

JOSÉ GERALDO PLACEDINO MARTINS

**MATRIZ ENERGÉTICA DO ALTO FORNO N° 2 DA COSIPA -
COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA**

ESP/SO
2008
M366m

São Paulo
2008

JOSÉ GERALDO PLACEDINO MARTINS

**MATRIZ ENERGÉTICA DO ALTO FORNO N° 2 DA COSIPA -
COMPANHIA SIDERÚRGICA PAULISTA**

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como trabalho de conclusão do
Curso de Especialização em
Siderurgia

Orientador:
Prof. Dr. José Deodoro Trani Capocchi

**São Paulo
2008**

AGRADECIMENTOS

Quero inicialmente agradecer ao Gerente da Unidade Técnica da Área de Redução, da COSIPA, o engenheiro Eduardo Maurell Lobo Pereira, por me ter dado a oportunidade de participar do Curso de Especialização em Siderurgia, oportunidade esta fruto da preocupação da Direção da COSIPA - Companhia Siderúrgica Paulista., em manter seus funcionários atualizados em novas técnicas desenvolvidas pela ciência e preparados para a competitividade do mercado.

Quero agradecer ao Professor e Orientador desse trabalho Dr. José Deodoro Trani Capocchi pela dedicação, disponibilidade e imensurável boa vontade em nos ensinar e motivar.

Aos professores que participaram desse curso pela dedicação, comprometimento e preocupações em nos mantermos sempre atualizados com as tecnologias mais recentes.

Aos Colegas de Classe pelo compartilhamento de conhecimentos e experiências.

Agradecimentos também a todos aqueles que colaboraram direta ou indiretamente na execução desse trabalho.

RESUMO

Para otimizar custos e tornar a empresa mais competitiva é necessário, além de acompanhar o custo de fabricação, ter percepção e ser pró-ativo nas oportunidades de reduções de custo do produto e na implantação de melhorias no processo. Com esse objetivo desenvolveu-se um Sistema de Avaliação de Custo que permite simular o efeito de alterações em variáveis operacionais, preços das matérias primas e utilidades no custo final de produção.

Tal sistema foi aplicado ao alto forno nº2 da COSIPA de modo a avaliar o efeito das alterações nos preços e quantidades consumidas de combustíveis sobre aspectos técnicos, econômicos e operacionais do alto forno.

Palavras-Chave: Matriz Energética. Alto Forno.

ABSTRACT

In order to optimize cost and to improve the competitiveness of the steel industry it is necessary not only to control the production cost during the process but also, to have perception and to be pro-active concerning the opportunity of reducing cost and implement betterment in the process. For such objective a Cost Evaluation System was developed to simulate the effect at change operation variable, raw materials and utility in the final production cost.

The System was applied at COSIPA blast furnace n° 2 to appraise the effect at price, fuel consume about technical, economic and operation blast furnace aspect.

Key words: Energy matrix. Blast furnace.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	13
1. INTRODUÇÃO	16
2. OBJETIVO	18
3. JUSTIFICATIVA	18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1. Considerações iniciais	19
4.2. Injeções Auxiliares	25
4.3. Balanço de Energia	31
5. ANÁLISE DOS DADOS OPERACIONAIS DA USINA	46
5.1. Apresentação e análise dos dados operacionais do alto forno nº2	46
5.2. Sistema de avaliação de custo - Metodologia	59
6. CONCLUSÕES	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Evolução percentual do consumo de sinter e pelotas nos Principais altos fornos japoneses.(2) -----	21
Figura 02 - Evolução da qualidade do coque dos principais altos fornos japoneses.(2) -----	21
Figura 03 - Principais fatores que contribuíram para a redução do "coke rate" nos altos fornos japoneses.(2) -----	22
Figura 04 - Evolução de consumo de combustíveis (kg/t) nos principais altos fornos japoneses.(2) -----	22
Figura 05 - Evolução da produtividade (t/d/m ³) dos altos fornos japoneses. (2) -	23
Figura 06 - Efeito do oxigênio suplementar (t/d) na produção do alto forno (t/d) para injeções de gás, óleo e carvão (5) -----	26
Figura 07- Consumos de oxigênio (Nm ³ /t) nos altos fornos para injeções (kg/t) de gás natural, carvão e injeções mistas, gás com carvão (6) ----	29
Figura 08 - Influência do volume de ar no volume de gás de rampa do alto forno, para injeções de combustíveis auxiliares, gás natural, carvão e mista, gás com carvão (6) -----	30
Figura 09 - Balanço de energia realizado em 1964 na Usina de Chiba da Kawasaki Steel Corporation.(2) -----	34
Figura 10 - Balanço de energia realizado em 1971 na Usina de Mizushima da Kawasaki Steel Corporation.(2) -----	35

Figura 11 - Balanço térmico do alto forno nº3 de Mizushima da Kawasaki.(2) ---	39
Figura 12 - Custo do gusa para duas qualidade de coque com diferentes preços (6) -----	45
Figura 13 - Ilustração esquemática de um alto forno (8) -----	47
Figura 14 - Distribuição percentual de energia na COSIPA em 2006 -----	49
Figura 15 - Evolução da produção anual do alto forno nº2 da COSIPA -----	50
Figura 16 - Evolução da produtividade anual do alto forno nº2 da COSIPA -----	51
Figura 17 - Taxa de enriquecimento do oxigênio no ar soprado - Alto forno nº2 da COSIPA -----	51
Figura 18 - Evolução do consumo total de combustíveis, Fuel rate, no alto forno nº2 da COSIPA -----	51
Figura 19 - Evolução do consumo de coque no alto forno nº2 da COSIPA -----	52
Figura 20 - Injeção de carvão no alto forno nº2 da COSIPA -----	54
Figura 21 - Injeção de gás natural no alto forno nº2 da COSIPA -----	55
Figura 22 - Evolução da temperatura do ar soprado nos regeneradores do alto forno nº2 da COSIPA. -----	55
Figura 23 - Consumo total de gases (alto forno e coqueria) nos regeneradores do alto forno nº2 da COSIPA. -----	56
Figura 24 - Consumo de gás de alto forno nos regeneradores do alto forno nº2	

da COSIPA -----	56
Figura 25 - Consumos de gás de coqueria nos regeneradores do alto forno nº2 da COSIPA -----	56
Figura 26 - Evolução da utilização de umidade no ar soprado no alto forno nº2 da COSIPA -----	57
Figura 27 - Evolução do volume de escória do alto forno nº2 da COSIPA -----	58
Figura 28 - Evolução da qualidade do coque produzido na COSIPA -----	58
Figura 29 - Índice de resistência a passagem de gases. Alto forno nº2 da COSIPA -----	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Dados operacionais dos altos fornos nº 6 e nº2, da Usina de Chiba - Kawasaki- Japão, que produzem respectivamente gusa para aciaria e fundição (3) -----	24
Tabela 02 - Comparativo das taxas de substituição, molar e em peso, para o Gás Natural, Óleo e Carvão (5) -----	27
Tabela 03 - Taxas de substituição em função da taxa de injeção de gás natural, óleo e carvão (5) -----	28
Tabela 04 - Equivalentes Caloríficos de Usinas integradas brasileiras em 1997 (1) -----	32
Tabela 05 - Produção (Kt gusa/ano) e Consumos energéticos (Mcal/tgusa) de Usinas integradas brasileiras em 1997 segundo Luchese (1) -----	33
Tabela 06 - Dados operacionais, média decendiais, dos altos fornos japoneses os de nº 3 da Usina de Chiba (A) e da Usina de Mizushima (B) – Kawasaki Stell Corporation (2) -----	37
Tabela 07 - Balanço térmico dos altos fornos japoneses os de nº 3 da Usina de Chiba (A) e da Usina de Mizushima (B) (2) -----	38
Tabela 08 - Balanços térmicos dos altos fornos nº 6 e nº2, da Usina de Chiba - Kawasaki, que produzem respectivamente gusa para aciaria e fundição (3) -----	40

Tabela 09 - Comparação entre valores calculados e operacionais de um alto forno com alto "coke rate" (3)-----	42
Tabela 10 - Exemplo de um balanço energético de um alto forno operando com "coke rate" elevado (3) -----	44
Tabela 11 - Custo de energia para diferentes qualidades do coque (6) -----	45
Tabela 12 - Períodos das campanhas do Alto Forno nº 2 da COSIPA -----	46
Tabela 13 - Dados básicos do Alto Forno nº 2 da COSIPA - 4ª Campanha ----	48
Tabela 14 - Distribuição de energia na COSIPA em 2006 -----	49
Tabela 15: Distribuição da energia consumida no alto forno nº2 da COSIPA em 2006 -----	50
Tabela 16 - Propriedades do gás natural usado no alto forno nº2 da COSIPA --	53
Tabela 17 - Características dos carvões de injeção usados no alto forno nº2 da COSIPA. -----	54

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

\$	Dolar
%	Porcentagem
AC	Aciaria
AF1	Alto Forno nº1
AF2	Alto Forno nº2
AF3	Alto Forno nº3
Al ₂ O ₃	Alumina
BFG	Blast furnace gás - gás de alto forno
CaO	Óxido de cálcio
CH	Hidrocarbonetos
cm ²	Centímetro quadrado
CO	Gás monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Coke	Coque
COQ	Coqueria (baterias 1 e 2)
COSIPA	Companhia Siderúrgica Paulista
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
CST	Companhia Siderúrgica Tubarão
CZ	Cinza
d	Dia
dBGAS	Aumento do calor latente do gás do topo
dBM	Alteração devido ajuste do vapor da mistura.
dBV	Alteração da energia do forno
dCR	Aumento de energia devido ao coque
dHS	Alteração no consumo de calor através dos regeneradores

DI	Drum index
dO ₂	Alteração da energia devido enriquecimento do ar com oxigênio.
dTRT	Energia elétrica recuperada devido alteração do gás do topo
FeO	Wustita: Monóxido de ferro
Fuel	Combustível
g	Grama
GJ	Giga joule
H ₂	Gás hidrogênio
HGI	Hardgrove Grindability Index
i	Índice de volume total de sopro
Kcal	Kilo caloria
Kg	Kilo
Kt	Kilo por tonelada
Kwh	Kilo watt hora
Lb	Libra
LC	Lingotamento contínuo
LF	Laminação a frio
LQ	Laminação a quente
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
Mcal	Mega caloria
MgO	Óxido de manganês
N	Taxa de recuperação de energia
N ₂	Nitrogênio
Ndam ³	Normal decâmetro cúbico
Ngloba	Eficiência de recuperação de energia de coque
Nm ³	Normal metro cúbico
O ₂	Oxigênio
°C	Grau Celsius
Óleo P	Óleo pesado
OUT	Outros
PCI	Finos de Carvão mineral
PERD	Perdas

REGs	Regeneradores
S	Enxofre
SEM	Sistema de energia
SINT	Sinterizações (2+3)
SINTER	Sinterização
SiO ₂	Sílica
t	Tonelada
tab	Tonelada de aço bruto
tgusa	Tonelada de gusa
thm	Ton hot metal: tonelada de gusa
TM	Tamanho médio
Usiminas	Usina Siderúrgica de Minas Gerais

1. INTRODUÇÃO

O elevado nível de concorrência no mercado de produtos siderúrgicos tem exigido das empresas, cada vez mais, produtos que atendam às expectativas dos consumidores a baixo custo, com elevado padrão de qualidade e que não tragam impactos ambientais nas fases produtivas.

Os custos de produção são afetados pela estabilidade operacional, desempenho técnico dos equipamentos, dos insumos consumidos e por fatores econômicos e financeiros. Portanto, para obter custos de produção mais baixos os gerentes necessitam de ferramentas úteis que os auxiliem nas tomadas decisões durante os processos produtivos, de modo a prever o custo de fabricação e anteceder às análises contábeis que normalmente ocorrem após a fabricação do produto.

Dentro de uma usina siderúrgica integrada, o equipamento alto forno é o maior consumidor individual de energia. O valor característico do "input" total é de 4.000 a 5.000 Mcal/t gusa produzido, representando de 60 a 70% do preço do gusa (1). Essa energia provem dos consumos de coque, injeções auxiliares (gás natural, finos de carvão mineral), oxigênio, insumos (nitrogênio, vapor de água, energia elétrica, água de refrigeração, ar comprimido) e os combustíveis gás de coqueria, gás de alto forno e gás natural, usados, nos regeneradores, para pré-aquecer o ar soprado no alto forno.

Na COSIPA há um déficit de coque entre o consumo nos altos fornos e a produção das baterias de coque, o qual é suprido pela importação de coque, principalmente da China, que é hoje uma das matérias primas mais cara usada na usina.

Para reduzir o custo de produção do gusa e o déficit de coque tem-se buscado a redução do consumo de coque pela adoção das seguintes estratégias:

- Elevar a taxa de injeção de finos de carvão nos altos fornos ao máximo
- Otimizar o "blend" de carvão mineral para os altos fornos
- Aumentar o rendimento do coque abastecido nos altos fornos, através da maior geração e consumo de "small" coque, coque de granulometria menor, nos altos fornos.
- Elevar a temperatura do ar soprado no alto forno
- Operar com o mínimo de vapor no ar soprado
- Injeções de gás natural e finos de carvão, individualmente ou simultaneamente através das ventaneiras

O custo de produção de gusa é altamente influenciado pelo custo das matérias primas consumidas e nos caso de importações das matérias primas, como coque, carvão para injeção e gás natural, são requeridos contratos de compra bem

elaborados, uma forma de comprometer os fornecedores quanto aos itens qualidade e preços fornecidos.

Nesse trabalho está sendo mostrado um Sistema de Avaliação de Custo, baseado em modelos simplificados dos processos, cuja ênfase é a previsão de custos de produção. Assim, modificações nos custos dos combustíveis utilizados no alto forno podem ser avaliadas antes de serem efetivamente consumidos. A um custo extremamente baixo, esse Sistema de avaliação econômica, disponibiliza informações de modo a facilitar as decisões gerenciais permitindo assim, reduções nos custos de produção que é uma das necessidades impostas pelo mercado.

Para exemplificar a utilização desse sistema foram montados cenários, com dados operacionais do Alto Forno nº 2 da COSIPA, onde foram introduzidas modificações nos preços dos combustíveis utilizados na fabricação do gusa e avaliado o impacto dessas alterações no preço final do produto.

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é fazer revisão bibliográfica direcionadas às matrizes energéticas dos altos fornos de modo que possam ser avaliados as trocas de combustíveis, no Alto Forno nº 2 da COSIPA - Companhia Siderúrgica Paulista, sobre aspectos técnicos, econômicos e operacionais.

O modelo de avaliação construído será examinado e posteriormente utilizado para aperfeiçoar os procedimentos de trocas de combustíveis durante operação do alto forno.

3. JUSTIFICATIVA

As trocas de combustíveis nas operações dos altos fornos são uma prática adotada em várias usinas e visam a redução do consumo de coque que é hoje uma das matérias primas mais caras usadas nas operações dos altos fornos sendo, portanto, essa prática relevante em termos econômicos. Essas reduções do consumo de coque nos altos fornos têm limitações técnicas que devem ser consideradas de modo a garantir a estabilidade operacional e a vida útil do alto forno.

Na COSIPA há um déficit de coque entre o consumo nos altos fornos e a produção das baterias de coque, o qual é suprido pela importação de coque, principalmente da China.

Esse déficit de coque, associados a constantes elevações dos preços ou baixas disponibilidades de carvões de injeção e gás natural tem exigido das operações dos altos fornos da COSIPA constantes reduções de custo, de modo a atender ao elevado nível de concorrência do mercado que exige, cada vez mais, produtos de qualidade a baixo custo.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Considerações iniciais

O consumo de energia nos diversos setores da Indústria Siderúrgica é função de diversos fatores como:

- ✓ Nível de produção;
- ✓ Perfil de produção;
- ✓ Tipos de reatores, etc.

