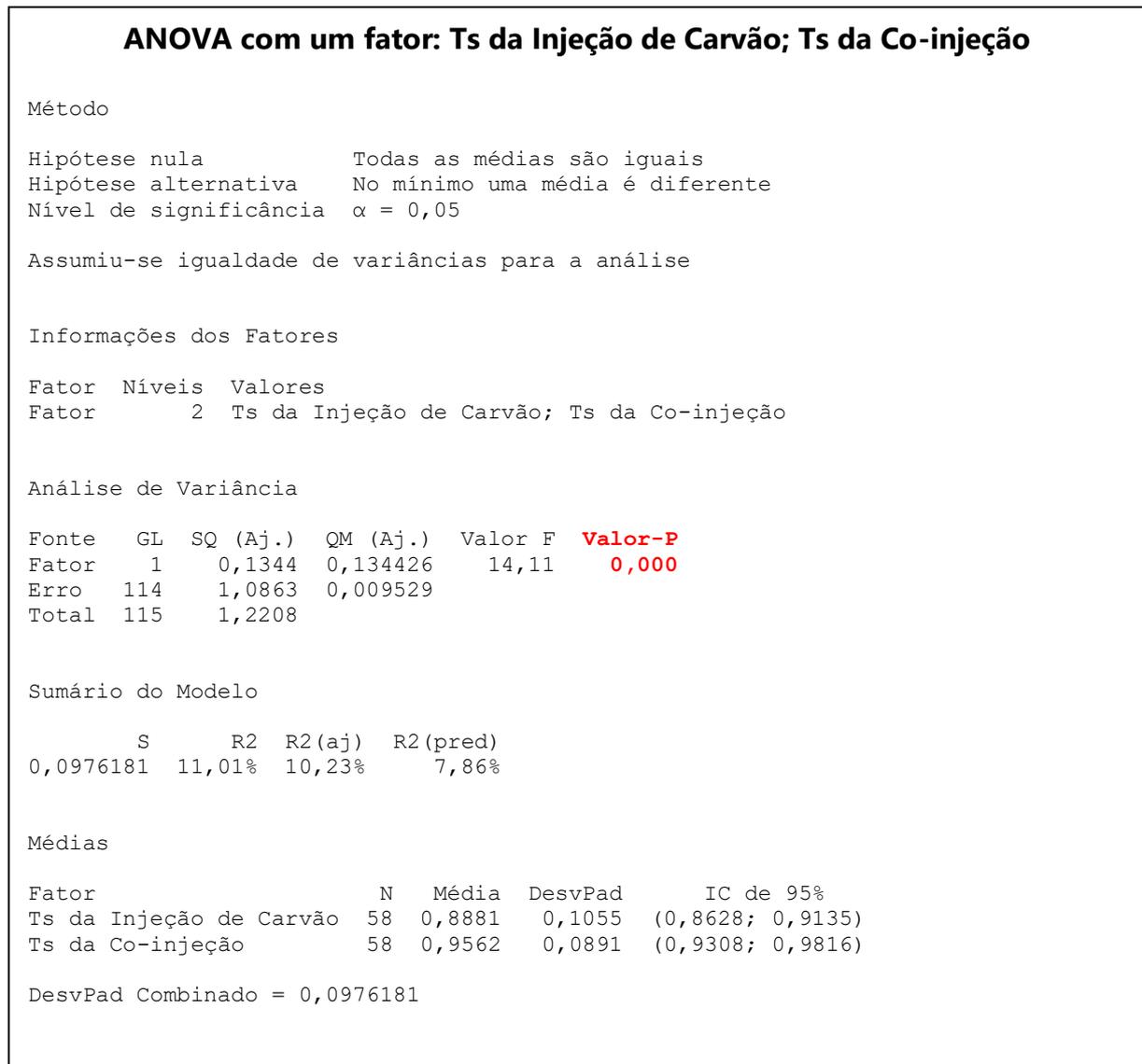


Figura 5.6 - Análise de Variância – ANOVA para as médias de taxa de substituição (Ts) do processo com co-injeção e com injeção de carvão.

Nota-se que o Valor-p foi menor que α , indicando que as diferenças entre as médias são estatisticamente significativas, e o valor de S foi 0,097, indicando que o modelo pode descrever corretamente a resposta, entretanto, o R^2 , que representa a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, não é muito alto, limitando a utilização quantitativa para comparação das médias.

A Figura 5.7 apresenta o *Boxplot* (Gráfico de Caixas) e a análise de resíduos que corroboram com a conclusão de haver evidência amostral de que as médias das taxas de substituição (por tipo de prática de injeção) diferem do ponto de vista estatístico, ou seja, a co-injeção promove melhores taxas de substituição.

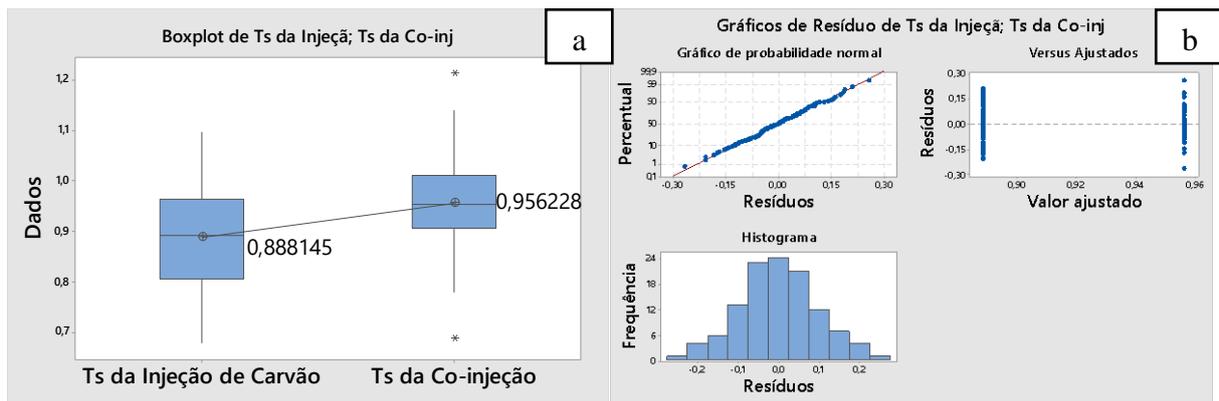


Figura 5.7 - *Boxplot* (a) e a análise de resíduos (b) para a taxa de substituição (Ts) do processo com co-injeção e com injeção de carvão.

Concluindo essa comparação entre taxas de substituição, pode-se inferir que, com os dados obtidos no período estudado, há diferença estatística entre as taxas de substituição dessas duas práticas de injeção de combustíveis sendo a co-injeção, em média, promovendo maiores taxas de substituição.

Analisando a taxa de Injeção dos combustíveis injetados em relação a taxa de substituição, obteve-se o gráficos da Figuras 5.8.

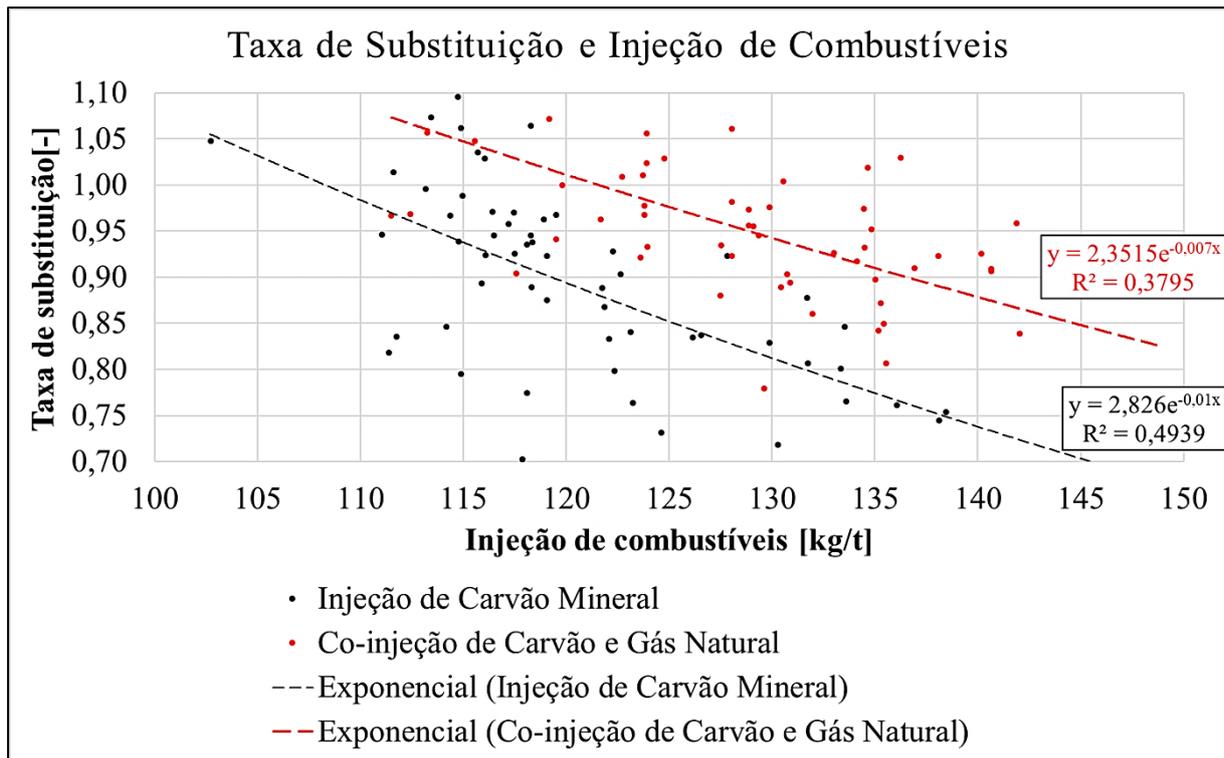


Figura 5.8 – Gráfico de dispersão da taxa de substituição versus taxa de injeção de combustíveis.

Qualitativamente, observa-se a mesma tendência relatada na literatura para o Alto-forno A, onde maiores taxas de injeção de combustíveis promovem menores taxas de substituição. Observa-se que as linhas de tendência representadas por uma equação exponencial (melhor equação ajustada) possuem R^2 não satisfatório para uma análise quantitativa categórica, mas evidencia a tendência antagônica das variáveis.

A fim de verificar se há influência direta do percentual de gás natural na co-injeção e a taxa de substituição, plotou-se o gráfico de dispersão da Figura 5.9, que relaciona o percentual de gás natural na co-injeção e a taxa de substituição.

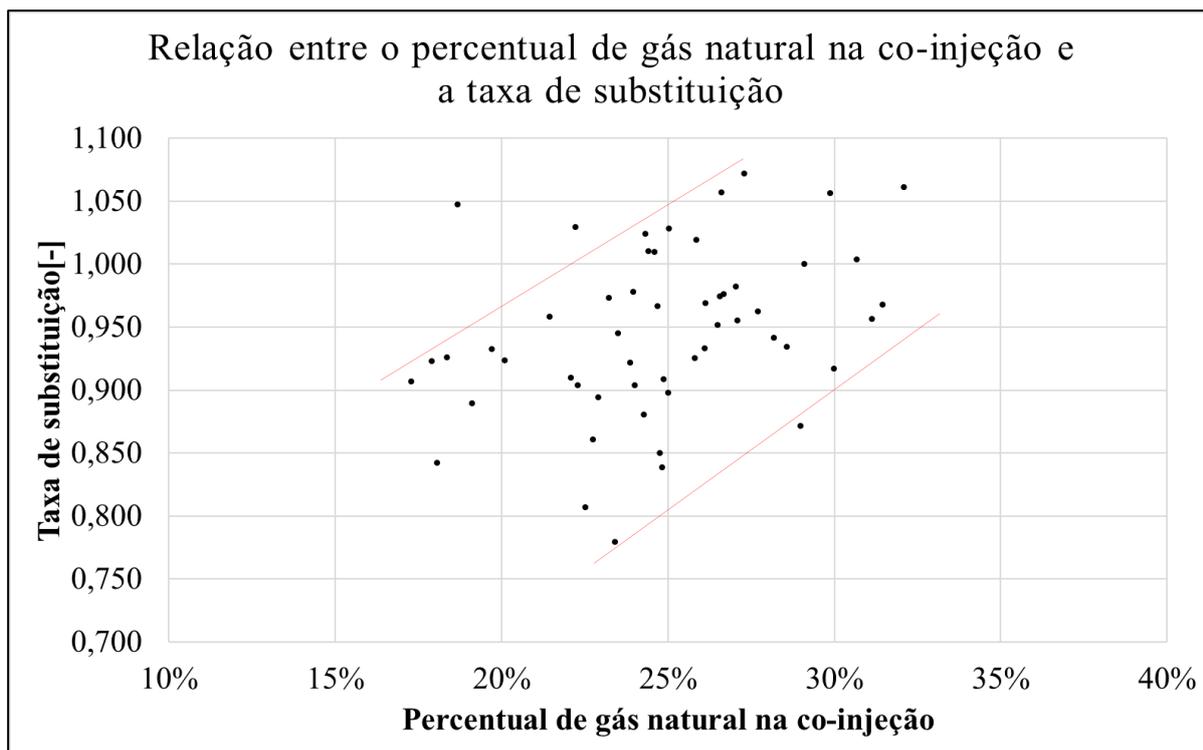


Figura 5.9 - Gráfico de dispersão da taxa de substituição versus o percentual de gás natural na co-injeção (em vermelho, linhas apenas para referência da tendência crescente).

Quantitativamente não se pôde ter conclusões devido à elevada dispersão (linha de tendência linear com R^2 de 0,062), entretanto, qualitativamente, há a hipótese de que, quanto maior o percentual de gás natural, maior tende a ser a taxa de substituição.

Tal gráfico, somada a análise da variância que mostrou diferença entre as médias dos dados de operação com e sem gás natural, pode indicar que o benefício esperado quanto à taxa de substituição com a injeção de gás natural é uma relação complexa de ser mensurada quantitativamente, mas de fato existe para o Alto-forno A, reforçando que essa análise é apenas referente a taxa de substituição e não quanto a benefícios operacionais que o gás natural pode proporcionar ao alto-forno.

5.3 Equacionamento para determinação do Índice de Excesso de Oxigênio (IEO)

Seguindo a metodologia apresentada no Capítulo 4, de antemão, calculou-se a vazão mássica de carvão e de gás natural envolvidas no processo através das Equações 5.1 e 5.2.

$$M_{cv} = \frac{1}{24} \left[\frac{\text{dia}}{\text{horas}} \right] \times \text{Prod} \left[\frac{\text{t}}{\text{dia}} \right] \times PCR \left[\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right] \quad (5.1)$$

$$Mgn = \frac{1}{24} \left[\frac{dia}{horas} \right] \times Prod \left[\frac{t}{dia} \right] \times GNR \left[\frac{kg}{t} \right] \quad (5.2)$$

Onde:

Mcv: Massa de carvão em quilogramas por hora;

Mgn: Massa de gás natural em quilogramas por hora;

Prod: Produção diária;

PCR: Taxa de injeção de carvão;

GNR: Taxa de injeção de gás natural.

Para cálculo da vazão de oxigênio proveniente do carvão ter-se-ão as Equações 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6:

$$\eta O2carv \left[\frac{kmol}{h} \right] = \frac{1}{2} \times \frac{\%Ocv}{100} \times \frac{Mcv \left[\frac{kg}{h} \right]}{16 \left[\frac{g}{mol} \right]} \quad (5.3)$$

$$\eta O2carv \left[\frac{kmol}{h} \right] = 3,13 \times 10^{-4} \times \%Ocv \times Mcv \quad (5.4)$$

$$VO2carv \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 3,13 \times 10^{-4} \times \%Ocv \times Mcv \times 22,4 \left[dcm^3 \right] \quad (5.5)$$

$$VO2carv \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 7,0 \times 10^{-3} \times \%Ocv \times Mcv \quad (5.6)$$

Onde:

$\eta O2carv$: vazão de mols de oxigênio provenientes do carvão mineral;

$\%Ocv$: percentual em massa de oxigênio no carvão;

$VO2carv$: vazão volumétrica de oxigênio proveniente do carvão.

Para o cálculo do oxigênio gerado pelo CO_2 do gás natural, devido as condições termodinâmicas da zona de combustão, consideram-se a reação da Equação 5.7 e as Equações 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11:



$$\eta O2gn \left[\frac{kmol}{h} \right] = \frac{1}{2} \times \eta CO2gn \left[\frac{kmol}{h} \right] \quad (5.8)$$

$$\eta O2gn \left[\frac{kmol}{h} \right] = \frac{1}{2} \times \frac{\%CO2gn \times Mgn \left[\frac{kg}{h} \right]}{44,01 \left[\frac{g}{mol} \right]} \quad (5.9)$$

$$VO2gn \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 1,14 \times 10^{-4} \times \%CO2gn \times Mgn \times 22,4 \left[dcm^3 \right] \quad (5.10)$$

$$VO2gn \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 2,54 \times 10^{-3} \times \%CO2gn \times Mgn \quad (5.11)$$

Onde:

$\eta O2gn$: vazão de mols de oxigênio provenientes do gás natural;

$\%CO2gn$: percentual em massa de oxigênio no gás natural;

$VO2gn$: vazão volumétrica de oxigênio proveniente do gás natural.

Para cálculo do oxigênio proveniente do ar soprado, consideram-se as Equações 5.12 e 5.13:

$$VO2VS \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = VS \left[\frac{Nm^3}{min} \right] \times 60 \times \left[\frac{min}{h} \right] \times \frac{21 [\%]}{100} \quad (5.12)$$

$$VO2VS \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 12,6 \times VS \quad (5.13)$$

Onde:

$VO2VS$: vazão volumétrica de oxigênio proveniente do ar soprado;

VS : vazão de ar soprado.

Para cálculo do oxigênio proveniente do enriquecimento do ar soprado, têm-se a Equação 5.14:

$$VO2Enr \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = VzO2 \left[\frac{Nm^3}{h} \right] \quad (5.14)$$

Ou a equação 5.15:

$$VO2Enr \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = VS \left[\frac{Nm^3}{min} \right] \times 60 \times \left[\frac{min}{h} \right] \times enr [\%] \times \frac{1}{79 [\%]} \quad (5.15)$$

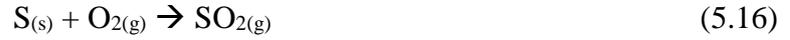
Onde:

$VO2Enr$: vazão volumétrica de oxigênio proveniente do enriquecimento;

$VzO2$: vazão volumétrica de oxigênio puro adicionado ao processo;

enr : percentual de enriquecimento do ar soprado.

Para o cálculo do oxigênio necessário para consumo dos combustíveis, inicia-se com o oxigênio necessário para oxidação do enxofre do carvão, segundo a reação da Equação 5.16 e as Equações 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20.



$$\eta_{Scv} \left[\frac{kmol}{h} \right] = \eta_{O2S} \left[\frac{kmol}{h} \right] \quad (5.17)$$

$$\eta_{O2S} \left[\frac{kmol}{h} \right] = \frac{\%Scv \times M_{cv} \left[\frac{kg}{h} \right]}{32,07 \left[\frac{g}{mol} \right]} \quad (5.18)$$

$$VO_{2S} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 3,12 \times 10^{-4} \times \%Scv \times M_{cv} \times 22,4 \left[dcm^3 \right] \quad (5.19)$$

$$VO_{2S} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 6,98 \times 10^{-3} \times \%Scv \times M_{cv} \quad (5.20)$$

Onde:

η_{Scv} : vazão de mols de enxofre provenientes do carvão mineral;

η_{O2S} : vazão de mols de oxigênio necessários para oxidar o enxofre;

$\%Scv$: percentual em massa de enxofre no carvão;

VO_{2S} : vazão volumétrica de oxigênio necessários para oxidar o enxofre.

Para cálculo do oxigênio que será gasto para oxidação do carbono e formação do monóxido de carbono, consideram-se a reação da Equação 5.21 e as Equações 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25.



$$\eta_{O2c} \left[\frac{kmol}{h} \right] = \frac{1}{2} \eta_{Ccv} \left[\frac{kmol}{h} \right] \quad (5.22)$$

$$\eta_{O2c} \left[\frac{kmol}{h} \right] = \frac{1}{2} \left(\frac{\%Ccv \times M_{cv} \left[\frac{kg}{h} \right]}{12,01 \left[\frac{g}{mol} \right]} \right) \quad (5.23)$$

$$VO_{2c} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 4,16 \times 10^{-4} \times \%Ccv \times M_{cv} \times 22,4 \left[dcm^3 \right] \quad (5.24)$$

$$VO_{2c} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 9,33 \times 10^{-3} \times \%Ccv \times M_{cv} \quad (5.25)$$

Onde:

η_{O2c} : vazão de mols de oxigênio para consumir o carbono provenientes do carvão mineral;

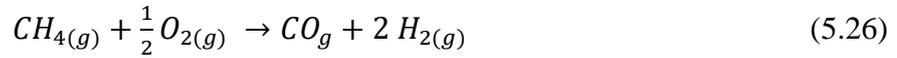
η_{Ccv} : vazão de mols de carbono provenientes do carvão mineral;

$\%Ccv$: percentual em massa de carbono no carvão;

VO_{2c} : vazão volumétrica de oxigênio necessários para oxidar o carbono.

