



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**"ANÁLISE EXERGÉTICA DE UMA USINA SIDERÚRGICA**  
**INTEGRADA"**

**ÂNGELA MARA DA SILVA CUNHA**

Belo Horizonte, 29 de maio de 2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

ÂNGELA MARA DA SILVA CUNHA

**"ANÁLISE EXERGÉTICA DE UMA USINA SIDERÚRGICA  
INTEGRADA"**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Calor Fluidos

Orientador(a): Prof. Dr. Roberto Márcio de Andrade

Universidade Federal de Minas Gerais

Co-orientador(a): Prof. Dr. Geraldo Augusto  
Campolina França

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus por mais uma vez ter me permitido chegar até o fim.

Aos meus pais, pela mão estendida, pela eterna acolhida, pelo apoio sem fim, desde o primário até aqui.

Ao Gu, a Lu, a Gegê e ao Iguinho por simplesmente existirem na minha vida e me incentivarem a caminhar.

Ao Thiago por encher de luz a minha vida, por tornar os dias mais leves e a batalha válida.

Aos professores Roberto Márcio e Geraldo Campolina pela orientação, pelo apoio e exemplo.

À Ângela Menin pela parceria fácil e produtiva, pela amizade, disponibilidade, paciência e confiança.

Ao Guilherme e à empresa por acreditarem e apoiarem.

Aos amigos queridos - Fabi, Tânia, Virnoca, Marina, Elaine, Fernando, Denis, Sinthya - por entenderem a ausência e pelo apoio constante.

À Lu Lisboa por mesmo longe, estar tão perto

À todos aqueles que contribuíram para a realização desse estudo, em especial aos colegas de trabalho pelas informações valiosas, pela ajuda, por entenderem a importância e apostarem nos resultados, Albertim, Haysler, Abel, Ledilson, Egídio, José Luiz, Marcelo Dutra, Denis, Willian Antoniol, Filipe Morgan, Ely, Gamboa, Tales e todos os outros sem os quais esse trabalho não poderia ser concluído.

Meus sinceros agradecimentos.

A minha avó Maria,  
que sabia, verdadeiramente, ver estrelas.

## SUMÁRIO

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| AGRADECIMENTOS.....                                       | 3  |
| LISTA DE GRÁFICOS .....                                   | 7  |
| LISTA DE FIGURAS.....                                     | 8  |
| LISTA DE TABELAS E QUADROS .....                          | 9  |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....                       | 11 |
| RESUMO .....                                              | 14 |
| ABSTRACT .....                                            | 15 |
| 1 INTRODUÇÃO.....                                         | 16 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                             | 18 |
| 2.1. Evolução da siderurgia nacional .....                | 18 |
| 2.2. Disponibilidade de Energia.....                      | 20 |
| 2.3 Análise de Exergética.....                            | 25 |
| 2.3.1 Tipos de Exergia.....                               | 28 |
| 2.3.2 Exergia associada com a transferência de calor..... | 28 |
| 2.3.3 Exergias Cinética e Potencial.....                  | 30 |
| 2.3.4 Exergia Física.....                                 | 30 |
| 2.3.5 Exergia Química.....                                | 31 |
| 2.3.6 Irreversibilidade .....                             | 32 |
| 2.3.7. Balanço Exergético – Sistemas Abertos.....         | 34 |
| 2.3.8 Eficiência Exergética.....                          | 36 |
| 3. METODOLOGIA.....                                       | 37 |
| 3.1 Balanço de Massa.....                                 | 40 |
| 3.2 Balanço de Energia.....                               | 44 |
| 3.3 Balanço de Exergia.....                               | 47 |
| 4 RESULTADOS .....                                        | 50 |
| 4.1 Balanço de Massa.....                                 | 50 |
| 4.2 Balanço de massa - Águas .....                        | 55 |
| 4.3 Balanço de Energia.....                               | 57 |
| 4.4 Balanço de Exergia.....                               | 62 |
| 5. CONCLUSÕES .....                                       | 69 |
| 6. PROPOSTA DE CONTINUIDADE .....                         | 72 |

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 73 |
| 8 ANEXOS.....                      | 77 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|             |                                                                                    |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| GRÁFICO 2.1 | Evolução da Produção Nacional de Aço                                               | 19 |
| GRÁFICO 2.2 | Colocação mundial da produção de aço bruto mundial - 2007                          | 20 |
| GRÁFICO 2.3 | Evolução da Participação do Consumo de EE por setor no total Brasil – 1970 a 2006. | 21 |
| GRÁFICO 2.4 | Balanço Energético Nacional 2008 – Ano Base 2007                                   | 21 |
| GRÁFICO 2.5 | Crescimento anual de abastecimento de energia                                      | 22 |
| GRÁFICO 2.6 | Faixas de eficiências exergéticas para usinas siderúrgicas.                        | 27 |
| GRÁFICO 4.1 | Contribuição de Energia por insumo na entrada do volume de controle global         | 57 |
| GRÁFICO 4.2 | Contribuição de Energia por produto na saída do volume de controle global          | 59 |



## LISTA DE FIGURAS

|            |                                                          |    |
|------------|----------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.1 | Tipos de Exergia                                         | 28 |
| FIGURA 2.2 | Sistema Fechado                                          | 29 |
| FIGURA 2.3 | Sistema Aberto                                           | 35 |
| FIGURA 3.1 | Esquema de uma Usina Siderúrgica Integrada               | 38 |
| FIGURA 3.2 | Conjunto de insumos, energéticos e produtos da usina     | 39 |
| FIGURA 3.3 | Balanço de Massa                                         | 42 |
| FIGURA 3.4 | Balanço de Massa para a água                             | 43 |
| FIGURA 3.5 | Conservação de Energia para um volume de controle.       | 44 |
| FIGURA 3.6 | Balanço de Energia                                       | 45 |
| FIGURA 4.1 | Balanço de Massa VC1 ( valores em t / t de aço líquido ) | 51 |
| FIGURA 4.2 | Balanço de Energia – Diagrama de Sankey                  | 61 |
| FIGURA 4.4 | Diagrama de Grassmann                                    | 68 |

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

|            |                                                                                                    |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 2.1 | Auto Geração de Energia Elétrica no setor Industrial                                               | 23 |
| TABELA 2.2 | Auto-geração de Energia Elétrica – Evolução da Auto Produção Total e Setorial, Brasil 1994 a 2006. | 24 |
| TABELA 2.3 | Rendimentos pela 2ª Lei da Termodinâmica no uso de energia elétrica                                | 26 |
| TABELA 2.4 | Perdas de Exergia                                                                                  | 34 |
| TABELA 3.1 | Correção volumétrica para os gases.                                                                | 45 |
| TABELA 3.2 | Composição química dos gases combustíveis                                                          | 46 |
| TABELA 4.1 | Balanço de Massa VC1                                                                               | 53 |
| TABELA 4.2 | Balanço de Massa VC2                                                                               | 53 |
| TABELA 4.3 | Balanço de Carbono                                                                                 | 54 |
| TABELA 4.4 | Balanço de Massa Global                                                                            | 54 |
| TABELA 4.5 | Desvios entre entradas e saídas                                                                    | 55 |
| TABELA 4.6 | Balanço de massa – Águas                                                                           | 55 |
| TABELA 4.7 | Balanço de Energia - Entrada                                                                       | 57 |
| TABELA 4.8 | Balanço de Energia - Saída                                                                         | 58 |

|             |                                           |    |
|-------------|-------------------------------------------|----|
| TABELA 4.9  | Exergia química dos gases combustíveis    | 62 |
| TABELA 4.10 | Exergia física dos gases combustíveis     | 62 |
| TABELA 4.11 | Exergia química dos produtos de combustão | 63 |
| TABELA 4.12 | Exergia física dos produtos de combustão  | 63 |
| TABELA 4.13 | Balanço de Exergia VC 2                   | 64 |
| TABELA 4.14 | Balanço de Exergia VC 1 - Entrada         | 65 |
| TABELA 4.15 | Balanço de Exergia VC 1 - Saída           | 65 |
| TABELA 4.15 | Balanço de Exergia Global                 | 66 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                     |                                                      |
|---------------------|------------------------------------------------------|
| <b><i>BNDES</i></b> | Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social |
| <b><i>CEMIG</i></b> | Companhia Energética de Minas Gerais                 |
| <b><i>EPE</i></b>   | Empresa de Pesquisa Energética                       |
| <b><i>EE</i></b>    | Energia Elétrica                                     |
| <b><i>ETA</i></b>   | Estação de Tratamento de Água                        |
| <b><i>IISI</i></b>  | International Iron and Steel Institute               |
| <b><i>MME</i></b>   | Ministério de Minas e Energia                        |
| <b><i>GAC</i></b>   | Gás de Aciaria                                       |
| <b><i>GAF</i></b>   | Gás de Alto Forno                                    |
| <b><i>GCO</i></b>   | Gás de Coqueria                                      |
| <b><i>GN</i></b>    | Gás Natural                                          |
| <b><i>PCH's</i></b> | Pequenas Centrais Hidrelétricas                      |
| <b><i>PCI</i></b>   | Poder Calorífico Inferior                            |
| <b><i>VC1</i></b>   | Volume de Controle 1                                 |
| <b><i>VC2</i></b>   | Volume de Controle 2                                 |

## NOTAÇÃO

|             |                                                           |                  |
|-------------|-----------------------------------------------------------|------------------|
| $b_{cha}$   | exergia química das cinzas presentes no combustível       | kJ/kg            |
| $b^{chS}$   | exergia química do enxofre                                | kJ/kg            |
| $b_{chw}$   | exergia química da água presente no combustível.          | kJ/kg            |
| $c_{p,i}$   | calor específico de cada componente da mistura de gases   | kJ/kg.K          |
| $C_I$       | poder calorífico inferior do carvão                       | kJ/kg            |
| $C^S$       | poder calorífico superior do carvão                       | kJ/kg            |
| $E_c$       | energia cinética                                          | kJ/kg            |
| $E_p$       | energia potencial                                         | kJ/kg            |
| $\dot{E}^Q$ | exergia associada à transferência de calor                | kJ/kg            |
| $E_{vc}$    | energia no volume de controle em um intervalo de tempo t. | kJ/kg            |
| $g_E$       | aceleração da gravidade                                   | m/s <sup>2</sup> |
| h           | entalpia                                                  | kJ/kg            |
| I           | irreversibilidade                                         | kW               |
| $\dot{m}$   | taxa de fluxo de massa                                    | kg/s             |
| $m_e$       | vazão de entrada                                          | kg/s             |
| $m_s$       | vazão de saída                                            | kg/s             |
| $L^{zw}$    | entalpia de vaporização da água                           | kJ/kg            |
| $P$         | pressão                                                   | kPa              |
| $P_c$       | pressão crítica                                           | kPa              |
| $\dot{Q}$   | taxas de energia na forma de calor transferido            | kJ/s             |
| $\tilde{R}$ | constante universal dos gases.                            | kJ/kmol.K        |
| S           | entropia                                                  | kJ/kg.K          |
| $T_0$       | temperatura na qual a mistura é fornecida ao processo     | K                |
| $T_0$       | temperatura ambiente                                      | K                |

|                         |                                                                         |     |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| $V_0$                   | velocidade                                                              | m/s |
| $T$                     | temperatura na qual o gás se encontra                                   | K   |
| $T_c$                   | temperatura crítica do gás                                              | K   |
| $T_r$                   | temperatura reduzida                                                    | K   |
| $T_{ref}$               | temperatura de referência, do sistema de controle.                      | K   |
| $x_i$                   | fração molar dos constituintes da mistura.                              |     |
| $Z_0$                   | cota                                                                    | M   |
| $z_w$                   | fração mássica da água no combustível                                   |     |
| $z_s$                   | fração mássica de enxofre no combustível                                |     |
| $z_a$                   | fração mássica das cinzas no combustível                                |     |
| $z_{H_2}$               | frações mássicas do $H_2$                                               |     |
| $z_C$                   | fração mássica do C                                                     |     |
| $z_{N_2}$               | fração mássica do $O_2$                                                 |     |
| $z_{O_2}$               | fração mássica do $N_2$                                                 |     |
| $W_{rev}$               | trabalho reversível                                                     | kW  |
| $W_{v.c}$               | trabalho real                                                           | kW  |
| $\dot{W}$               | taxa de trabalho potencial através das fronteiras do volume de controle | kW  |
| Letras gregas           |                                                                         |     |
| $\tilde{\epsilon}_{0i}$ | exergia química padrão de cada componente da mistura                    |     |
| $v$                     | volume específico corrigido                                             |     |
| $\tau$                  | eficiência de Carnot                                                    |     |

## RESUMO

As usinas siderúrgicas brasileiras se confrontam com um mercado cada vez mais competitivo, o que as obriga a buscar pela redução dos seus custos de produção através do aumento da eficiência de seus processos e ampliação do reaproveitamento de seus rejeitos. Dentro desse cenário, as empresas realizam, frequentemente, balanços energéticos a fim de conhecer e controlar as quantidades de energia por elas consumidas. Porém, balanços de energia consideram apenas o aspecto quantitativo das energias envolvidas, não tratam da qualidade da energia, da parcela da energia realmente disponível. A parcela de energia que pode ser transformada, sem restrições, em qualquer forma de energia é chamada exergia. A máxima quantidade de trabalho que pode vir a ser fornecida por um fluido ou sistema é fornecida pelo cálculo da exergia do sistema. A análise exérgica é uma metodologia que permite identificar os pontos do processo onde existem os maiores potenciais de recuperação e produção de trabalho, sendo amplamente utilizada para a avaliação de diversos processos industriais. Nesse trabalho são apresentados os balanços de massa, de energia e de exergia de uma usina siderúrgica integrada típica. Usando-se a Primeira e a Segunda Lei da Termodinâmica foram determinadas as energias e exergias de cada um dos insumos necessários à produção do aço, assim como dos energéticos, consumidos durante o processo e dos produtos e resíduos gerados. A planta siderúrgica foi tratada como um volume de controle único, sendo as fronteiras estabelecidas a partir de todo o material adquirido que entra na unidade, assim como, pelos volumes totais de produtos, resíduos ou emissões que deixam a usina. Foi considerado o fluxo de materiais referentes a um ano de produção dessa empresa. Os resultados encontrados permitiram a identificação de potenciais para a implantação de melhorias, a fim de se aumentar as eficiências, assim como o reconhecimento de setores ou processos onde a reutilização da energia se mostra bastante viável (recuperação de energia pelo reaproveitamento de calor na coqueria, aquecimento de água com o calor dos gases exaustos na sínter, aproveitamento da energia dos gases queimados originados nos diversos processos de combustão, etc). Tais fatores poderão trazer ganhos de competitividade à empresa em meio à grande demanda mundial por energia e melhor tratamento de rejeitos.