O alto forno é o maior consumidor de combustíveis fósseis e produz além do gusa, escória e gás de alto forno.

A escória é recuperada e é usada na usina de cimento e como matéria prima para construções de estradas.

Os gases são usados nos aquecimentos dos regeneradores (pré-aquecedores do ar a ser soprado no alto forno), geração de energia elétrica ou nas caldeiras e turbinas, a vapor ou a gás.

Com o crescimento da demanda de aço algumas novas técnicas têm sido incorporadas aos processos dos altos fornos para obter maior produtividade, como o aumento do tamanho dos altos fornos; operações com pressões de topo mais altas e reduções do consumo de combustíveis.

Essa tendência foi particularmente percebida no Japão onde uma rápida expansão econômica proveniente da indústria do aço exigiu, para manter a competitividade entre as empresas, instalações de altos fornos com volumes maiores (volume interno superior a 2000 m³), reduções do consumo de combustíveis, especialmente coque, devido a escassez de reservas e elevação dos preços dos carvões coqueificáveis.

O tipo e volume dos combustíveis consumidos são característicos de cada usina.

As reduções dos consumos de combustíveis têm sido feitas através das seguintes ações:

- ✓ Elevação da temperatura do ar soprado com a melhora da eficiência térmica dos regeneradores (pré-aquecedores do ar soprado no alto forno) desde que as condições dos equipamentos e operacionais dos altos fornos sejam favoráveis.
- ✓ Injeções de combustíveis auxiliares
- ✓ Carregamento do alto forno com carga metálica mais preparada, sinter e pelotas
- ✓ Melhorarias nas distribuições de carga
- ✓ Melhorarias na qualidade das matérias primas abastecidas nos altos.
- ✓ Elevação da taxa de utilização do gás CO
- ✓ Redução da temperatura e silício do gusa
- ✓ Diminuição das perdas térmicas
- ✓ Melhorias na operação das áreas de corrida

Melhores utilizações dos gases de alto forno são possíveis quando aumenta a concentração do gás redutor que sai no topo do alto. Esse aumento de concentração é favorecido por:

- ✓ Uso de oxigênio enriquecido
- ✓ Melhora da redutibilidade da carga carregada no alto forno
- ✓ Redução da velocidade do gás de topo, operação com pressão de topo mais elevada
- ✓ Injeções auxiliares

As figuras 01 e 02 mostram respectivamente o consumo de cargas metálicas e melhorias implantadas na qualidade do coque nas principais usinas japonesas. A figura 03 mostra as principais contribuições para a redução do “coque rate”. As figuras 04 e 05 mostram respectivamente a evolução do consumo de combustíveis e produtividade desses altos fornos, conforme (2).

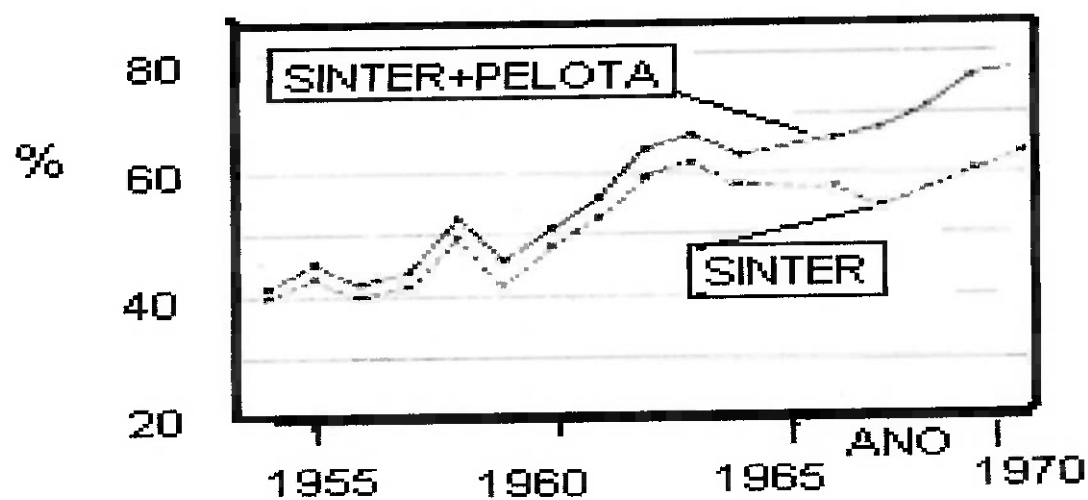


Figura 01- Evolução percentual do consumo de sinter e pelotas nos Principais altos fornos japoneses.(2)

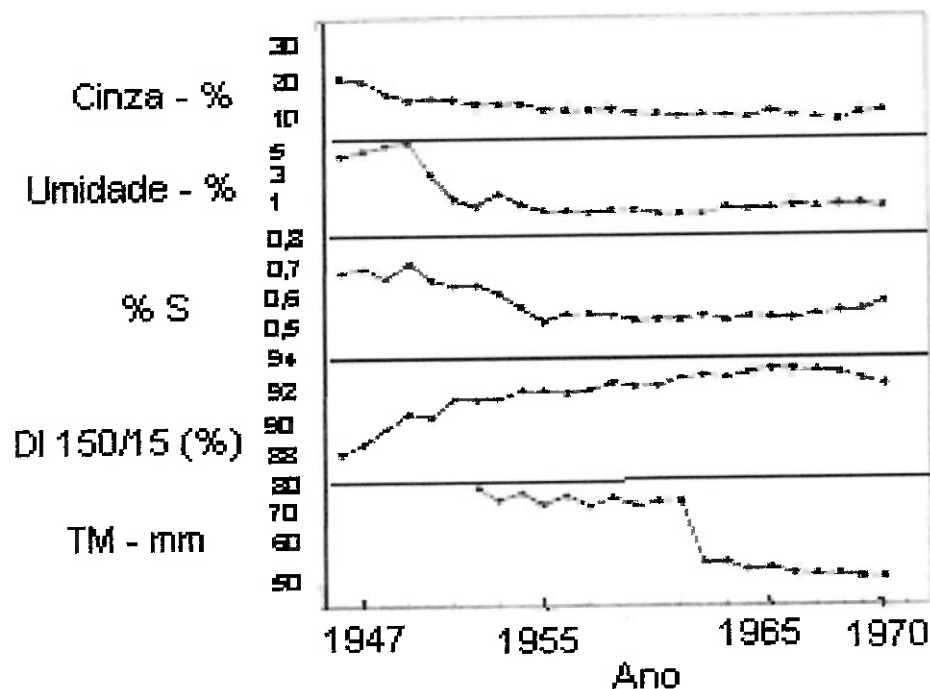


Figura 02 - Evolução da qualidade do coque dos principais altos fornos japoneses.(2)

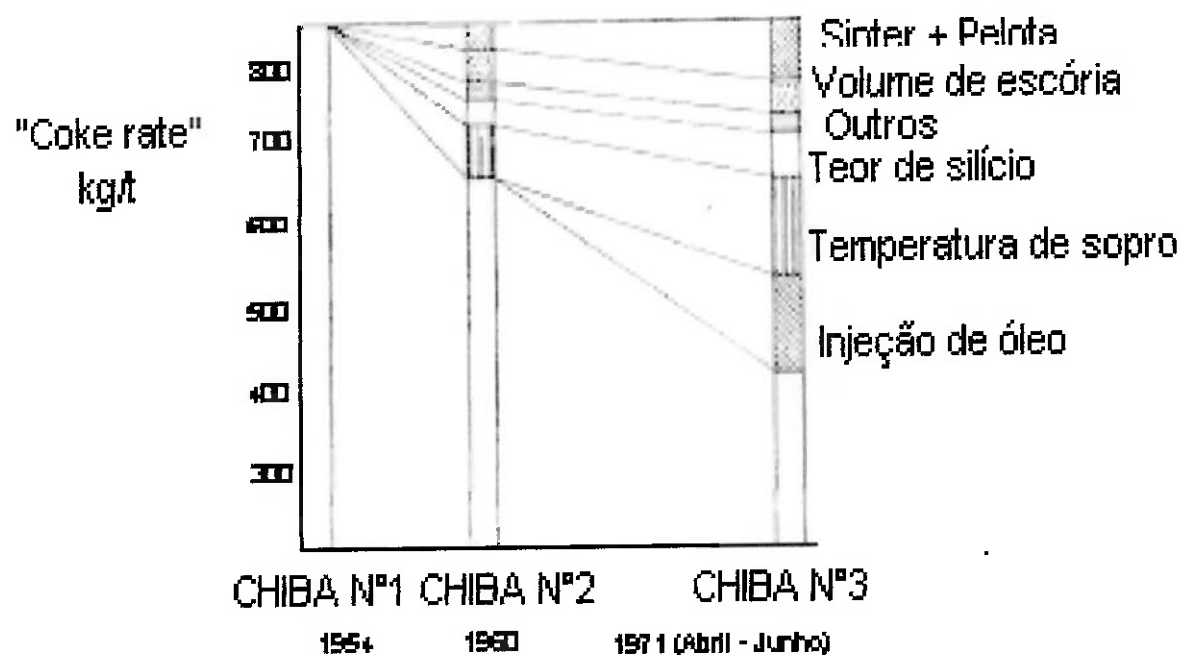


Figura 03 - Principais fatores que contribuíram para a redução do coque rate nos altos fornos japoneses.(2)

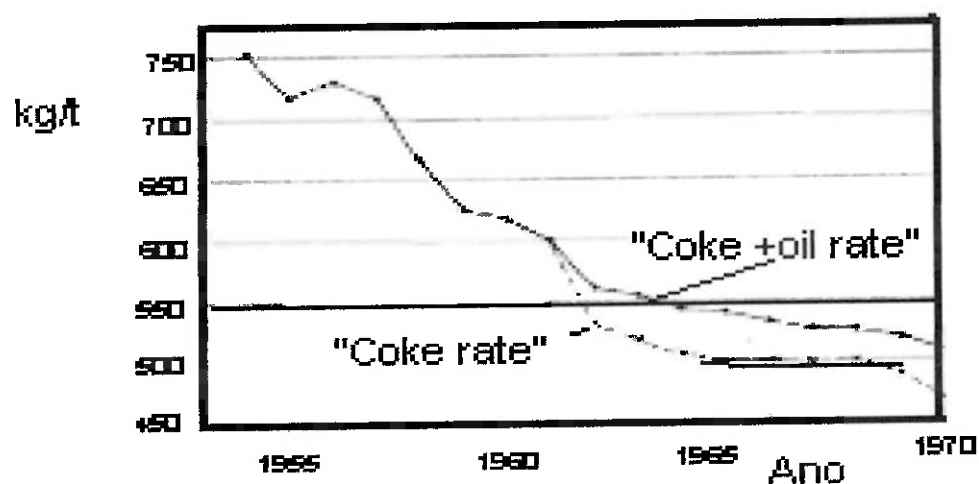


Figura 04 - Evolução de consumo de combustíveis (Kg/t) nos principais altos fornos japoneses.(2)

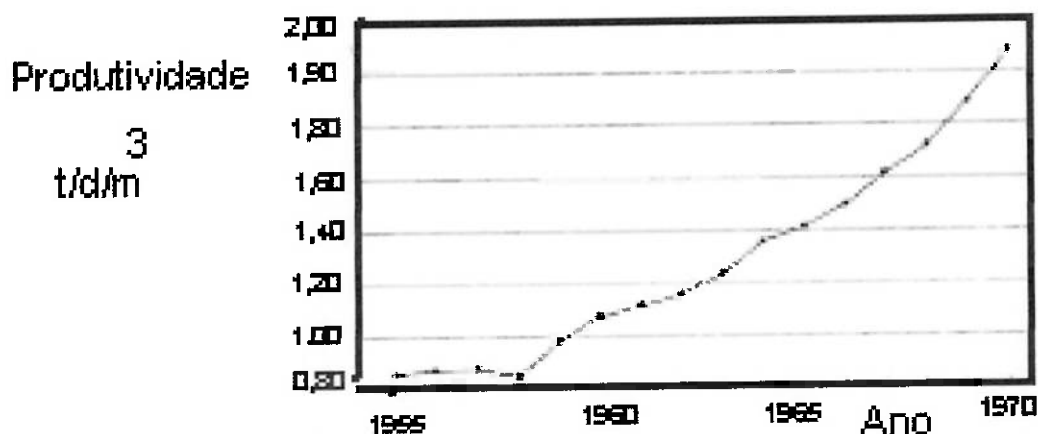


Figura 05 - Evolução da produtividade (t/d/m³) dos altos fornos japoneses.(2)

Substituições de combustíveis são possíveis, porém os seguintes itens devem ser analisados:

- ✓ Os preços relativos dos combustíveis a serem substituídos (gás natural, óleo, carvão)
- ✓ Taxas de substituição do coque pelo combustível complementar
- ✓ "Coke rate"
- ✓ Consumo de oxigênio
- ✓ Consumo de fundentes
- ✓ Consumo do ar soprado
- ✓ Consumo de vapor
- ✓ Taxa de produção e calor contido no gás do topo do alto forno
- ✓ Tratamentos secundários para gusa (custo dessulfuração)

As operações dos altos fornos podem estar também focadas não em reduzir e sim elevar o consumo de coque como nos casos em que a necessidade é a de geração de energia elétrica ou a fundição.

Nos casos de gerações de energia elétrica a operação do alto forno objetiva aumentar o volume dos gases do topo mantendo a temperatura do gusa, silício e perdas térmicas. Nos casos das fundições a operação do alto forno visa aumentar

as temperaturas e silício do gusa de modo a reduzir as necessidades térmicas no processo da fundição.

A tabela 01 compara dados operacionais dos altos fornos da usina de Chiba no Japão que operam com produtividade de 1,8 t/d/m³ e produzem gusa para aciaria (alto forno n°6) e fundição (alto forno n°2).

Item	Unidade	Gusa - Aciaria	Gusa - Fundição
"Coke rate"	kg/t	472,0	547,0
Ar soprado	Nm ³ /t	1032,8	1888,4
Temp. sopro	°C	1151,0	996,0
Umidade do ar soprado	g/Nm ³	27,9	29,8
Temp. gás topo	°C	170,0	180,0
CO no topo	%	51,8	49,7
Temp. gusa	°C	1493,0	1553,0
Si gusa	%	0,37	2,32

Tabela 01- Dados operacionais dos altos fornos n°6 e n°2 da Usina de Chiba-Kawasaki-Japão que produzem respectivamente gusa para aciaria e fundição (3)

A elevação do coque rate nas operações dos altos fornos são acompanhadas por uma queda no consumo específico de gases nos regeneradores; aumento da energia do ar soprado, atribuída à maior combustão do coque e aumento da energia elétrica gerada com o aumento do volume do gás do topo.

Normalmente um aumento no coque rate resulta num aumento da temperatura do gusa e silício e uma diminuição da taxa de utilização de gás, resultando num aumento da temperatura do topo. Portanto, antes de aumentar o coque rate é importante avaliar a eficiência da energia a ser recuperada no processo.

Nos casos em que as operações dos altos fornos forem feitas "all coke" ou por problemas operacionais ou inviabilidade de injeções auxiliares são necessários ajustes na distribuição de carga; controle da temperatura de chama e H₂ contido no

gás de rampa de modo a contornar a degradação da descida de carga e formação de carga inativa na parede do alto forno.

Os ajustes na distribuição de carga visam controlar os fluxos e temperaturas do gás na direção radial do topo, adequando o formato da zona coesiva, de modo que:

- ✓ Melhore as trocas térmicas e reações dentro do alto forno;
- ✓ Melhore a distribuição e permeabilidade da carga;
- ✓ Reduza as perdas térmicas na parede do alto forno.