Outro combustível em questão que consome oxigênio é o gás natural injetado, sendo assim, seguem os cálculos a seguir.

Para consumo de oxigênio para oxidação do metano, consideram-se a reação da Equação 5.26 e os cálculos das Equações 5.27, 5.28, 5.29 e 5.30.



$$\eta_{O_2CH_4} \left[\frac{kmol}{h} \right] = \frac{1}{2} \eta_{CH_4} \left[\frac{kmol}{h} \right] \quad (5.27)$$

$$\eta_{O_2CH_4} \left[\frac{kmol}{h} \right] = \frac{1}{2} \left(\frac{\%CH_4}{100} \times Mgn \left[\frac{kg}{h} \right] \right) \left(\frac{16,04 \left[\frac{g}{mol} \right]}{1} \right) \quad (5.28)$$

$$VO_{2CH_4} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 1,25 \times 10^{-3} \times \%CH_4 \times Mgn \times 22,4 \left[dcm^3 \right] \quad (5.29)$$

$$VO_{2CH_4} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 2,80 \times 10^{-2} \times Mgn \times \%CH_4 \quad (5.30)$$

Onde:

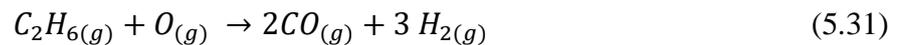
$\eta_{O_2CH_4}$: vazão de mols de oxigênio para consumir o metano provenientes do gás natural;

η_{CH_4} : vazão de mols de metano provenientes do gás natural;

$\%CH_4$: percentual em massa de metano do gás natural;

VO_{2CH_4} : vazão volumétrica de oxigênio necessários para oxidar o metano do gás natural.

Para consumo de oxigênio para oxidação do etano, consideram-se a reação da Equação 5.31 e os cálculos das Equações 5.32, 5.33, 5.34 e 5.35.



$$\eta_{C_2H_6} \left[\frac{kmol}{h} \right] = \eta_{O_2C_2H_6} \left[\frac{kmol}{h} \right] \quad (5.32)$$

$$\eta_{O_2C_2H_6} \left[\frac{kmol}{h} \right] = \frac{\%C_2H_6}{100} \times Mgn \left[\frac{kg}{h} \right] \left(\frac{30,07 \left[\frac{g}{mol} \right]}{1} \right) \quad (5.33)$$

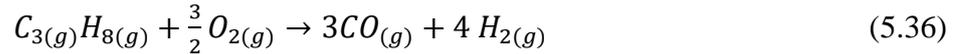
$$VO_{2C_2H_6} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 3,33 \times 10^{-4} \times \%C_2H_6 \times Mgn \times 22,4 \left[dcm^3 \right] \quad (5.34)$$

$$VO_{2C_2H_6} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 7,45 \times 10^{-3} \times Mgn \times \%C_2H_6 \quad (5.35)$$

Onde:

$\eta_{O_2C_2H_6}$: vazão de mols de oxigênio para consumir o etano provenientes do gás natural;
 $\eta_{C_2H_6}$: vazão de mols de etano provenientes do gás natural;
 $\%C_2H_6$: percentual em massa de etano do gás natural;
 $VO_2C_2H_6$: vazão volumétrica de oxigênio necessários para oxidar o etano do gás natural.

Para consumo de oxigênio para oxidação do propano, consideram-se a reação da Equação 5.36 e os cálculos das Equações 5.37, 5.38, 5.39 e 5.40.



$$\eta_{O_2C_3H_8} \left[\frac{kmol}{h} \right] = \frac{3}{2} \eta_{C_3H_8} \left[\frac{kmol}{h} \right] \quad (5.37)$$

$$\eta_{O_2C_3H_8} = \left[\frac{kmol}{h} \right] = \frac{3}{2} \left(\frac{\%C_3H_8 \times Mgn \left[\frac{kg}{h} \right]}{44,1 \left[\frac{g}{mol} \right]} \right) \quad (5.38)$$

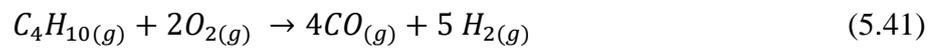
$$VO_2C_3H_8 \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 3,40 \times 10^{-4} \times \%C_3H_8 \times Mgn \times 22,4 [dcm^3] \quad (5.39)$$

$$VO_2C_3H_8 \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 7,62 \times 10^{-3} \times Mgn \times \%C_3H_8 \quad (5.40)$$

Onde:

$\eta_{O_2C_3H_8}$: vazão de mols de oxigênio para consumir o propano provenientes do gás natural;
 $\eta_{C_3H_8}$: vazão de mols de propano provenientes do gás natural;
 $\%C_3H_8$: percentual em massa de propano do gás natural;
 $VO_2C_3H_8$: vazão volumétrica de oxigênio necessários para oxidar o propano do gás natural.

Para consumo de oxigênio para oxidação do butano, consideram-se a reação da Equação 5.41 e os cálculos das Equações 5.42, 5.43, 5.44 e 5.45.



$$\eta_{O_2C_4H_{10}} \left[\frac{kmol}{h} \right] = 2 \eta_{C_4H_{10}} \left[\frac{kmol}{h} \right] \quad (5.42)$$

$$\eta_{O_2C_4H_{10}} = \left[\frac{kmol}{h} \right] = 2 \times \left(\frac{\%C_4H_{10} \times Mgn \left[\frac{kg}{h} \right]}{58,12 \left[\frac{g}{mol} \right]} \right) \quad (5.43)$$

$$VO_2C_4H_{10} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 3,40 \times 10^{-4} \times \%C_4H_{10} \times Mgn \times 22,4 [dcm^3] \quad (5.44)$$

$$VO_2C_4H_{10} \left[\frac{Nm^3}{h} \right] = 7,71 \times 10^{-3} \times Mgn \times \%C_4H_{10} \quad (5.45)$$

Onde:

$\eta_{O_2C_4H_{10}}$: vazão de mols de oxigênio para consumir o butano provenientes do gás natural;

$\eta_{C_4H_{10}}$: vazão de mols de butano provenientes do gás natural;

%C₄H₁₀: percentual em massa de butano do gás natural;

VO₂C₄H₁₀: vazão volumétrica de oxigênio necessários para oxidar o butano do gás natural.

Logo, a fórmula final obtida para o IEO foi a Equação 5.46:

$$IEO = \frac{\{(7,0 \times 10^{-3} \times \%O_{cv} \times M_{cv}) + (2,54 \times 10^{-3} \times \%CO_2_{gn} \times M_{gn}) + (12,6 \times VS) + (VzO_2)\}}{\{[(6,98 \times 10^{-3} \times \%S_{cv}) + (9,33 \times 10^{-3} \times \%C_{cv})] \times M_{cv} + [(2,80 \times 10^{-2} \times \%CH_4) + (7,45 \times 10^{-3} \times \%C_2H_6) + (7,62 \times 10^{-3} \times \%C_3H_8) + (7,71 \times 10^{-3} \times \%C_4H_{10})] \times M_{gn}\}} \quad (5.46)$$

5.4 Cálculo e Análise do Índice de Excesso de Oxigênio (IEO) para o banco de dados do Alto-Forno A

Após obtenção da equação que define o índice de excesso de oxigênio (IEO), esta foi aplicada ao banco de dados estabelecido a fim de análise da situação do Alto-forno A.

Considerando o período com injeção de somente carvão mineral e co-injeção, o gráfico da Figura 5.10 apresenta o comportamento geral dos valores obtidos para o IEO, em destaque, a linha vertical pontilhada define o limite entre a prática de injeção de carvão e co-injeção de carvão e gás natural.

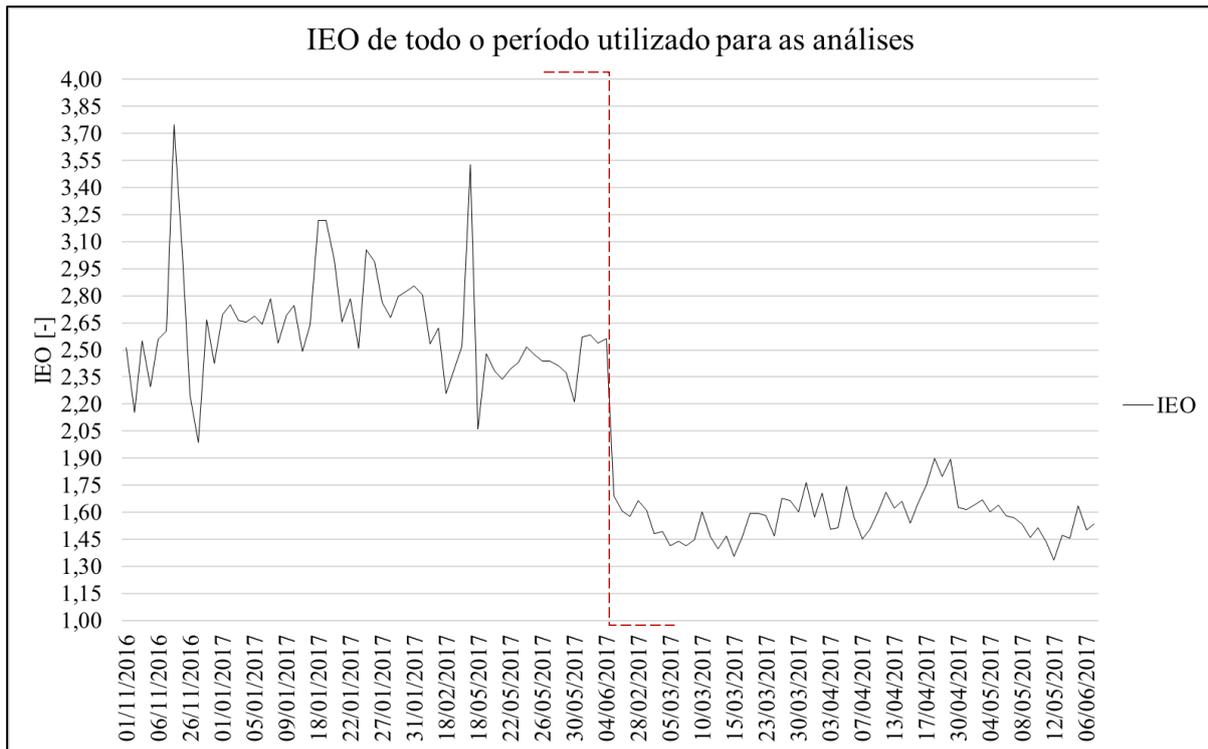


Figura 5.10 - Comportamento geral dos valores obtidos para o IEO no período em estudo (a linha vertical pontilhada define o limite entre a prática de injeção de carvão e co-injeção de carvão e gás natural).

Analisando individualmente o grupo de dados, realizando teste de normalidade observa-se que os dados em ambas as práticas operacionais seguem uma distribuição normal, devido ao Valor-p ter sido maior que nível de significância, como pode ser visto na Figura 5.11.

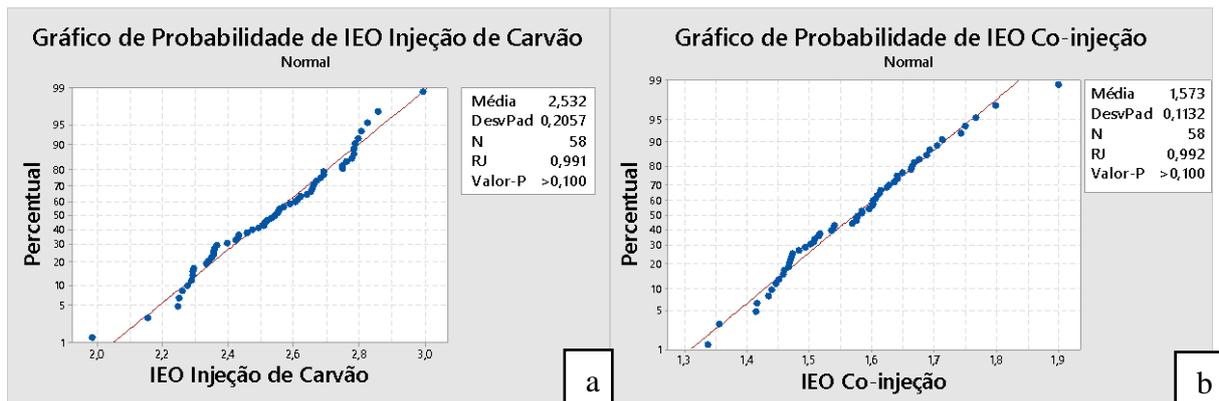


Figura 5.11 - Teste de normalidade para IEO do processo com injeção de carvão (a) e com co-injeção (b).

Realizando a análise de variância para verificação da diferença entre as médias, obtém-se os resultados da Figura 5.12.

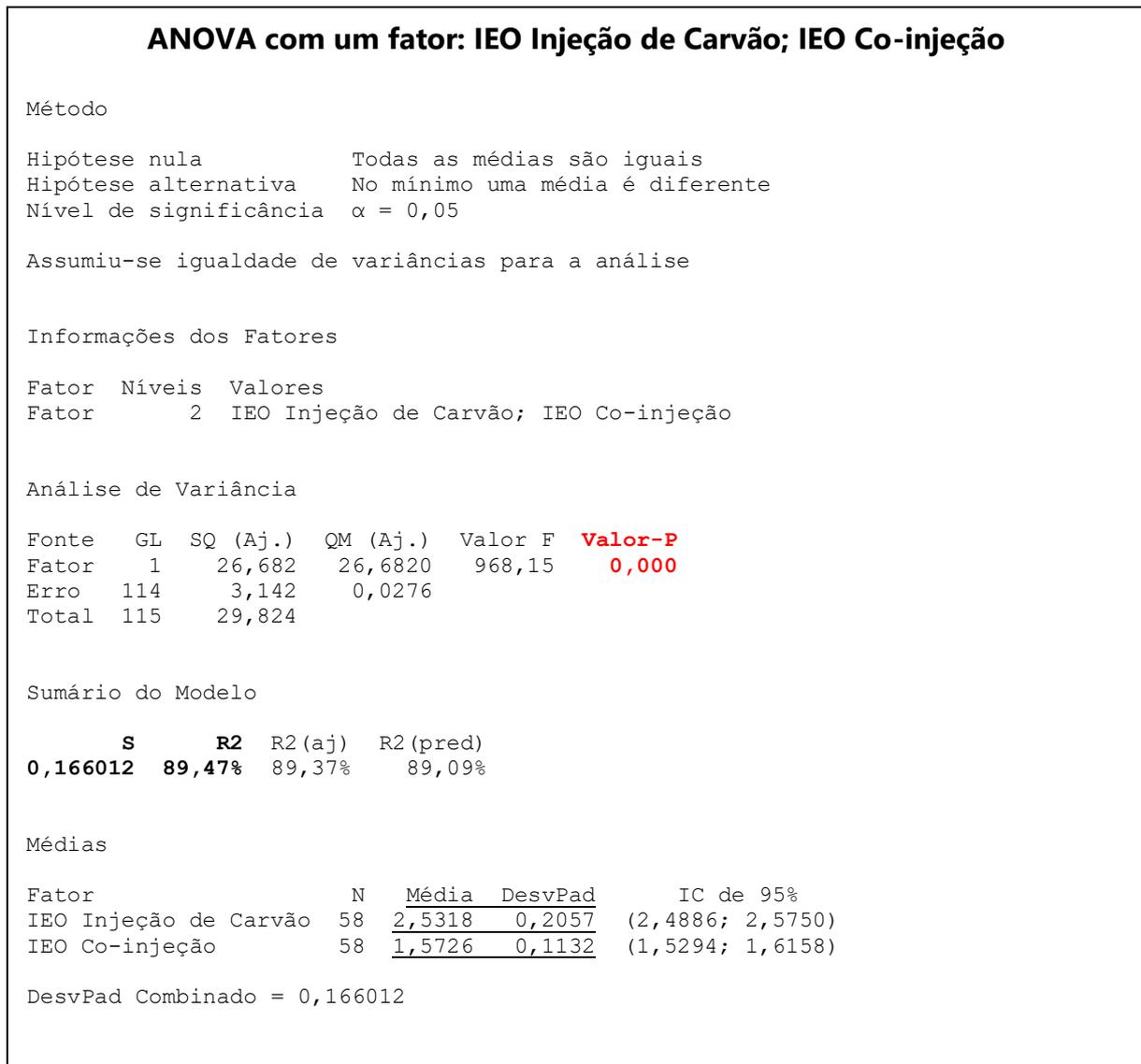


Figura 5.12 - Análise de Variância – ANOVA para as médias de IEO do processo com co-injeção e com injeção de carvão.

Nota-se que o Valor-p foi menor que α , indicando que as diferenças entre as médias são estatisticamente significativas, e o valor de S foi 0,166, indicando que o modelo pode descrever corretamente a resposta, além do R^2 , que representa a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, ser muito satisfatório, possibilitando a utilização quantitativa para comparação das médias.

A Figura 5.13 apresenta o *Boxplot* (a) e a análise de resíduos (b) que corroboram com a conclusão de haver evidência amostral de que as médias do IEO (por tipo de prática de injeção) diferem do ponto de vista estatístico.

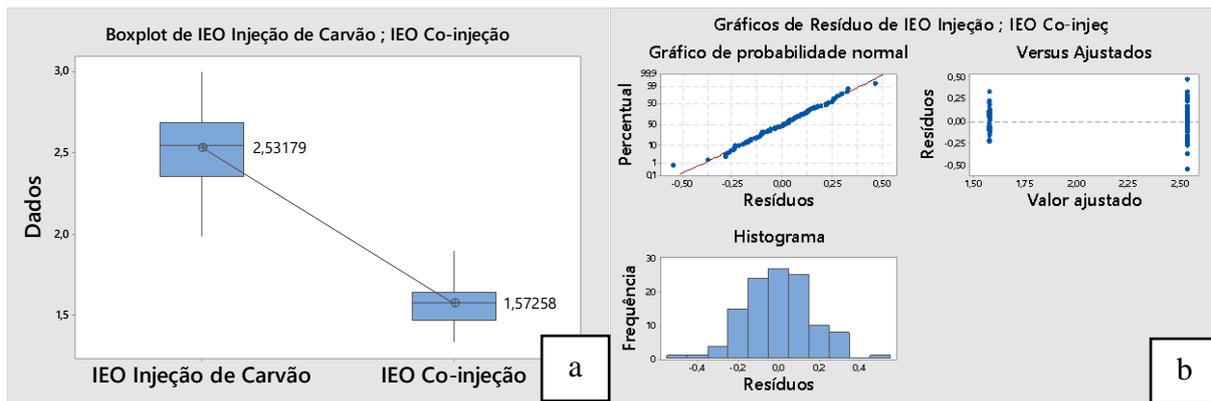


Figura 5.13 - Boxplot (a) e a análise de resíduos (b) para IEO do processo com co-injeção e com injeção de carvão.

Após as análises estatística evidencia-se um valor de IEO para Injeção de Carvão com média de 2,53 e desvio padrão de 0,20 e outro valor de IEO para Co-injeção com média de 1,57 e desvio padrão de 0,11. Sob o ponto de vista de processo, nota-se que, com a co-injeção, trabalha-se seguramente com excesso de oxigênio 38% menor que com injeção de apenas carvão. Outro ponto que chama atenção é que o desvio padrão do IEO do processo de injeção de apenas carvão mineral é quase duas vezes maior que o do processo de co-injeção, podendo ser um indicador de que a co-injeção traz mais estabilidade em termos de excesso de oxigênio. Tais análises são interessantes pois foram feitas levando em consideração planejamento de produção em valores semelhantes, ou seja, não há justificativa no modo operacional do reator para tais diferenças, indicando que ou essa necessidade de mais excesso de oxigênio é intrínseca à diferença entre as práticas de injeção de carvão e a co-injeção ou que esse valor de IEO para injeção de carvão não está otimizado.

5.5 Modelagem e otimização do IEO

5.5.1 Modelagem e otimização para processo de injeção de apenas carvão mineral

Primeiramente, realizou-se um estudo do comportamento do IEO em determinadas faixas de produção, a fim de que fosse delimitado intervalos para trabalho. Sendo assim, gerou-se o gráfico de intervalo da Figura 5.14.