**Palavras Chaves:** *(energia, siderurgia, balanço energético, balanço exérgico)*

## ABSTRACT

The Brazilian steel plants are in competitive market and need to look for alternative ways that be possible to save cost of production, with efficient improvements in their process, and recycling of rejected materials. In this scenario the companies usually make their energy balances to control all the quantity of energy consumed.. However, energy balances do not take into account the quality of energy, the real available energy. The part of energy that can be changed in another is called exergy. The most of work supplied by a system or fluid can be well known for the exergy calculation. The exergy analysis is an important methodology to identify points of a process where can find the biggest potentials to get improvements and energy recovery and have been used in a lot of industries. This paper presents the mass, energy and exergy balances in a traditional steel integrated plant. The First and Second Laws of Thermodynamics were used to calculate the energies and exergies of the raws materials, products and residues used in the steel production, as well as the energy inputs, products and residues. Was used a year as considered time. The results that were found can be used to identify potentials points or sectors to get the reuse of energy, bring efficiencies improvements ( heat recovery in coke plant, water heating by energy of exhausted gases in the sinter plant, to make use of burned gases used in all steel plant), for allow competitive gains to the company.

**Key words:** *(energy, steel plant energy balance, exergy balance)*



## INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento da economia brasileira nos últimos tempos e a aceleração do processo de globalização das empresas, fazem com que os fatores de ganho de competitividade sejam fortemente avaliados e colocados em prática pelas indústrias nacionais e estrangeiras.

A siderurgia nacional é a oitava do mundo e a primeira da América Latina em produção, além de ocupar a quinta colocação na pauta de exportações brasileiras. Soma-se a esses aspectos o fato de ser o segundo maior consumidor industrial de energia elétrica do país, respondendo por quase 25% do consumo total de energia do setor ( E&E, 2008).

Por envolver um elevado número de processos térmicos e por ser grande consumidor de energia, esse segmento industrial tem buscado desenvolver projetos que levem a uma redução de seus custos de produção através do aumento das eficiências energéticas dos seus processos.

A análise energética dos processos propicia a redução dos impactos ambientais advindos da produção do aço, por promover um melhor uso dos resíduos industriais. Permite que as usinas estejam em condição favorável quando da ocorrência de crises nos setores de abastecimento de energia. Como a observada nos últimos anos, em especial nos primeiros meses de 2008, quando o preço da energia elétrica aumentou mais de 2000% ( Moody's Investors Service, 2008).

As projeções para o preço da energia ainda são pessimistas, mostrando um cenário de dificuldades para a geração de energia elétrica e conseqüente elevação dos preços (Vasconcelos, 2008). O investimento em termelétricas eleva ainda mais os custos, expondo os consumidores a um panorama de incertezas e aumentos dos gastos de produção.

Em algumas indústrias siderúrgicas, o gasto com as chamadas utilidades (energia elétrica, gases combustíveis, água, entre outros) chega a ser o segundo maior responsável pelo custo total de produção, ficando atrás somente dos valores de depreciação (ABM, 1984).

Diante do exposto, é ferramenta estratégica para as indústrias, em especial as siderúrgicas, a criação de projetos ou a alteração em modos de operação que permitam um aumento da eficiência energética global das usinas e que levem a economias no total da energia utilizada.

Balanços energéticos já são amplamente utilizados pelas siderúrgicas nacionais, fornecendo informações sobre a quantidade de energia envolvida nos processos de transformação. Porém, balanços de exergia, apesar de possuírem similaridades com os balanços energéticos, possuem uma particularidade fundamental: são fundamentados no padrão de degradação da energia, ou seja, considera-se o fato de que em processos reais, irreversibilidades ocorrem e uma parte da energia realmente não pode ser utilizada

A análise exergética é regularmente usada para avaliar a eficiência de sistemas energo intensivos e tem mostrado ganhos favoráveis no sentido de melhoria de desempenho de plantas industriais (Beer De J. et al., 1998).

Sahim, (1998) mostra que um forno industrial a gás apresenta eficiência energética, baseada na 1ª Lei, de 85%, porém, sua eficiência exergética é de apenas 6,6%, mostrando que 93,4% de toda energia disponível para o aquecimento é destruída.

Na avaliação exergética reúnem-se os valores quantitativos (1ª Lei da Termodinâmica) e qualitativos (2ª Lei) dos fluxos energéticos, permitindo seu uso como importante mecanismo para avaliação e para melhoria técnica e econômica de processos industriais, para a redução dos impactos ambientais e para garantia da disponibilidade de energia.

Nesse trabalho o desenvolvimento dos balanços de massa, dos balanços de energia e de exergia servirão de base para a indicação de potenciais de melhorias, com a indicação de ganhos de eficiência e implantação de economias.

Por meio do balanço exergético pretende-se qualificar a energia, mostrando a eficiência exergética das fontes energéticas utilizadas nessa planta siderúrgica. E, ainda, identificar perdas de massa e exergia, propondo, então, algumas medidas de ganhos de rendimento.

Como objetivo secundário pretende-se, a partir da identificação dos valores de exergia por processo industrial de fabricação do aço, apresentar potenciais de reaproveitamento da exergia com o objetivo de reduzir custos na aquisição de materiais e energéticos.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Evolução da siderurgia nacional**

A descoberta e exploração de ouro no atual estado de Minas Gerais que desencadeou o estímulo a indústria siderúrgica nacional. Fundições foram abertas para a construção de implementos de ferro utilizados nas minas.

A partir de 1805 ascensão de D. João VI ao trono de Portugal e a vinda da família real portuguesa para o Brasil impulsionaram a construção de diversas indústrias siderúrgicas no país.

Um marco importante para o desenvolvimento desse setor no Brasil foi a fundação em 1876 da Escola de Minas em Ouro Preto.

As primeiras décadas do século XX foram de avanço para a siderurgia brasileira. Impulsionado pelo surto industrial, verificado entre 1917 e 1930. Decretos governamentais concederam à indústria de ferro e aço diversos benefícios fiscais. Na época, a produção brasileira era de apenas 36 mil toneladas de gusa anuais.

O cenário de dependência brasileira de produtos siderúrgicos importados começou a mudar nos anos 40 com a ascensão de Getúlio Vargas ao poder. Era uma de suas metas fazer com que a indústria de base brasileira crescesse e se nacionalizasse.

As laminações entraram em atividade no Brasil em 1948 e marcaram o início da autonomia brasileira na produção de ferro e aço.

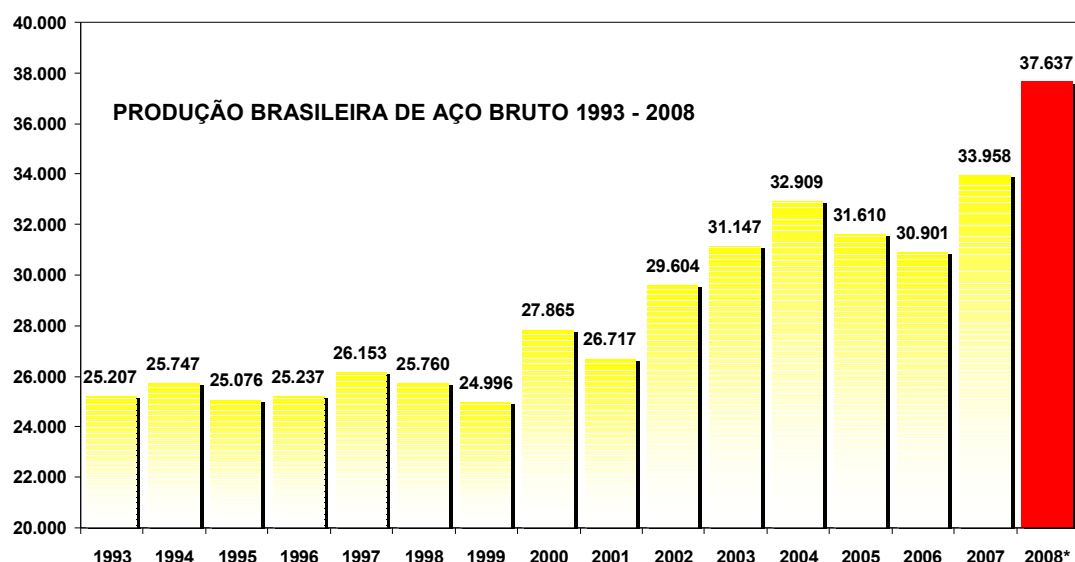
Em 1950 a produção de aço bruto nacional alcançou 788 mil toneladas, início de uma fase de crescimento continuado da produção de aço no país. Dez anos depois a produção triplicava, e passados mais dez anos, em 1970, eram entregues ao mercado 5,5 milhões de toneladas de aço.

Em 1973, foi inaugurada no país a primeira usina integrada produtora de aço que utilizava o processo de redução direta de minérios de ferro a base de gás natural.

A retração do mercado interno na década de 1980 levou a busca por mercados no exterior e, assim sendo, a nação se tornou exportadora, mesmo sem ter grande tradição no ramo.

No ano de 2005, a produção nacional de aço foi de 31,6 milhões de toneladas, e as grandes empresas brasileiras empregavam juntas cerca de 100 mil pessoas (ABM,1984).

O GRÁFICO 2.1 mostra a evolução da produção brasileira ao longo dos últimos 15 anos, onde se destaca o salto na produção entre os anos de 2006 e 2008, quando a fabricação nacional de aço aumentou de quase 31 milhões de toneladas para mais de 37,5 milhões de toneladas.



\* **Projeção**

GRÁFICO 2.1 – Evolução da Produção Nacional de Aço

FONTE: IISI- International Iron and Steel Institute, 2008, slide 66.

A previsão de investimentos no setor de 2005 a 2010 é de US\$ 12,5 bilhões, com a projeção de se atingir a capacidade instalada de 50 milhões de toneladas de aço por ano, anteriormente à crise econômica de 2008 (IBS, 2008).

No GRÁFICO 2.2 pode-se observar a posição do Brasil na colocação mundial de produção de aço bruto para o ano de 2007. O país coloca-se ao lado dos grandes produtores, apresentando volumes de produção superiores ao da França e da Itália.

O gráfico também mostra que a produção nacional de aço bruto, para aquele ano, foi quase 15 vezes inferior à produção da China, ainda hoje, a maior produtora mundial.

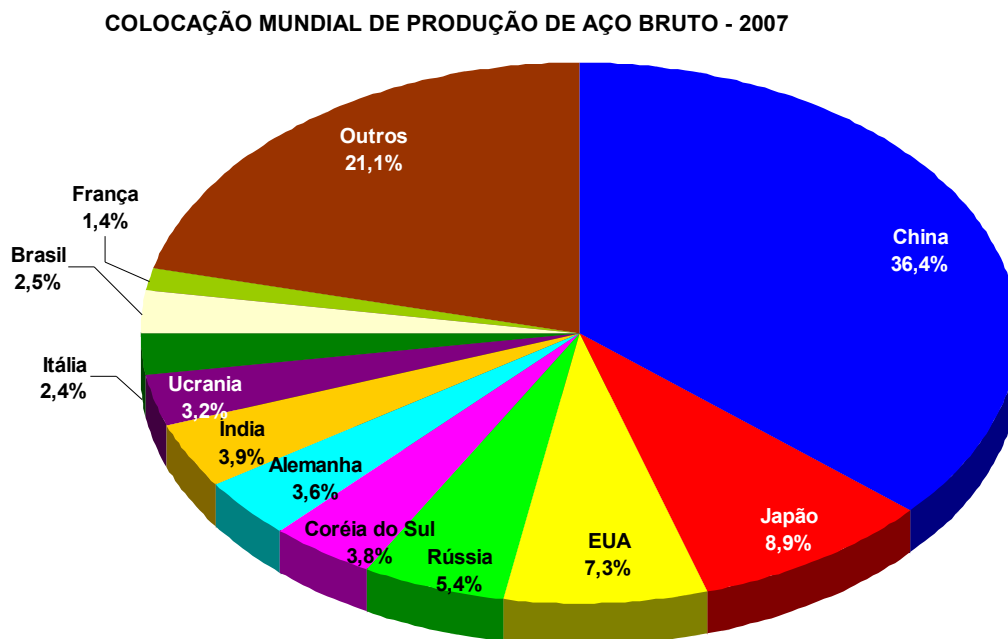


GRÁFICO 2.2 – Colocação mundial da produção de aço bruto mundial – 2007  
FONTE: IISI- International Iron and Steel Institute, 2008, slide 37.