Elevadas temperaturas de chama aumentam o deslizamento da carga dentro do alto forno. Foi verificado no alto forno nº6 da Usina de Chiba, da Kawasaki, que mantendo as condições operacionais inalteradas e cortando o consumo de óleo injetado, 20 kg/tgusa elevou a temperatura teórica de chama em 106°C devido à redução do gás gerado por unidade de ar na região frontal as ventaneiras causado pelo decréscimo da reação endotérmica na decomposição do óleo. Esse aumento da temperatura de chama foi contornado com a elevação da umidade do ar soprado (4).

O gás H_2 ao ser comparado com o gás CO tem as seguintes características:

- ✓ Taxa de redução mais rápida
- ✓ Menor viscosidade
- ✓ Alta condutividade térmica favorecendo as reações de redução no alto forno.

Na “operação all coke” o aumento da umidade do ar serve como fonte de H_2 que somado ao gás CO melhora as condições operacionais do alto forno porque aumenta a taxa de redução, melhora a permeabilidade e reduz a perda de carga do alto forno.

4.2. Injeções Auxiliares

Injeções auxiliares de combustíveis, como gás natural, óleo e carvão, nos altos fornos são usados com os seguintes objetivos:

- ✓ Reduzir o consumo de coque
- ✓ Aumentar a produtividade do alto forno, devido a necessidade de usar oxigênio complementar para contra balancear o efeito refrigerante dessas injeções
- ✓ Reduzir o custo de produção.

Comparando os três combustíveis, o gás natural destaca quanto à segurança do risco de investimento; ganho em produtividade; flexibilidade de taxas de injeção e operabilidade do alto forno.

A máxima produtividade obtida com injeção auxiliar é função do hidrogênio contido nos combustíveis, sendo maior para o gás natural (CH_4), seguida pelo óleo (CH_2) e carvão ($\text{CH}_{0,6}$). Segundo Agarwal (5), para as máximas taxas de injeções pesquisadas com carvão em 350 lb/thm (158,9 Kg/t) e gás natural em 250 lb/thm (113,5 kg/t) as produções de gusa obtidas foram respectivamente 4800 t/d e 5600 t/d, conforme mostra a figura 06.

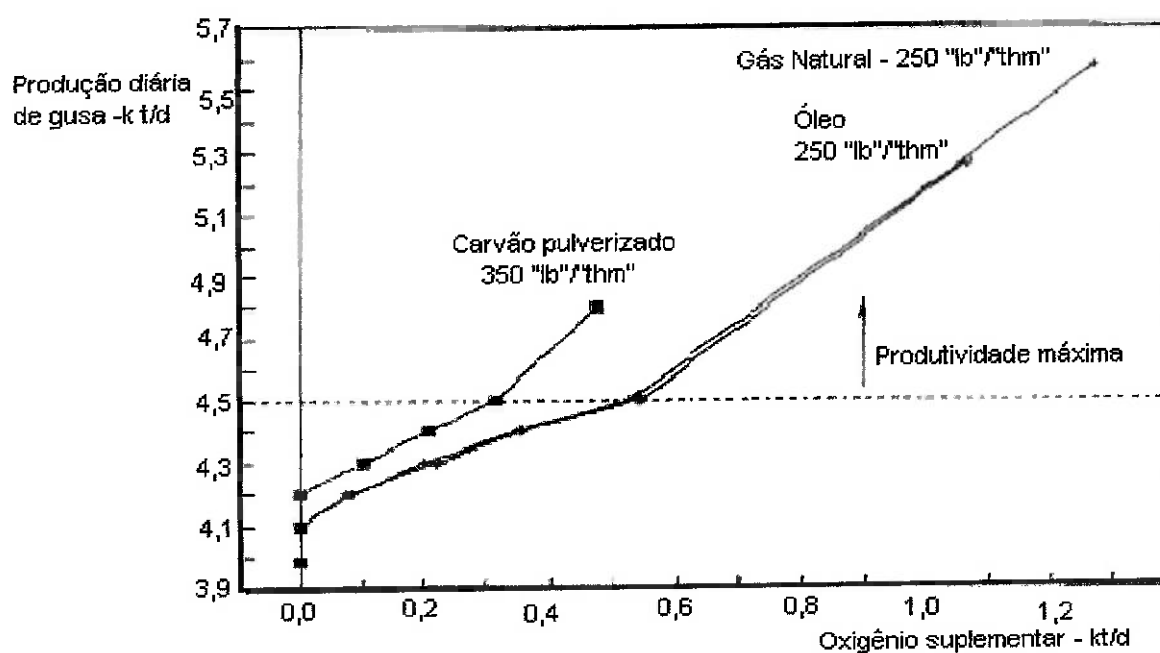


Figura 06 - Efeito do oxigênio suplementar (t/d) na produção do alto forno (t/d) para injeções de gás, óleo e carvão (5)

Embora gás natural, óleo, carvão e outros materiais sejam conhecidos como combustíveis, seus comportamentos são de agentes redutores químicos e fontes de energia térmica com grande importância na avaliação de impactos econômicos quando utilizadas no alto forno.

Desconsiderando o efeito endotérmico do calor de formação destes combustíveis, cada átomo de carbono do combustível poderia substituir um átomo de carbono do coque. Além disso, carbono do coque é substituído pelo hidrogênio do combustível, governado pelo equilíbrio termodinâmico requerido para redução do FeO, reação que ocorre a altas temperaturas e consome coque. A máxima taxa de substituição é aproximadamente de 0,5 átomo de carbono para cada mol de hidrogênio do combustível.

As taxas de substituição baseadas no peso são inferiores às taxas de substituição molar devido à utilização de hidrogênio ser menor que o limite teórico, conforme tabela 02.

COMBUSTÍVEL	TAXA DE SUBSTITUIÇÃO MOLAR	TAXA DE SUBSTITUIÇÃO EM PESO
Natural gás (CH ₄)	2,0	1,6
Óleo (CH _{1,5-2,0})	1,375 a 1,5	1,3 a 1,4
Carvão (CH _{0,6-0,8})	1,15 a 1,2	1,1

Tabela 02: Comparativo das taxas de substituição, molar e em peso, para o gás natural, óleo e Carvão (5)

A tabela 03 mostra as variações das taxas de substituição para varias taxas de injeção (5).

Combustível	Taxa de injeção (lbs/thm)	Taxa de substituição limite (lb "coke"/lb "fuel")	Taxa de substituição marginal (lb "coke"/lb "fuel")
Gás Natural	50	1,82	1,82
	100	1,52	1,22
	150	1,40	1,16
	200	1,33	1,10
	250	1,27	1,06
Óleo	60	1,50	1,50
	120	1,25	1,00
	180	1,14	0,93
	240	1,08	0,88
	300	1,03	0,85
Carvão Pulverizado	70	1,26	1,26
	140	1,06	0,87
	210	0,97	0,79
	280	0,92	0,76
	350	0,88	0,73

Tabela 03 - Taxas de substituição em função da taxa de injeção de gás natural, óleo E carvão (5)

A influência da injeção de gás na produtividade foram analisadas inicialmente em duas condições de injeção, 50 e 100 Kg/t, e posteriormente nas condições atuais de operação.

As injeções de combustíveis auxiliares nos altos fornos estão normalmente associadas ao uso de oxigênio complementar para contra balancear o efeito refrigerante dessas injeções, a figura 07 (mostra as necessidades de oxigênio nos altos fornos para injeções de gás natural, carvão e injeções mistas, gás com carvão (6).

Na injeção de 100 kg/t de gás com 69 Nm³ de oxigênio/t não houve degradação da estabilidade operacional apesar da temperatura de chama ter sido reduzida de 2100 para 1912°C ao manter os parâmetros operacionais constantes.

Na injeção de carvão, para taxas inferiores a 100 Kg/t, foi atuado na injeção de vapor para manter a temperatura de chama em 2100°C. Acima desse valor houve necessidade de elevação do consumo de oxigênio, para taxa de injeção em 180 Kg/t a necessidade de oxigênio foi de 48 Nm³.

Na injeção mista de 180 Kg/t (150 kg de carvão com 30 kg de gás) a necessidade de oxigênio foi de 77 Nm³ de oxigênio/t, ou seja, mais de 50% se comparado com a mesma taxa de injeção de carvão.

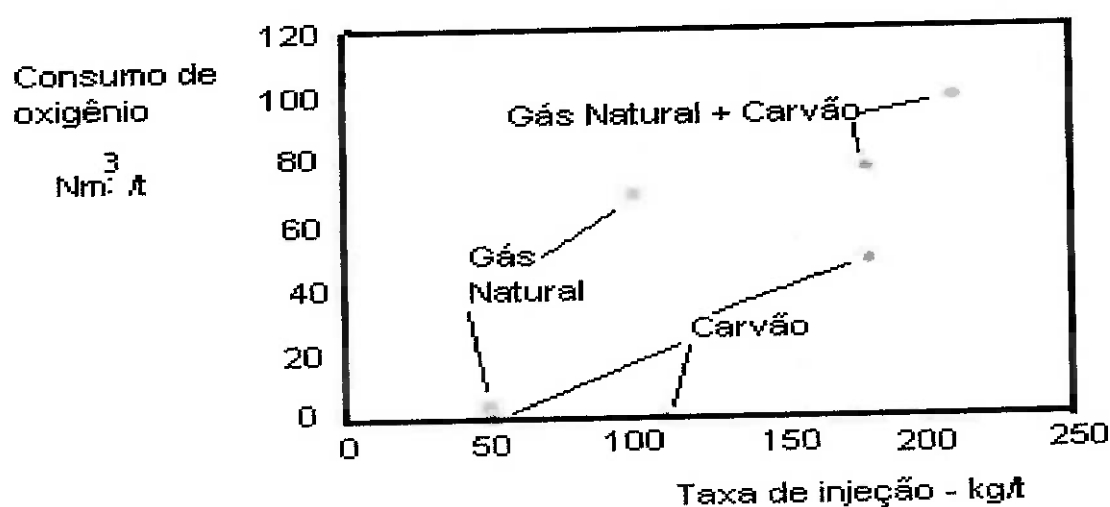


Figura 07- Consumos de oxigênio (Nm³/t) nos altos fornos para injeções (kg/t) de gás natural, carvão e injeções mistas, gás com carvão (6).

Variações no volume de oxigênio indicam que a produtividade pode ser alterada dependendo do tipo de injeção.

A taxa de produção é essencialmente limitada por dois fatores: capacidade do turbo soprador e a permeabilidade do forno. As propriedades da carga, volume e características dos gases também influem.

A solução clássica de suprir deficiências dos turbo sopradores é o enriquecimento do ar soprado.

A figura 08 mostra a influência da injeção de combustíveis no volume de gás de rampa (6).

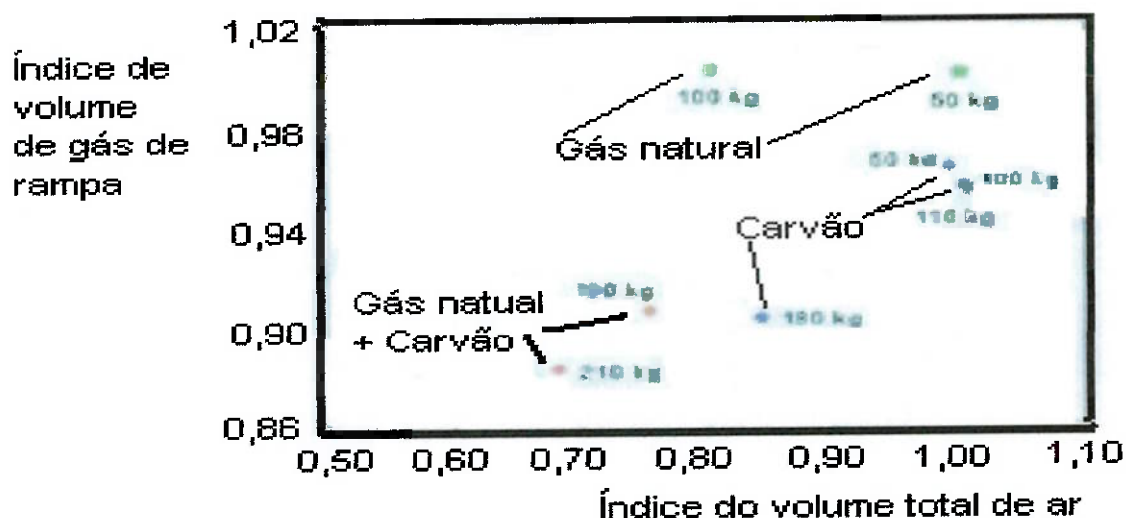


Figura 08 - Influência do volume de ar no volume de gás de rampa do alto forno, para injeções de combustíveis auxiliares, gás natural, carvão e mista, gás com carvão (6)

O eixo x mostra a variação do índice de sopro com as taxas de injeção.

O índice de volume total de sopro = i é calculado na equação [01], como:

$$i = ((ar + O_2)/(ar + O_2)_{referência}) \quad [01] \quad (6)$$

A referência considerada, nesse caso, foi para a injeção de gás natural em 50 Kg/t ($i=1$).

O eixo Y representa o índice de volume de gás de rampa, calculado de forma equivalente ao índice de sopro e para a mesma referência.

A resistência ao fluxo de gás, para a mesma permeabilidade da carga, aumenta com o aumento do volume de gás na rampa. A redução do volume de gás de rampa reduz a perda de carga do alto forno e permite elevar o volume de ar soprado se houver disponibilidade do turbo soprador e necessidade de maior produção. A situação ideal para aumentar a produção é quando os volumes específicos de ar e gás de rampa forem reduzidos. Reduções do consumo de coque favorecem também

o aumento de produção, porém aumentam a resistência à passagem de gás dentro do alto forno.

Pela figura 08 observa-se que:

- ✓ O maior potencial de produção está localizado na parte inferior esquerda do gráfico
- ✓ Elevar a injeção de gás natural de 50 para 100 Kg/t favorece à elevação do sopro, via injeção de oxigênio, porém o ganho em volume de gás de rampa é insignificante,
- ✓ Substituir 50 Kg/t de injeção de gás natural por carvão reduz o volume de gás de rampa, porém não favorece à elevação do sopro,
- ✓ Acima de 110 Kg/t de carvão, no ponto em que inicia o enriquecimento de oxigênio o ganho é dos dois índices: capacidade de sopro e a baixa pressão do alto forno
- ✓ O volume de gás de rampa é menor na injeção de carvão do que com injeção de gás natural. Porém o gás natural é mais eficiente quando se refere à capacidade de sopro de ar no alto forno.
- ✓ Injeções mistas combinam as vantagens das duas práticas. Com injeção de 180 Kg/t (30 kg de gás natural e 150 kg de carvão) favorece ao aumento do sopro e diminui o volume de gás de rampa. Injeções de 210 Kg/t favorecem mais o aumento de produtividade porém a permeabilidade do alto forno degrada se a capacidade do soprador estiver no limite e o "coque rate" estiver entre 300 a 320 Kg/t.

4.3. Balanços de Energia

As energias usadas nos altos fornos provêm dos consumos de coque, injeções auxiliares de combustíveis (gás natural, óleo, alcatrão, finos de carvão), ar soprado, gás de alto forno e gás de coqueria consumidos nos regeneradores (pré - aquecedores do ar injetado no alto forno), oxigênio, nitrogênio, vapor, energia elétrica, água de refrigeração e ar comprimido.

Os equivalentes caloríficos e consumos energéticos de 1997 de altos fornos de 05 usinas integradas brasileiras são mostrados respectivamente nas tabelas 04 e 05.