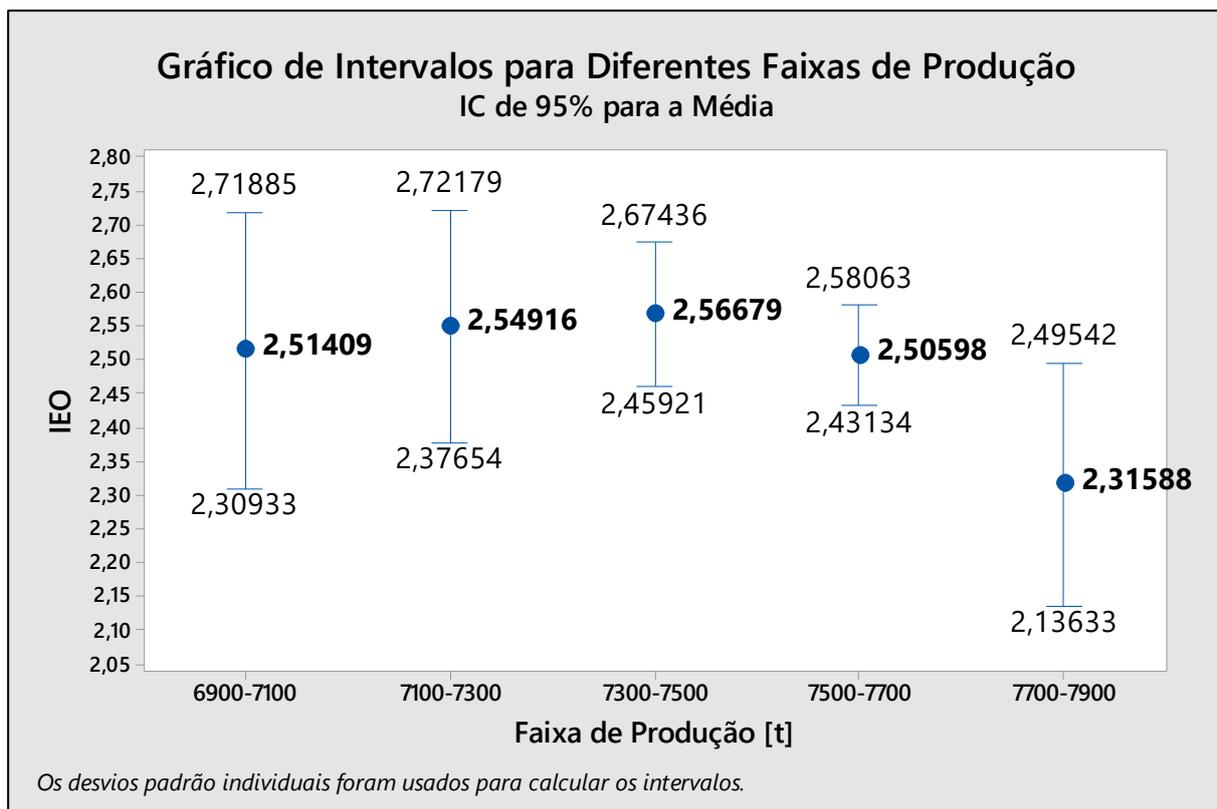


Figura 5.14 - Gráfico de intervalos de IEO para diferentes faixas de produção com apenas injeção de carvão mineral.

Os intervalos de valores de IEO em cada faixa de produção são sensíveis ao volume de dados processados. Na operação normal do alto-forno em questão, não é comum grandes variações na produção diária em pequenos intervalos de dias, entretanto, como está sendo considerada a situação com dados reais (não calculados) é justificável a utilização prática da análise, pois contempla as faixas de variações naturais do processo.

Agrupando as informações, obteve-se a Tabela V.3, onde tem-se os intervalos da variável IEO para cinco níveis de produção média.

Tabela V.3: Intervalo de valores de IEO para 5 níveis de produção média considerando o processo de injeção de apenas carvão mineral.

Produção Média [t]	7000	7200	7400	7600	7800
Intervalo do IEO	2,31-2,72	2,38-2,72	2,46-2,67	2,43-2,58	2,14-2,50

Executando a regressão múltipla, conforme a metodologia, obtiveram-se os resultados demonstrados na Figura 5.15.

Análise de Regressão: IEO Injeção de Carvão versus PRODUÇÃO [t]; Vazão de Sop; Temperatura ; ...

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	7	1,80303	0,257576	21,16	0,000
PRODUÇÃO [t]	1	0,10773	0,107727	8,85	0,005
Vazão de Sopros [Nm3/min]	1	0,19859	0,198590	16,32	0,000
Temperatura de Chama [°C]	1	0,36252	0,362520	29,78	0,000
Temperatura do Topo [°C]	1	0,03132	0,031320	2,57	0,115
Taxa de Injeção de Carvão	1	0,88955	0,889555	73,08	0,000
TAXA DE SUBSTITUIÇÃO CARVÃO MINE	1	0,00000	0,000004	0,00	0,987
% Enriquecimento	1	0,04451	0,044514	3,66	0,062
Erro	50	0,60859	0,012172		
Total	57	2,41162			

Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)
0,110326	74,76%	71,23%	65,15%

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	17,52	2,58	6,80	0,000	
PRODUÇÃO [t]	-0,000252	0,000085	-2,97	0,005	3,43
Vazão de Sopros [Nm3/min]	0,000727	0,000180	4,04	0,000	4,18
Temperatura de Chama [°C]	-0,00587	0,00108	-5,46	0,000	2,26
Temperatura do Topo [°C]	0,00276	0,00172	1,60	0,115	3,11
Taxa de Injeção de Carvão	-0,02684	0,00314	-8,55	0,000	3,61
TAXA DE SUBSTITUIÇÃO CARVÃO MINE	0,004	0,228	0,02	0,987	2,72
% Enriquecimento	-0,1366	0,0714	-1,91	0,062	1,45

Equação de Regressão

IEO Injeção de Carvão = 17,52 - 0,000252 PRODUÇÃO [t]
 + 0,000727 Vazão de Sopros [Nm3/min]
 - 0,00587 Temperatura de Chama [°C]
 + 0,00276 Temperatura do Topo [°C]
 - 0,02684 Taxa de Injeção de Carvão [kg/t]
 + 0,004 TAXA DE SUBSTITUIÇÃO CARVÃO MINERAL-
 0,1366 % Enriquecimento

Figura 5.15 – Regressão múltipla para predição do IEO com injeção de carvão com sete variáveis preditoras.

O Valor-P para a maioria das variáveis foi menor que o nível de significância, exceto para a temperatura do topo, taxa de substituição e o enriquecimento. O percentual de enriquecimento é tecnicamente relevante à análise do excesso de oxigênio, pois se trata de uma variável diretamente ligada à entrada de oxigênio, entretanto, temperatura de topo e taxa de substituição são variáveis importantes, mas que dependem de diversos outros fatores, e como

pode ser visto na análise dos efeitos principais, através da Figura 5.17, essas variáveis tem pouca influência estatística como preditoras do IEO.

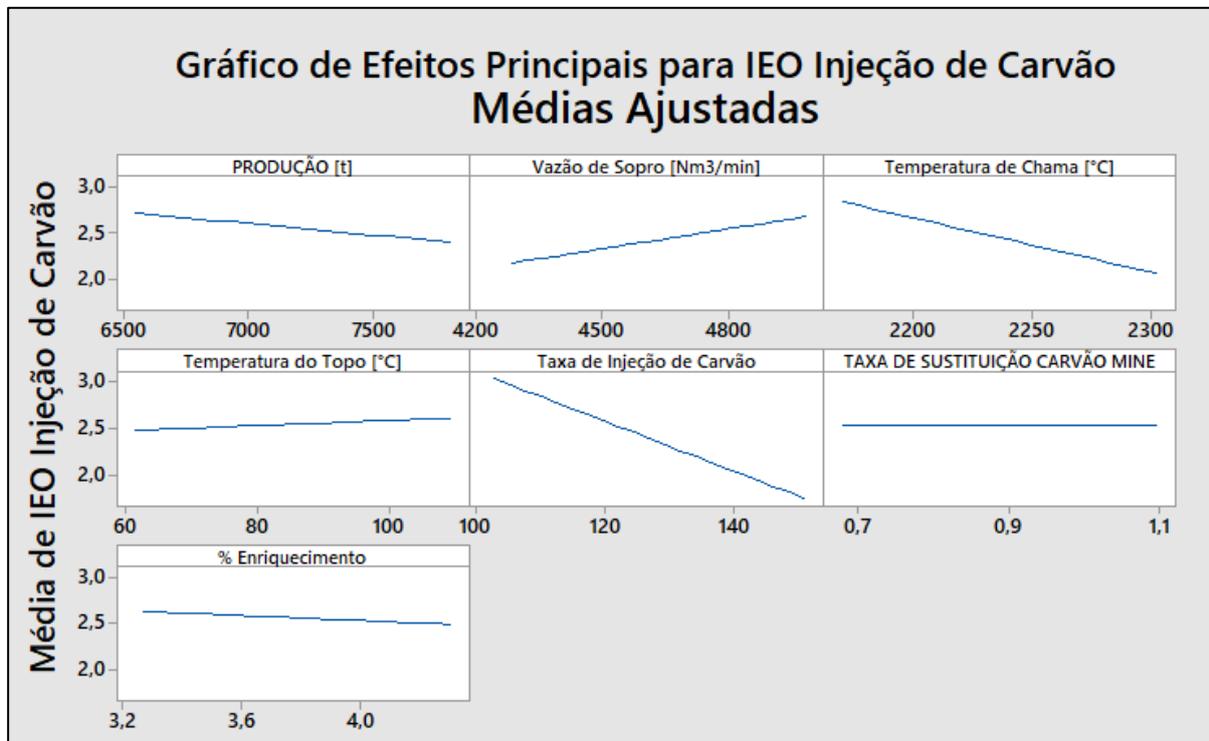


Figura 5.16 – Gráfico de Efeitos Principais das sete variáveis preditoras no valor de IEO no modelo de regressão para processo com injeção de apenas carvão mineral.

Outro ponto de atenção em relação as variáveis preditoras é a existência de colinearidade, que pode ser evidenciada tecnicamente e estatisticamente entre produção e vazão de sopros, onde maiores produções ocorrem, preponderantemente, com maiores vazões de sopros, como pode ser visto através da linha de tendência linear (em vermelho) com R^2 de 0,685 no gráfico de dispersão na Figura 5.17.

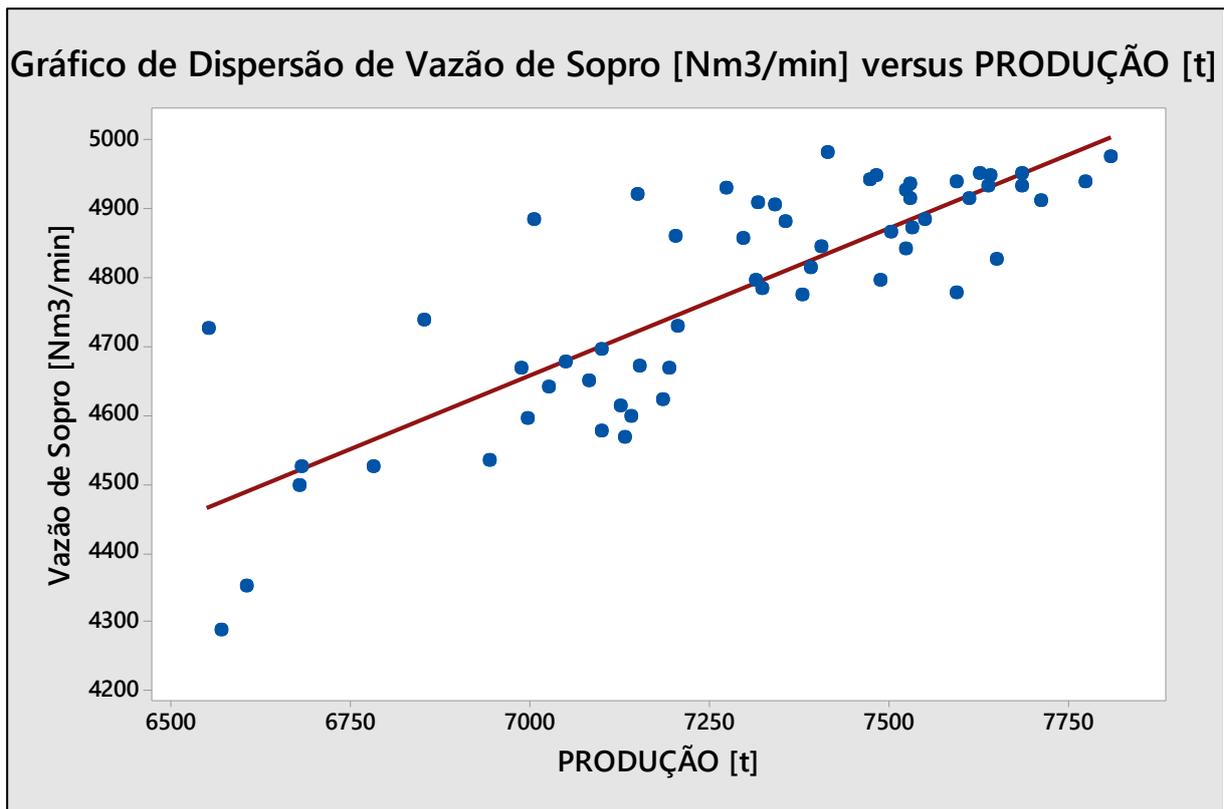


Figura 5.17 – Gráfico de dispersão da vazão de sopros versus produção com a linha de tendência linear (em vermelho) com R^2 de 0,685 para processo com injeção de carvão mineral.

Sendo assim, com o foco na otimização e para evitar variáveis preditoras fracas e colinearidade, optou-se por reformular o modelo de regressão linear múltipla mantendo apenas os seguintes parâmetros:

- Produção diária [t]
- Temperatura de Chama [°C]
- Taxa de injeção de combustível [kg/t]
- % de Enriquecimento [%]

Optou-se por manter a produção e retirar a vazão de sopros sanando assim o problema de colinearidade evidente com facilidade de interpretação dos resultados.

Mediante as considerações, o modelo reformulado definido para o IEO pode ser visto na Figura 5.18.

Análise de Regressão: IEO Injeção versus PRODUÇÃO [t]; Temperatura ; Taxa de Inje; ...

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	4	1,52107	0,38027	22,63	0,000
PRODUÇÃO [t]	1	0,01826	0,01826	1,09	0,302
Temperatura de Chama [°C]	1	0,20455	0,20455	12,17	0,001
Taxa de Injeção de Carvão	1	1,17153	1,17153	69,72	0,000
% Enriquecimento	1	0,04775	0,04775	2,84	0,098
Erro	53	0,89055	0,01680		
Total	57	2,41162			

Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)
0,129626	63,07%	60,29%	52,46%

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	13,30	2,41	5,52	0,000	
PRODUÇÃO [t]	0,000064	0,000061	1,04	0,302	1,31
Temperatura de Chama [°C]	-0,00373	0,00107	-3,49	0,001	1,61
Taxa de Injeção de Carvão	-0,02015	0,00241	-8,35	0,000	1,55
% Enriquecimento	-0,1279	0,0759	-1,69	0,098	1,18

Equação de Regressão

$$\text{IEO Injeção de Carvão} = 13,30 + 0,000064 \text{ PRODUÇÃO [t]} - 0,00373 \text{ Temperatura de Chama [°C]} - 0,02015 \text{ Taxa de Injeção de Carvão} - 0,1279 \text{ \% Enriquecimento}$$

Figura 5.18 – Regressão múltipla para predição do IEO com injeção de carvão com quatro variáveis preditoras.

A análise de resíduos para a regressão pode ser observada na Figura 5.19. Os resíduos tenderam a apresentar distribuição normal e aleatoriedade em relação ao tempo e valor calculado, com poucas discrepâncias.

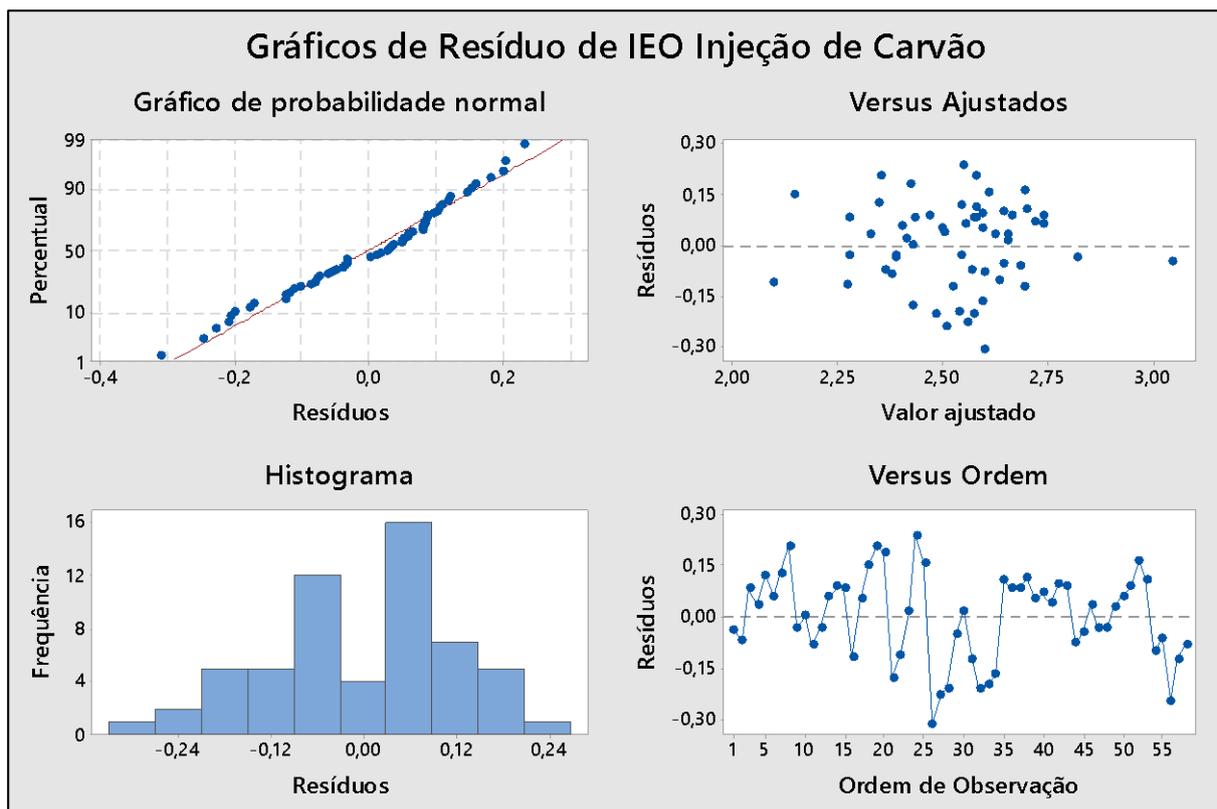


Figura 5.19 - Gráfico de resíduos da regressão múltipla para predição do IEO com injeção de carvão com quatro variáveis predictoras.

Analisando então os valores obtidos pelo modelo e os valores calculados com base na amostra, pode-se gerar o gráfico de dispersão da Figura 5.20 onde pode-se ver a linha de tendência com o R^2 de 0,6307, conforme apresentado nos dados da regressão.

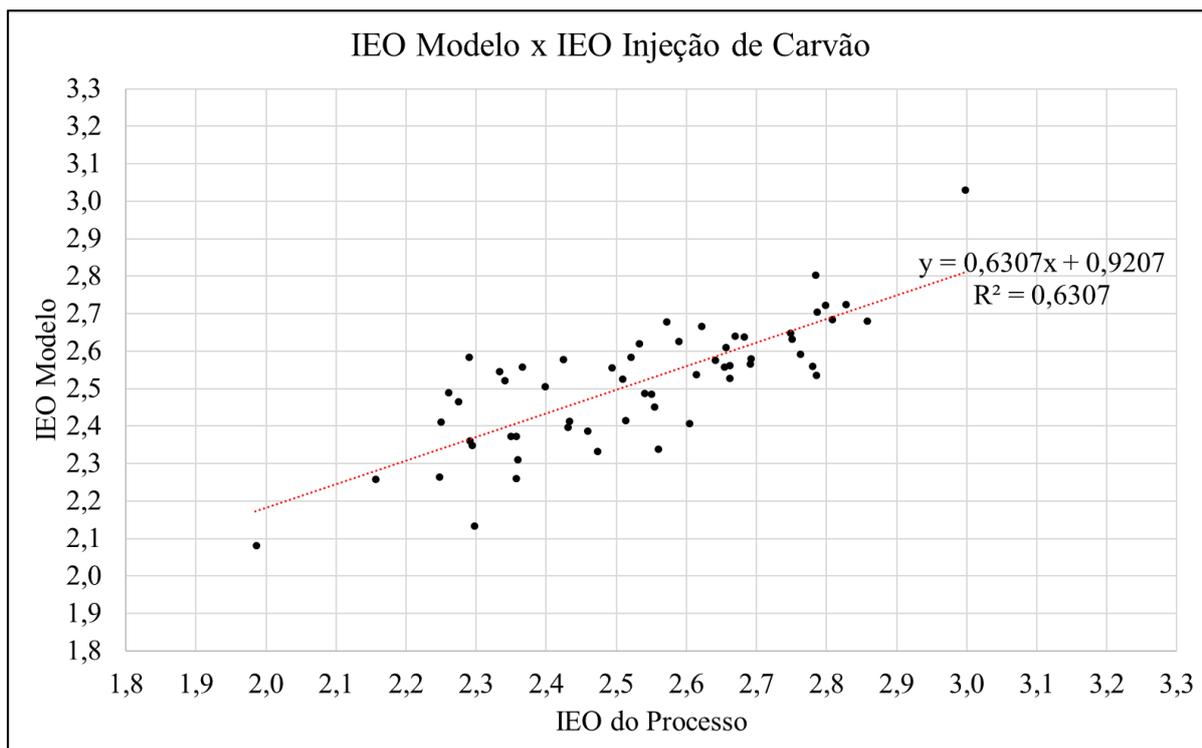


Figura 5.20 – Gráfico de dispersão do IEO dos dados amostrado versus o IEO do modelo com a linha de tendência linear (em vermelho) com R^2 de 0,631 para processo com injeção de carvão mineral.