## 2.2. Disponibilidade de Energia

Acompanhando a evolução das siderúrgicas nacionais a demanda do setor por energéticos, em especial energia elétrica, apresentou uma evolução significativa ao longo dos anos, acabando por contribuir significativamente com a definição do valor final dos produtos.

O setor industrial brasileiro apresenta hoje demandas por energia elétrica inferiores às observadas para as décadas de 1980 e 1990, o que revela o investimento do setor em fontes alternativas de energia; porém encontra-se atualmente com percentual de consumo de energia elétrica equivalente ao da década de 1970, o que indica que ainda existe a possibilidade de se avaliar a substituição da energia elétrica como principal fonte de abastecimento.

O GRÁFICO 2.3 apresenta a evolução da participação no consumo de EE por setor no Brasil, entre as décadas de 1960 e 2000.

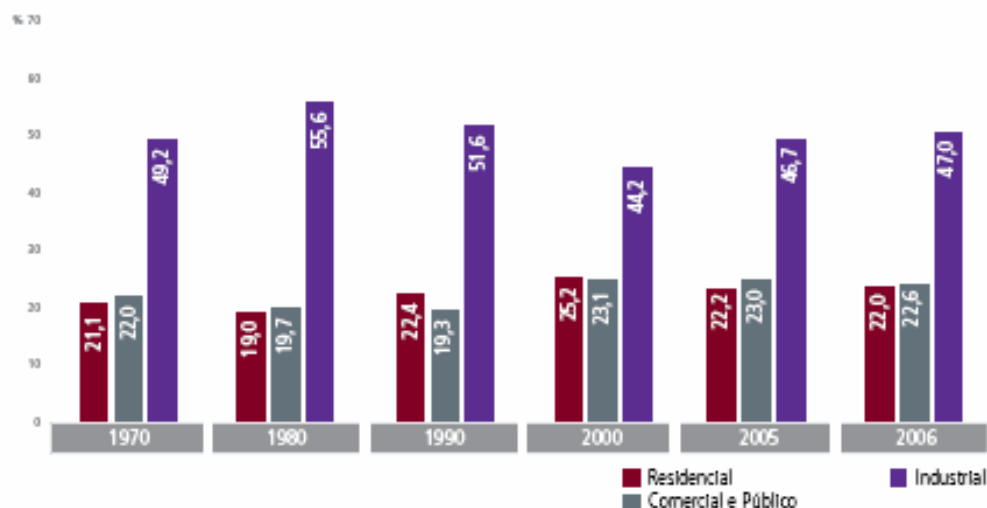


GRÁFICO 2.3 – Evolução da Participação do consumo de EE por setor no total Brasil – 1970 a 2006. FONTE: MME - Balanço Energético Nacional 2007 – ano base 2006, 2007, p.32.

Em 2006 o setor industrial brasileiro já era o responsável pelo consumo de mais de 40% do total da energia gerada, sendo que desse total o setor metalúrgico é o maior consumidor, respondendo por mais de 40% do consumo industrial.

O GRÁFICO 2.4 mostra a estrutura do consumo de energia no setor de ferro – gusa e aço no Brasil. Observa-se que após carvões e derivados, a energia elétrica apresenta o maior percentual de consumo no setor, o que indica a forte dependência em relação à esse tipo de energia.

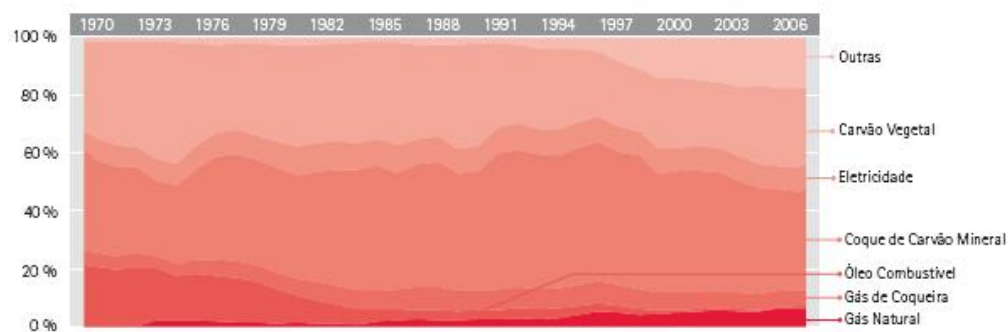


GRÁFICO 2.4 – Balanço Energético Nacional 2008 – ano base 2007. FONTE: EPE, p. 74.

A crise energética ocorrida em 2001 no país colocou em discussão a atual capacidade de suprimento de energia pelo parque gerador brasileiro; segundo Andrade, (2001) para o atendimento do aumento da demanda por energia, dos setores eletro-intensivos brasileiros, será necessário aumentar a geração de energia do país em 9,3 GWh /ano até 2010.

A agência Moody's\* prevê que, a partir de 2008, haverá um aumento na demanda por energia de 5,0% ao ano, o que representa um aumento de 3,1GW/ano no total da energia elétrica que deverá ser gerada. Caso a oferta não acompanhe a elevação da demanda pode-se ter em 2012 um déficit no fornecimento de energia elétrica no Brasil de aproximadamente 724 MW.

No GRÁFICO 2.5 pode-se acompanhar a evolução da demanda por energia até 2012.

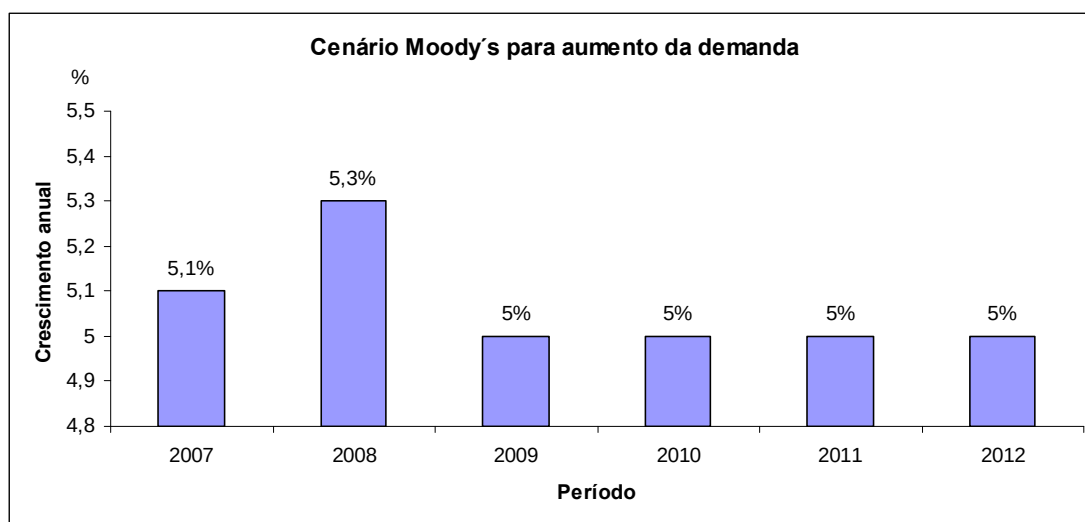


GRÁFICO 2.5 – Crescimento anual de abastecimento de energia.  
FONTE: MOODY'S GLOBAL INFRASTRUCTURE, 2008 p. 13.

De acordo com relatório apresentado pelo IBS (2008), anteriormente à crise econômica, o cenário, em médio prazo, para a área de energia elétrica no país é:

**Período de 2008 a 2010**

- ✓ Não há tempo de construir nova capacidade geradora;
- ✓ Risco de desequilíbrio oferta x demanda, por forte aumento da demanda;
- ✓ Preço tende a subir muito.

\* Moody's Investors Service – Agência de pesquisas norte americana para aspectos relacionados à geração e abastecimento de energia.

**Período de 2011-2013**

- ✓ Impossibilidade de inclusão de hidrelétricas e situação do gás natural ainda não equacionada;
- ✓ Oportunidade para inserção de renováveis e “repotenciamento” de PCHs.
- ✓ Renovação de parcela significativa dos contratos das distribuidoras em 2013;
- ✓ Tendência de preços ainda em ascensão.

Diante desse cenário o setor siderúrgico nacional tem investido maciçamente na busca por fontes sustentáveis de energéticos, desenvolvendo projetos para a própria geração da energia que consome. No país, no início dessa década, cerca de 35% do total de energia, utilizado por essas usinas, eram originadas de auto-geração.

Na TABELA 2.1 observa-se que o setor minero metalúrgico gerava em 2000 aproximadamente 1/3 de toda a energia que consumia, através, principalmente, do reaproveitamento dos gases residuais gerados durante o processo de produção dos diversos metais.

TABELA 2.1 - Auto Geração de Energia Elétrica no setor Industrial

**Setor Minero Metalúrgico - 2000**

| <b>Segmentos</b>      | <b>Produção<br/>(Mil t)</b> | <b>Consumo<br/>de Energia<br/>(Gwh/a)</b> | <b>Auto<br/>Geração<br/>Gwh/a)</b> | <b>Energia<br/>Própria %</b> |
|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------|
| Caulim                | 1.434                       | 1.956                                     | -                                  | -                            |
| Cobre                 | 270                         | 327                                       | 115                                | 35,2                         |
| Estanho               | 13                          | 208                                       | 228                                | 109,6                        |
| Ferro/Pelotas         | 141.040                     | 730                                       | 73                                 | 10                           |
| Alumínio              | 1.277                       | 18.713                                    | 2.397                              | 12,7                         |
| Níquel/Cobalto        | 16,6/0,8                    | 639                                       | 81                                 | 12,6                         |
| Ouro                  | 17                          | 50                                        | -                                  | -                            |
| Ferroligas            | 866                         | 6.394                                     | 68                                 | 1,1                          |
| Zinco                 | 254                         | 345                                       | 265                                | 76,3                         |
| Sider. Integrada      | 21.677                      | 12.285                                    | 4.237                              | 34,5                         |
| Sider. Semi-integ.    | 5.745                       | 3.256                                     | 7.464                              | -                            |
| <b>Total do Setor</b> | <b>172.593</b>              | <b>44.903</b>                             | <b>14.928</b>                      | <b>33,3</b>                  |

FONTE: BNDES, 2001.



Entre os vários setores industriais brasileiros, o segmento de ferro gusa e aço ocupa a sexta posição na colocação dos setores auto produtores de energia elétrica, sendo responsável pela geração própria, no ano de 2006, de mais de 5.000 GWh, conforme apresentado pela TABELA 2.2.

TABELA 2.2 - Auto geração de Energia Elétrica – Evolução da Auto Produção Total Setorial, Brasil 1994 a 2006.

|                                                     | 1994              | 2005              | 2006              | % 06/05 <sup>3</sup>       | % aa<br>06/94 <sup>4</sup>        | % 06 <sup>5</sup>       |
|-----------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| <b>CONSUMO TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA (GWh)</b>      | <b>249.793,00</b> | <b>375.193,10</b> | <b>389.905,40</b> | <b>3,90</b>                | <b>3,80</b>                       | <b>-</b>                |
| <b>AUTOPRODUÇÃO TOTAL DE ENERGIA ELÉTRICA (GWh)</b> | <b>14.166,00</b>  | <b>39.782,10</b>  | <b>41.692,40</b>  | <b>4,80</b>                | <b>9,40</b>                       | <b>-</b>                |
| <b>Autoprodução sobre consumo total (%)</b>         | <b>5,7</b>        | <b>10,6</b>       | <b>10,7</b>       | <b>0,8</b>                 | <b>5,4</b>                        | <b>-</b>                |
| <b>Autoprodução por Setor (GWh)</b>                 | <b>1994</b>       | <b>2005</b>       | <b>2006</b>       | <b>% 06/05<sup>3</sup></b> | <b>% aa<br/>06/94<sup>4</sup></b> | <b>% 06<sup>5</sup></b> |
| Setor Energético                                    |                   |                   |                   |                            |                                   |                         |
| Petróleo e Gás Natural                              | 1.725,0           | 4.139,6           | 4.714,0           | 13,9                       | 8,7                               | 11,3                    |
| Refinarias                                          | 1.054,6           | 1.704,0           | 1.751,0           | 2,8                        | 4,3                               | 4,2                     |
| Exploração e Produção                               | 670,4             | 2.435,6           | 2.963,0           | 21,7                       | 13,2                              | 7,1                     |
| Setor Metalurgia                                    | 3.852,0           | 12.742,5          | 12.265,8          | (3,7)                      | 10,1                              | 29,4                    |
| Ferro Gusa e Aço                                    | 2.041,0           | 6.189,8           | 5.279,0           | (14,7)                     | 8,2                               | 12,7                    |
| Alumínio e Outros <sup>1</sup>                      | 1.811,0           | 6.552,7           | 6.986,9           | 6,6                        | 11,9                              | 16,8                    |
| Setor Químico                                       | 1.432,0           | 2.349,2           | 2.391,8           | 1,8                        | 4,4                               | 5,7                     |
| Setor Papel e Celulose                              | 3.908,0           | 7.576,9           | 7.822,1           | 3,2                        | 6,0                               | 18,8                    |
| Outros                                              | 934,6             | 5.531,9           | 5.927,8           | 7,2                        | 16,6                              | 14,2                    |
| Setor Sulcroalcooleiro <sup>2</sup>                 | 2.314,0           | 7.442,0           | 8.316,8           | 11,8                       | 11,2                              | 19,9                    |
| Destilarias de Etanol                               | 1.251,0           | 3.180,1           | 3.554,1           | 11,8                       | 9,1                               | 8,5                     |
| Usinas de Açúcar                                    | 1.063,0           | 4.261,9           | 4.762,7           | 11,8                       | 13,3                              | 11,4                    |

<sup>1</sup> Incluem ferro ligas, não ferrosos e outros metálicos.