ÍTEM	UNIDADE	AÇOMINAS AF1	CSN AF3	CST AF1	COSIPA AF1+AF2	USIMINAS AF3
Coque	Kcal/kg	6900	6900	6900	6900	6900
Injeção de carvão	Kcal/kg		6700	6500		6700
Gás Natural	Kcal/Nm ³		8784	8900	9519	
Alcatrão	Kcal/kg	9000	8600	9000	9000	9000
Gás de alto forno	Kcal/Nm ³	725	843	819	798	801
Gás de coqueria	Kcal/Nm ³	4410	4355	4794	4320	4391
Oxigênio	Kcal/Nm ³	1330	2074	1165	1585	1290
Nitrogênio	Kcal/Nm ³	1330	2074	1165	1585	1290
Energia Elétrica	Kcal/kWh	2500	2500	2500	2500	2500
Água recirculação	Kcal/m ³	735	26745	730	954	780
Ar soprado	Kcal/Nm ³	290		247		
Vapor de baixa pressão	Kcal/kg	733	1036	752	710	876
Ar comprimido	Kcal/Nm ³	290	251	314	281	241
Vapor de alta pressão	Kcal/kg	985	1036		1012	829

Tabela 04: Equivalentes Caloríficos de Usinas integradas brasileiras em 1997
segundo Luchese (1)

ÍTEM	AÇOMINAS AF1	CSN AF3	CST AF1	COSIPA AF1+AF2	USIMINAS AF3
Produção	2272,5	3308,1	3629,0	3656,4	2424,1
Coque	3441,0	2801,3	2489,1	3253,3	2936,3
Injeção de carvão	0	470,4	815,0		576,6
Gás Natural	0	236,1	5,8	384,9	
Alcatrão	0		30,0	0	
Gás de alto forno	241,9	297,0	300,2	354,9	335,0
Gás de coqueria	256,7	130,3	143,6	160,5	123,9
Oxigênio	4,7	124,9	48,5	47,3	65,9
Nitrogênio	13,6	58,0	31,6	30,2	16,0
Energia elétrica	56,7	286,6	60,6	32,8	58,2
Água de recirculação	21,8	8,6	17,0	35,3	37,1
Ar soprado	336,7		240,8	397,9	242,0
Vapor de baixa pressão	15,2	36,3	12,8	20,8	12,1
Ar comprimido		5,6	4,0	3,4	1,7
TOTAL	4388,0	4455,0	4199,0	4721,0	4404,8

Tabela 05: Produção (Kt gusa/ano) e Consumos energéticos (Mcal/tgusa) de Usinas integradas brasileiras em 1997 segundo Luchese (1)

As figuras 09 e 10 mostram respectivamente os balanços de energia em duas usinas japonesas da Kawasaki Steel Corporation, Usina de Chiba e Usina de Mizushima, realizados respectivamente em 1964 e 1971 (2).

Pode-se verificar uma tendência de reduções da participação do carvão coqueificável na matriz energética nesses dois períodos, de 90 % para aproximadamente 80%.

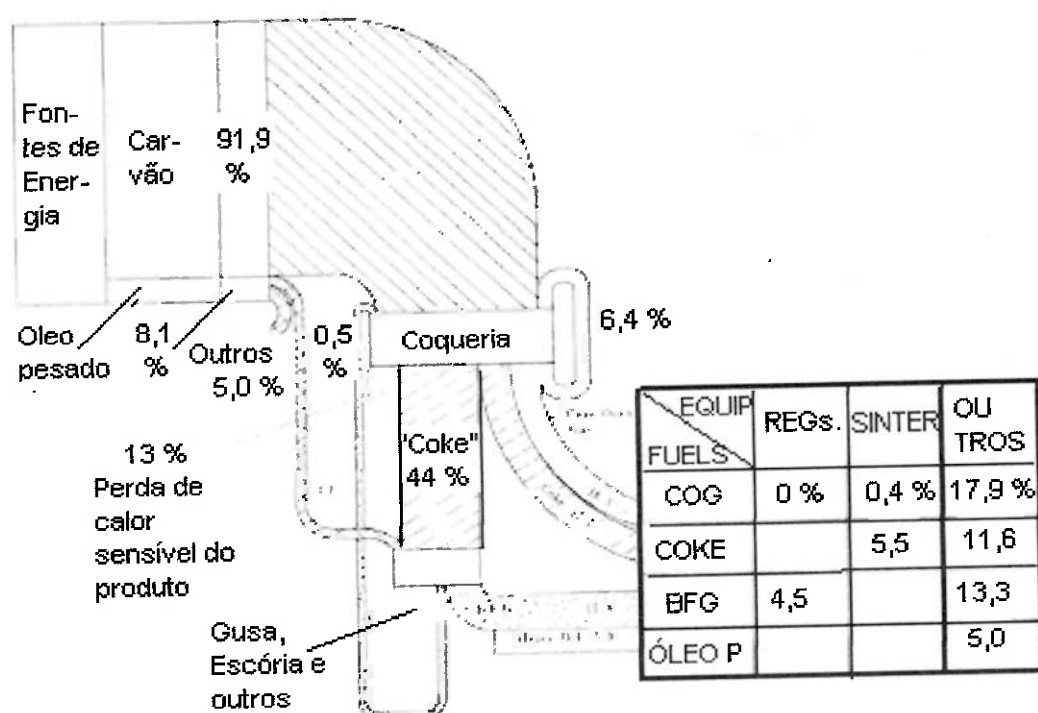


Figura 09 - Balanço de energia realizado em 1964 na Usina de Chiba da Kawasaki Steel Corporation.(2)

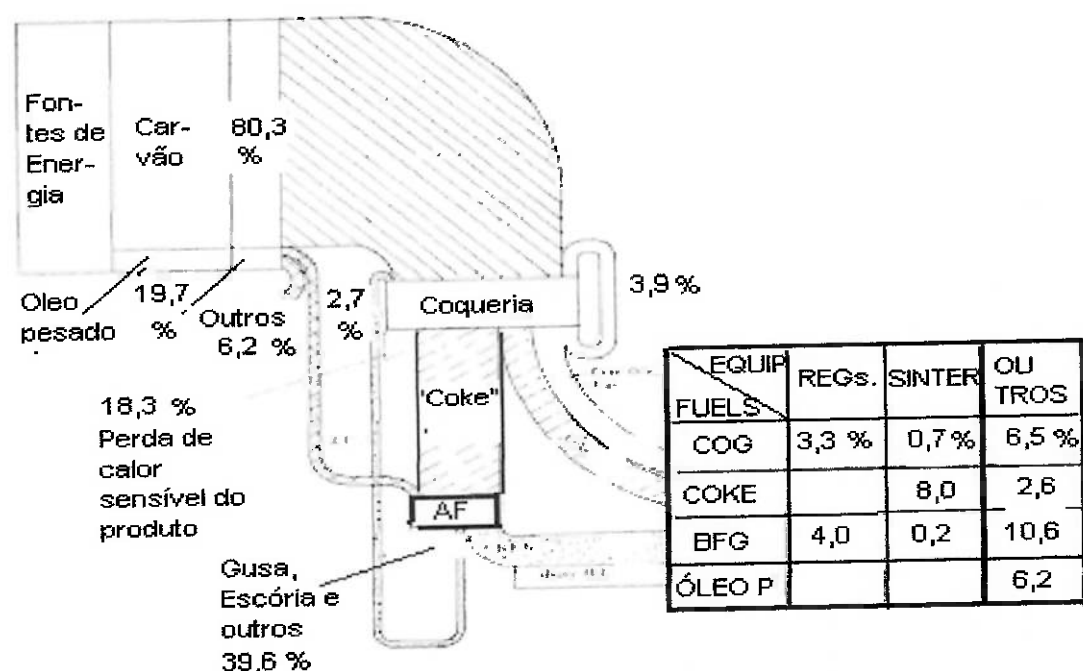


Figura 10 - Balanço de energia realizado em 1971 na Usina de Mizushima da Kawasaki Steel Corporation.(2)

O tamanho do alto forno influi no consumo de combustíveis. Isto pode ser explicado pelo fato que altos fornos maiores tem menores perdas térmicas; melhores equipamentos para elevar a temperatura do ar soprado; maiores pressões de topo e melhores técnicas operacionais.

Comparando dados operacionais de dois altos fornos japoneses de diferentes tamanhos, um da Usina de Chiba e outro da Usina Mizushima - Kawasaki Steel Corporation, tabela 06, lamura (2) mostra, na tabela 07, os resultados obtidos do balanço térmico desses dois altos fornos.

ITEM	UNIDADE	A	B
Volume do alto forno	m ³	1686	3363
Diâmetro do cadinho	m	8,8	12,4
Coque rate	kg/t	366	372
Óleo rate	kg/t	98,2	85,7
Enriquecimento de Oxigênio	Nm ³ /t	52,6	43,3
Volume de ar	Nm ³ /t	1014	965
Temperatura do ar	°C	1090	1313
Umidade	g/m ³	15,5	17,6
Silício do gusa	%	0,35	0,54
Basicidade da escória *	-	1,15 (0,91)	1,24
Volume de escória	kg/t	350	312,4
CO no topo	%	22,2	22,4
CO ₂ no topo	%	24,2	23,1
H ₂ no topo	%	5,3	4,7
Volume de gás no topo	m ³ /t	1414	1567
Pelota + Sinter	%	21,4 + 73,2	5,0 + 80,1
Calcário	kg/t	0,1	16,9
Carga metálica	kg/t	1590	1633

Geração de Pó	kg/t	6,6	8,2
Produção diária de gusa	t/d	3475	7532
Temperatura do gusa	°C	1462	1511
Pressão do topo	g/cm ²	750	2100

Tabela 06 - Dados operacionais, média decendial, dos altos fornos japoneses os de n° 3 da Usina de Chiba (A) e da Usina de Mizushima (B) - Kawasaki Steel Corporation (2)

✓ Basicidade da escória = CaO/SiO_2 ($\text{CaO} + \text{MgO} / \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$)

CALOR	A	A	B	B
ENTRADA	X 10 Kcal/t	%	X 10 Kcal/t	%
Combustão do coque	231,1	63,2	232,7	64,7
Combustão do óleo	93,3	25,5	80,9	22,5
Calor sensível do ar	36,5	10,0	41,8	11,6
Formação da escória	4,9	1,3	4,4	1,2
TOTAL	365,8	100,0	359,8	100,0

CALOR	A	A	B	B
	X 10		X 10	
SAÍDA	Kcal/t	%	Kcal/t	%
Calor de redução	158,3	43,3	161,9	45,0
Calor sensível do gusa e escória	46,2	12,6	45,6	12,7
Calor latente do gás do topo	114,2	31,2	124,9	34,7
Decomposição da umidade do ar	5,0	1,4	5,4	1,5
Perdas térmicas	40,7	11,1	20,6	5,7
Evaporação da umidade da carga	1,4	0,4	1,4	0,4
TOTAL	365,8	100,0	359,8	100,0

Tabela 07 - Balanço térmico dos altos fornos japoneses os de nº 3 da Usina de Chiba (A) e da Usina de Mizushima (B) (2)

Com base nessas tabelas pode-se verificar que o calor de entrada corresponde a 3,6 milhões de kcal/t gusa e está distribuído em calor sensível do ar (10%); calor proveniente da combustão do óleo combustível injetado (25%) e ao calor de combustão do coque (65%).

A perda térmica, correspondente ao calor de saída, de um alto forno grande é aproximadamente a metade de perda de um alto forno menor.

Com relação ao calor de saída se deve ao calor gerado na redução da carga (45%); calor sensível do gusa e escória (13 %) e ao calor contido no gás de topo (aproximadamente 30 a 35 %).

Uma forma mais efetiva de geração de gás do topo permite redução do fuel rate. Iwamura (2) quantificou o valor térmico do gás do topo em 1,25 milhões de Kcal/tgusa para uma relação de gás CO_2/CO igual a 1, correspondente a 50% de gás CO. Se o teor do gás CO for alterado para 70%, o fuel rate de um alto forno grande poderia ser reduzido em 60 Kg.

Para o alto forno maior, o de nº3 da Usina de Mizushima, os resultados do balanço térmico também são mostrados em forma gráfica, figura 11.

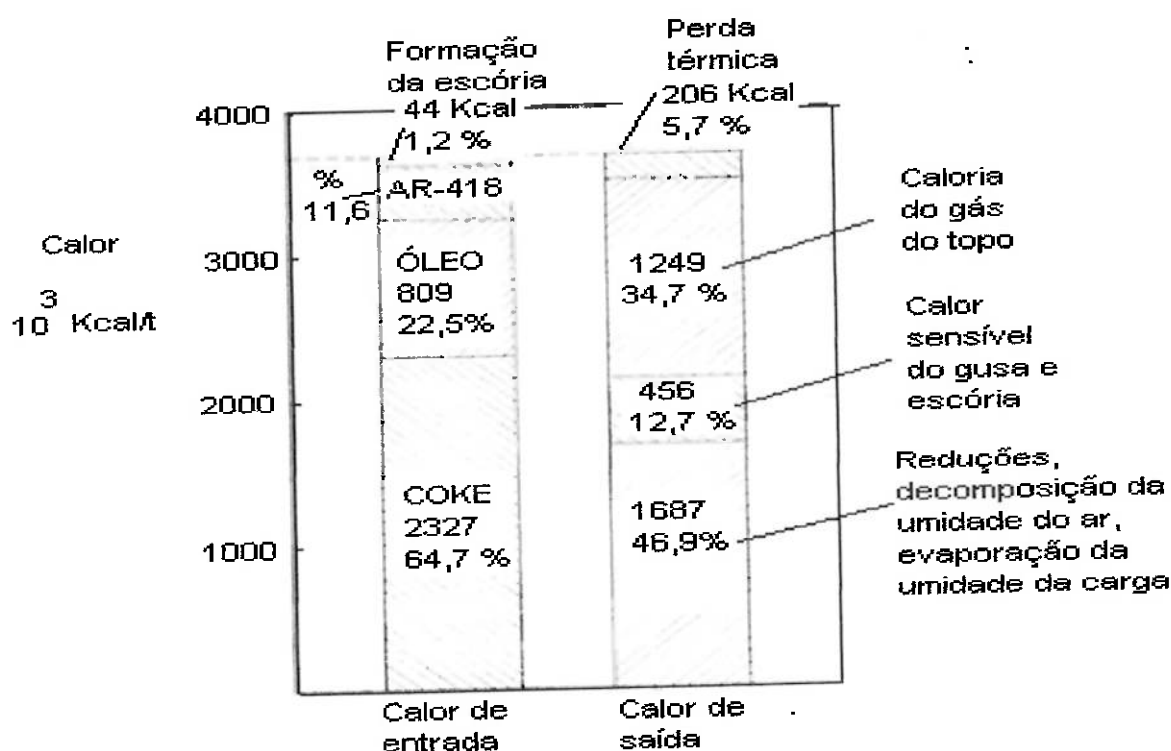


Figura 11 - Balanço térmico do alto forno nº3 de Mizushima da Kawasaki.(2)

Sawata (3) com base nos dados operacionais dos altos fornos da usina de Chiba da Kawasaki Stell, o de nº6, que produz gusa para aciaria e o de nº2, que produz gusa para a fundição, tabela 01 obteve dos balanços energéticos desses altos fornos que tem produtividade de 1,8 t/d/m³ os valores mostrados na tabela 08.