A fim de verificar se há diferença entre as médias dos resultados do modelo e do IEO calculado, foi realizada a análise de variância (ANOVA) e Comparações Emparelhadas de Tukey, cujos resultados estão na Figura 5.21.

ANOVA com um fator: IEO Injeção de Carvão; IEO Modelo Injeção de Carvão

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa No mínimo uma média é diferente
Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator Níveis Valores
Fator 2 IEO Injeção de Carvão; IEO Modelo Injeção de Carvão

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	1	0,00586	0,005865	0,17	0,681
Erro	114	3,93261	0,034497		
Total	115	3,93848			

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
IEO Injeção de Carvão	58	2,5318	0,2057	(2,4835; 2,5801)
IEO Modelo Injeção de Carvão	58	2,5176	0,1634	(2,4693; 2,5659)

DesvPad Combinado = 0,185733

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%

Fator	N	Média	Agrupamento
IEO Injeção de Carvão	58	2,5318	A
IEO Modelo Injeção de Carvão	58	2,5176	A

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Testes Simultâneos de Tukey para as Diferenças de Médias

Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T Ajustado	Valor-P Ajustado
IEO Modelo I - IEO Injeção	-0,0142	0,0345	(-0,0825; 0,0541)	-0,41	0,681

Nível de confiança individual = 95,00%

Figura 5.21 - Análise de Variância – ANOVA para as médias de IEO do modelo e do IEO dos dados amostrados para processo com injeção de carvão mineral.

Nota-se que o Valor-p foi maior que α , indicando que as diferenças entre as médias não são estatisticamente significativas e nas Comparações Emparelhadas de Tukey, as médias compartilharam a letra A, indicando que não são significativamente diferentes. A análise de

resíduos para a análise de variância pode ser observada na Figura 5.22. Os resíduos tenderam a apresentar distribuição normal com média zero, corroborando para a validação da análise.

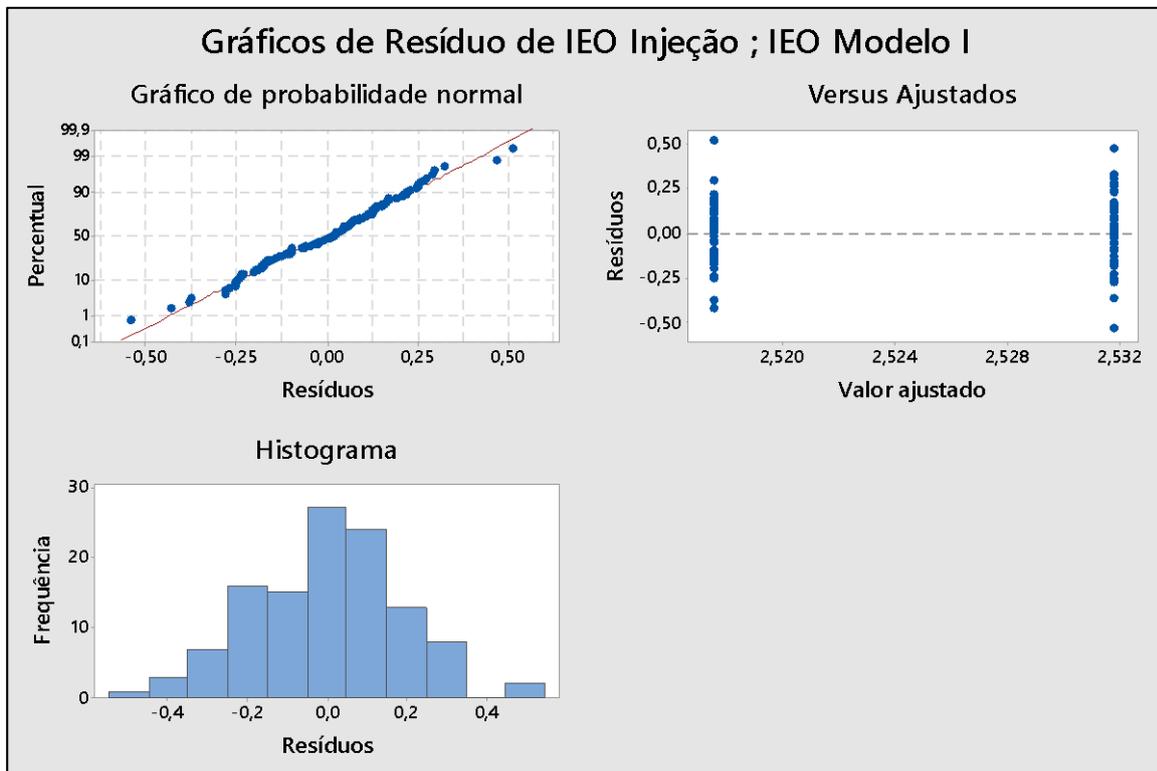


Figura 5.22 - Gráfico de resíduos da análise de variância das médias de IEO do modelo e do IEO dos dados amostrados para processo com injeção de carvão mineral.

Sendo assim, após todas essas análises estatísticas e baseado no conhecimento prático operacional de alto-forno, o modelo elaborado através da regressão múltipla pode ser aplicado no processo de otimização com significativa relevância a fim de se obter referências para otimização do IEO.

A Figura 5.23 contém o gráfico de efeitos principais, onde pode ser visto a relação do IEO com as variáveis predictoras a partir da inclinação das retas.

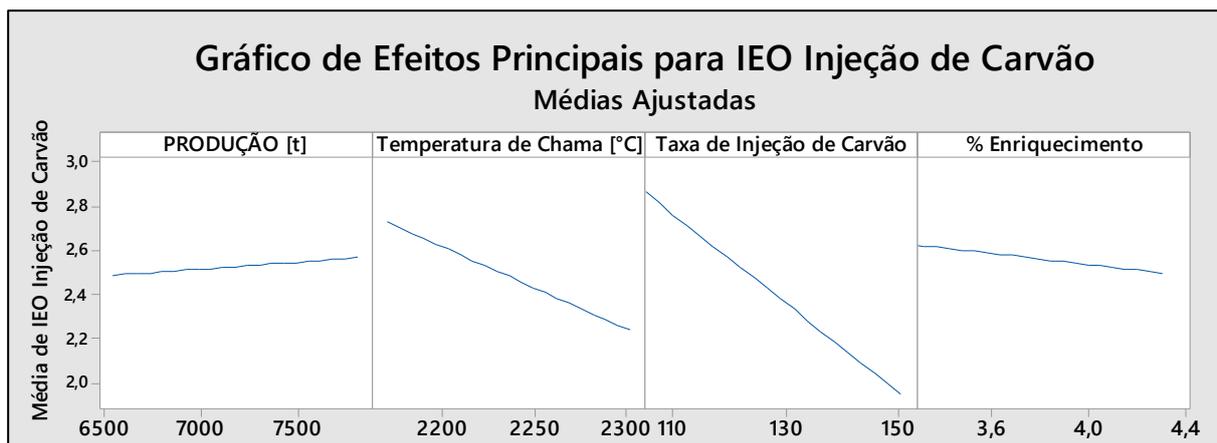


Figura 5.23 – Gráfico de Efeitos Principais das quatro variáveis preditoras no valor de IEO no modelo de regressão para processo com injeção de apenas carvão mineral.

Pode-se notar que a inclinação da reta indica se a variável em análise é diretamente (correlação positiva) ou inversamente (correlação negativa) proporcional ao valor de IEO obtido e quanto maior a inclinação, maior o impacto. Esses resultados são válidos apenas para as faixas de valores das variáveis utilizadas na construção do modelo, que justifica a metodologia para otimização que prevê a utilização de valores de variáveis dentro dos limites encontrados na amostra.

Analisando individualmente cada variável pode-se concluir:

- Quanto maior a produção de gusa maior tende a ser o IEO, entretanto, com pequeno impacto, indicando que o nível de produção não afeta significativamente o IEO.
- Quanto maior a Temperatura de Chama, menor o IEO, que pode ter relação com a queima do combustível e consumo do oxigênio.
- Quanto maior a taxa de injeção de carvão, menor o IEO, como esperado, uma vez que maior entrada de combustível tende a aumentar o consumo de oxigênio, diminuindo o excesso (analisando isoladamente).
- Quanto maior o enriquecimento, menor o IEO. Aparentemente é contraditório, entretanto, deve-se considerar que a elevação do percentual de oxigênio está relacionada a sua efetiva necessidade, e que o enriquecimento não está diretamente ligado ao excesso de oxigênio se este estiver sendo consumido pelo processo de combustão.

Para análise dos valores operacionais de IEO e busca de valores mínimos (otimização) de acordo com os parâmetros operacionais preditivos, foram estabelecidos 5 níveis de produção

média: 7000, 7200, 7400, 7600 e 7800t à Temperatura de Chama preestabelecida de 2150°C, conforme padrão operacional da empresa. As demais variáveis do modelo foram relacionadas a fim de se obter faixas operacionais para o comportamento do IEO.

A sequência de gráficos de contornos a seguir (Figura 5.24 à Figura 5.28) apresenta os diagramas auxiliares para otimização do Índice de Excesso de Oxigênio, onde para cada nível de produção, pode-se traçar pares das variáveis taxa de injeção de carvão e percentual de enriquecimento, a fim de se obter valores de IEO mais baixos e operacionalmente viáveis, buscando sempre a região com melhor otimização, como ilustrada pela Figura 4.1.

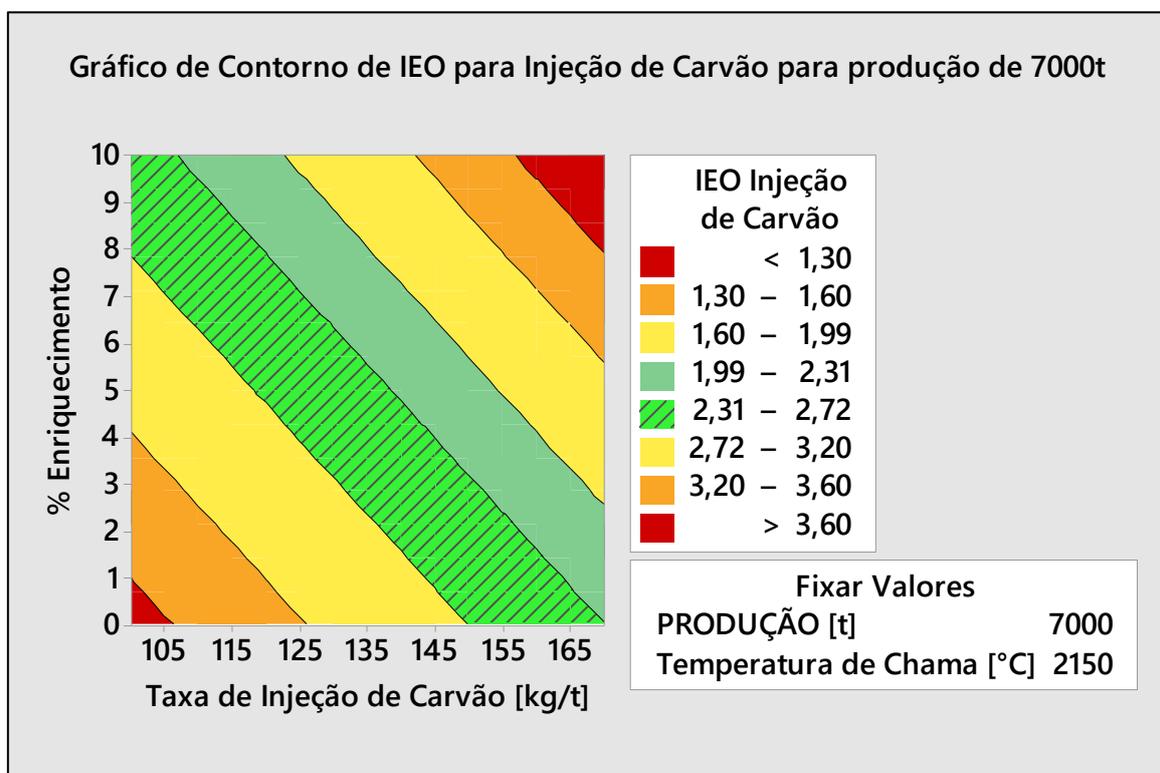


Figura 5.24 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7000t e temperatura de chama de 2150°C para processo com injeção de carvão mineral.

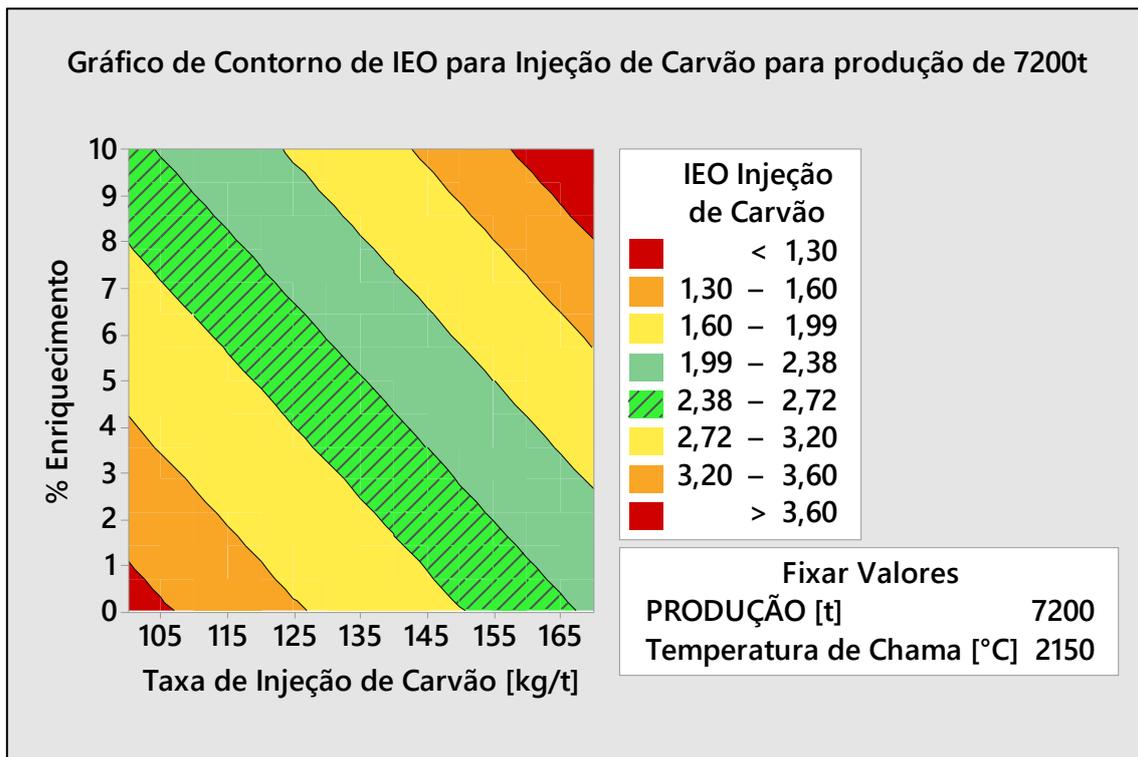


Figura 5.25 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7200t e temperatura de chama de 2150°C para processo com injeção de carvão mineral.

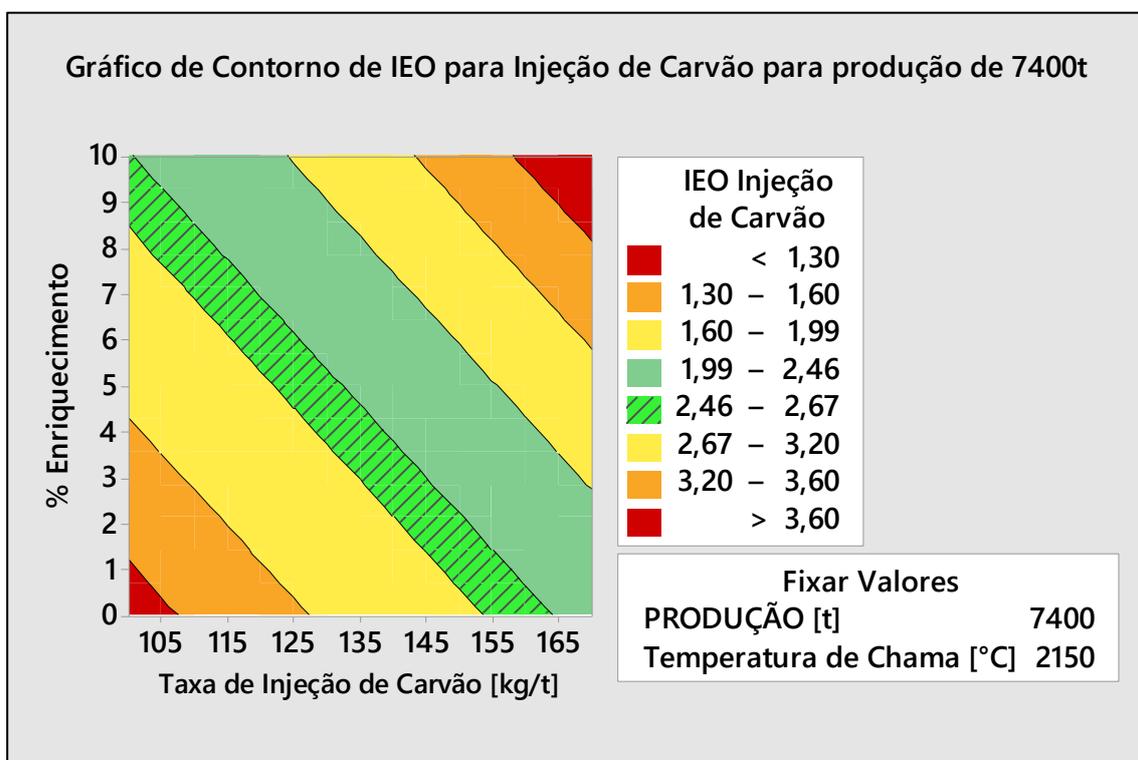


Figura 5.26 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7400t e temperatura de chama de 2150°C para processo com injeção de carvão mineral.

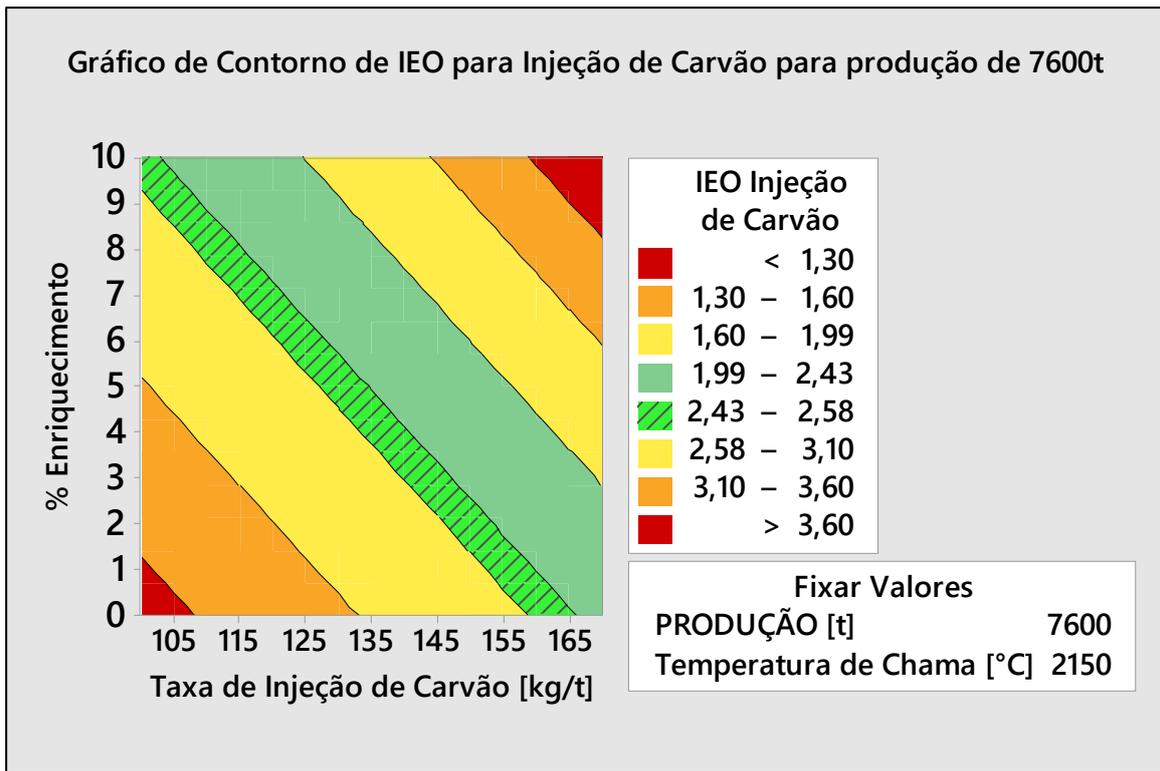


Figura 5.27 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7600t e temperatura de chama de 2150°C para processo com injeção de carvão mineral.