<sup>2</sup> O setor sulcroalcooleiro não existe formalmente na estrutura do Balanço Energético Nacional (As destilarias de etanol pertencem ao setor energético e as usinas de açúcar ao setor de alimentos, porém os dados são apresentados de forma consolidada).

<sup>3</sup> Variação dos parâmetros entre os anos de 2005 e 2006

<sup>4</sup> Taxa média de crescimento ao ano que reproduz variação do parâmetro entre os anos de 1994 e 2006.

<sup>5</sup> Participação do parâmetro no total do ano de 2006.

FONTE: EPE, 2007, p.45.

### 2.3 Análise Exergética

Diante da necessidade de se desenvolver melhorias no rendimento de máquinas e processos, o balanço exergético constitui ferramenta poderosa e adequada para identificação de potenciais de alteração e ganhos de desempenho.

Para considerar a qualidade de diferentes formas de energia desordenada, um padrão universal de qualidade é necessário. O mais natural e conveniente padrão é o que indica o trabalho máximo que pode ser extraído de uma determinada forma de energia, usando-se parâmetros ambientais como referência. O padrão para determinação da qualidade de energia é a exergia (Kotas, 1995)

Kotas (1995) define exergia como a sendo o resultado da análise qualitativa de diferentes formas de energia, indicando o máximo de trabalho que pode ser obtido quando se utiliza parâmetros ambientais como estado de referência.

Goran (1977) descreveu exergia como sendo a qualidade da energia, qual a sua real capacidade em realizar trabalho durante um processo qualquer de transformação.

Já Rant (1956) definiu exergia como a parcela da energia que pode ser completamente convertida em outra forma de energia, ou seja, conceituou exergia como sendo o resultado da interação real entre a matéria sobre consideração e o meio ambiente.

Rant (1956) também propôs a palavra anergia para denominar a parte da energia que não pode ser aproveitada, a parcela perdida em processos de transformação da energia. E assim sendo definiu que:

$$\text{Energia} = \text{Exergia} + \text{Anergia}$$

A exergia mede a capacidade que um fluxo ou um sistema tem de realizar trabalho; quantifica o potencial de causar mudança; não é conservada, mas é irreversivelmente destruída enquanto “alimenta” qualquer processo real. Portanto é a exergia que possui valor. Ineficiências são conseqüências da destruição da energia disponível (exergia) ou de perdas (Pinheiro, 1996)

A Primeira Lei da Termodinâmica estabelece que a energia se conserva. Assim em um processo real não existe consumo de energia e sim consumo de exergia. Chama-se rendimento exergético a relação entre a exergia final a inicial em um processo. O rendimento exergético é a medida da adequação de uma forma a um uso de exergia. O objetivo da adequação é minimizar o consumo de exergia do processo (Leal, 2000).

Na TABELA 2.3 podem ser encontrados os valores de rendimento exergético em alguns processos que consomem energia elétrica (Pinheiro, 1996)

TABELA 2.3 - Rendimentos pela 2ª Lei da Termodinâmica no Uso da Energia Elétrica

| USO                                                        | %    |
|------------------------------------------------------------|------|
| Chuveiro Elétrico e Boilers (20 a 40°C)                    | 2,6  |
| Caldeiras a Vapor d'água (16 bar)                          | 32,7 |
| Aquecimento de material em forno siderúrgico (25 a 1140°C) | 41,4 |
| Ar Condicionado (30 a 250 °C)                              | 5    |
| Tração Elétrica                                            | 95   |
| Máquina Ferramenta (torno, fresa)                          | 90   |
| Bomba d'água                                               | 80   |

FONTE: PINHEIRO, 1996, P.8

Szargut (1988) foi quem primeiro empregou a análise exergética para avaliação de um processo metalúrgico.

Brauer e Jeschar (1963) aplicaram exergia para o estudo do comportamento termodinâmico de um alto forno.

Zhang, (2004) apresentou o resultado da avaliação exergética do Alto Forno da planta siderúrgica japonesa Nippon Steel. No estudo ele avalia quais as principais irreversibilidades do processo, mensurando as maiores perdas de energia e concluindo que no processo de produção de gusa são destruídas, devido às irreversibilidades, 5.461 MJ de energia para cada tonelada produzida.

Michaelis et. al. (1998), apresentaram a análise exergética de uma usina siderúrgica integrada inglesa, onde destacaram que no processo de cogeração convencional dessa planta, cerca de 60% da energia do combustível utilizado na geração do vapor é destruída, apesar da eficiência energética do processo ser particularmente alta.

Costa et al., (2001) mostraram que as perdas de exergia em uma siderúrgica integrada chegam a ser da ordem de 10,9 GJ/ t aço líquido, e que em usinas semi integradas, as perdas oscilam em torno de 3,3 GJ/ t aço líquido; com as eficiências exergéticas variando de 30 a 53% para plantas integradas e entre 64 a 70% para as semi integradas.

No GRÁFICO 2.6 encontram-se diferentes faixas de eficiências exergéticas para usinas siderúrgicas com características distintas. Observa-se a grande diferença encontrada entre as eficiências de usinas integradas para aquelas semi-integradas.

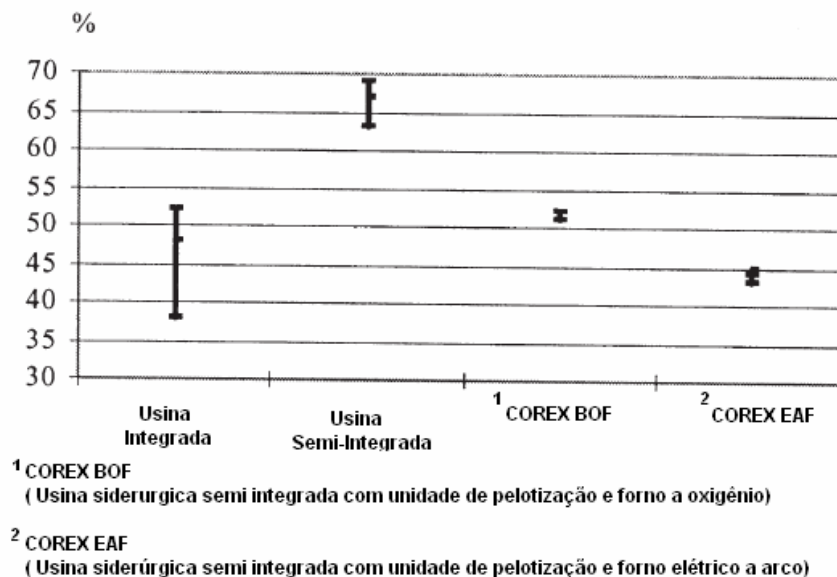


GRÁFICO 2.6 Faixas de eficiências exergéticas para usinas siderúrgicas.  
 FONTE – COSTA et al., 2001, p.13.

Trabalhos como os citados serviram para avaliar as eficiências térmicas de processos e permitiram a proposição de intervenções que levaram a uma maior economia nas quantidades dos combustíveis utilizados, contribuindo, assim, para a melhoria das eficiências.

Verifica-se, ainda, que medidas para a economia de energia, que a reutilização de resíduos e que um maior controle das emissões são passos importantes para o aumento das eficiências exergéticas das unidades de produção.

Balancos exergéticos são ferramentas eficazes na quantificação das eficiências de processos industriais, permitindo, através da identificação de perdas, que intervenções possam ser realizadas a fim de garantir o tratamento de deficiências relacionadas ao mau uso da energia.

Szargut (2007) apresentou uma tabela onde listava as eficiências exergéticas de vários processos de produção de diferentes tipos de materiais, destacando que alguns possuíam eficiências muito baixas, como o processo de produção de laminados de aço a quente, com eficiência exergética de, apenas 19%

Nos dias atuais, torna-se cada vez mais difundida a técnica de avaliação exergética em sistemas e em processos termodinâmicos (Moran 1982, Kotas, 1985, Szargut et al., 1988 e Bejan 1988), sendo que a prática tem sido amplamente difundida e aplicada em vários setores

econômicos de vários países, tais como Turquia, Japão, Itália, Brasil, entre outros (Leal, 2000).

### 2.3.1 Tipos de Exergia

Segundo Szargut (1988) e Kotas (1985) a exergia total pode ser dividida em cinco partes: cinética, potencial, térmica, química e física.

|               |                                     |                                    |                               |
|---------------|-------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|
|               | Exergia Cinética                    | Exergia Potencial                  |                               |
| Exergia Total | Exergia Térmica<br>$E_X^{\Delta T}$ | Exergia Física<br>$E_X^{\Delta P}$ | Exergia Química<br>$E_X^{Ch}$ |

FIGURA 2.1 – Tipos de Exergia  
FONTE - TORRES, 1995, p.18.

Um sistema em completo equilíbrio com o ambiente é chamado sistema em *estado morto*, pois não existe nenhuma diferença entre a pressão, temperatura e o potencial químico entre o ambiente e o sistema que possa provocar algum processo (Szargut, 1988).

### 2.3.2 Exergia associada com a transferência de calor

A exergia associada à transferência de calor através de uma superfície de controle pode ser determinada pelo trabalho máximo que pode ser obtido do sistema tendo-se o ambiente como um reservatório de energia térmica.

A FIGURA 2.2 mostra uma máquina que transforma uma parte do calor, que pode ser transferido do reservatório, em trabalho. Se o objetivo é realizar o máximo de trabalho, essa máquina deve ser completamente reversível (ciclo de Carnot) e o reservatório a baixa temperatura apresentar temperatura igual a do ambiente.

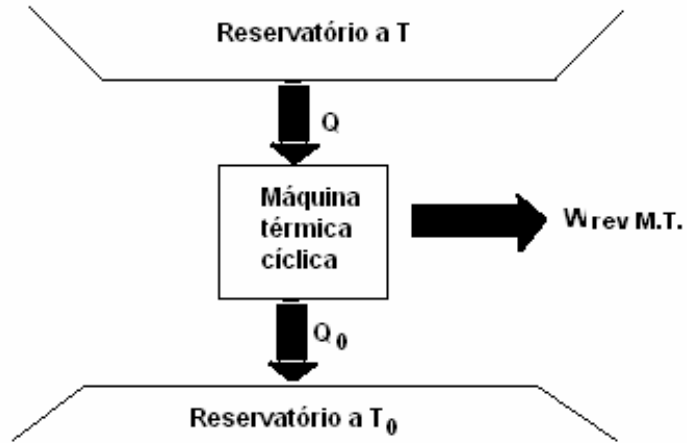


FIGURA 2.2 – Fonte de Energia com temperatura constante  
 Fonte: VAN WYLEN, 1998, p.230.

Para uma taxa de transferência de calor  $\dot{Q}_r$  na temperatura da superfície de controle  $T_r$ , onde a transferência de calor acontece, a taxa máxima de conversão de energia térmica em trabalho é dada por:

$$\dot{W}_{\max} = \dot{E}^Q = \dot{Q}_r \cdot \tau \quad (2.1)$$

onde:

$$\tau = 1 - \frac{T_0}{T_{ref}} \quad (2.2)$$

Se a transferência de calor se der a uma temperatura de referência maior que a temperatura ambiente, então o calor transferido através da superfície de controle resulta em um ganho de exergia para o sistema.

Para o caso de uma variação de temperatura que ocorra ponto a ponto ao longo da superfície de controle, a exergia térmica associada é dada por:

$$\dot{E}^Q = \int_A \left( \frac{T - T_0}{T} \right) \dot{Q}_A dA \quad (2.3)$$

onde  $A$  é a área de transferência de calor (Kotas, 1995).

### 2.3.3 Exergias Cinética e Potencial

A exergia cinética é a própria energia cinética, que é uma forma ordenada de energia, quando a velocidade relativa é considerada em relação à superfície terrestre.

$$\dot{E}_k = \dot{m} \frac{V_0^2}{2} \quad (2.4)$$

A exergia potencial, também uma forma ordenada de energia, é a própria energia potencial, tomando-se uma superfície qualquer por referencial, como por exemplo, o nível do mar.

$$\dot{E}_p = \dot{m} g_E Z_0 \quad (2.5)$$

### 2.3.4 Exergia Física

Exergia Física é igual à máxima quantidade de trabalho que pode ser obtido quando o fluxo de uma substância é levado de um estado inicial ao estado ambiente definido por  $P_0$  e  $T_0$ , através de processos físicos que envolvem somente interações térmicas, com o ambiente (Kotas, 1995).

Se a interação térmica presente é a transferência de calor reversível com o ambiente, por unidade de massa, tem-se que:

$$q_{0(rev)} = T_0 \cdot \Delta S \quad (2.6)$$

A equação para o balanço energético do sistema é, então, dada por:

$$q_{0(rev)} - W_{s(rev)} = \Delta h \quad (2.7)$$

sendo o trabalho reversível,  $W_{s(rev)}$ , igual a exergia total do fluxo.

Assim sendo, obtém-se a exergia física específica do fluxo para o volume de controle:

$$\varepsilon_{ph1} - \varepsilon_{ph2} = (h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2) \quad (2.8)$$

Onde  $h_1 - h_2$  é a parcela de energia, calculada pela diferença entre as entalpias dos dois estados e  $s_1 - s_2$  é a parcela correspondente à desordem das moléculas, calculada a partir da diferença entre as entropias dos dois estados.