Item	Gusa-Aciaria	Gusa-Fundição	Diferença
------	--------------	---------------	-----------

ENTRADA			
Combustão do carbono-coque	3363,7	3898,2	
Calor sensível do ar soprado	410,0	520,2	
Calor gerado da escória	42,1	40,9	

SAÍDA			
Calor redução óxido de ferro	1680,0	1680,0	
Calor redução outros óxidos (Si, etc.)	39,8	183,6	143,8 (22,3 %)
Calor latente do gás de topo	1061,6	1332,2	270,6 (42,0 %)
Calor sensível do gás de topo	87,6	122,5	34,9 (5,4 %)
Calor sensível do ferro gusa	319,1	331,4	12,3 (1,9 %)
Calor sensível da escória	128,3	129,6	
Calor latente do carbono no gusa	367,6	371,7	
Calor latente do carbono no pó	3,5	2,7	
Calor: evaporar umidade: materiais	4,0	4,0	
Perdas térmicas	124,2	301,6	177,4 (27,6 %)
Total	3815,9	4459,2	643,3 (100 %)

Tabela 08 - Balanços térmicos :($\times 10^3$ Kcal/t) dos altos fornos nº 6 e nº2, da Usina de Chiba - Kawasaki, que produzem respectivamente gusa para aciaria e fundição (3)

As energias não recuperadas incluem calor sensível da escória e do gás do topo, perdas térmicas e calor da evaporação das umidades. No caso do alto forno que produz gusa para aciaria o input total de energia é de $3815,9 \times 10^3$ Kcal/t e as energias não recuperadas de $344,1 \times 10^3$ Kcal/t possibilitando uma recuperação efetiva de energia do alto forno em 91%.

As perdas térmicas normais estão entre 50 a 200×10^3 Kcal/t dependendo das condições operacionais, volume do alto forno e da efetiva taxa de utilização da energia disponível.

A taxa de recuperação de energia (N) quando altera a energia térmica na entrada do alto forno é definida por Haru (3) pela equação [02]:

N = Taxa de recuperação do calor latente do gás do topo + taxa
do calor do agente redutor do silício [02] (3)

$$N = ((\text{variação do calor latente do gás do topo} / (\text{calor de combustão devido alteração do coque} + \text{alteração do calor sensível do ar soprado})) + ((\text{calor devido incorporação do silício no gusa} / (\text{calor de combustão devido alteração do coque} + \text{alteração do calor sensível do ar soprado})))$$

No caso da produção de gusa para a fundição, a taxa de recuperação de energia é 64,8 % (42,0 % devido recuperação do calor latente do gás do topo e 22,3 % devido incorporação do silício no gusa).

Para minimizar o custo total de energia de uma siderurgia é necessário maximizar a recuperação de energia do alto forno, em termos de balanço térmico, equivale a manter baixo o teor de silício e alto calor latente do gás do topo.

A tabela 09 compara os valores calculados e com valores operacionais de um alto forno após alterar os consumos de coque, temperatura e umidade do ar soprado.

Item	Unidade	Padrão	Valor calculado	Valor Operacional
Produtividade	t/m ² .d	52,22	39,44	59,44
Coque rate	kg/t	472,1	491,9	489,2
Ar soprado (+O ₂)	Nm ³ /t	1032,8	1067,8 (+10,2)	1069,7 (+10,2)
Temperatura do ar	°C	1151,0	1005,0	1005,0
Umidade do ar soprado	g/Nm ³	27,9	41,5	41,5
Temperatura teórica de chama	°C	2372	2198	2198
Volume do gás do topo	Nm ³ /t	1529,2	1600,0	1599,3
Poder calorífico do gás de alto forno	Kcal/Nm ³	695,6	724,3	735,0
Rendimento do gás CO	%	51,84	50,87	49,97
Temperatura do gás do topo	°C	166,6	195,8	189,0
Teor de silício	%	0,37	0,23	0,27
Perda térmica	10 ³ Kcal/t	72,9	72,9	75,4
Taxa de equivalência em água entre sólido e gás	%	0,820	0,790	0,795
H ₂ em frente às ventaneiras	%	3,39	4,53	4,53
Tabela 09 - Comparação entre valores calculados e operacionais de um alto forno com alto coque rate (3).				

Sawada (3) define a eficiência de recuperação de energia do coque como a Variação da energia de saída/Variação da energia de entrada) e a representa pela pela equação [03] :

$$N_{\text{global}} = (d_{\text{bgas}} + d_{\text{TRT}}) / (d_{\text{CR}} + d_{\text{HS}} + d_{\text{BV}} + d_{\text{O2}} + d_{\text{BM}}) \quad [03]$$

onde,

d_{BGAS} : Aumento do calor latente do gás do topo

d_{TRT} : Energia elétrica recuperada devido alteração do gás do topo

d_{CR} : Aumento de energia devido ao coque

d_{HS} : Alteração no consumo de calor através dos regeneradores

d_{BV} : Alteração da energia do forno

d_{O2} : Alteração da energia devido enriquecimento do ar com oxigênio.

d_{BM} : Alteração devido ajuste do vapor da mistura.

Os dados da tabela 10 exemplifica o resultado dos cálculos baseados nos dados da tabela 09 e considerando o rendimento térmico dos regeneradores em 85% e poder calórico do ar soprado em 120 Kcal/Nm³-O₂, umidade de 730 Kcal/Kg e energia elétrica para recuperar os gases do topo (1KW.h = 2450 Kcal) proporcional ao volume do gás do topo.

Para essas condições, a recuperação da energia do gás do topo foi de 73,1 % e a perda de energia no processo do alto forno de 36 x 10³ Kcal/t.

Se a perda de calor for elevada para 10³ Kcal/t, a eficiência de recuperação de energia cai aproximadamente 7,5 % e um aumento do teor de silício em 0,1 % corresponde a um aumento na perda térmica de aproximadamente 7,5 x 10³ Kcal/t e uma redução da eficiência da energia recuperada em aproximadamente 5,5 %.

Fator	Cálculo da variação de energia	Resultados
dCR	$(491,9-472,1)\text{Kg/t} \times 7200 \text{ Kcal/Kg}$	$142,6 \times 10^3 \text{ Kcal/t}$
dHS	$(1005^\circ\text{C} \times 1067,8 \text{ Nm}^3/\text{t} - 1151^\circ\text{C} \times 1032,8 \text{ Nm}^3/\text{t}) \times 0,3 \text{ Kcal/Nm}^3^\circ\text{C}/0,85$	$-40,8 \times 10^3 \text{ Kcal/t}$
dBV	$(1067,8-10,2-1032,8)\text{Nm}^3\text{ar/t} \times 120 \text{ Kcal/Nm}^3 \text{ ar}$	$3,0 \times 10^3 \text{ Kcal/t}$
dO2	$(10,2-0)\text{Nm}^3\text{O}_2/\text{t} \times 1760 \text{ Kcal/Nm}^3 \text{ O}_2$	$18,0 \times 10^3 \text{ Kcal/t}$
dBm	$(1067,8 \text{ Nm}^3/\text{t} \times 41,5 \text{ g/Nm}^3 - 1032,8 \text{ Nm}^3/\text{t} \times 27,9 \text{ g/Nm}^3) \times 720 \text{ Kcal/1000g}$	$11,2 \times 10^3 \text{ Kcal/t}$
dBGAS	$724,3 \text{ Kcal/Nm}^3 \times 1600,0 \text{ Nm}^3/\text{t} - 695,6 \text{ Kcal/Nm}^3 \times 1529,2 \text{ Nm}^3/\text{t}$	$95,2 \times 10^3 \text{ Kcal/t}$
dTRT	$24,5 \text{ KW.h/t} \times (1600,0 \text{ Nm}^3/\text{t} / 1529,2 \text{ Nm}^3/\text{t} - 1) \times 2450 \text{ Kcal/KW.h}$	$2,8 \times 10^3 \text{ Kcal/t}$
Eficiência de recuperação de energia $\text{Nglobal} = (\text{dbgas} + \text{dTRT}) / (\text{dCR} + \text{dHS} + \text{dBV} + \text{dO}_2 + \text{dBm})$		73,1 %

Tabela 10 - Exemplo de um balanço energético de um alto forno operando com "coke rate" elevado (3).

Diez (5) com base no modelo desenvolvido por Rist e Maysson avaliou o efeito de alterações de algumas das variáveis operacionais no custo final do gusa, considerando um alto forno com produção diária de 6000 t de gusa; temperatura do ar soprado em 1150°C ; injeção de carvão de 180 kg/t e umidade ambiente de 12 g/Nm^3 .

O custo de energia considerado foi o da tabela 11 e o custo do gusa obtido está mostrado na figura 12.

CUSTO DE ENERGIA	UNIDADE	100 kg Carvão	180 kg Carvão	180 kg Carvão de baixa eficiência
Coque	\$/t	120	125	120
Carvão	\$/t	75	75	75
Eletricidade	\$/kWh	0,050	0,050	0,050
Oxigênio	\$/t	30,0	30,0	30,0
Gás de alto forno	\$/GJ	2,50	2,50	2,50

Tabela 11 - Custo de energia para diferentes qualidades do coque (6)

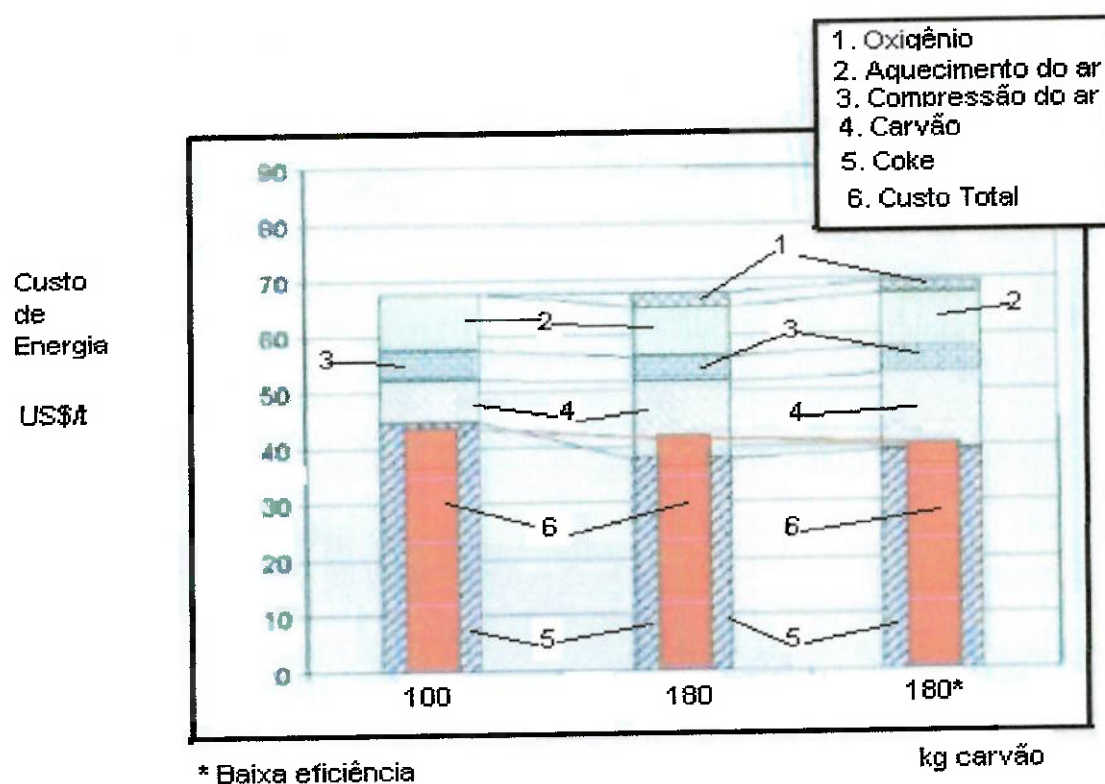


Figura 12 - Custo do gusa para duas qualidade de coque com diferentes preços (6)

Observa-se pela figura 12 que o aumenta de preço do coque de 120 para 125 \$/t, a elevação da taxa de injeção de carvão de 100 para 180 Kg/t permite uma redução

do custo do gusa de \$/t 43,54 para \$/t 41,93 sendo portanto interessante reduzir o coque rate e elevar a taxa de injeção.

Elevando o coque rate de 303 para 327 kg/t mantendo a taxa de injeção de carvão em 180 kg/t o dispêndio com o consumo de coque eleva de \$/t de 37,91 para \$/t 39,18 porém as melhoras na permeabilidade e descida de carga do alto forno, associada ao crédito da energia gerada por um gás mais rico no topo do alto forno permite uma redução do custo global do gusa para \$/t 40,51 . Essa prática é comum nas usinas do Japão quando o objetivo gerar mais energia elétrica.

5. ANÁLISE DOS DADOS OPERACIONAIS DA USINA

5.1. Apresentação e análise dos dados operacionais do alto forno nº2

O Alto Forno nº2 da COSIPA iniciou a 4ª Campanha operacional em 22/11/2001. Os períodos das campanhas anteriores são mostrados na tabela 12, abaixo:

CAMPANHA	PERÍODO	PRODUÇÃO (t)	PRODUTIVIDADE (t/m3)
1ª	24/07/1976 a 26/02/1982	8.172.923	3186,3
2ª	29/06/1982 a 01/04/1988	10.905.665	3429,4
3ª	15/06/1988 a 15/07/2001	26.968.324	8480,6
4ª	22/11/2001 a	16.798.130 (em 31/12/07)	4992,0

Tabela 12 - Períodos das campanhas do Alto Forno nº 2 da COSIPA

A figura 13 mostra de forma esquemática um alto forno e a tabela 13 as características básicas do alto forno nº2 da COSIPA na 4ª campanha.

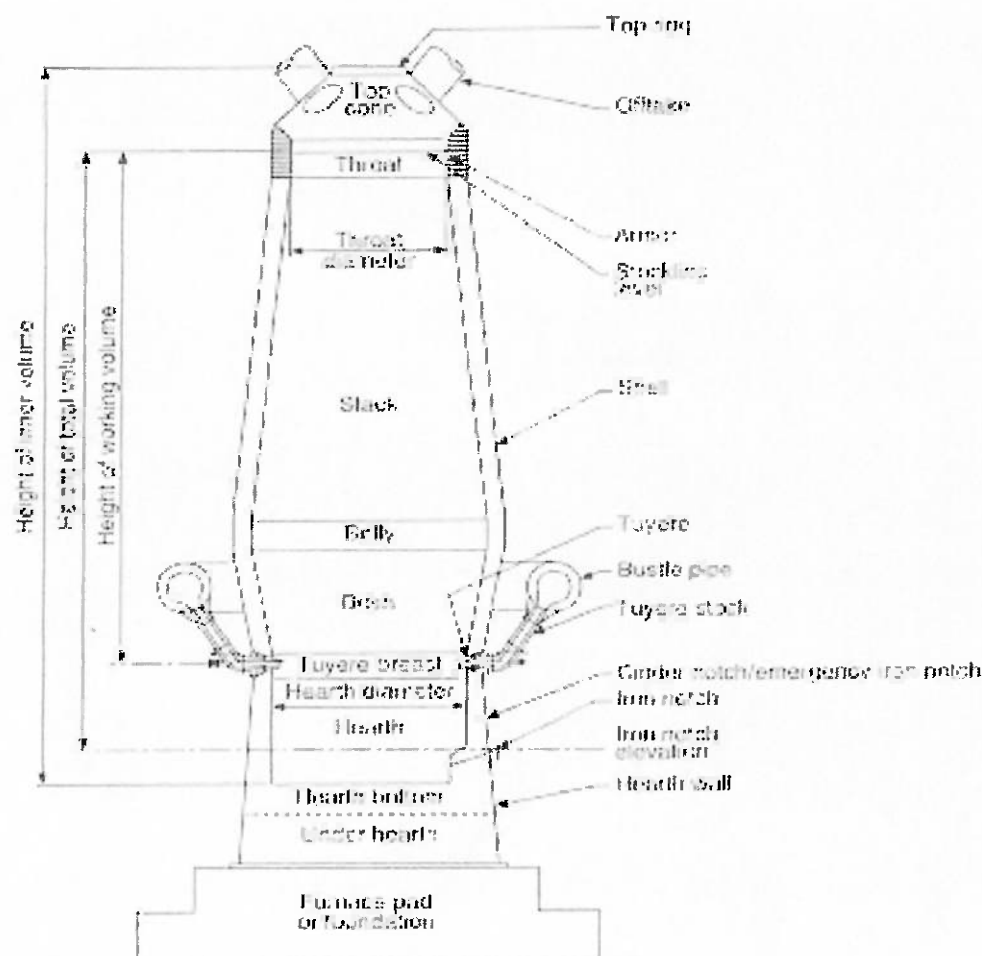


Figura 13: Ilustração esquemática de um alto forno (7), onde:

- Hearth: Cadinho
- Iron notch: Furo de gusa
- Tuyere: Ventaneira
- Bustle pipe: anel de vento
- Bosh: Rampa
- Belly: Ventre
- Stack: Cuba
- Throat: Goela
- Armor: Armadura móvel
- Top ring: Bleeder: Válvulas de alívio de pressão
- Working volume: Volume de trabalho
- Inner volume: volume interno

ÍTEM	DADOS
Volume interno (m ³)	3365
Volume de trabalho (m ³)	2865
Diâmetro do cadinho (m)	12,4
Diâmetro do ventre (m)	14,4
Altura do cadinho (m)	4,14
Sistema de carregamento	Correia transportadora - duplo cone
Equipamentos da limpeza dos gases: Tipo do Lavador	Duplo Venturi
Regeneradores (câmara de combustão)	Interna
Quantidade de regeneradores	04
Tipo de combustível dos regeneradores	Gás de coqueria e alto forno
Área de corrida - Número de furos de gusa	03
Número de ventaneiras	33
Tabela 13: Dados básicos do Alto Forno nº 2 da COSIPA - 4ª Campanha	

A produção anual de aço bruto da COSIPA em 2006 foi de 4.154.162 tab.