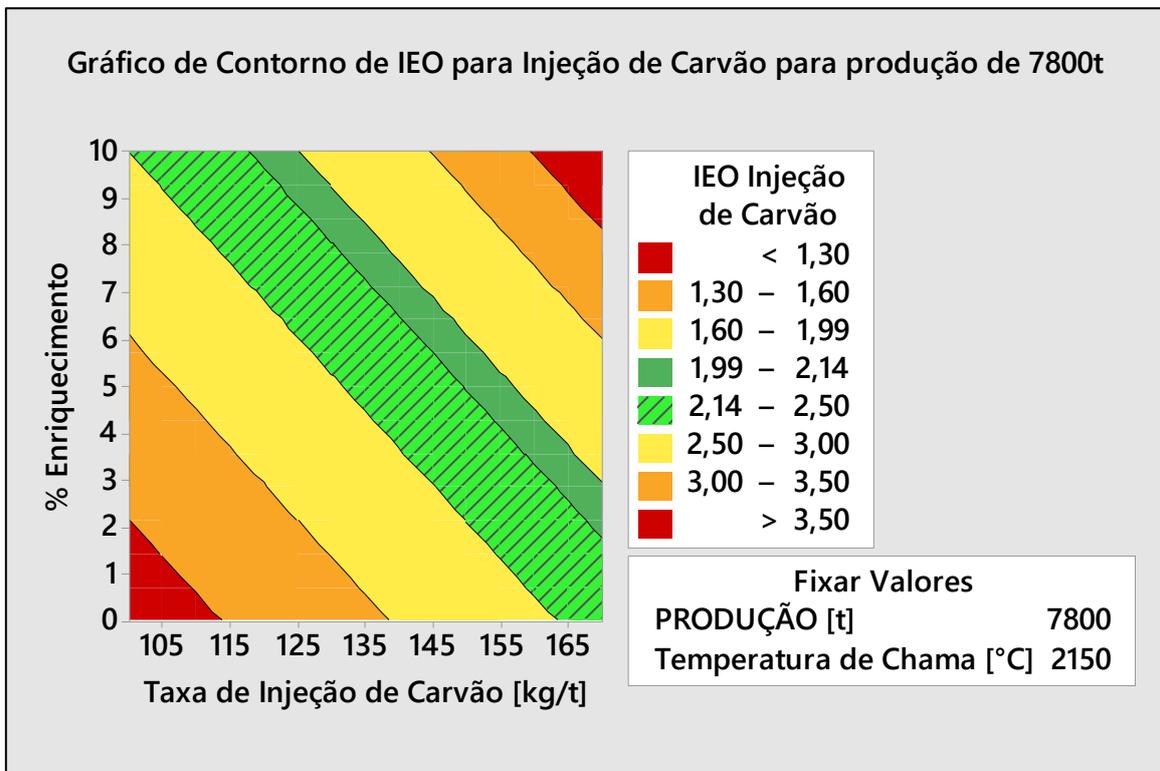


Figura 5.28 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7800t e temperatura de chama de 2150°C para processo com injeção de carvão mineral.

De modo geral, pode-se confirmar que a produção impacta pouco nos valores de IEO, como visto no gráfico de efeitos principais da Figura 5.23, onde o aumento da produção média fixa não altera significativamente o perfil do diagrama.

Em todos os diagramas, a faixa verde hachurada representa os valores de IEO obtidos no processo, de acordo com a produção média fixada, sendo assim, pares de variáveis (% de Enriquecimento e Taxa de Injeção de Carvão) que promovam pontos dentro dessa área estão dentro da normalidade do processo.

A faixa verde não hachurada representa um intervalo próximo à faixa de trabalho que apresenta menores valores de IEO, podendo ser considerada como a melhor alternativa durante o planejamento de produção no momento da determinação do percentual de enriquecimento e taxa de injeção de carvão mineral pois, de todos os dados considerados na análise, essa faixa está dentro do limite inferior dos valores de IEO obtidos, ou seja, o valor 1,99 para IEO foi o menor valor encontrado para ao processo com injeção de carvão mineral, podendo ser considerado o *benchmark* (melhor valor praticado) no período analisado.

As faixas amarelas, laranjas são regiões onde o IEO tende a se distanciar da faixa operacional típica para o Alto-Forno A, indicando tendência a anormalidade operacional.

As faixas vermelhas representam os extremos dos valores de IEO, onde há risco de “desperdício” de oxigênio ou que o excesso esteja pequeno, tangenciando o risco de insuficiência para eficiência da combustão do carvão mineral ou manutenção da temperatura de chama.

Os gráficos apresentados são interessantes pois conseguem associar através do IEO as variáveis Taxa de Injeção de Carvão e % de Enriquecimento, uma vez que estas, pelas análises realizadas, não apresentam colinearidade nem qualquer outra relação estatística quantificável.

Nota-se que a faixa verde, sugerida como alternativa para busca de menores valores de IEO compreende, de modo geral, valores entre 2,0 e 2,5. Para averiguar se valores de IEO dentro dessa faixa impactam significativamente na taxa de substituição e na temperatura do topo (parâmetros que foram excluídos como variáveis preditoras na reformulação do modelo) do

alto Forno A, os dados de taxa de substituição e temperatura do topo dos dias com IEO entre 2,0 e 2,5 foram comparados com os dados de todo o período.

O resultado do gráfico de intervalos para temperatura do topo encontra-se na Figura 5.29

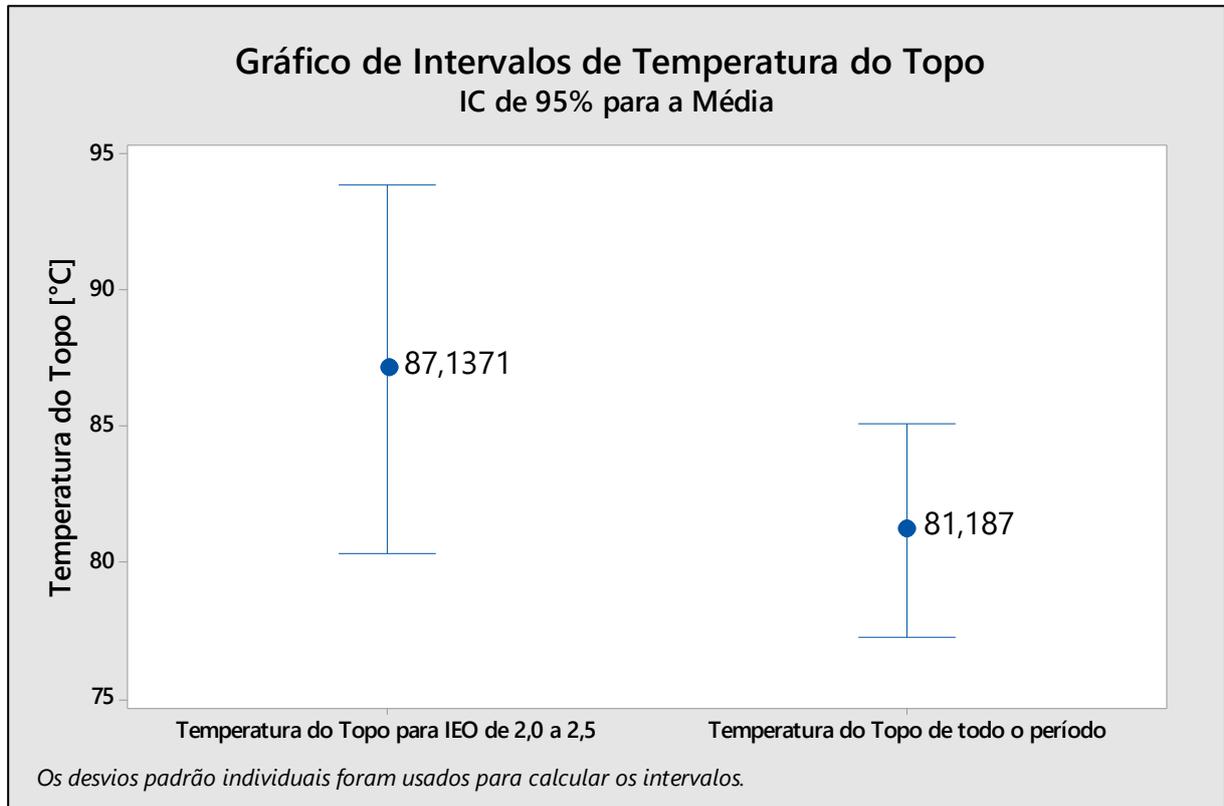


Figura 5.29 – Gráfico de Intervalos de temperatura de topo para a faixa de IEO entre 2,0 e 2,5 e de temperatura de topo de todo o período para processo com injeção de carvão mineral.

Observa-se que para a faixa de IEO entre 2,0 e 2,5 ocorreram temperatura de topo, em média, mais altas, entretanto com grande dispersão, não permitindo uma análise quantitativa efetiva, mas indicando que não há alterações técnicas negativas em termos de temperatura de topo com o IEO nessa faixa.

As temperaturas do topo do alto-forno expostas nesta pesquisa apresentaram-se menores que o padrão operacional interno da empresa em questão (que é 110°C) em decorrência de problemas técnicos presentes no período do estudo, certamente as temperaturas apresentadas para o topo são menores que a temperatura de orvalho. Apesar desse fato, como a análise realizada foi comparativa, estima-se que em estudos futuros as diferenças entre médias e intervalo de variação, guardadas as devidas proporções, podem ser semelhantes.

O resultado do gráfico de intervalos para taxa de substituição encontra-se na Figura 5.30.

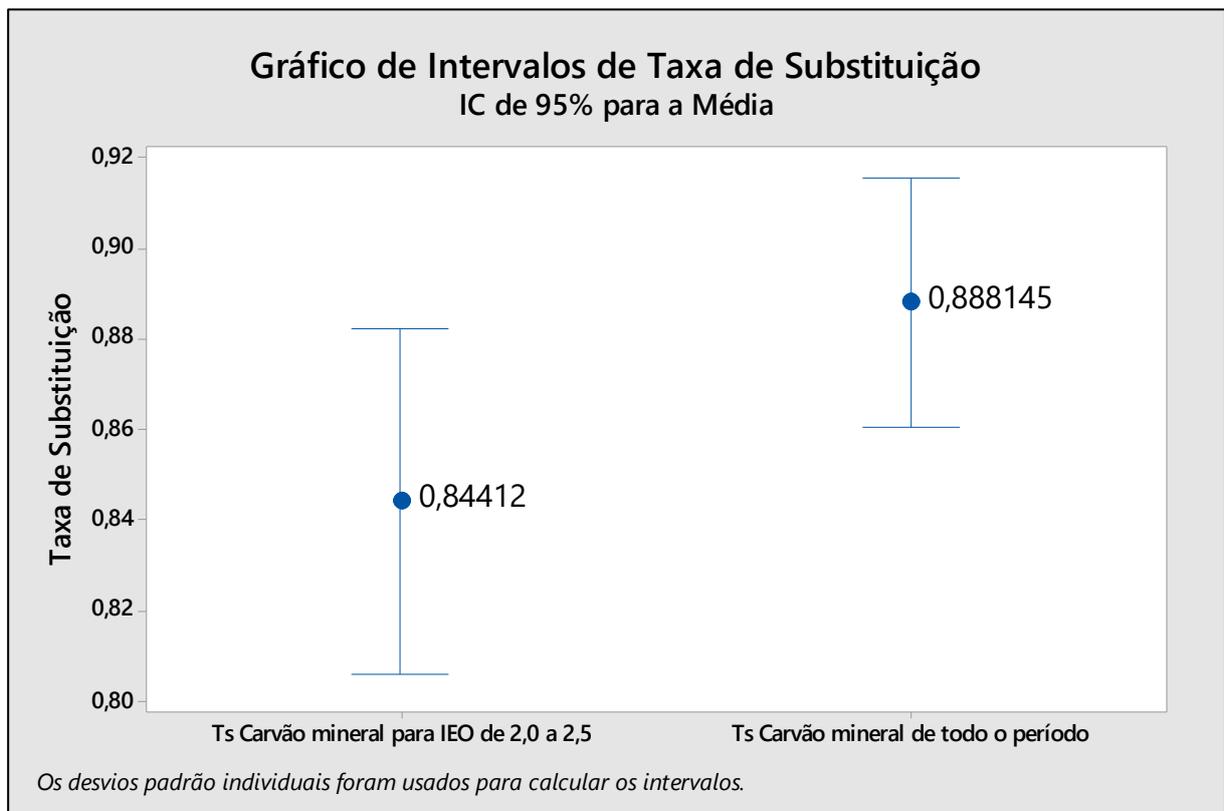


Figura 5.30 – Gráfico de Intervalos de taxa de substituição (Ts) para a faixa de IEO entre 2,0 e 2,5 e de taxa de substituição de todo o período para processo com injeção de carvão mineral.

Observa-se que para a faixa de IEO entre 2,0 e 2,5 ocorreram taxas de substituição com média 5,6% abaixo da média do período, entretanto, assim como a temperatura de topo, com grande dispersão, não permitindo uma análise quantitativa efetiva. Levando em consideração que menores valores de IEO geralmente estão relacionados a altas taxas de injeção e, como visto no Capítulo 3 e atestado na análise dos dados do Alto-Forno A, altas taxas de injeção tendem a promover menores taxas de substituição, tal efeito já era esperado, entretanto, dadas as proporções e dispersões, pode não ocasionar alterações técnicas significativamente negativas a ponto de inviabilizar a otimização do Índice de Excesso de Oxigênio.

5.5.2 Modelagem e otimização para processo de co-injeção

Assim como para o processo de injeção de carvão, realizou-se um estudo do comportamento do IEO em determinadas faixas de produção, a fim de que fosse delimitado intervalos para trabalho com co-injeção. Sendo assim, gerou-se o gráfico de intervalo da Figura 5.31.

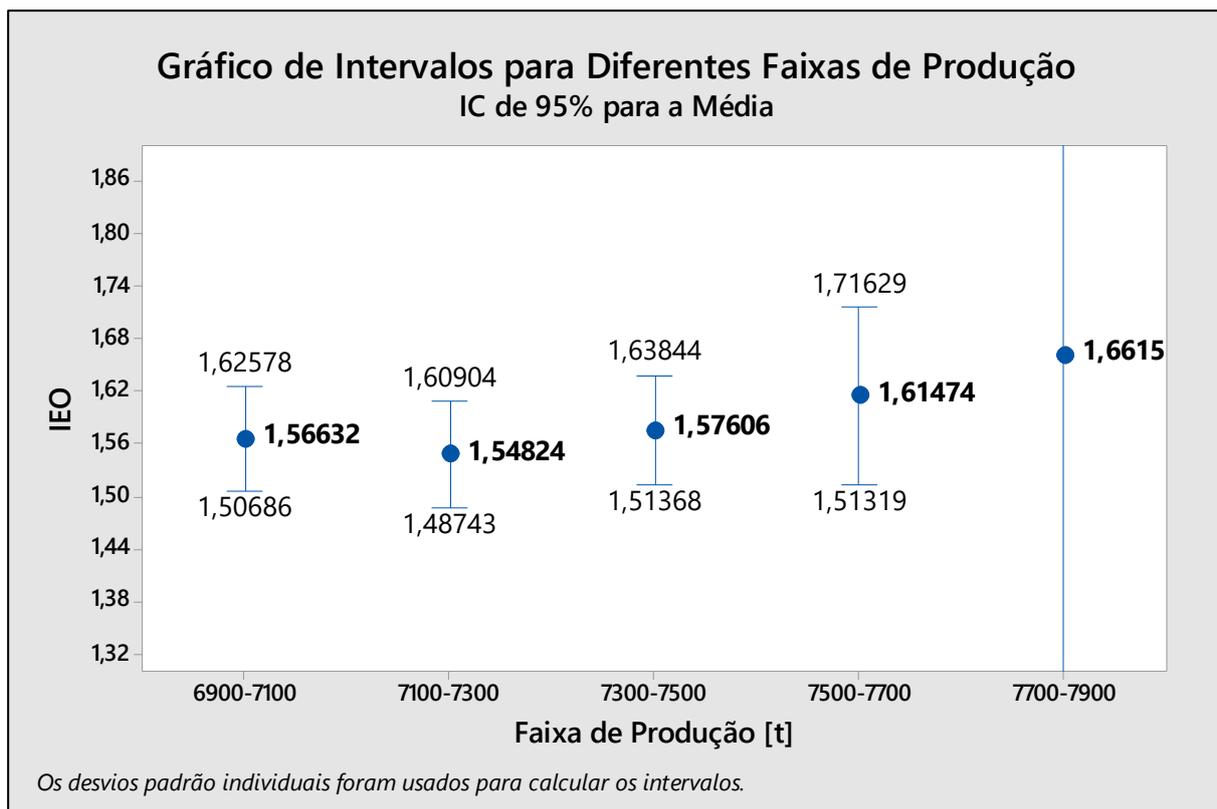


Figura 5.31 - Gráfico de intervalos de IEO para diferentes faixas de produção com processo de co-injeção.

O intervalo de IEO para a faixa de produção de 7700-7900t apresentou-se demasiadamente grande devido ao alto desvio padrão gerado por apenas dois dados pertencentes à essa faixa de produção, sendo assim, desconsiderou-se essa faixa de produção na construção dos gráficos de contornos que visam otimização desse parâmetro.

Agrupando as informações, obteve-se a Tabela V.4, onde tem-se os intervalos da variável IEO para cinco níveis de produção média.

Tabela V.4: Intervalo de valores de IEO para 4 níveis de produção média considerando o processo de co-injeção.

Produção Média [t]	7000	7200	7400	7600
Intervalo do IEO	1,51-1,62	1,49-1,61	1,51-1,64	1,51-1,72

Seguindo a metodologia, agora aplicada ao processo de co-injeção, obteve-se a regressão com sete preditores, conforme a Figura 5.32.

Análise de Regressão: IEO Co-injeção versus PRODUÇÃO [t]; Vazão de Sop; Temperatura ; Temperatura ; ...

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	7	0,502150	0,071736	15,73	0,000
PRODUÇÃO [t]	1	0,012382	0,012382	2,71	0,106
Vazão de Sopro [Nm3/min]	1	0,016636	0,016636	3,65	0,062
Temperatura de Chama [°C]	1	0,064751	0,064751	14,20	0,000
Temperatura do Topo [°C]	1	0,005189	0,005189	1,14	0,291
Taxa de Injeção de Carvão e Gás	1	0,078712	0,078712	17,26	0,000
TAXA DE SUSTITUIÇÃO CO-INJEÇÃO	1	0,004138	0,004138	0,91	0,345
% Enriquecimento	1	0,082309	0,082309	18,05	0,000
Erro	50	0,228065	0,004561		
Total	57	0,730215			

Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)
0,0675374	68,77%	64,39%	52,32%

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-1,27	1,17	-1,08	0,284	
PRODUÇÃO [t]	-0,000138	0,000084	-1,65	0,106	5,78
Vazão de Sopro [Nm3/min]	0,000300	0,000157	1,91	0,062	5,14
Temperatura de Chama [°C]	0,001845	0,000490	3,77	0,000	1,87
Temperatura do Topo [°C]	-0,001013	0,000949	-1,07	0,291	1,40
Taxa de Injeção de Carvão e Gás	-0,00682	0,00164	-4,15	0,000	2,30
TAXA DE SUSTITUIÇÃO CO-INJEÇÃO	-0,135	0,142	-0,95	0,345	2,00
% Enriquecimento	-0,0783	0,0184	-4,25	0,000	1,49

Equação de Regressão

IEO Co-injeção = -1,27 - 0,000138 PRODUÇÃO [t]
 + 0,000300 Vazão de Sopro [Nm3/min]
 + 0,001845 Temperatura de Chama [°C] -
 0,001013 Temperatura do Topo [°C]
 - 0,00682 Taxa de Injeção de Carvão e Gás [kg/t]-
 0,135 TAXA DE SUSTITUIÇÃO CO-INJEÇÃO- 0,0783 % Enriquecimento

Figura 5.32 – Regressão múltipla para predição do IEO com co-injeção com sete variáveis preditoras.