Para um gás ideal a exergia física pode ser calculada por meio da EQ. 2.9:

$$\varepsilon_{ph} = c_p(T - T_0) - T_0 \left( c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (2.9)$$

Caso o fluxo em estudo seja uma mistura de gases ideais, o valor de  $c_p$  é determinado pela EQ. 2.10:

$$c_p = \sum_i c_{p,i} \cdot x_i \quad (2.10)$$

### 2.3.5 Exergia Química

Exergia química é igual à máxima quantidade de trabalho que pode ser obtido de um fluxo ou sistema, nas condições de referência, por um processo envolvendo transferência de calor e trocas de substâncias com o ambiente.

A exergia química é a exergia de um fluxo de substâncias que se encontram em um estado de referência igual ao estado ambiente.

A exergia química molar de um gás ideal pode ser calculada por:

$$\tilde{\varepsilon}_0 = \tilde{R}T_0 \ln \frac{P_0}{P_{00}} \quad (2.11)$$

Onde  $R$  é a constante específica dos gases ideais;  $P_{00}$  é a pressão parcial das substâncias gasosas de referência sob consideração.



A exergia química de uma mistura de gases, que podem ser considerados ideais é a soma da exergia de seus componentes menos o trabalho realizado. Então:

$$\tilde{\varepsilon}_{0M} = \sum_i x_i \tilde{\varepsilon}_{0i} + \tilde{R}T_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (2.12)$$

Existem tabelas de exergia química padrão para uma grande variabilidade de substâncias, baseados num estado padrão definido pelos valores de temperatura e pressão a 25°C e 1 atm, respectivamente.

Para combustíveis sólidos, líquidos e gasosos existem equações específicas para a determinação da exergia química, que variam de acordo com a natureza do combustível.

### 2.3.6 Irreversibilidade

Todos os processos encontrados na Natureza têm algum grau de irreversibilidade. Há fatores que tornam irreversível um processo, tais como atrito, expansão não resistida, transferência de calor com diferença finita de temperatura, etc. (Wylen, 1995).

Os processos que não geram atrito ou transferência de calor são possíveis somente no plano ideal (Wall, 2001).

Todos os processos irreversíveis podem ser identificados por três características básicas:

- ✓ Acontecem espontaneamente em um único sentido
- ✓ Durante a transformação sempre há dissipação de energia
- ✓ Para que a transformação ocorra no sentido inverso é necessária a introdução de energia.

Um processo irreversível é inevitavelmente acompanhado de um aumento de entropia, isso quer dizer que nesses processos é possível observar uma conversão da energia ordenada para outra com um maior grau de desordem.

A irreversibilidade de um processo pode ser calculada através da diferença entre o trabalho reversível e o trabalho realizado no volume de controle (trabalho real) sob consideração.

$$I = W_{rev} - W_{v.c} \quad (2.13)$$

onde:

Para um volume de controle em regime permanente, o trabalho reversível é dado por :

$$W_{rev} = \sum_e m_e (h - T_0 \cdot S + E_c + E_p) - \sum_s m_s (h - T_0 \cdot S + E_c + E_p) \quad (2.14)$$

Outra expressão para o cálculo da irreversibilidade em um processo é dada pelo teorema de Gouy-Stodola, que diz que a relação de estado da irreversibilidade de um processo é igual ao produto da temperatura ambiente e a geração de entropia (Kotas, 1995).

$$I = T_0 \cdot \left[ (S_2 - S_1) - \sum_r \frac{Q_r}{T_r} \right] \quad (2.15)$$

Onde  $(S_2 - S_1)$  é o aumento de entropia do sistema e  $\sum_r \left( \frac{Q_r}{T_r} \right)$  é o fluxo total de entropia dentro do sistema.

Segundo Torres, (2001) a irreversibilidade pode ser dividida em duas parcelas principais: evitável e intrínseca.

As irreversibilidades evitáveis podem ser minimizadas a partir de um estudo de melhoria do processo e as intrínsecas são provenientes de reações químicas descontroladas, de reações térmicas em trocadores de calor, por exemplo, que dificilmente são convertidas em exergia.

Em usinas siderúrgicas uma grande parcela dos sistemas térmicos refere-se ao aquecimento em fornos, para exemplificar, podem-se listar as irreversibilidades encontradas para esse processo como sendo:

- ✓ Irreversibilidades pela combustão
- ✓ Transferência de calor irreversível dos gases de combustão para o material a ser aquecido.

- ✓ Perdas de calor irreversíveis através das paredes do forno para o ambiente.
- ✓ Perdas de calor irreversíveis para a água de refrigeração do forno.
- ✓ E perdas de calor através do gás queimado lançado ao ambiente.

Szargut (2007) apresentou os cálculos de irreversibilidades para diversos processos de produção de aço em uma usina siderúrgica integrada, ele mostra que a destruição de exergia em um alto forno pode chegar a 2300 kJ para cada quilograma de gusa produzido.

De Beer, Worrell e Block (1998) apresentam os valores de destruição de exergia para várias etapas do processo de produção de aço em uma usina siderúrgica integrada. Valores encontrados na TABELA 2.4.

TABELA 2.4 - Perdas de Exergia

| <b>Destruição de Exergia Externa (GJ/trs)</b> |                                        |                                               |                           |              |                                 |                                   |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|--------------|---------------------------------|-----------------------------------|
|                                               | <b>Perdas por radiação e convecção</b> | <b>Perdas químicas e físicas dos resíduos</b> | <b>Perdas do Material</b> | <b>Total</b> | <b>Total de perdas internas</b> | <b>Total de perdas de Exergia</b> |
| Coqueria                                      | 0,28                                   | 0,47                                          | 0,24                      | 0,99         | 0,87                            | 1,86                              |
| Sínter                                        | 0,29                                   | 0,39                                          |                           | 0,68         | 0,98                            | 1,66                              |
| Alto Fornos                                   | 0,44                                   | 0,18                                          | 0,04                      | 0,66         | 1,35                            | 2,01                              |
| Conversor                                     | 0,12                                   | 0,06                                          |                           | 0,18         | 0,34                            | 0,52                              |
| Lingotamento Contínuo                         | 1,05                                   |                                               |                           | 1,05         | 0,06                            | 1,11                              |
| Fornos de Reaquecimento                       | 0,04                                   | 0,2                                           |                           | 0,24         | 0,5                             | 0,74                              |
| Laminação a Quente                            | 0,62                                   |                                               |                           | 0,62         | 0,12                            | 0,74                              |
| Planta de Geração de energia                  | 0,2                                    | 0,21                                          |                           | 0,41         | 1,51                            | 1,92                              |
| Outros                                        | 0,28                                   |                                               |                           | 0,28         | 0,03                            | 0,31                              |
| <b>Total</b>                                  | <b>2,27</b>                            | <b>1,51</b>                                   | <b>0,28</b>               | <b>5,11</b>  | <b>5,76</b>                     | <b>10,87</b>                      |

\* GJ/trs gigajoule por tonelada de material laminado a quente

FONTE – DE BEER, et al., 1998. p.148.

### 2.3.7. Balanço Exergético – Sistemas Abertos

Para sistemas abertos que envolvem fluxo de exergia entrando ou saindo da região de controle, a equação para o balanço de exergia é dada por (Kotas, 1995)

$$\dot{E}_i + \dot{E}_e^Q = \dot{E}_e + \dot{W}_x + \dot{I} \quad (2.16)$$

com:

$$\dot{E}_i = \sum_{IN} \dot{m} \varepsilon \quad (2.17)$$

$$\dot{E}_e = \sum_{OUT} \dot{m} \varepsilon \quad (2.18)$$

$$\dot{E}^Q = \sum_r \left[ \dot{Q}_r \frac{T_r - T_0}{T_r} \right] \quad (2.19)$$

A expressão para a exergia específica pode ser escrita como:

$$\varepsilon = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) + \varepsilon_0 + \frac{V_0^2}{2} + g_E Z_0 \quad (2.20)$$

A exergia química,  $\varepsilon_0$ , pode ser obtida separadamente, através de tabelas para a exergia química padrão de substâncias.

A FIGURA 2.3 traz a representação de um sistema aberto, com os respectivos fluxos de exergia.

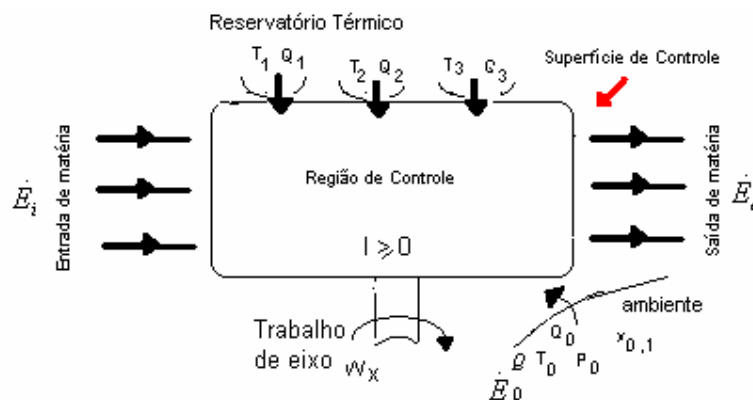


FIGURA 2.3 – Sistema Aberto  
FONTE – KOTAS, 1995. p.64.

O calculo das irreversibilidades para a região de controle que experimenta um fluxo permanente de matéria pode ser obtido pela EQ. 2.21:

$$\dot{I} = T_0 \left[ \sum_{OUT} \dot{m}_e s_e - \sum_{IN} \dot{m}_i s_i - \sum_r \frac{\dot{Q}_r}{T_r} \right] \quad (2.21)$$

sendo que a expressão  $\sum_{OUT} \dot{m}_e s_e - \sum_{IN} \dot{m}_i s_i - \sum_r \frac{\dot{Q}_r}{T_r}$  representa a taxa de da produção de entropia para o processo.

### 2.3.8 Eficiência Exergética

Para sistemas abertos, Szargut (1988) propõe o grau de perfeição termodinâmica, que consiste na razão entre o somatório de exergia na saída pelo somatório de exergia na entrada do sistema:

$$\eta = \frac{\sum Exergia\ na\ saída}{\sum Exergia\ na\ entrada} \quad (2.22)$$

Dessa maneira, mede-se o desempenho termodinâmico do sistema e as irreversibilidades internas, sem considerar a função do equipamento.

### 3 METODOLOGIA

A usina siderúrgica, objeto desse estudo, é uma planta integrada que realiza a redução do minério de ferro com base na queima de gases resultantes dos processos de coqueificação, fabricação de gusa e aço.

O processo inicial de produção do aço, em uma usina integrada, é chamado de redução, que por sua vez é composto de coqueificação, sinterização e produção de gusa em alto forno.

Após a redução segue-se a etapa de refino, composta pelo tratamento do gusa em uma estação de dessulfuração, passando-se a um conversor e geralmente a um processo de refino secundário, em equipamentos conhecidos por: forno panela, desgaseificador a vácuo e injeção de argônio.

Em razão da distância entre a unidade de fabricação do aço (aciaria) e as unidades de laminação, os materiais (blocos, tarugos, etc.) depois de tratados, são levados a fornos de reaquecimento, para em seguida serem direcionados às instalações de conformação (laminadores, escarfadeiras, etc.).

Os balanços, energético e exergético, a serem desenvolvidos nesse trabalho terão como base o ano de 2007, ou seja, os valores encontrados nas entradas e saídas de cada processo significam a totalização dos insumos e produtos utilizados em todo o ano acima declarado.

A FIGURA 3.1 é uma representação esquemática da planta integrada, com a apresentação da área de redução, composta por Coqueria, Sinterização e Alto-forno, seguida pela área de Aciaria, onde ocorre a transformação do ferro gusa em aço, terminando o processo na área de Laminação onde ocorre a produção do aço bruto acabado.

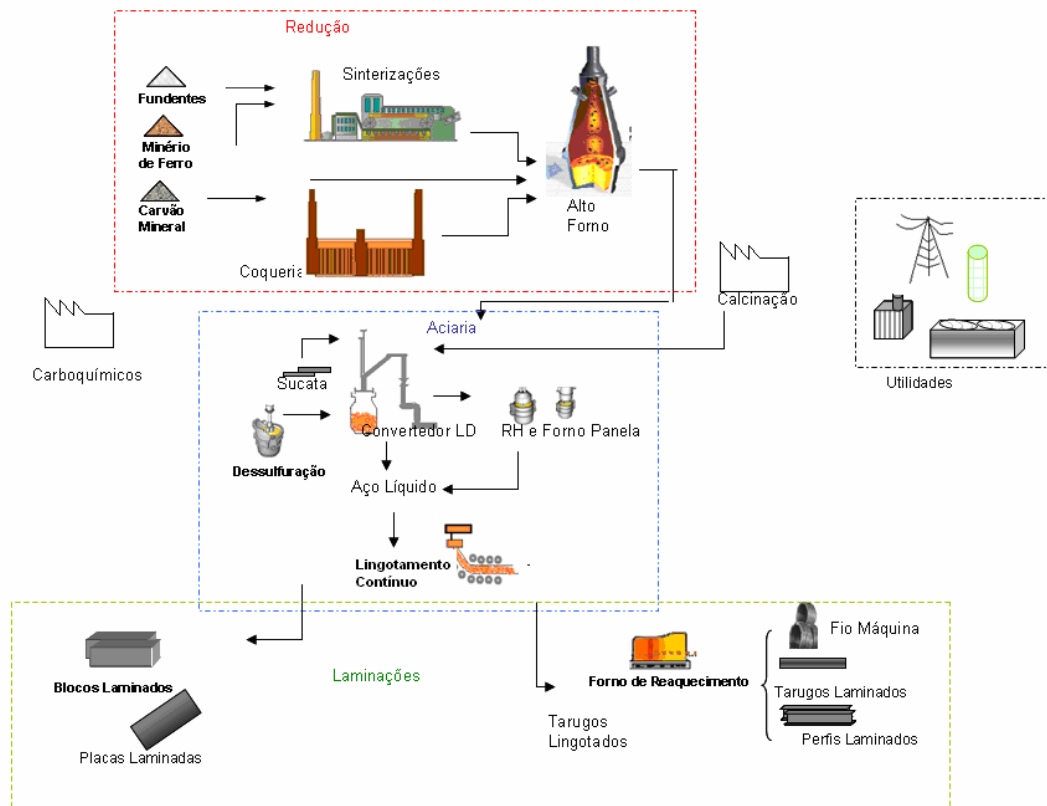


FIGURA 3.1 – Esquema de uma Usina Siderúrgica Integrada

Optou-se por realizar balanços globais, onde os insumos necessários à produção do aço e as utilidades requeridas (fontes energéticas ou de refrigeração) foram tratadas como entradas do balanço; e os produtos e resíduos gerados, como saídas.