As participações dos altos fornos 1 e 2 no balanço energético da usina neste ano foi 52,2 % das 5878 Mcal/tab. O alto forno nº2 representou 35,4 % conforme são mostrados, respectivamente, na tabela e figura 14.

ESPECIFICAÇÃO	ENERGIA (%)
Altos Fornos	52,2
Sinterizações	11,6
Coquerias	11,1
Sub-Total	74,9
Aciaria	3,8
Lingotamento Contínuo	2,0
Sub-Total	5,8

Laminação a Quente	8,6
Laminação a Frio	2,9
Sub-Total	11,5
Sistema de Energia	2,2
Outros	1,7
Perdas	3,9

Tabela 14: Distribuição de energia na COSIPA em 2006.

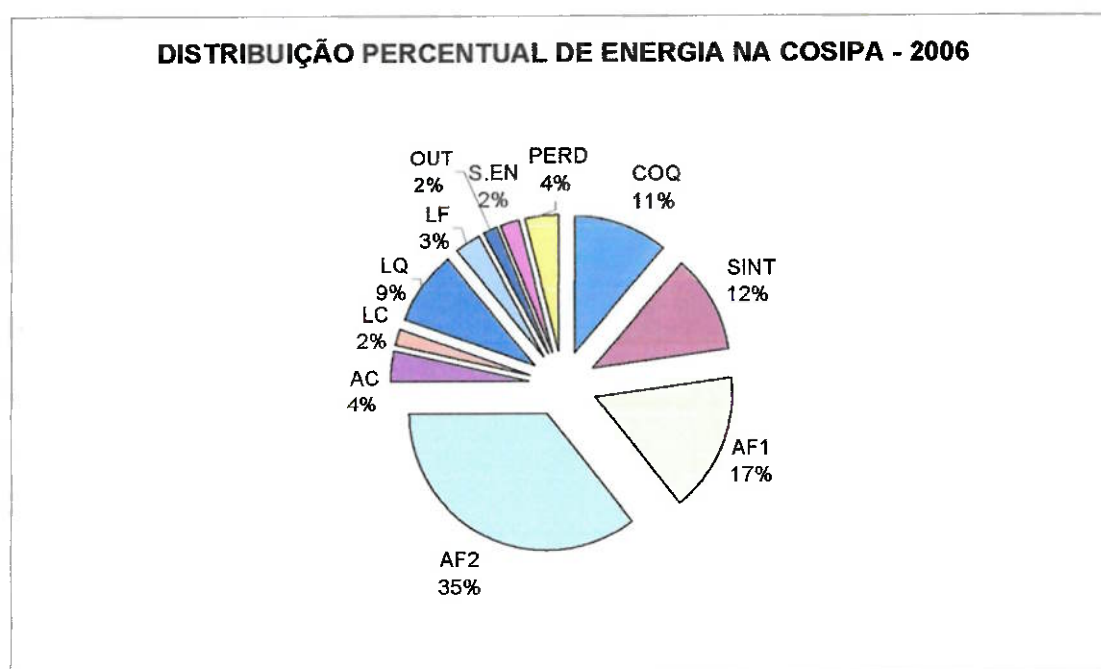


Figura 14: Distribuição percentual de energia na COSIPA em 2006.

O balanço energético do alto forno nº2 da COSIPA em 2006 foi de 2082 Mcal/tab sendo contabilizado como geração o gás de alto forno em 825 Mcal/tab e como consumo, o valor de 2908 Mcal/tab distribuídos conforme tabela 15.

COMBUSTÍVEIS	Mcal/tab	%
Coque	1673	57,5
Carvão de injeção	612	21,1
Gás de alto forno	158	5,4
Gás de coqueria	145	5,0
Gás natural	2	0,1
TOTAL	2590	89,1

UTILIDADES	Mcal/tab	%
Ar soprado	166	5,7
Oxigênio	49	1,7
Energia elétrica	48	1,7
Nitrogênio	29	1,0
Água	15	0,5
Vapor	9	0,2
Ar comprimido	2	0,1
TOTAL	318	10,9

Tabela 15: Distribuição da energia consumida no alto forno nº2 da COSIPA em 2006.

Com o aumento da disponibilidade de oxigênio após a 4ª reforma do alto forno nº2, iniciada em 22/11/2001, foi possível elevar os níveis de produção, consumo de oxigênio e redução do consumo de combustíveis conforme mostram respectivamente as figuras 15, 16, 17 e 18.

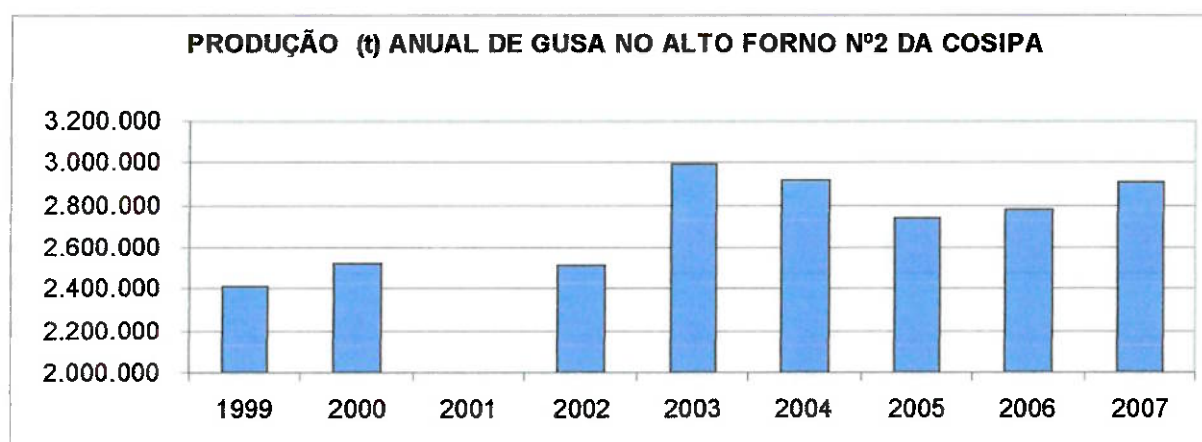


Figura 15 - Evolução da produção anual do alto forno nº2 da COSIPA

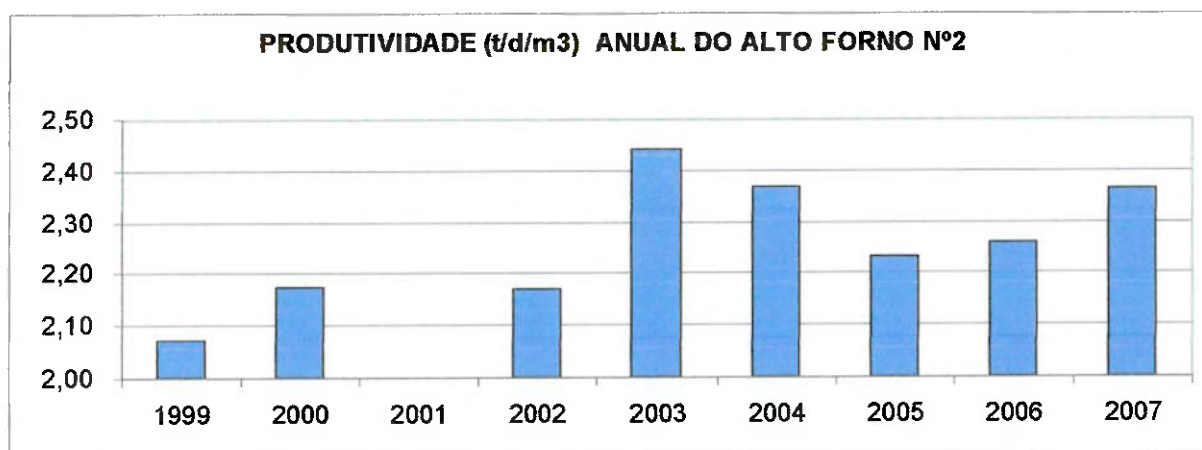


Figura 16 - Evolução da produtividade anual do alto forno nº2 da COSIPA

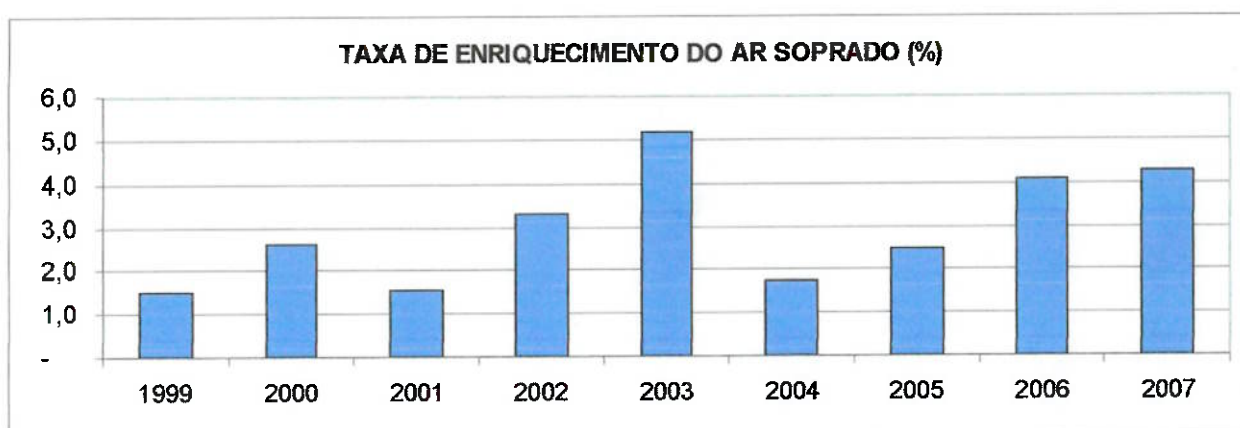


Figura 17 - Taxa de enriquecimento do oxigênio no ar soprado - Alto forno nº2 da COSIPA

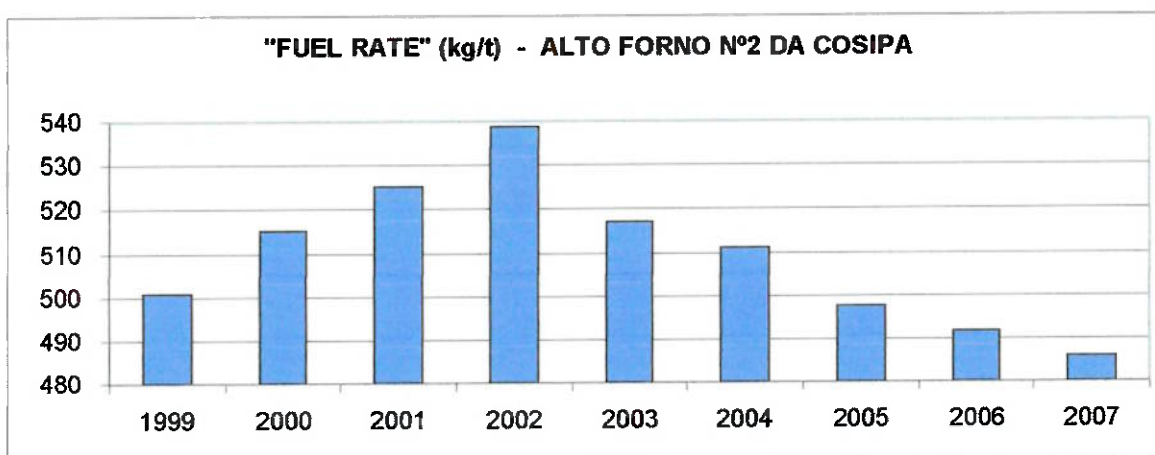


Figura 18 - Evolução do consumo total de combustíveis, Fuel rate, no alto forno nº2 da COSIPA

Após a reforma do alto forno até setembro/02 a operação do alto forno foi realizada com fuel rate elevado e produção limitada devido necessidades de ajustes em equipamentos e permeabilidade da carga ruim.

Entre outubro de 2002 a fevereiro de 2005 a elevação do drum index do coque aliado a necessidades de produção permitiram reduzir o consumo de combustíveis e alcançar vários recordes de produção e de consumo de combustíveis.

O ano de 2005 até junho/2006 foi caracterizado pelos elevados preços das matérias primas adquiridas, coque e pelota, degradação da qualidade do coque, drum index e elevação da carga térmica na parede do alto forno. Devido o preço das matérias primas a produção foi ajustada à quantidade de sinter disponível.

A partir de junho/2006 a produção foi ajustada às necessidades da usina.

A evolução do consumo de coque no alto forno nº2 são mostrados na figura 19 e as principais medidas adotadas para reduzir esse consumo foram:

- ✓ Injeções de combustíveis auxiliares
- ✓ Elevação da temperatura do ar soprado
- ✓ Redução da umidade do ar soprado
- ✓ Redução do volume de escória
- ✓ Melhorias na qualidade do coque
- ✓ Melhorias no blend de carvões de injeção

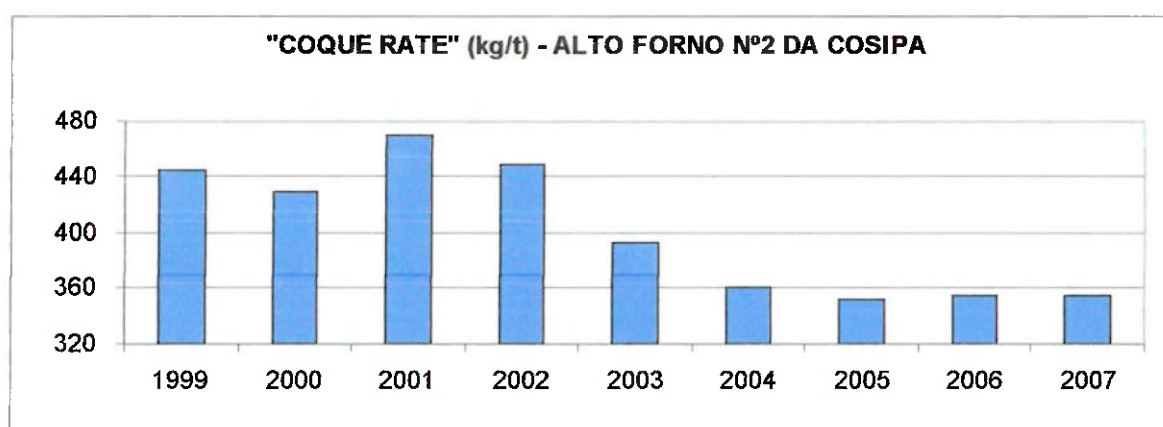


Figura 19 - Evolução do consumo de coque no alto forno nº2 da COSIPA

✓ Injeções de combustíveis auxiliares

Os combustíveis auxiliares usados durante as campanhas do alto forno nº2 são:

- Óleo: Usado na 2ª campanha do alto forno entre 1977 a 1981, sendo o recorde de consumo anual de 53 Kg/t em 1980.
- Gás natural: Usado durante a 3ª campanha entre 1995 a 1997, sendo o recorde mensal de 33 kg/t em julho de 1996.