O Valor-P para a maioria das variáveis foi maior que o nível de significância, exceto para a Temperatura de Chama, Taxa de Injeção de Carvão e Gás Natural e o Percentual de Enriquecimento, indicando que, estatisticamente, essas são as principais variáveis preditoras do modelo. A Produção e a Vazão de Sopro são tecnicamente relevantes à análise do excesso de oxigênio, pois, como já discutido, são diretamente ligadas à entrada de oxigênio, entretanto, colineares, optando-se assim, por manter a Produção como variável preditiva no modelo.

Temperatura de topo e Taxa de Substituição, como pode ser visto na inclinação das retas na análise dos efeitos principais, através da Figura 5.33, assim como para injeção de somente carvão, apresentaram pouca influência estatística como preditoras do IEO.

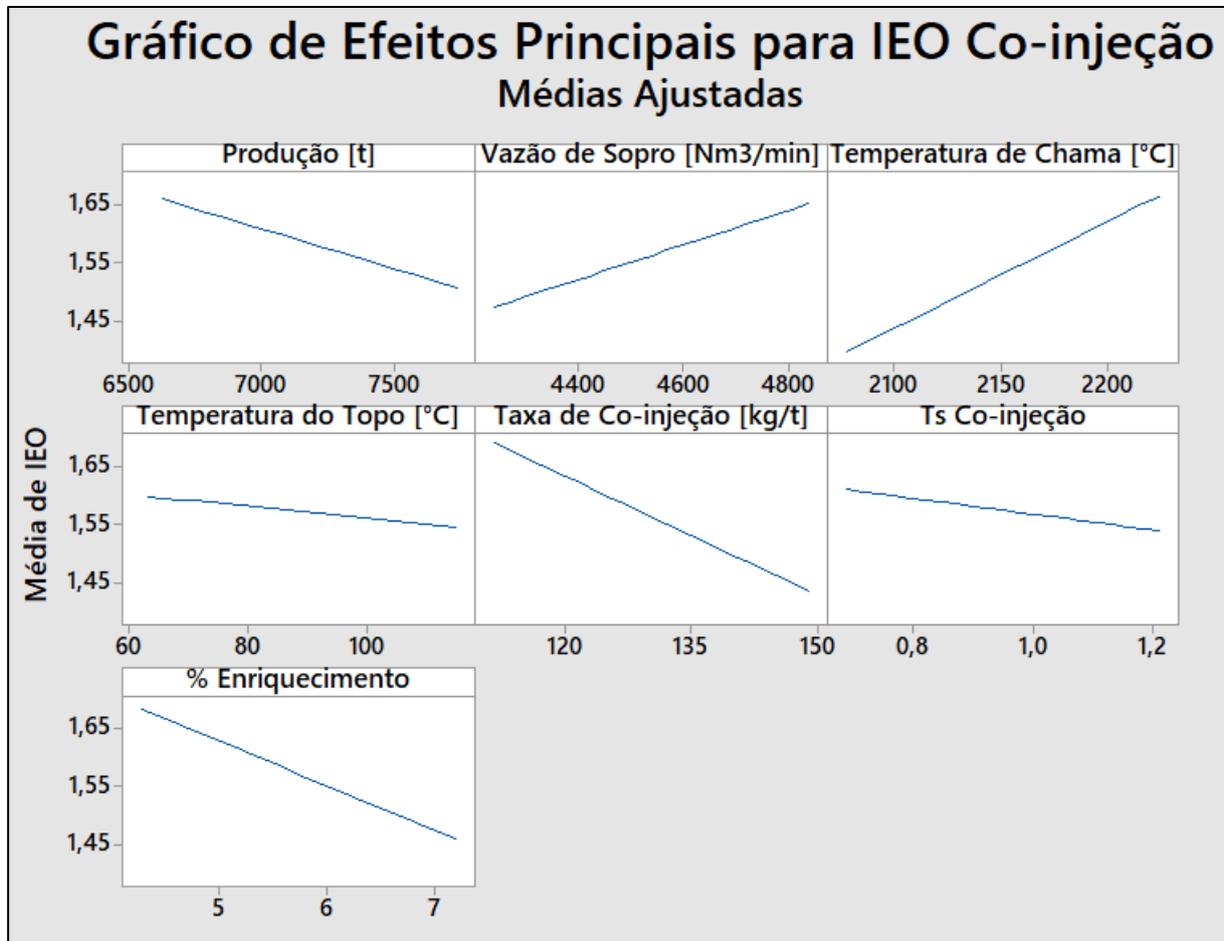


Figura 5.33 – Gráfico de Efeitos Principais das sete variáveis preditoras no valor de IEO no modelo de regressão para processo com co-injeção.

A colinearidade, que pode ser evidenciada tecnicamente e estatisticamente entre produção e vazão de sopros, também para o processo de co-injeção, onde maiores produções ocorrem, preponderantemente, com maiores vazões de sopros, como pode ser visto através da linha de tendência linear (em vermelho) com R^2 de e 0,685, coincidentemente idêntico ao processo de injeção de somente carvão, no gráfico de dispersão na Figura 5.34.

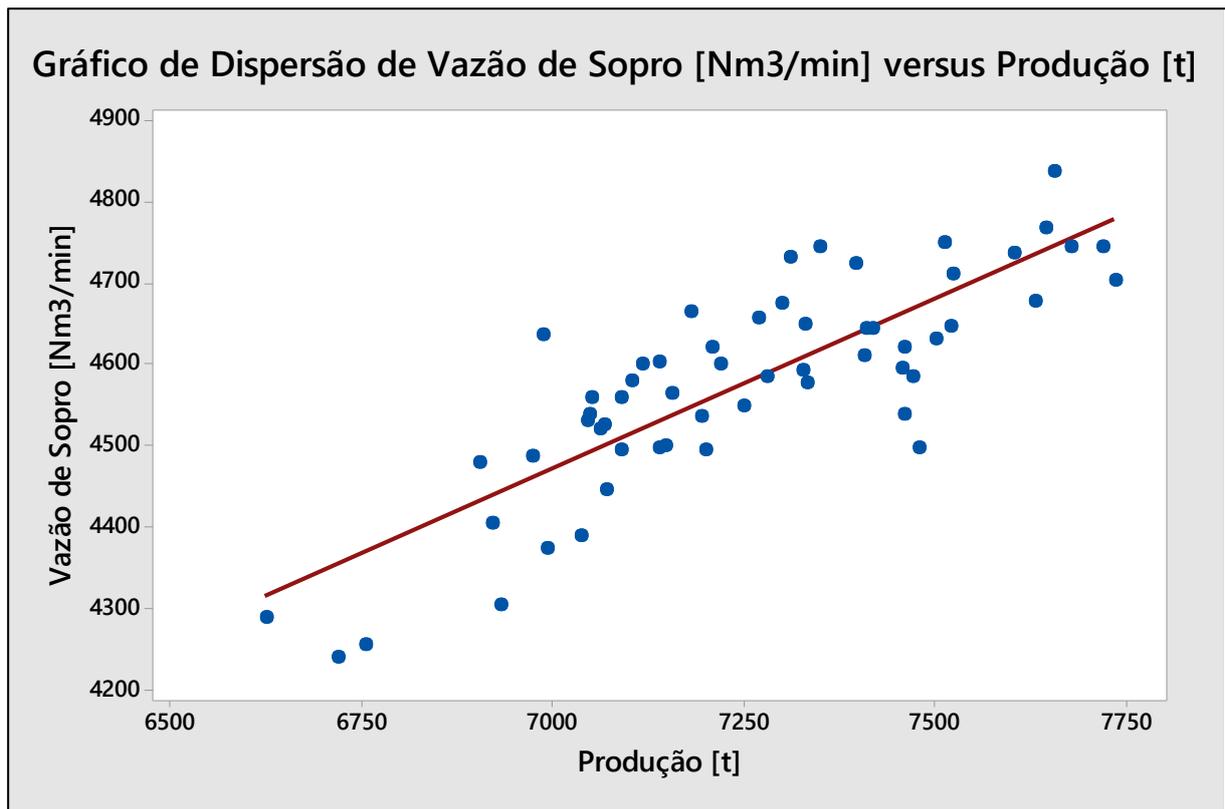


Figura 5.34 – Gráfico de dispersão da vazão de sopros versus produção no processo de co-injeção com a linha de tendência linear (em vermelho) com R^2 de 0,685

Sendo assim, mantendo a metodologia já elucidada no processo de injeção de apenas carvão mineral, o modelo definido para o IEO no processo de co-injeção pode ser visto na Figura 5.35.

Análise de Regressão: IEO Co-injeç versus Produção [t]; Temperatura ; Taxa de Co-i; ...

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Regressão	4	0,482421	0,120605	25,80	0,000
Produção [t]	1	0,000427	0,000427	0,09	0,764
Temperatura de Chama [°C]	1	0,060390	0,060390	12,92	0,001
Taxa de Co-injeção [kg/t]	1	0,089766	0,089766	19,20	0,000
% Enriquecimento	1	0,153645	0,153645	32,86	0,000
Erro	53	0,247794	0,004675		
Total	57	0,730215			

Sumário do Modelo

S	R2	R2 (aj)	R2 (pred)
0,0683766	66,07%	63,50%	53,25%

Coeficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	-0,77	1,12	-0,68	0,499	
Produção [t]	-0,000012	0,000039	-0,30	0,764	1,22
Temperatura de Chama [°C]	0,001727	0,000481	3,59	0,001	1,76
Taxa de Co-injeção [kg/t]	-0,00613	0,00140	-4,38	0,000	1,63
% Enriquecimento	-0,0950	0,0166	-5,73	0,000	1,18

Equação de Regressão

$$\text{IEO Co-injeção} = -0,77 - 0,000012 \text{ Produção [t]} + 0,001727 \text{ Temperatura de Chama [°C]} - 0,00613 \text{ Taxa de Co-injeção [kg/t]} - 0,0950 \text{ \% Enriquecimento}$$

Figura 5.35 – Regressão múltipla para predição do IEO com co-injeção com quatro variáveis preditoras.

A análise de resíduos para a regressão pode ser observada na Figura 5.36. Os resíduos tenderam a apresentar distribuição normal e aleatoriedade em relação ao tempo e valor calculado, com poucas discrepâncias.

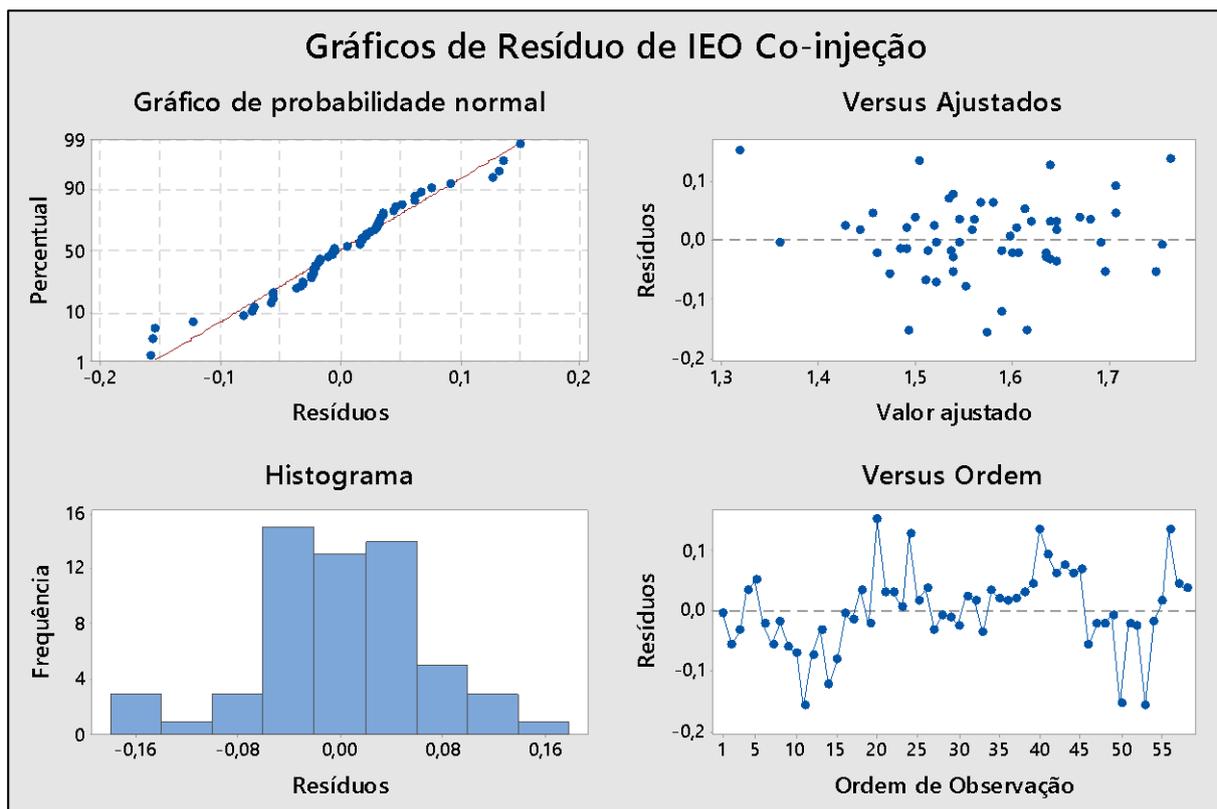


Figura 5.36 - Gráfico de resíduos da regressão múltipla para predição do IEO com co-injeção com quatro variáveis predictoras.

Analisando então os valores obtidos pelo modelo e os valores calculados com base na amostra, pode-se gerar o gráfico de dispersão da Figura 5.37, onde se pode ver a linha de tendência com o R^2 de 0,6607, conforme apresentado nos dados da regressão.

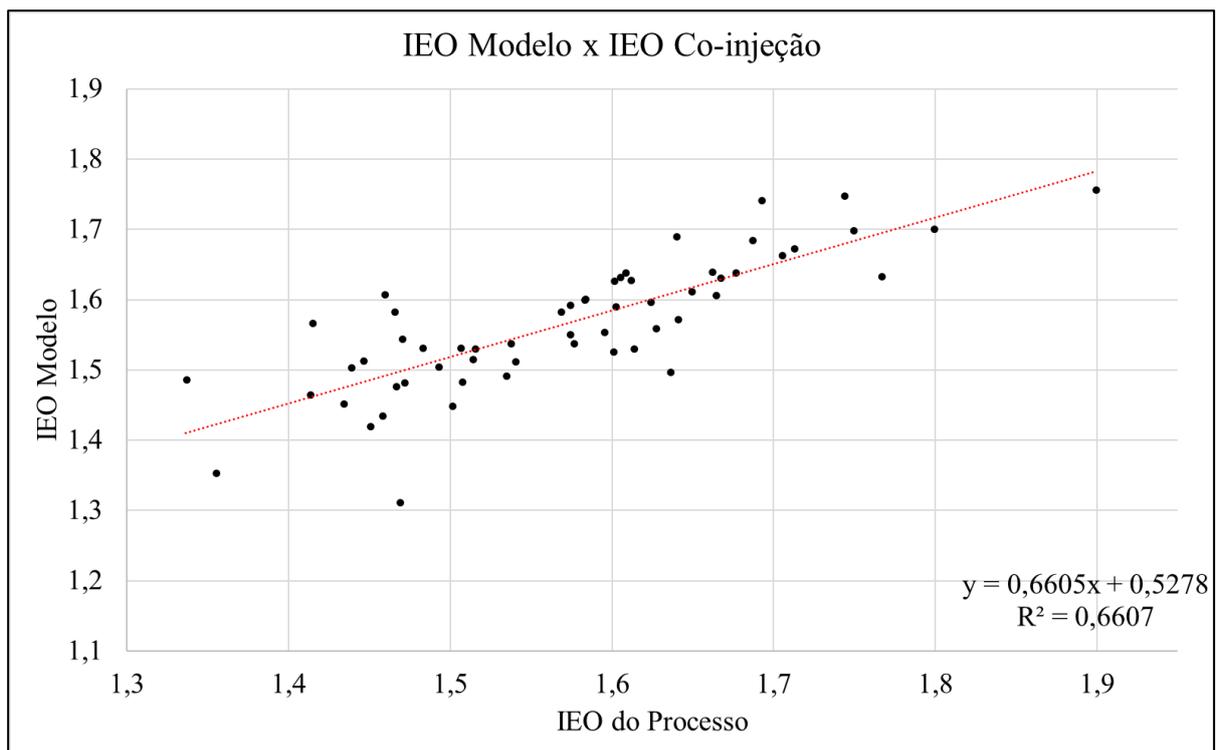


Figura 5.37 – Gráfico de dispersão do IEO dos dados amostrado versus o IEO do modelo para processo de co-injeção com a linha de tendência linear (em vermelho) com R^2 de 0,661%.

A fim de verificar se há diferença entre as médias dos resultados do modelo e do IEO calculado, foi realizada a análise de variância (ANOVA) e Comparações Emparelhadas de Tukey, cujos resultados estão na Figura 5.38.

ANOVA com um fator: IEO Modelo Co-Injeção; IEO Co-injeção

Método

Hipótese nula Todas as médias são iguais
Hipótese alternativa No mínimo uma média é diferente
Nível de significância $\alpha = 0,05$

Assumiu-se igualdade de variâncias para a análise

Informações dos Fatores

Fator Níveis Valores
Fator 2 IEO Modelo Co-Injeção; IEO Co-injeção

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Fator	1	0,00107	0,001071	0,10	0,752
Erro	114	1,21238	0,010635		
Total	115	1,21345			

Médias

Fator	N	Média	DesvPad	IC de 95%
IEO Modelo Co-Injeção	58	1,5665	0,0920	(1,5397; 1,5933)
IEO Co-injeção	58	1,5726	0,1132	(1,5458; 1,5994)

DesvPad Combinado = 0,103126

Comparações Emparelhadas de Tukey

Informações de Agrupamento Usando Método de Tukey e Confiança de 95%

Fator	N	Média	Agrupamento
IEO Co-injeção	58	1,5726	A
IEO Modelo Co-Injeção	58	1,5665	A

Médias que não compartilham uma letra são significativamente diferentes.

Testes Simultâneos de Tukey para as Diferenças de Médias

Diferença de Níveis	Diferença de Médias	EP da Diferença	IC de 95%	Valor-T	Valor-P Ajustado
IEO Co-injeç - IEO Modelo C	0,0061	0,0191	(-0,0319; 0,0440)	0,32	0,752

Nível de confiança individual = 95,00%

Figura 5.38 - Análise de Variância – ANOVA para as médias de IEO do modelo e do IEO dos dados amostrados para processo com co-injeção.

Notamos que o Valor-p foi maior que α , indicando que as diferenças entre as médias não são estatisticamente significativas e nas Comparações Emparelhadas de Tukey, as médias

compartilharam a letra A, indicando que não são significativamente diferentes. A análise de resíduos para a análise de variância pode ser observada na Figura 5.39. Os resíduos tenderam a apresentar distribuição normal com média próximo de zero, corroborando para a validação da análise.