As transformações de energia ou exergia internas ao volume de controle considerado, ou seja, aquelas ocorridas em cada uma das sub-unidades da planta siderúrgica não foram considerados.

Para a realização dos balanços de massa, de energia e de exergia foram levantadas todas as matérias primas utilizadas na produção do aço, todas as utilidades necessárias, todos os produtos e subprodutos gerados, assim como os resíduos e efluentes produzidos durante o intervalo de tempo de um ano de operação da usina.

Na FIGURA 3.2 está representado, esquematicamente, o volume de controle considerado para a usina na análise. Observa-se que as transformações internas não estão sendo consideradas.

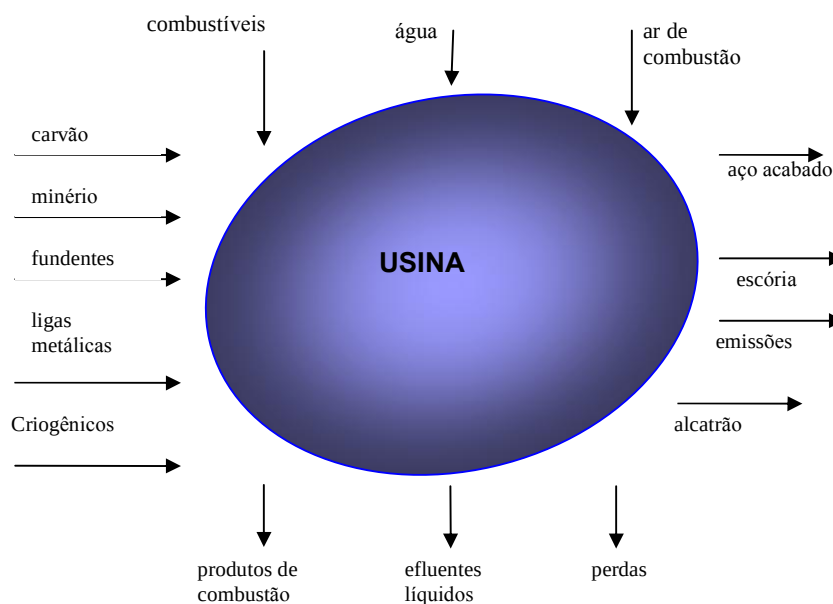


FIGURA 3.2 – Conjunto de insumos, energéticos e produtos da usina.

Em razão da grande variabilidade de fornecedores para uma única espécie de material, médias ponderadas foram calculadas e utilizadas na determinação da composição e no estabelecimento das propriedades termodinâmicas de cada material.

Alguns dos aços produzidos possuíam características (composição, dimensões, etc.) específicas, estabelecidas pela própria empresa. Porém, a maior parcela do que é produzido é fabricado segundo necessidades específicas dos clientes, fazendo com que as composições sejam bastantes variáveis para o mesmo tipo de produto (placa, bloco, etc.).

Nesses casos, foram consideradas as composições médias dos produtos de maior valor agregado, aqueles cuja margem de contribuição para a empresa era mais significativa.

Os dados de pressão e temperatura foram informados pela própria empresa, a partir de leituras em instrumentos regularmente calibrados.

As composições químicas dos carvões, cinzas e minérios adquiridos, assim como dos gases gerados pelo processo de produção do aço, foram fornecidas pelos laboratórios da empresa.

Para o caso do gás natural, a composição química foi obtida junto ao fornecedor. Como essa composição pode variar, percentuais médios foram adotados, seguindo o estabelecido pela ANP para a especificação do gás natural comercializado no Brasil.



Já para as ligas metálicas, as composições médias foram adquiridas em catálogos de fornecedores.

O sistema foi admitido em regime permanente, o que significa que as propriedades dos materiais não variam no tempo.

As propriedades termodinâmicas dos diversos elementos foram obtidas de tabelas disponíveis na literatura e na biblioteca interna do programa computacional *EES*. - Engineering Equation Solver © 1992-2008 S.A. Klein Academic Commercial disponibilizado pela UFMG.

As análises energéticas e exergéticas, assim como as eficiências foram realizadas com base na literatura apresentada no capítulo 2 desse estudo.

Em razão da grande variabilidade de insumos e produtos utilizados na planta siderúrgica e por haver grandes diferenças entre as quantidades dos diversos materiais a serem considerados no cálculo dos balanços, dois volumes de controle auxiliares foram criados, para a determinação do balanço global.

Tais volumes de controle são fictícios, não representando fronteiras físicas reais da usina, sendo considerados e utilizados apenas para facilitar os cálculos e a apresentação dos resultados. Os volumes de controle estabelecidos foram denominados por:

Volume de Controle 1 – VC1: engloba todos os materiais que não passam por processo de combustão.

Volume de Controle 2 – VC2: engloba todos os processos de combustão realizados na planta.

### 3.1 Balanço de Massa

O balanço de massa, segundo a Lei de Conservação da Massa, estabelece que:

✓ Para sistemas abertos, com múltiplas entradas e saídas, a massa no sistema durante um intervalo de tempo deve ser igual à massa que sai mais a massa que ficou acumulada naquele intervalo de tempo considerado, ou seja:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} + \sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (3.1)$$

Ou

$$\sum massa_{entrada} = \sum massa_{saida} + \sum massa_{acumulada} \quad (3.2)$$

Como o sistema foi admitido estando em regime permanente, o total da massa presente em qualquer instante de tempo permanece constante, ou seja, o termo  $\frac{dm_{vc}}{dt}$  é nulo. Não há acúmulo de massa no sistema.

Nesse trabalho, o balanço de massa foi realizado considerando-se todas as entradas sólidas, líquidas e gasosas, assim como as respectivas saídas.

Para o cálculo das massas dos gases envolvidos no processo foram consideradas as temperaturas e pressões indicadas pelos instrumentos de medição de cada uma das unidades onde os gases são utilizados (fornos de reaquecimento, caldeiras, regeneradores, entre outros). ANEXO C.

As demais considerações foram:

- ✓ Temperatura ambiente igual a 298K.
- ✓ Pressão de referência igual a 101,325 kPa.
- ✓ As reações de combustão, para determinação dos gases produzidos, foram calculadas através de software fornecido pela empresa. (ANEXO C).
- ✓ A unidade carboquímica foi considerada como sendo um negócio a parte, por não ser diretamente envolvida no processo de produção do aço. Assim sendo, os insumos fornecidos pela siderúrgica a essa unidade serão considerados na saída do VC 1.

Para o volume total da água que é utilizada diariamente na empresa, optou-se por realizar o balanço de massa separadamente. Tal consideração se fez necessária, pois assim como os gases combustíveis, os volumes encontrados para a água representam quantidades até 10 vezes maiores que os demais insumos e produtos da planta, o que poderia vir a dificultar a apresentação dos resultados do balanço de massa global.

Os gases, admitidos no balanço global, foram considerados como ideais, uma vez que: ou se tem pressões altas e temperaturas próximas à ambiente, ou pressões equivalentes à atmosférica e temperaturas elevadas.

O balanço de massa foi estruturado conforme a FIGURA 3.3:

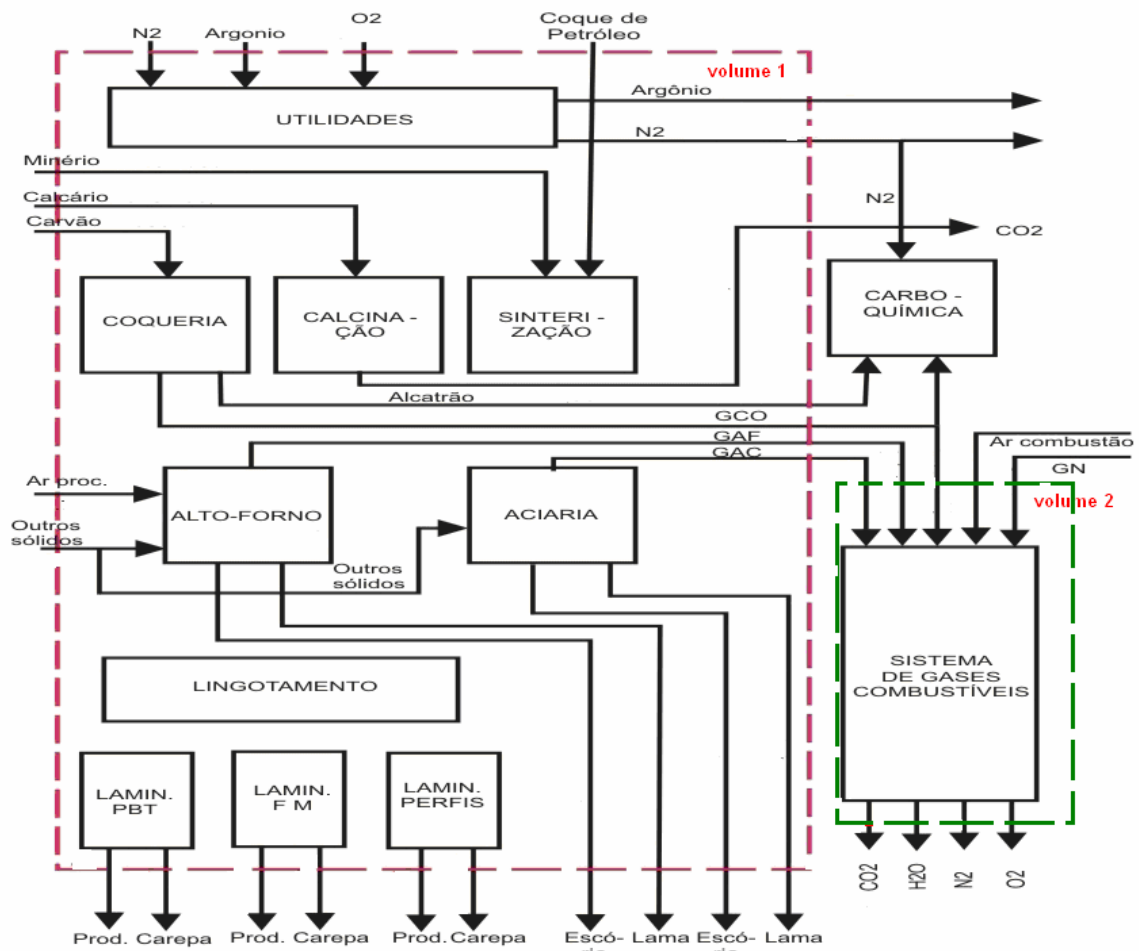


FIGURA 3.3– Balanço de massa do processo industrial

As entradas consideradas foram:

- ✓ Os totais de carvão, coque adquirido e minérios usados na produção do aço.
- ✓ Os volumes de gases combustíveis adquiridos, utilizados na planta.
- ✓ O total de ar de combustão e ar de processo necessários às etapas de produção.
- ✓ O total de ligas metálicas adicionadas ao aço líquido.
- ✓ Toda a quantidade de material fundente (exemplo: calcário) utilizada

Já para a totalização das saídas, tem-se:

- ✓ O total de gases combustíveis gerados na planta.
- ✓ As emissões gasosas resultantes dos processos de combustão.

- ✓ O total de alcatrão e GCO enviados para a unidade carboquímica.
- ✓ As produções de aço acabado (incluindo material estocado), lama, escória e carepas.

Para o balanço de massa da água, uma representação esquemática foi elaborada, conforme mostra a FIGURA 3.4.