As propriedades típicas do gás natural usado são mostradas na tabela 16.

PROPRIEDADE	UNIDADE	VALOR
CH ₄	%	86,90
C ₂ H ₆	%	6,72
C ₃ H ₈	%	2,76
C ₄ H ₁₀	%	0,89
C ₅ H ₁₂	%	0,18
N ₂	%	2,17
CO ₂	%	0,38
Poder calorífico inferior	Kcal/Nm ³	9363,50
Peso Específico	Kg/Nm ³	0,77

Tabela 16 - Propriedades do gás natural usado no alto forno nº2 da COSIPA

- Carvão Pulverizado: Iniciado a injeção no alto forno nº 2 em junho de 1998. O recorde anual e mensal de injeção foram 147,0 Kg/t (2004) e 155,1 kg/t (fev04).

As características típicas dos carvões usados são mostradas na tabela 17.

PROPRIEDADE/CARVÃO	ALTO VOLÁTIL	MÉDIO VOLÁTIL	BAIXO VOLÁTIL
MÁTERIA VOLÁTIL	35,22 - 36,33	23,1	8,06 - 20,19
CINZA	6,14 - 10,34	9,94	0,30 - 11,83
ENXOFRE	0,54 - 0,97	0,56	0,27 - 0,80
CARBONO	74,2 - 77,88	88,2	87,0 - 96,0
ÁLCALIS (K ₂ O+Na ₂ O)	0,59 - 2,31	1,49	1,49 - 2,28
P ₂ O ₅	0,20 - 0,44	0,71	0,66 - 1,17
PODER CALORÍFICO INFERIOR	7489 - 7957	8784	8527 - 9022
HGI	41,0 - 53,7	77,6	60,0 - 133,0

Tabela 17 - Características dos carvões de injeção usados no alto forno nº2 da COSIPA.

- Co-injeção: A injeção simultânea de carvão e gás natural teve início em outubro/2004 e o máximo injetado foi de 159,0 Kg/t em out/2005 (carvão = 147,3 e gás natural em 11,7 Kg/t).

As injeções auxiliares de carvão e gás natural no alto forno nº2 são mostradas respectivamente nas figuras 20 e 21.

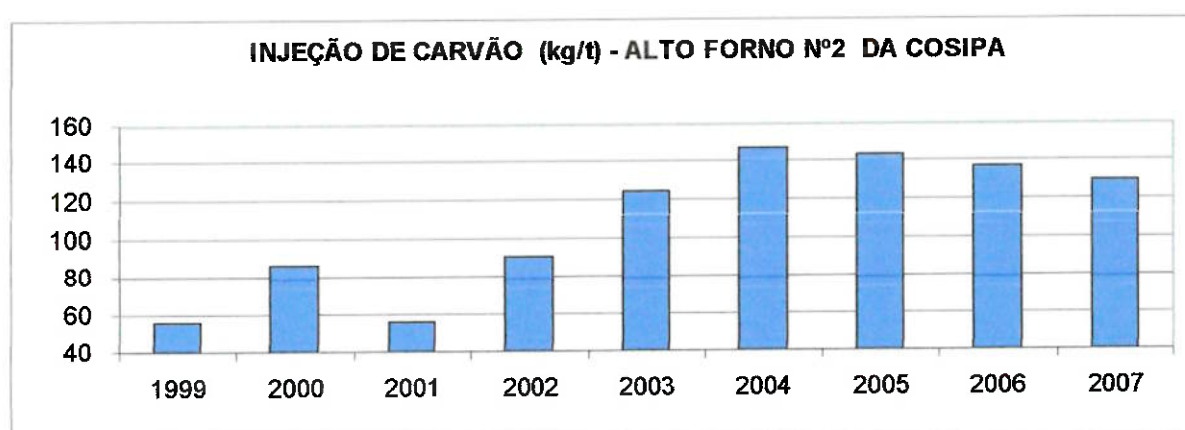


Figura 20 - Injeção de carvão no alto forno nº2 da COSIPA

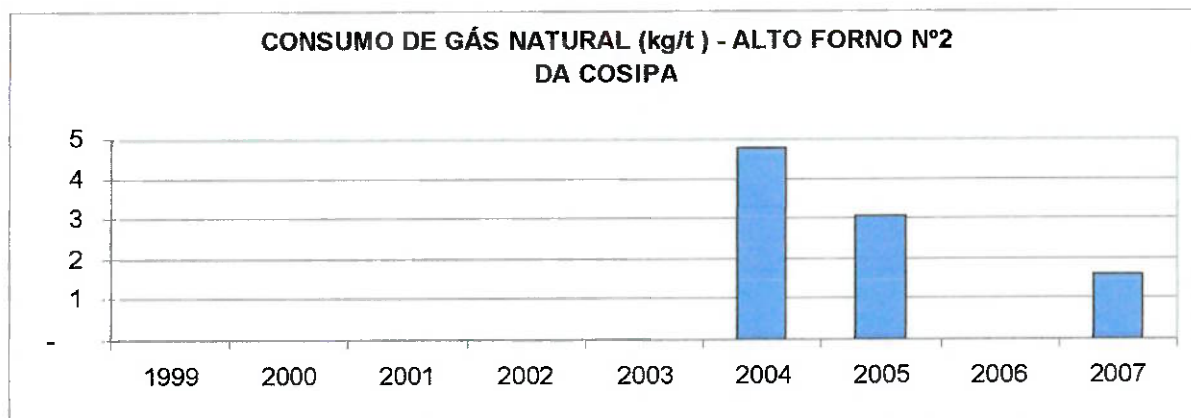


Figura 21 - Injeção de gás natural no alto forno nº2 da COSIPA

A partir de julho/06 a redução do consumo de carvão visou à diminuição da carga térmica na parede do alto forno. A injeção de gás natural tem sido usada para compensar essa redução da taxa de injeção de carvão e manter baixo o consumo de coque.

✓ Elevação da temperatura do ar soprado

A elevação da temperatura do ar soprado foi possível após a inclusão dos regeneradores, pré-aquecedores de ar, nos planos de reformas ocorridos durante a operação do alto forno. A queda da temperatura do ar soprado após julho/07 se deve a irregularidades em válvulas de controle do equipamento.

As figuras 22 a 25 mostram as evoluções da temperatura do ar soprado e o consumo de combustíveis nos regeneradores do alto forno nº2.

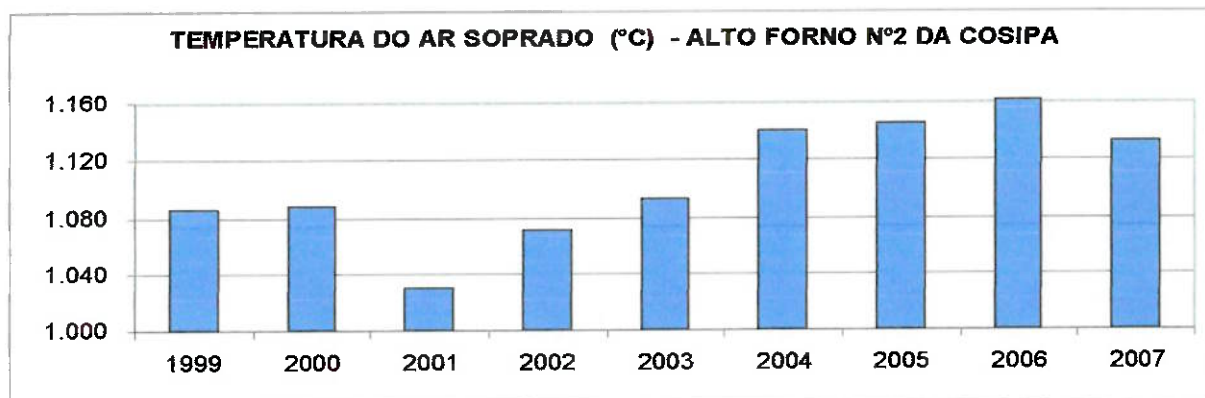


Figura 22 - Evolução da temperatura do ar soprado nos regeneradores do alto forno nº2 da COSIPA.

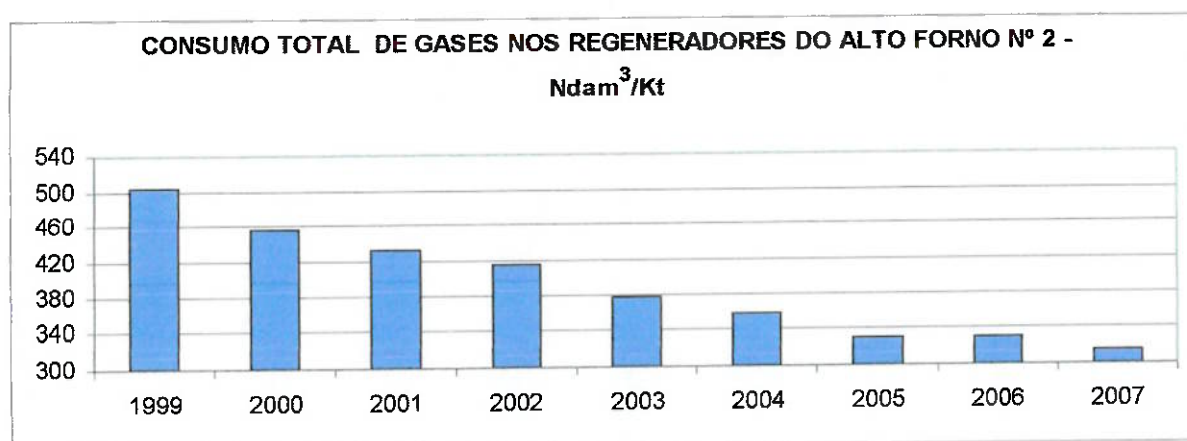


Figura 23 - Consumo total de gases (alto forno e coqueria) nos regeneradores do alto forno nº2 da COSIPA.

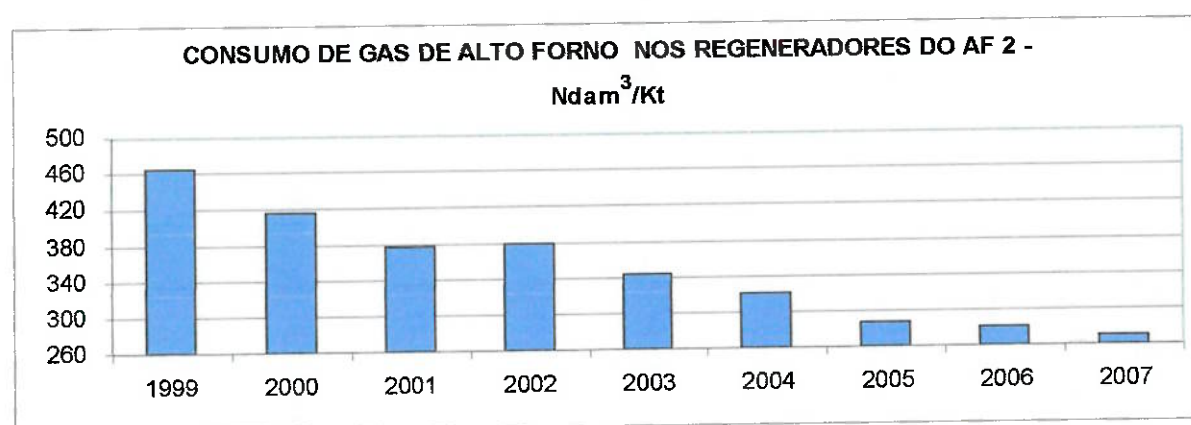


Figura 24 - Consumo de gás de alto forno nos regeneradores do alto forno nº2 da COSIPA.

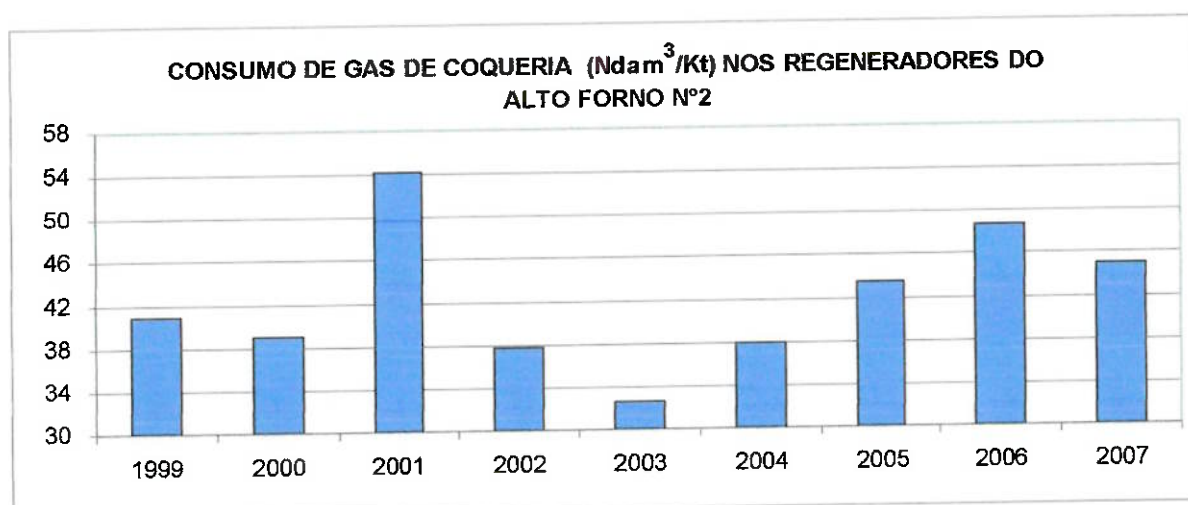


Figura 25 - Consumos de gás de coqueria nos regeneradores do alto forno nº2 da COSIPA

✓ Redução da umidade do ar soprado

A partir de 2004 o controle térmico do alto forno passou a ser realizado através da atuação na injeção dos combustíveis auxiliares visando trabalhar com o mínimo de injeção de umidade no ar soprado, como mostra a figura 26.

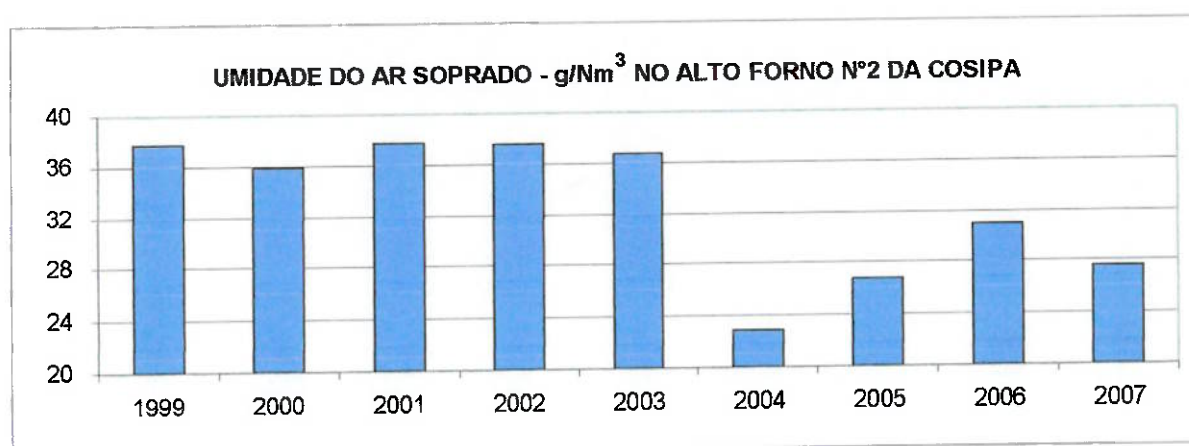


Figura 26 - Evolução da utilização de umidade no ar soprado no alto forno nº2 da COSIPA.