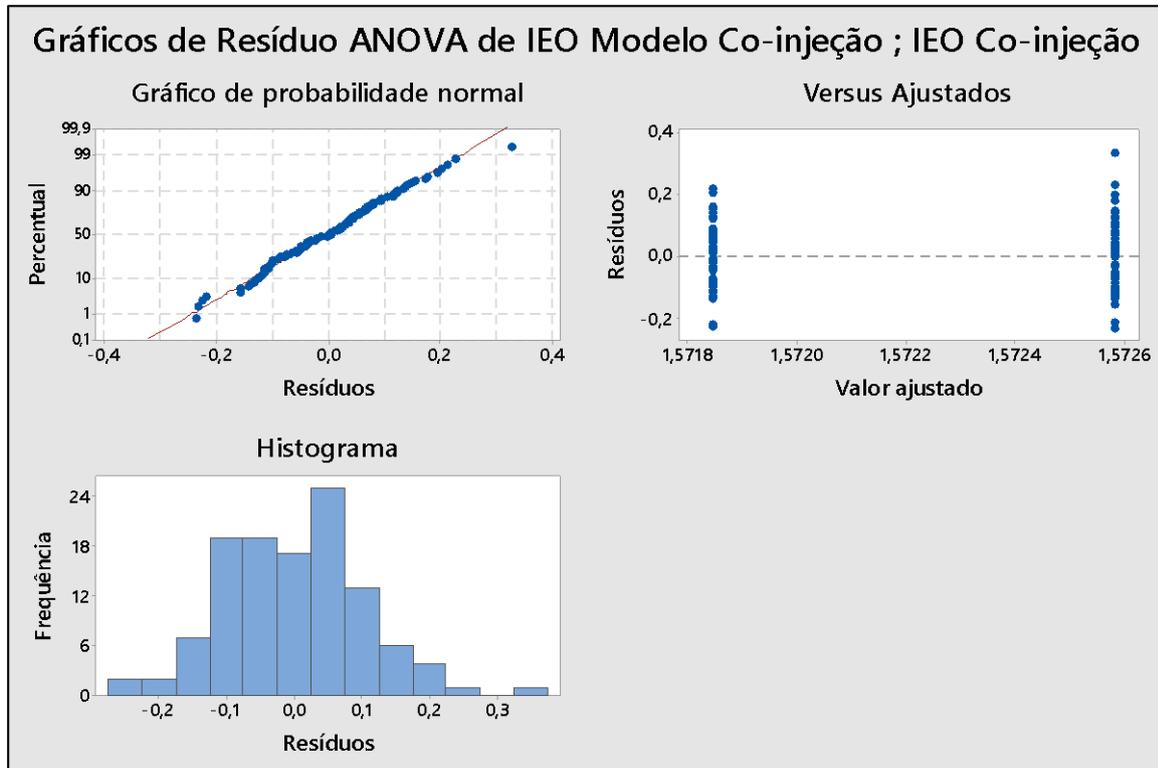


Figura 5.39 - Gráfico de resíduos da análise de variância das médias de IEO do modelo e do IEO dos dados amostrados para processo com co-injeção.

Assim como para o processo de injeção de apenas carvão, após as análises estatísticas e baseado no conhecimento prático operacional de alto-forno, o modelo elaborado para o processo de co-injeção através da regressão múltipla pode ser aplicado no processo de otimização com significativa relevância a fim de se obter referências para otimização do IEO.

A Figura 5.40 contém o gráfico de efeitos principais, onde pode ser visto a relação do IEO com as variáveis predictoras a partir da inclinação das retas.

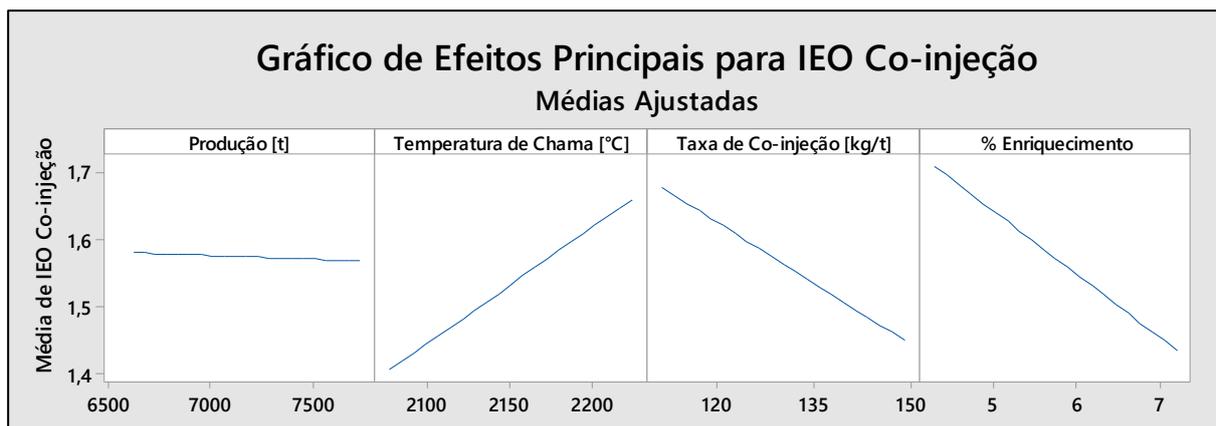


Figura 5.40 – Gráfico de Efeitos Principais das quatro variáveis preditoras no valor de IEO no modelo de regressão para processo com co-injeção.

Lembrando que, a inclinação da reta indica se a variável em análise é diretamente (correlação positiva) ou inversamente (correlação negativa) proporcional ao valor de IEO obtido e quanto maior a inclinação, maior o impacto. Esses resultados são válidos apenas para as faixas de valores das variáveis utilizadas na construção do modelo, que justifica a metodologia para otimização que prevê a utilização de valores de variáveis dentro dos limites encontrados na amostra.

Analisando individualmente cada variável pode-se concluir:

- Quanto maior a produção de gusa menor tende a ser o IEO, com impacto pequeno.
- Quanto maior a Temperatura de Chama, menor o IEO, que pode ter relação com a eficiência da queima dos combustíveis e consumo do oxigênio.
- Quanto maior a taxa de co-injeção, menor o IEO, como esperado, uma vez que maior entrada de combustível tende a aumentar o consumo de oxigênio, diminuindo o excesso (analisando isoladamente).
- Quanto maior o enriquecimento, menor o IEO, assim como para o processo com injeção de apenas carvão mineral.

Seguindo a mesma metodologia usada no processo de injeção de somente carvão, para determinação dos valores mínimos de IEO possíveis (otimização) de acordo com os parâmetros operacionais preditivos, foram estabelecidos 5 níveis de produção, 7000, 7200, 7400, 7600 e 7800t a Temperatura de Chama preestabelecida de 2150°C, conforme padrão

operacional da empresa. As demais variáveis do modelo foram relacionadas a fim de se obter faixas operacionais para o comportamento do IEO e possibilitar identificar o IEO mínimo. A sequência de gráficos a seguir (Figura 5.41 à Figura 5.44) apresenta os diagramas para otimização do Índice de Excesso de Oxigênio, onde para cada nível de produção, pode-se traçar pares das variáveis taxa de injeção de carvão e percentual de enriquecimento, a fim de se obter o IEO mínimo para produção com co-injeção.

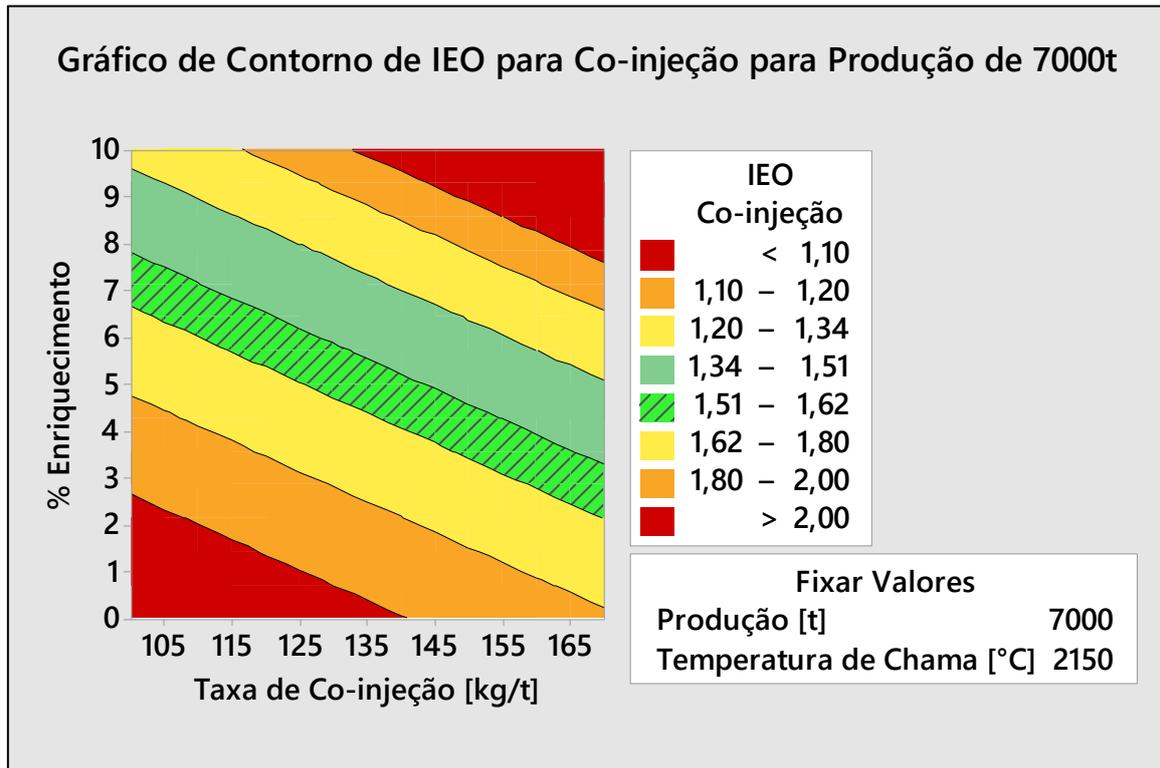


Figura 5.41 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7000t e temperatura de chama de 2150°C no processo com co-injeção.

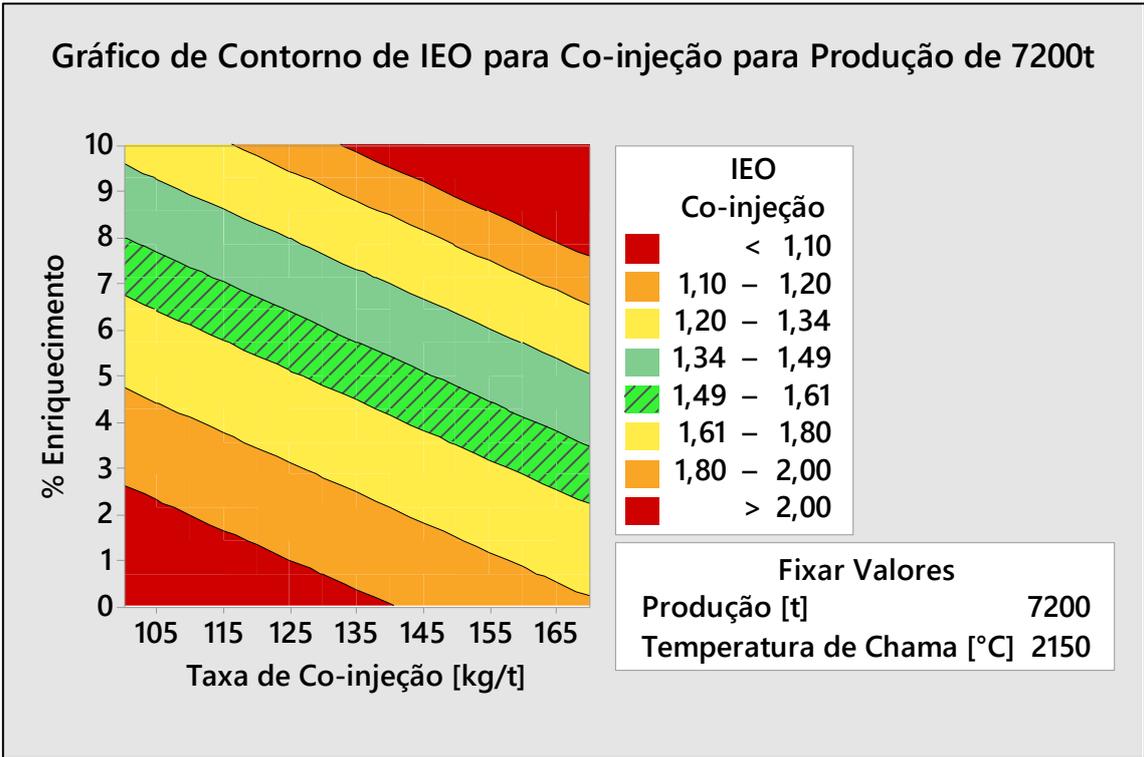


Figura 5.42 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7200t e temperatura de chama de 2150°C no processo com co-injeção.

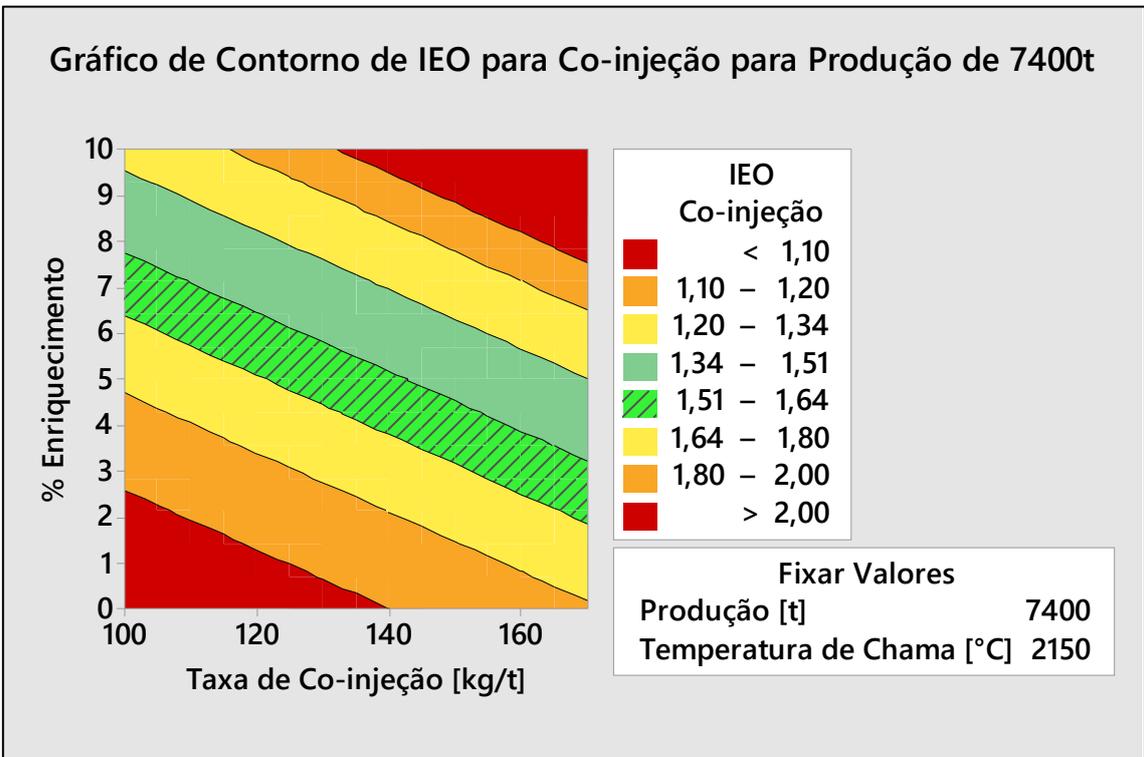


Figura 5.43 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7400t e temperatura de chama de 2150°C no processo com co-injeção.

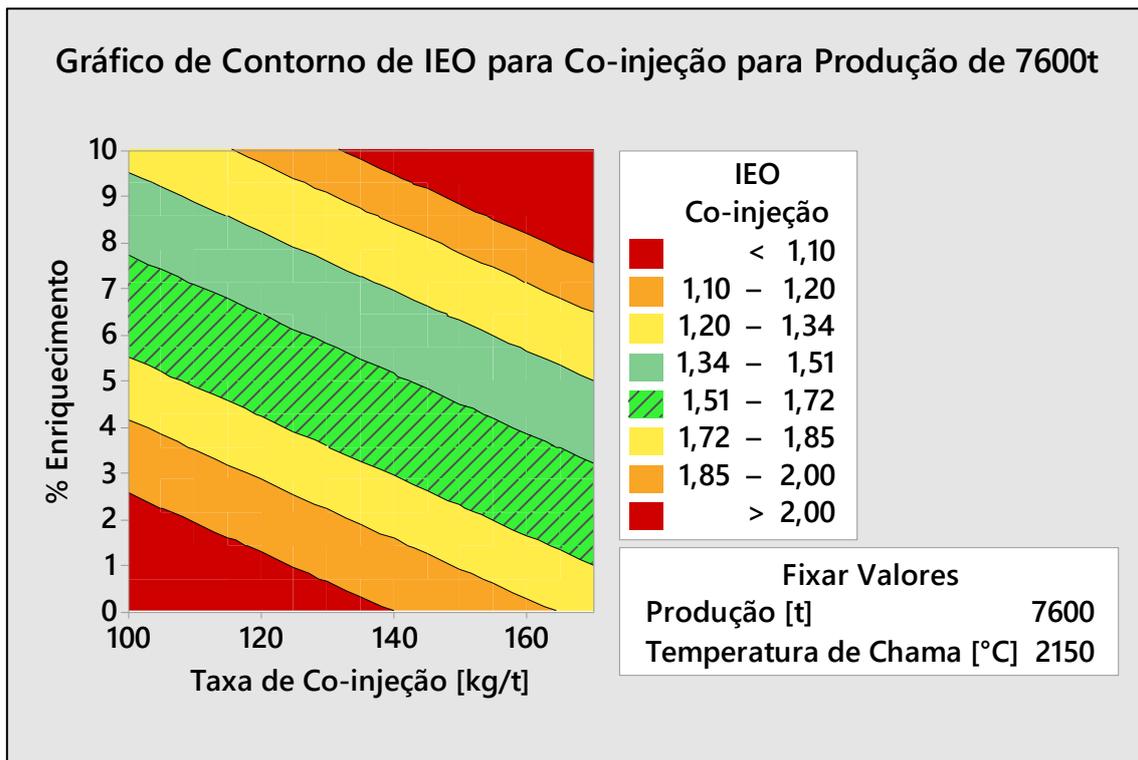


Figura 5.44 – Gráfico de contorno com faixas de valores de IEO para produção média de 7600t e temperatura de chama de 2150°C no processo com co-injeção.

Assim como para a injeção de carvão a produção impacta pouco nos valores de IEO, pois o aumento da produção média fixa não altera significativamente o perfil do diagrama.

Em todos os diagramas, a faixa verde hachurada representa os valores de IEO obtidos no processo, de acordo com a produção média fixada, sendo assim, pares de variáveis (% de Enriquecimento e Taxa de Co-injeção) que promovam pontos dentro dessa área estão dentro da normalidade do processo.

A faixa verde não hachurada representa um intervalo próximo à faixa de trabalho que apresenta menores valores de IEO, podendo ser considerada como alternativa durante o planejamento de produção no momento da determinação do percentual de enriquecimento e taxa de co-injeção, pois de todos os dados considerados na análise, esta está dentro do limite inferior dos valores de IEO obtidos, ou seja, o valor 1,34 para IEO foi o menor valor encontrado para ao processo de co-injeção.

As faixas amarelas, laranjas são regiões onde o IEO tende a se distanciar da faixa operacional típica para o Alto-Forno A com co-injeção, indicando tendência a anormalidade operacional.

As faixas vermelhas representam os extremos dos valores de IEO, onde há risco de “desperdício” de oxigênio ou que o excesso esteja pequeno, tangenciando o risco de insuficiência para eficiência da combustão ou manutenção da temperatura de chama.

A faixa verde, sugerida como alternativa para busca de menores valores de IEO compreende, de modo geral, valores entre 1,34 e 1,51. Para averiguar se valores de IEO dentro dessa faixa impactam significativamente na taxa de substituição e na temperatura do topo do Alto-Forno A, os dados de taxa de substituição e temperatura do topo dos dias com IEO entre essa faixa foram comparados com os de toda a amostra.

O resultado do gráfico de intervalos para temperatura do topo encontra-se na Figura 5.46.