#### BALANÇO DE ÁGUA

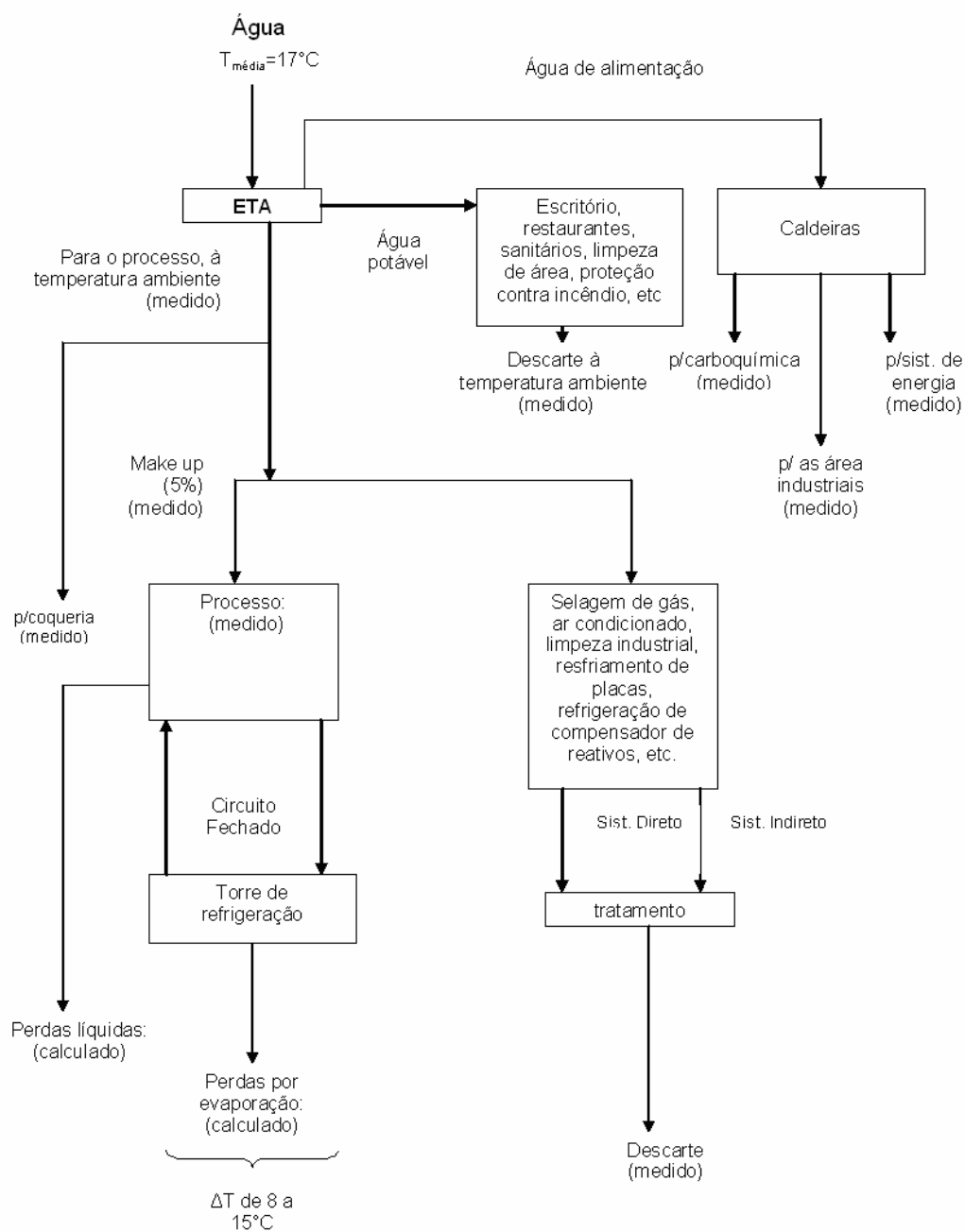


FIGURA 3.4 - Balanço de massa - Água

### 3.2 Balanço de Energia

A equação para o balanço de energia para um volume de controle é dada por (Kotas, 1995):

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left( u_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left( u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \quad (3.6)$$

onde  $u_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i$  representa a energia interna, cinética e potencial na entrada do volume de controle e  $u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e$  a a energia interna, cinética e potencial na saída do volume de controle.

A FIGURA 3.5 representa um volume de controle com o fluxo de energias a serem consideradas em um balanço de energia.

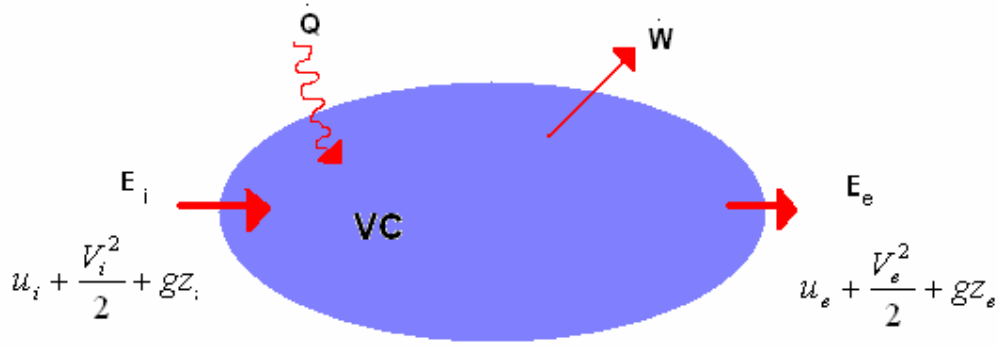


FIGURA 3.5 – Conservação de Energia para um volume de controle.  
FONTE – MORAN et al., 2003, p. 99.

Nesse estudo as variações na energia interna, cinética e potencial foram desprezadas.

Não foi considerada a realização de trabalho através das fronteiras do sistema. Toda a variação de energia no sistema refere-se às variações de energia resultantes de processos de transferência de calor. Tendo-se então:

$$Q_{v.c.} = m \cdot \Delta h \quad (3.7)$$

sendo  $\Delta h$  a variação de energia entre a entrada e a saída do volume de controle.

Para o balanço de energia, assim como para o balanço de massa, se estruturou um fluxograma do processo para melhor identificação das entradas e saídas e realização dos cálculos. Tal fluxograma pode ser visto na FIGURA 3.6

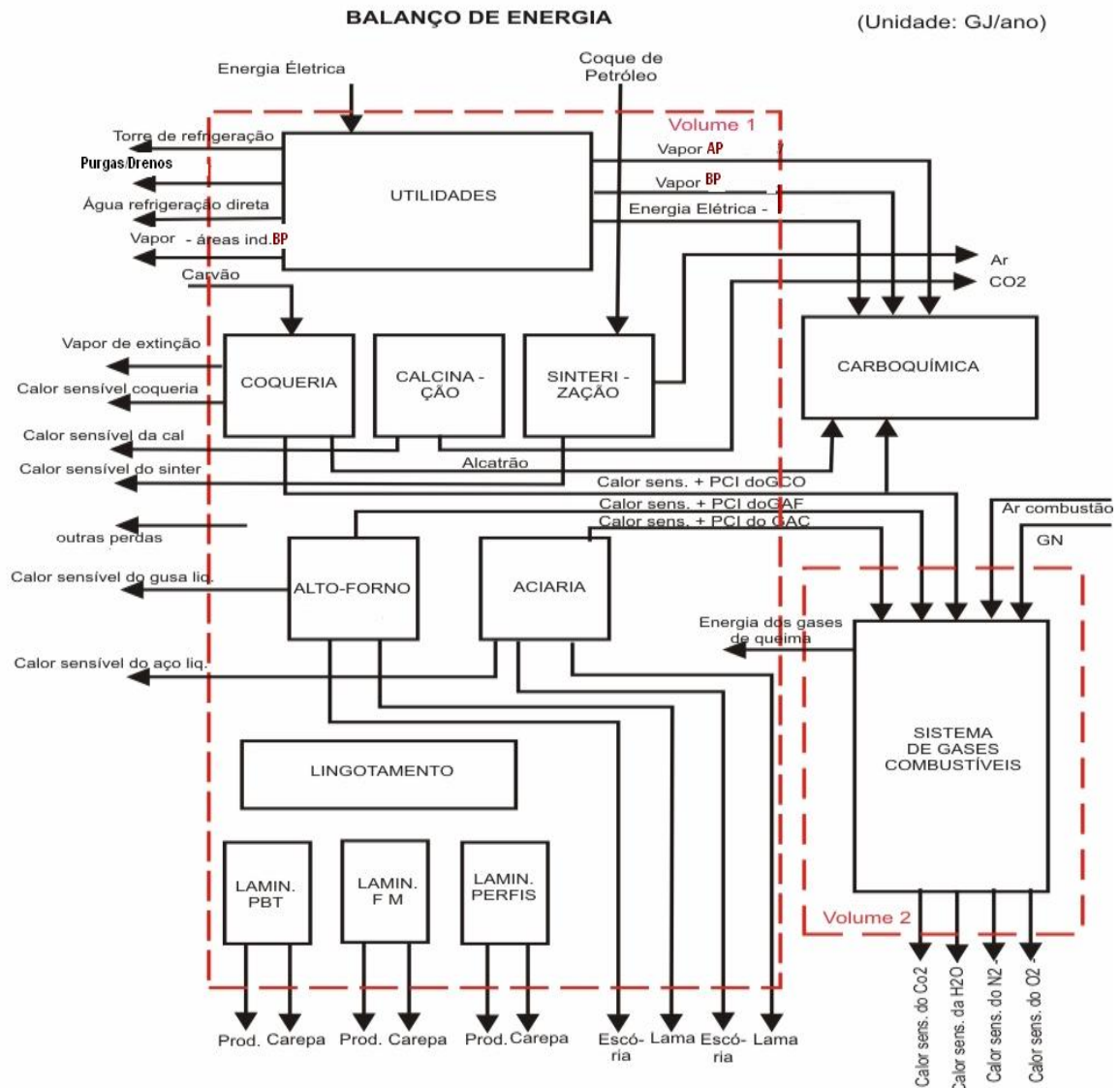


FIGURA 3.6 – Balanço de Energia

Os processos de combustão foram considerados no VC 2, simplesmente para facilitar os cálculos e permitir melhor análise dos resultados.

Os gases residuais do processo de produção do aço foram considerados na entrada do VC 2. O cálculo da energia disponível foi realizado a partir dos calores sensíveis desses

gases somados à parcela de energia disponível pelo poder calorífico inferior de cada um dos gases.

A energia liberada pela queima dos gases e a energia dos gases de exaustão foram consideradas na saída do VC 2, sendo que a energia disponibilizada pela queima dos combustíveis gasosos é apresentada retornando ao VC 1.

Para os gases combustíveis utilizados: gás de alto forno (GAF), gás de coqueria (GCO), gás de aciaria (GAC), adotaram-se as composições médias, em percentual volumétrico, fornecidas pela empresa conforme descrito na TABELA 3.2 e ANEXO C..

TABELA 3.2 -Composição química dos gases combustíveis

|     | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | N <sub>2</sub> | CO    | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> |
|-----|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------|-----------------|----------------|
| GAF | 0               | 0                             | 0                             | 0                             | 0                             | 46,7           | 24,10 | 24,5            | 3,83           |
| GCO | 26,02           | 0,11                          | 2,08                          | 0,69                          | 0                             | 2,00           | 6,13  | 1,9             | 60,2           |
| GAC | 0               | 0                             | 0                             | 0                             | 0                             | 23,37          | 56,63 | 18,69           | 0,850          |
| GN  | 92,09           | 0                             | 0                             | 0                             | 1,002                         | 0,779          | 0     | 0,468           | 0              |

FONTE – USINA SIDERURGICA

Para as emissões resultantes dos processos de combustão, fez-se o cálculo dos volumes gerados a partir dos valores de excesso de ar informados para cada processo. Para os demais componentes do balanço (líquidos e sólidos), a determinação dos parâmetros termodinâmicos (calor específico, entalpia, etc.) foi estabelecida a partir do cálculo do valor médio dessas grandezas para cada um dos elementos constituintes do material sob análise (ANEXO A) excetuando-se aqueles materiais cujos parâmetros termodinâmicos foram localizados na biblioteca interna do programa *ESS*.

As temperaturas e pressões consideradas representam os valores nas quais os insumos são recebidos e utilizados e aquelas nas quais os produtos são fabricados e posteriormente vendidos ou armazenados.

A unidade carboquímica, tratada em separado, foi representada recebendo todo o alcatrão, e parcelas de GCO, vapores de alta e baixa pressão e energia elétrica gerados no VC1.

### 3.3 Balanço de Exergia

Para a realização do balanço de exergia foram levantadas as composições químicas médias de todos os insumos e produtos da planta, suas temperaturas e pressões de geração, utilização e descarte.

Foram determinados, a partir da literatura, os valores de calor específico, entalpia, entropia e exergia química padrão para cada um dos componentes químicos dos materiais (ANEXO B).

A partir do conhecimento desses dados foram calculadas as exergias químicas e físicas das entradas e saídas do balanço.

As variações de exergia cinética e potencial dos diversos processos não foram consideradas.

Os gases de exaustão foram considerados como ideais.

As irreversibilidades, no balanço global, são constituídas pelas perdas térmicas e elétricas do sistema (irreversibilidade evitável) somadas à irreversibilidade devido à geração de entropia no processo de combustão (irreversibilidade intrínseca). Ou seja:

$$I = \Sigma \text{ perdas térmicas} + \Sigma \text{ perdas elétricas} + T_0 \cdot \Delta S \quad (3.8)$$

Para o cálculo das exergias químicas presentes nos componentes do carvão mineral e do coque foram utilizadas as equações sugeridas por Szargut,

$$b_{ch} = (C_1 + L_{zw})\beta + (b_{chS} - C_s)z_s + b_{cha}z_a + b_{chw}z_w \quad (3.9)$$

onde

$$\beta = 1,0437 + 0,1896 \frac{z_{H2}}{z_C} + 0,0617 \frac{z_{O2}}{z_C} + 0,0428 \frac{z_{N2}}{z_C} \quad (3.10)$$

Com faixa de aplicação de:

$$\frac{z_{O2}}{z_C} \leq 0,667 \quad \pm 1\%$$

Já para a determinação do valor da exergia presente no alcatrão, fez-se:

$$b_{ch} = C_I \times \beta \quad (3.11)$$



onde:

$$\beta = 1,0401 + 0,1728 \frac{z_{H_2}}{z_C} + 0,0432 \frac{z_{O_2}}{z_c} + 0,2169 \frac{z_s}{z_c} \left( 1 - 2,0628 \frac{z_{H_2}}{z_C} \right) \quad (3.12)$$

Como a composição química da mistura de gases combustíveis, queimados nas várias unidades produtivas da usina, é diferente, foi necessária determinar a composição química da mistura de gases em cada uma das áreas, com os respectivos percentuais em volume.(ANEXO C).