✓ Redução do volume de escória

Foi uma prática adotada após junho/02 até julho/05, período em que a elevação do preço da carga metálica adquirida, bolas e a necessidade de elevação da percentagem de minério granulado no alto forno de 21 para 25% dificultaram o ajuste da qualidade do sinter para atendimento desse item até julho/06. A figura 27 mostra a evolução do volume de escória do alto forno nº2 da COSIPA.



Figura 27 - Evolução do volume de escória do alto forno nº2 da COSIPA.

✓ Melhorias na qualidade do coque

Medidas têm sido adotadas visando melhorar a qualidade do coque, especialmente o drum index que afeta a permeabilidade da carga no alto forno. No período de 2005 a julho/06 esse índice foi afetado pela disponibilidade de carvões adquiridos. As figuras 28 e 29 mostram respectivamente a evolução do drum index do coque produzido na COSIPA e o índice de resistência a passagem de gases dentro do alto forno.

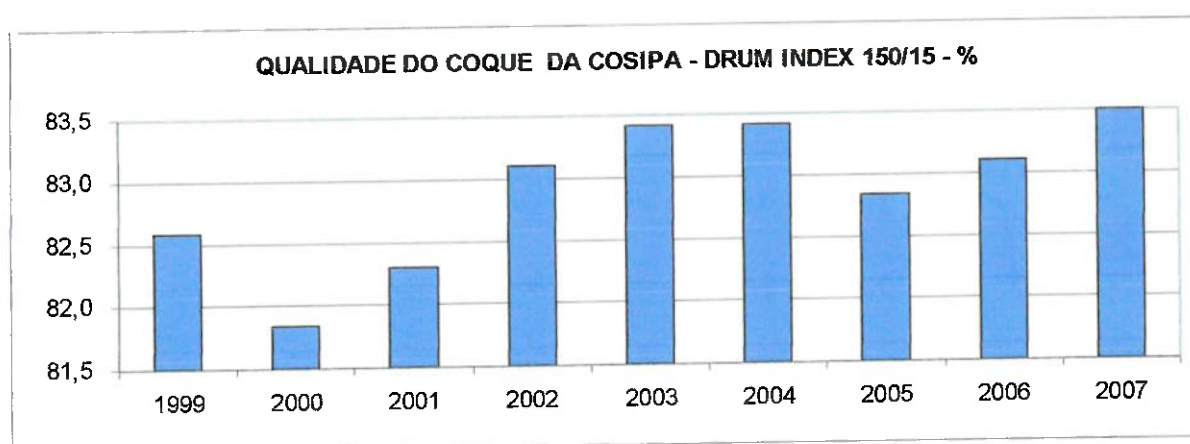


Figura 28 - Evolução da qualidade do coque produzido na COSIPA

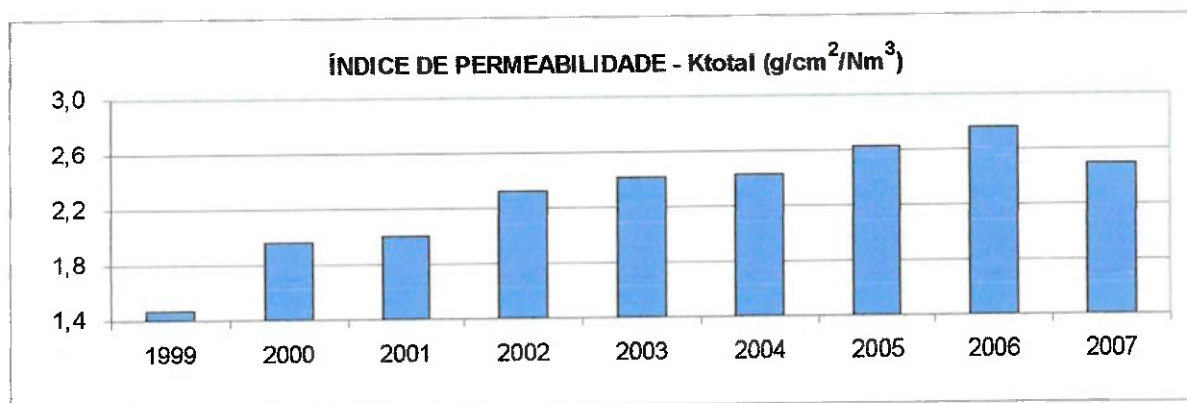


Figura 29 - Índice de resistência a passagem de gases. Alto forno nº2 da COSIPA.

✓ Melhorias no blend de carvões de injeção

Com a disponibilidade de silos de carvões foi possível aperfeiçoarem as blendagens de carvões a serem injetadas nos altos fornos de modo a elevar as taxas de substituições do carvão/coque e poder calorífico das misturas.

5.2. Sistema de avaliação de custo - Metodologia

O sistema de avaliação de custos buscou a conversão de parâmetros operacionais em parâmetros econômicos a partir de condições padrões pré-estabelecidas.

Com base no balanço energético do alto forno nº2 da COSIPA em 2006 está sendo considerado na avaliação de custos o consumo de combustíveis, coque, carvão e gás natural que representaram 78,7 % da energia consumida. Os consumos de combustíveis nos regeneradores que representaram 10,4 % da energia consumida estão sendo avaliados em termos de temperatura do ar soprado e para as utilidades ar soprado e oxigênio consumido que representaram 7,4 % da energia consumida, juntamente com a umidade do ar soprado serão analisados e considerados com parâmetros de ajustes operacionais, como ritmo de produção, temperatura de chama, volume de gás produzido (crédito).

O Sistema de avaliação de custos desenvolvido em planilha Excel, num primeiro momento, não leva em consideração o efeito da carga metálica no consumo de combustíveis do alto forno.

O Sistema de avaliação de custos foi desenvolvido considerando os seguintes itens:

- ✓ Premissas: Valores adotados como prática operacional no alto forno n°2, como taxas de substituições coque/carvão, gás natural/coque, densidade do gás natural e equivalência temperatura do ar soprado/coque rate
- ✓ Preços dos componentes, combustíveis e/ou utilidades, considerados quando utilizados no alto forno
- ✓ Alterações: Valores a serem considerados na simulação
- ✓ Cálculos: Resultados gerados com os dados de entrada, como produção, fuel rate, consumo específico de oxigênio e desvio diário no custo devido a variações para cada componente
- ✓ Limitações técnicas: Comparativo entre valores viáveis operacionalmente (META), com valores simulados, resultados de cálculos adotando equações usadas no alto forno n° 2.

5. CONCLUSÕES

O modelo desenvolvido para simular os efeitos de alterações nas variáveis operacionais do alto forno, parâmetros dos combustíveis consumidos (preço e/ou taxas de injeção) apesar da simplicidade, se mostram plenamente capazes de prever o impacto no custo final de produção do gusa.

As práticas operacionais adotadas pelo alto forno nº2 da COSIPA para elevação da produtividade e redução do “coke” rate são semelhantes às adotadas por outros altos fornos de acordo com pesquisa realizada.

A redução da taxa de injeção de carvão a partir de julho/2006 para os níveis de 130 kg/t devido elevação da carga térmica na parede do alto forno perde um potencial de redução de custo do gusa produzido, exigindo portanto, que um estudo mais aprofundado seja realizado visando minimizar essa anormalidade.

O efeito da carga metálica no consumo de combustíveis dos altos fornos não foram considerados nesse primeiro momento, sendo interessante avaliar essa inclusão no modelo de simulação de custos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MORAES, R.L. **Altos-fornos brasileiros: matriz energética.** In: SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES - ABM, 21, 1999, Vitória. Seminário de Energia. São Paulo: ABM, 1999. p.109-119
2. IWAMURA, Eiro. **Energy needs in the large blast furnace.** 1971. s.p. Kawasaki Steel, 4 (12)).
3. SAWADA, T., et al. /Melhoria da taxa de recuperação de coque no processo de alto-forno/ **Improvement of coke recovery ratio in blast furnace process.** Kawasaki Steel Technical Report, n.13, p.157-166, Sept. 1985
4. HARU, T., KURIHARA, J. **Energy saving in blast furnace operation.** Steel Times, v.210, n.7, p.369-373, July 1982
5. AGARWAL, J.C., et al. **A model for economic comparison of natural gas, oil and coal injection in the blast furnace.** In: IRONMAKING CONFERENCE, 51, 1992, Toronto, 1992. p.609-615.
6. TYNELIUS-DIEZ, K.T., et al. **Optimising the blast furnace energy balance.** Steel Times, v.228, n.5, p.178-180, May 2000
7. WAKELIN, D.H.. **The making, shaping and treating of steel: ironmaking.** 11 ed. Warrendale: ASSOCIATION FOR IRON & STEEL TECHNOLOGY, 1999. 811 p.
8. FIGUEIRA, R.M., NICÁCIO, P.A.D. **Desenvolvimento de um sistema integrado de avaliação de custo para uma Menem usina integrada.** In: SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS - ABM, 30, 1999, Belo Horizonte, 1999. p.531-542.
9. QUITES, E.E.C. **Seis anos de operação do alto forno 2: Evolução do fuel rate.** In: SEMINÁRIO INTERNO DA REDUÇÃO – COSIPA, 25, Cubatão, novembro 2007. 60 p.

MATRIZ ENERGÉTICA DO ALTO FORNO N° 2 DA COSIPA

ESTIMATIVAS DE CUSTOS - ECONOMIA DIÁRIA

R\$/d : 21.212,59

SIMULAÇÃO: ELEVAÇÃO DE 10 KG/T NA INJEÇÃO DE CARVÃO E REDUÇÃO DE 8,5 kg/t NO CONSUMO DE COQUE, VARIANDO A PRODUÇÃO DE GUSA

COMPONENTE	ALTERAÇÕES			CONTRIBUIÇÕES INDIVIDUAIS: R\$/d		
	UNIDADE	PADRÃO	SIMULAÇÃO	VARIAÇÃO	PADRÃO	DESVIO
PRODUÇÃO DE GUSA - CALCULADA	t	8432	8392	-40,6	4.047.417,98	4.027.927,06
COQUE METALÚRGICO + SMALL COQUE	Kg/t	380,0	351,5	-8,5	1.214.225,39	(19.490,92)
INJEÇÃO DE CARVÃO	Kg/t	130	140,0	10,0	(87.694,06)	34.378,43
GÁS NATURAL	Kg/t	5,0	5,0	0,0	7.096,12	6.290,91
VAZÃO DE AR SOPRADO	Nm3/min	5000	5000	0	178.272,00	7.061,96
VAZÃO DE OXIGÊNIO TOTAL	Nm3/h	20000	20000	0	92.721,60	178.272,00
UNIDADE DO AR	g/Nm3	30	30	0	15.780,96	92.721,60
TEMPERATURA DO AR SOPRADO	°C	1150	1150	0	-	15.780,96
VGT - VOLUME DE GÁS NO TOPO	Nm3/min	8265	8265	0	607.005,39	-
FUEL RATE	kg/t	495,0	496,5	1,5	-	-

PREMISSAS

* TAXA DE SUBSTITUIÇÃO CARVÃO/COQUE	0,85
* TAXA DE SUBSTITUIÇÃO GÁS NATURAL/COQUE	1,30
* DENSIDADE DO GÁS NATURAL: t/ndam3	0,77
* INJEÇÃO CARVÃO - AR TRANSPORTE (Nm3/h):	2800
* GÁS NATURAL - LANÇAS COM INJEÇÃO	4

* CONSUMO ESPECÍFICO DE OXIGÊNIO = O2espec
= 0,7621 * FUEL RATE - 141 [Nm3/t]

LIMITAÇÕES TÉCNICAS

UNIDADE	PADRÃO	SIMULAÇÃO	META
VGR: VOLUME DE GÁS DE RAMPA	Nm3/min	7158	7169
TCHAMA: TEMPERATURA TEÓRICA DE CHAMA	°C	2207	2174
TAXA ENRIQUECIMENTO DE OXIGÊNIO	%	4,9	4,9

MATRIZ ENERGÉTICA DO ALTO FORNO N° 2 DA COSIPA

ESTIMATIVAS DE CUSTOS - ECONOMIA DIÁRIA

R\$/d : 34.228,40

SIMULAÇÃO: ELEVAÇÃO DE 10 KG/T NA INJEÇÃO DE CARVÃO E REDUÇÃO DE 8,5 kg/t NO CONSUMO DE COQUE, MANTENDO A PRODUÇÃO DE GUSA

COMPONENTE	ALTERAÇÕES		
	UNIDADE	PADRÃO	SIMULAÇÃO
PRODUÇÃO DE GUSA - CALCULADA	t	8432	8432
COQUE METALÚRGICO + SMALL COQUE	Kg/t	360,0	351,5
INJEÇÃO DE CARVÃO	Kg/t	130,0	140,0
GÁS NATURAL	Kg/t	5,0	5,0
VAZÃO DE AR SOPRADO	Nm3/min	5000	5032
VAZÃO DE OXIGÊNIO TOTAL	Nm3/h	20000	20000
UNIDADE DO AR	g/Nm3	30	30
TEMPERATURA DO AR SOPRADO	°C	1150	1150
VG-T - VOLUME DE GÁS NO TOPO	Nm3/min	8265	8311

PREÇO	
UNIDADE	R\$/UN
t	480,0
t	400,00
t	260,00
Nm3	0,53
NDC	24,76
NDC	193,17
t	73,06
-	-
Nm3	0,051

CONTRIBUIÇÕES INDIVIDUAIS: R\$/d		
PADRÃO	SIMULAÇÃO	DESVIO
4.047.417,98	4.047.494,05	76,07
1.214.226,39	1.185.578,47	28.646,93
(87.694,06)	(94.441,53)	6.747,47
7.096,12	7.096,26	(0,13)
178.272,00	179.412,94	(1.140,94)
92.721,60	92.721,60	-
15.780,96	15.881,96	(101,00)
-	-	-
607.005,39	610.358,96	3.353,56

FUEL RATE	kg/t	495,0	496,5	1,5
-----------	------	-------	-------	-----

PREMISSAS

* TAXA DE SUBSTITUIÇÃO CARVÃO/COQUE	0,85
* TAXA DE SUBSTITUIÇÃO GÁS NATURAL/COQUE	1,30
* DENSIDADE DO GÁS NATURAL: t/Ndam3	0,77
* INJEÇÃO CARVÃO - AR TRANSPORTE (Nm3/h):	2800
* GÁS NATURAL - LANÇAS COM INJEÇÃO	4

LIMITAÇÕES TÉCNICAS

VGR: VOLUME DE GÁS DE RAMPA	UNIDADE	PADRÃO	SIMULAÇÃO	META
TCHAMA: TEMPERATURA TÉORICA DE CHAMA	Nm3/min	7158	7210	< 8000
TAXA ENRIQUECIMENTO DE OXIGÊNIO	°C	2207	2173	1950 - 2200
	%	4,9	4,9	< 7,0

* CONSUMO ESPECÍFICO DE OXIGÊNIO = O2espec
= 0,7621 * FUEL RATE - 141 [Nm3/t]
* PRODUÇÃO DIÁRIA DE GUSA (t)
= (VZAR*0,21*60 + VZ OXIGÊNIO) *24/O2espec