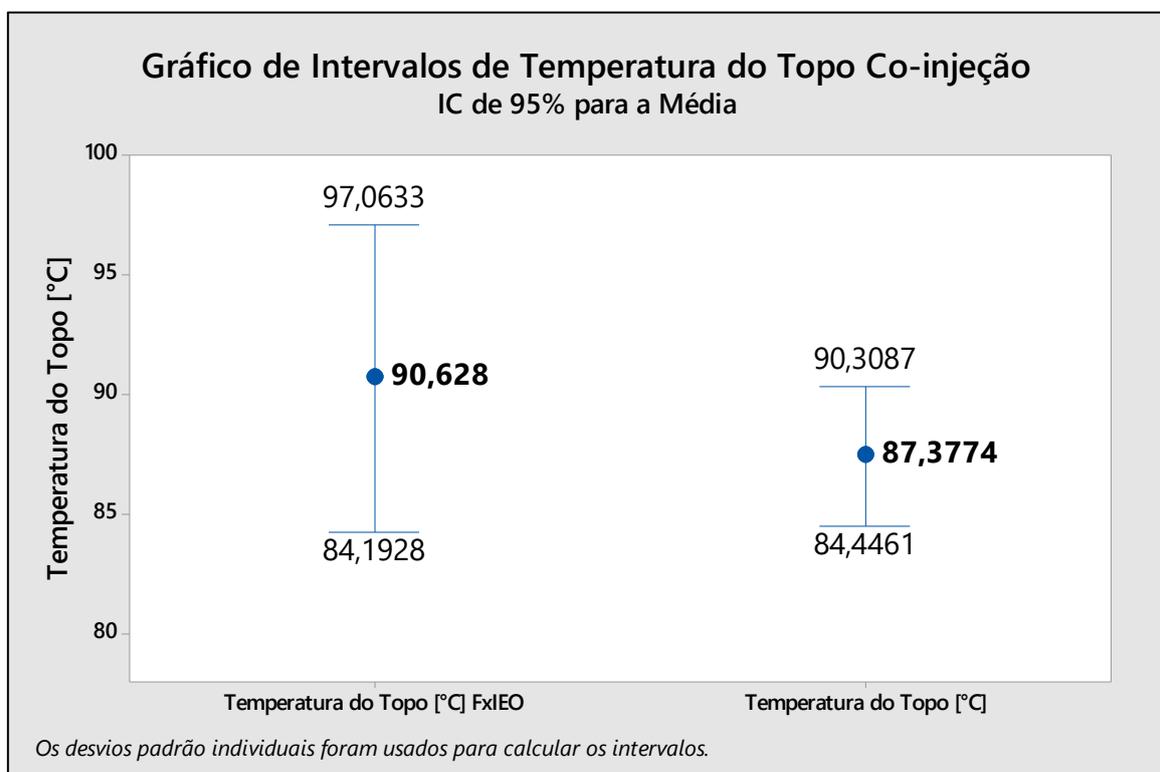


Figura 5.45 – Gráfico de Intervalos de temperatura de topo para a faixa de IEO entre 1,34 e 1,51 (Temperatura do Topo [°C] FxIEO) e de temperatura de topo de todo o período com co-injeção (Temperatura do Topo [°C]).

Observa-se que para a faixa de IEO entre 1,34, e 1,51 ocorreram temperatura de topo, em média, mais altas, entretanto com grande dispersão, não permitindo uma análise quantitativa

efetiva, mas indicando que não há alterações técnicas negativas em termos de temperatura de topo com o IEO nessa faixa.

O resultado do gráfico de intervalos para taxa de substituição encontra-se na Figura 5.47.

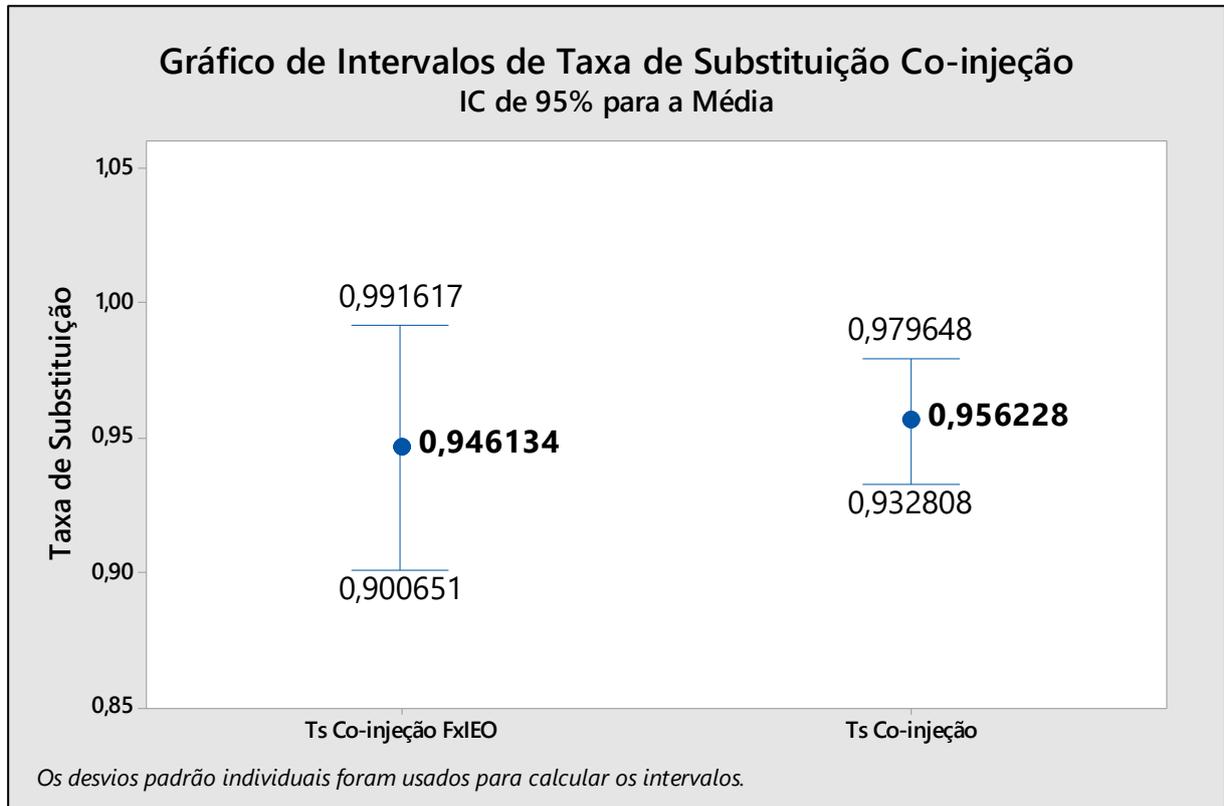


Figura 5.46 – Gráfico de Intervalos da taxa de substituição (Ts) para a faixa de IEO entre 1,34 e 1,51 (Ts Co-injeção FxIEO) e de taxa de substituição de todo o período com co-injeção (Ts Co-injeção).

Observa-se que para a faixa de IEO entre 1,34, e 1,51 ocorreram taxas de substituição com média muito próxima da média do período, entretanto, assim como a temperatura de topo, com grande dispersão, não permitindo uma análise quantitativa efetiva, entretanto, dadas as proporções e dispersões, pode não ocasionar alterações técnicas significativamente negativas a ponto de inviabilizar a otimização do Índice de Excesso de Oxigênio.

6. CONCLUSÕES

- Foi possível definir uma fórmula para taxa de substituição com os processos de injeção de carvão mineral e de co-injeção para o Alto-forno A, calcula-las e compara-las, sendo observada diferença entre elas, onde o processo com co-injeção apresentou taxa de substituição média de 0,96 e com injeção de apenas carvão mineral 0,89;
- Atestou-se qualitativamente que, assim como já relatado na literatura, maiores taxas de injeção de carvão mineral ou co-injeção de carvão mineral e gás natural promovem menores taxas de substituição no Alto-forno A. Equações com R^2 significativo para análises quantitativas não foram alcançadas;
- Foi obtido uma fórmula para cálculo do Índice de excesso de Oxigênio (IEO) para o Alto-Forno A aplicada tanto para o processo de injeção de carvão mineral quanto para co-injeção, onde foi evidenciado IEO para Injeção de Carvão com média de 2,53 e desvio padrão de 0,20 e IEO para Co-injeção com média de 1,57 e desvio padrão de 0,11;
- Foi possível construir um modelo matemático que estabelece uma relação entre Produção diária, Temperatura de Chama, Taxa de Injeção de Combustíveis e Percentual de Enriquecimento e o IEO, para ambas práticas de injeção, com aplicabilidade satisfatória servindo assim de ferramenta para melhor compreensão do processo e otimização. Não foi possível construir, pela metodologia proposta, um modelo que relacione o IEO diretamente com a taxa de substituição e a temperatura do topo do Alto-Forno A;
- Através do modelo construído, foi possível obter diagramas para identificar a faixa de valores do IEO típicos do processo, faixas de valores atípicos que podem indicar ineficiência operacional e uma faixa alternativa, onde, prezando por menor consumo de oxigênio de enriquecimento e maiores taxas de injeção, tem-se menores valores de IEO possíveis;
- Após análise, concluiu-se que a faixa de IEO sugerida como alternativa não causa significativos impactos deletérios na temperatura de chama, na temperatura do topo e na taxa de substituição;
- Pôde-se atestar através da pesquisa que, em operação normal, seja com injeção de carvão mineral ou co-injeção, o potencial de oxidação da chama apresenta-se suficiente para que ocorra as reações químicas de consumo dos combustíveis injetados;
- A partir da metodologia utilizada e resultados obtidos, pode-se obter valores para se ter como referência para o parâmetro IEO para o Alto-forno A, com isso, torna-se possível

utilizar-se também desse parâmetro para controle do processo e identificação de anormalidades no tocante a injeção de combustíveis auxiliares, além de promover o uso consciente e eficiente dos recursos disponíveis.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros, sugere-se:

- Análise da aplicabilidade da metodologia desenvolvida em outros altos-fornos;
- Desenvolvimento de um *software* que possibilite uma análise mais dinâmica dos diagramas auxiliares para otimização dos valores do IEO;
- O estudo de outras ferramentas de modelagem para determinação do IEO a partir de variáveis preditoras com melhor ajuste;
- Análise do impacto econômico da variação nos valores do IEO a fim de verificar se a otimização traz benefícios econômicos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 ANDRADE, D. H. B. Avaliação da Permeabilidade da Zona de Gotejamento de um Alto-forno com Foco na Análise dos Fenômenos de Retenção e Refluxo. 2017. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

2 FERREIRA, C. R.; MOREIRA, V. E. S.; ANDRADE, D. H. B. Desenvolvimento de um dispositivo para aferição da temperatura interna dos furos de corrida de alto-forno siderúrgico e definição de seus perfis térmicos. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA IFMG, 6, 2017, Betim. Anais eletrônicos... Betim: IFMG, 2017. Disponível em: <<http://sic.eadifmgbetim.com.br/ocs/index.php/SIC/2017/paper/viewFile/89/7>>. Acesso em: 24 maio. 2019.

3 VIEIRA, D. H.; Avaliação de Parâmetros Operacionais que Influenciam a Taxa de Injeção de Carvão Pulverizado em Altos-Fornos a Carvão Vegetal. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

4 GASPARINI, V. M. Desenvolvimento de um Modelo de Controle de Processo para Altos-Fornos a Coque Aplicado a Altos-Fornos Industriais. 2016. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

5 GUIMARÃES, V. A. Princípios Básicos de Fabricação de Gusa em Altos-Fornos, 81p. (Apostila), 2003.

6 CASTRO, J. A.; NOGAMI, H.; YAGI, J. Three-dimensional Multiphase Mathematical Modeling of the Blast Furnace Based on the Multifluid Model. ISIJ International, Japão, v. 42, n. 1, p. 44-52, 2002.

7 NOGUEIRA, A. C. Utilização do Composto $\text{SiO}_2(62-68)\text{-MgO+CaO}(29-39)$ nas Proteções Cerâmicas das Máquinas de Injeção de Massa nos Furos de Retirada de Ferro Gusa e Escória

do Interior dos Altos-Fornos. 2014. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Fundação Oswaldo Aranha, Volta Redonda, 2014.

8 GANDRA, B. F. Desenvolvimento de modelo matemático do fluxo de líquidos no cadinho do alto-forno. 2006. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

9 GEERDES, M.; CHAIGNEAU, R.; KURUNOV, I. Modern blast furnace ironmaking: An introduction. 3ª Ed. Amsterdam: Ios Press, 2015. p. 1 - 218.

10 CASTRO, L. F. A. Desenvolvimento de um modelo de controle de processo para altos-fornos a carvão vegetal. 2002. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

11 SILVA, K. G. Caracterização de Combustíveis Sólidos Pulverizados para Injeção em Alto-forno. 2018. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2018.

12 CALDERON, E. R. D. Superfície de Mínimo Consumo de Carbono do Processo de Redução em Altos-Fornos. 2016. 166 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

13 ASSIS, P. S. Injeção de Materiais Pulverizados em Altos-Fornos. 16ª ed. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia e de Materiais, 2009. P 1- 304.

14 BENNETT, P.; FUKUSHIMA, T. Impact of PCI Coal Quality on Blast Furnace Operations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COAL SCIENCE, nº 12, 2003, Anais... 2003. p. 1-11

15 SEXTON, D. C.; Coal agglomeration in blast furnace injection coals. 2019. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - School of Engineering Cardiff University, Cardiff, 2019.

- 16 LEOTAUD, V. R. (2018). Metallurgical coal prices starting to slip: Fitch. [Online]. Mining.com, Disponível em: <<http://www.mining.com/metallurgical-coalprices-starting-slip-fitch/>>. Acesso em: 15/05/2018.
- 17 CAVALIERE, P. Ironmaking and Steelmaking Processes: Greenhouse Emissions, Control and reduction. 1ª Edição. Suíça: Springer, 2016. 446.
- 18 COALTECH. (2005). Calculation of replacement ratio. [Online]. Coaltech, Disponível em: <<http://www.coaltech.com.au/LinkedDocuments/Replacement%20Ratio.pdf>> Acesso em: 16/05/2019.
- 19 CHEN C-H. Numerical analysis for the multi-phase flow of pulverized coal injection inside blast furnace tuyere. Applied Mathematical Modelling, 29, 871-884, Janeiro de 2005.
- 20 JAMPANI, M. Increased Use of Natural Gas in Blast Furnace Iron-Making. 2016. 156 f. Tese (Doutorado em Materials Science & Engineering) - Carnegie Mellon University, Pensilvânia, EUA, 2016.
- 21 JAMPANI, M. Increased Use of Natural Gas in Blast Furnace Ironmaking. In: The Iron & Steel Technology Conference and Exposition, 2014, Indianapolis, Ind. Anais... Indianapolis: Association for Iron & Steel Technology, 2015. 37 – 43.
- 22 SPIRIN, N.; *et all.* The use of combined-blast is the main way to improve the energy efficiency of blast furnaces. Energy Production and Management in the 21st Century, v. 1, p. 467 – 478, 2014.
- 23 GASPARINI V. M.; *et all.* Thermo-chemical model for blast furnace process control with the prediction of carbon consumption. Journal of Materials Research and Technology. v. 6, n. 3, p. 220-225, fevereiro 2017.
- 24 CASTRO, J. A.; NOGAMI, H.; YAGI, J. Numerical Investigation of Simultaneous Injection of Pulverized Coal and Natural Gas with Oxygen Enrichment to the Blast Furnace. ISIJ International, Japão, v. 42, n. 11, p. 1203-1211, 2002.

25 BABICH, A.; *et all.* Co-injection of Noncoking Coal and Natural Gas in Blast Furnace. ISIJ International, Japão, v. 39, n. 3, p. 229-238, 1999.

26 AGARWAL L. C.; *et all.* Coinjection of Natural Gas and Pulverized Coal in the Blast Furnace at High Levels: Field Test Results at USS/Gary. Ironmaking Conference Proceedings, Universidade de Michigan, v. 58, p. 105-134, 1999.

27 RIZZO, E. M. S. Processo de fabricação de ferro-gusa em alto-forno. ABM; São Paulo, 2009.

28 CAVALIERO, C. K. N.; JANNUZZI, G. M. A Injeção de Combustível Auxiliar em Alto-Forno como Medida de Redução das Emissões de CO₂ do Segmento Siderúrgico Nacional: Estudo de Casos na ACESITA E COSIPA. In: SEMINÁRIO DE ENERGIA, XXI SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, n. 21, 1999, Vitória. Anais... Vitória: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1999.

29 MAKI, A.; SAKAI, A.; TAKAGAKI, N. et alii – High rate coal injection of 218kg/tHM at Fukuyama nº4 Blast Furnace. ISIJ International, Japão, v. 36, n. 6, p. 650-657, 1996.

30 FERNANDES, M. V. Efeito do Tipo de Carvão Injetado nas Ventaneiras do Alto-Forno no Consumo de Combustíveis (Fuel-Rate). 2007. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte, 2007.

31 YOSHIDA, Y.; *et all.* High coal injection rate operation in Kobe n. 3 BF. In: IRONMAKING CONFERENCE, 50, Washington, p. 517-522, 1991

32 MATOS, U. F.; *et all.* Co-injeção de gás natural e carvão em altos-fornos. In: 44º SEMINÁRIO DE REDUÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO E MATÉRIAS-PRIMAS, n. 44, 2014, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: Iron Making and Mineral Technology, 2014.

33 SEMYONOV N.N. Chain Reactions. São Petersburgo. Goshimizdat, 1934. 256.

34 KAZANTSEV, E. I. Industrial Furnaces. Moscou. Metallurgia, 1975. 368.

35 SIQUEIRA, E. R. L. Simulação de gás natural injetado pelas ventaneiras de alto forno. 2014. 90 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2014.

36 D'ABREU, J.C. Estudo Setorial da Siderurgia: Indicadores da Siderurgia Brasileira; Contextualização Internacional. Editora Lucky, 2009.

37 D'ABREU, J. C. Siderurgia: Fundamentos e Tecnologia. Editora PUC-Rio, 2012.

38 TURNS, S. R. An introduction to combustion: concepts and applications, WCB/McGraw-Hill, 2000. Volume 1.

9. ANEXOS

Anexo I

Cálculos referentes à Taxa de Substituição.

Taxa de substituição

$$= \frac{\text{Coke rate do período base corrigida à umidade} \left[\frac{kg}{t} \right] - \text{Coke rate real corrigido} \left[\frac{kg}{t} \right]}{\text{Taxa de injeção de carvão pulverizado} \left[\frac{kg}{t} \right] \times \frac{100 - \text{Umidade do carvão pulverizado} [\%]}{100} + \text{Taxa de injeção de gás natural} \left[\frac{kg}{t} \right]}$$

Coke rate do período base corrigida à umidade $\left[\frac{kg}{t} \right]$

$$= \frac{\text{Coke rate do período base} \left[\frac{kg}{t} \right] \times \text{Percentual de Small coke na carga} [\%]}{100} \times \frac{100 - \text{umidade do small coke} [\%]}{100 - \text{umidade do small coke} [\%]} +$$

$$+ \text{Coke rate do período base} \left[\frac{kg}{t} \right] \times \frac{100 - \text{Percentual de Small coke na carga} [\%]}{100} \times \frac{100 - \text{umidade do coque via laboratório} [\%]}{100 - \text{umidade do coque via Kay Ray} [\%]}$$

Coke rate real corrigido $\left[\frac{kg}{t} \right]$

$$= \text{coke rate atual corrigida à umidade} \left[\frac{kg}{t} \right] + \left(\text{Umidade do ar soprado do período base} \left[\frac{g}{Nm^3} \right] - \text{Umidade do ar soprado do período atual} \left[\frac{g}{Nm^3} \right] \right) \times \text{Fator de correção de umidade do ar soprado} \left[\frac{kg}{t} \right] +$$

$$\left(\text{Temperatura de sopro atual} [^{\circ}C] - \text{temperatura de sopro do período base} [^{\circ}C] \right) \times \text{Fator de correção da temperatura de sopro} \left[\frac{kg}{t} \right] +$$

$$\left(\text{Produtividade do período base} \left[\frac{t}{dia.m^3} \right] - \right.$$

$$\left. \text{Produtividade do período atual} \left[\frac{t}{dia.m^3} \right] \right) \times \text{Fator de correção da produtividade} \left[\frac{kg}{t} \right] +$$

$$\left(\text{percentual de silício no gusa no período base} - \right.$$

$$\left. \text{percentual de silício no gusa no período atual} \right) \times \text{fator de correção do percentual de silício no gusa} \left[\frac{kg}{t} \right] +$$

$$\left(\text{percentual de cinzas no coque no período base} - \right.$$

$$\left. \text{percentual de cinzas no coque no período atual} \right) \times \text{fator de correção do percentual de cinzas no coque} \left[\frac{kg}{t} \right] +$$

$$\left(\text{Temperatura do gusa no período base} [^{\circ}C] - \right.$$

$$\left. \text{Temperatura do gusa no período atual} [^{\circ}C] \right) \times \text{fator de correção da temperatura do gusa} \left[\frac{kg}{t} \right] +$$

$$\left(\text{Slag Rate do período base} \left[\frac{kg}{t} \right] - \text{slag rate do período atual} \left[\frac{kg}{t} \right] \right) \times \text{fator de correção do slag rate} [-] +$$

$$\left(\text{percentual de minério na carga no período base} - \right.$$

$$\left. \text{percentual de minério na carga no período atual} \right) \times \text{fator de correção do percentual de minério na carga} [-]$$

$$\begin{aligned}
 \text{Coke rate atual corrigida à umidade} \left[\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right] &= \\
 &= \frac{\text{Coke rate do período atual} \left[\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right] \times \text{Percentual de Small coke na carga} [\%]}{100} \times \frac{100 - \text{umidade do small coke} [\%]}{100 - \text{umidade do small coke} [\%] + 2} \\
 &+ \text{Coke rate do período atual} \left[\frac{\text{kg}}{\text{t}} \right] \times \frac{100 - \text{Percentual de Small coke na carga} [\%]}{100} \times \frac{100 - \text{umidade do coque via laboratório} [\%]}{100 - \text{umidade do coque via Kay Ray} [\%]}
 \end{aligned}$$