Desta forma foi possível calcular a exergia total (química e física) presente nos combustíveis e nos produtos de combustão: (ANEXO B).

A equação utilizada para a determinação da exergia química da mistura de gases foi:

$$\tilde{\varepsilon}_{0M} = \sum_i x_i \tilde{\varepsilon}_{0i} + R T_0 \sum_i x_i \ln x_i \quad (3.13)$$

Já a exergia física dos gases combustíveis e dos gases de exaustão foi determinada por:

$$\varepsilon_{ph} = c_p (T - T_0) - T_0 \left( c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{P}{P_0} \right) \quad (3.14)$$

onde:

T e P são os valores de temperatura e pressão nos quais os gases são utilizados ou descartados (gases queimados).

$T_0$  e  $P_0$  representam a temperatura e a pressão de referência utilizada.

Para os demais insumos e produtos da planta, a determinação da exergia química foi possível por meio da equação:

$$b_{ch} = \sum_i z_i t_i \quad (3.15)$$

onde:

$z_i$  – percentual em massa dos componentes químicos do material.

$t_i$  – exergia química padrão dos componentes da mistura.

As hipóteses consideradas são:

- ✓ O volume de controle corresponde a um processo em regime permanente
- ✓ As variações na energia cinética e potencial que entram ou deixam o volume de controle não foram consideradas.
- ✓ Os gases de exaustão se comportam como ideais.

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 Balanço de Massa**

Conforme mencionado o balanço de massa foi realizado considerando-se em separado o total de água utilizado na planta.

Os resultados para as entradas e saídas estão apresentados em valores específicos (t / t de aço líquido) produzido.

O aço acabado total, apesar das diferentes geometrias e composições, foi agrupado em um único bloco, denominado de aço bruto total.

Na FIGURA 4.1 encontram-se as massas nas entradas e saídas do VC 1.

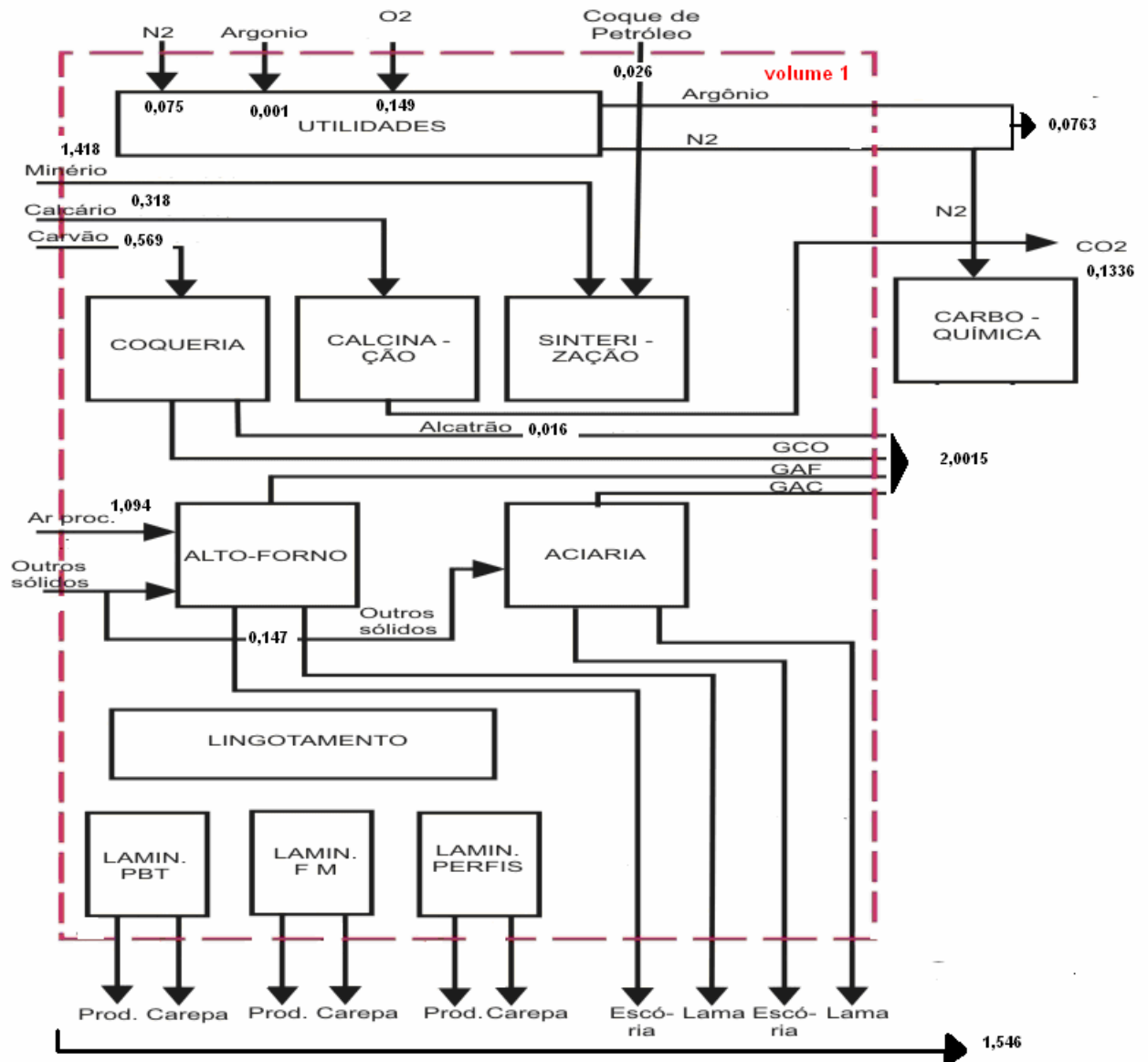


FIGURA 4.1 - Balanço de Massa VC1 (valores em t / t de aço líquido).

Pela FIGURA 4.1 observa-se que a quantidade de material sólido na entrada do volume de controle representa quase o dobro do volume total de gases criogênicos ( $N_2, O_2, Ar$ ) e de ar para processo consumidos.

Os sólidos considerados representam um total de mais de 35 materiais diferentes, entre fundentes e ligas metálicas. O carvão e o minério de ferro, juntos, totalizam cerca de 80% do total de material sólido na entrada do VC1.

Para o tratamento das quantidades de carvão e minério, a dificuldade encontrada referia-se à separação das quantidades estocadas desses materiais daquelas que realmente representavam as massas na entrada e saída do volume de controle. Os volumes estocados apresentaram uma variabilidade significativa durante o ano analisado e, assim sendo, exigiram um detalhamento maior das informações recebidas dos responsáveis pelo controle dos estoques.

É possível observar a diferença entre o total de material sólido na entrada do VC1 (2,478 t/t aço líquido) para apenas 0,850 t/ t aço líquido, que constituem o total de aço produzido. Essa diferença deve-se a transformação de parte do material sólido da entrada em gases combustíveis, à produção de resíduos sólidos ( carepas e escórias) e líquidos (alcatrão).

Pode-se, ainda, observar que os gases combustíveis, gerados através do próprio processo de fabricação do aço, representam 53% do total da massa na saída do VC 1. Tal volume de combustível é suficiente para a gerar energia e abastecer uma cidade com, aproximadamente, 40 mil habitantes por cerca de um ano.

Todo o gás combustível resultante do processo de fabricação do aço é reaproveitado internamente na empresa, seja para processos térmicos ou para a geração interna de energia.

Outro aspecto relevante é a quantidade de gás carbônico gerado através do processo de calcinação (0,134 t/t aço líq.), que pode vir a ser objeto de estudos e, consequentemente, de projetos para redução de emissões, apresentando uma possibilidade de ganho com a comercialização de cotas de emissão, conforme estabelecido pelo Protocolo de Kyoto\*.

A parcela de líquidos encontrada na saída do volume de controle representa todo o alcatrão gerado que é entregue a unidade carboquímica.

Todos os resultados apresentados podem ser encontrados na TABELA 4.1.

\* Protocolo de Kyoto – Documento apresentado através Convenção Quadro das Nações Unidas sobre mudanças no clima, que estabelece percentuais de redução dos volumes de gases de efeito estufa emitidos pelos diversos países do mundo.

TABELA 4.1 - Balanço de Massa –VC1

| <b>BALANÇO DE MASSA DO VOLUME DE CONTROLE 1</b> |              |                        |
|-------------------------------------------------|--------------|------------------------|
| <b>Entradas</b>                                 |              | <b>Onde.</b>           |
| gases (N2, Ar, O2 e ar para AF)                 | 1,319        | t/t aço líquido        |
| sólidos                                         | 2,478        | t/t aço líquido        |
| <b>TOTAL</b>                                    | <b>3,797</b> | <b>t/t aço líquido</b> |
| <b>Saídas</b>                                   |              | <b>Onde.</b>           |
| N2, Ar,                                         | 0,0763       | t/t aço líquido        |
| GCO, GAF e GAC                                  | 2,0045       | t/t aço líquido        |
| CO2 (calcinação)                                | 0,1336       | t/t aço líquido        |
| líquidos                                        | 0,016        | t/t aço líquido        |
| sólidos                                         | 1,546        | t/t aço líquido        |
| <b>TOTAL</b>                                    | <b>3,776</b> | <b>t/t aço líquido</b> |

Na TABELA 4.2 encontra-se o balanço de massa do VC 2, onde o processo de combustão dos gases é analisado e as emissões geradas conhecidas.

TABELA 4.2- Balanço de Massa -VC2

| <b>BALANÇO DE MASSA NO VOLUME DE CONTROLE 2</b> |              |                        |
|-------------------------------------------------|--------------|------------------------|
| <b>Entradas</b>                                 |              | <b>Unid.</b>           |
| GCO                                             | 0,062        | t/t aço líquido        |
| GAF                                             | 1,827        | t/t aço líquido        |
| GAC                                             | 0,113        | t/t aço líquido        |
| GN                                              | 0,001        | t/t aço líquido        |
| ar de combustão                                 | 2,144        | t/t aço líquido        |
| <b>TOTAL</b>                                    | <b>4,147</b> | <b>t/t aço líquido</b> |
| <b>Saídas</b>                                   |              | <b>Unid.</b>           |
|                                                 |              |                        |
| CO2                                             | 1,501        | t/t aço líquido        |
| H2O                                             | 0,182        | t/t aço líquido        |
| N2                                              | 2,432        | t/t aço líquido        |
| O2                                              | 0,017        | t/t aço líquido        |
| <b>TOTAL</b>                                    | <b>4,132</b> | <b>t/t aço líquido</b> |

Na entrada desse volume de controle destaca-se a participação significativa do gás de alto forno no processo de geração de energia. Apesar de seu poder calorífico inferior não superar o do gás de coqueria, o volume total de GAF gerado é 29,5 vezes maior que o volume de GCO produzido. Este maior volume permite a equalização das misturas de gases combustíveis, conseguindo-se um valor adequado de PCI, para cada processo.

O GAF é, ainda, amplamente utilizado para a geração de energia elétrica na Central Termoelétrica da empresa.

No período analisado nesse trabalho, a unidade siderúrgica gerava um pouco mais que 50% do total de energia elétrica por ela consumida naquele período.

Pela TABELA 4.2 destaca-se a elevada geração de CO<sub>2</sub> pelos processos de combustão, fazendo-se merecer, portanto, avaliações para a implementação de mecanismos “limpos” ou que minimizem os volumes desse gás emitidos à atmosfera.

A TABELA 4.3 apresenta o balanço de carbono para a unidade siderúrgica em análise.

TABELA 4.3 – Balanço de Carbono

| Entradas             |              | Saídas          |              |
|----------------------|--------------|-----------------|--------------|
| Carvão               | 0,38754      | GAF             | 0,34448      |
| Coque de Petróleo    | 0,02234      | GAC             | 0,03315      |
| Calcario             | 0,03821      | GCO             | 0,03225      |
| Antracito            | 0,02423      | Alcatrão        | 0,01263      |
| Ligas Metálicas      | 0,00987      | Aço e carepa    | 0,00307      |
| Grafite              | 0,00071      | CO <sub>2</sub> | 0,03645      |
| Dolomita Crua        | 0,00324      | Lama AF         | 0,00045      |
| Carbureto de Silício | 0,00000      | Lama AC         | 0,00069      |
| Sucata               | 0,00000      |                 |              |
| <b>Total</b>         | <b>0,486</b> |                 | <b>0,463</b> |

Pela TABELA 4.3 observa-se a perda de 5% do total de carbono disponibilizado na entrada do volume de controle global, principalmente, através dos gases gerados no processo.

A TABELA 4.4 apresenta o balanço de massa global da unidade, onde os valores encontrados nos volumes de controle VC1 e VC2 foram agrupados, permitindo uma análise geral da unidade.

TABELA 4.4- Balanço de Massa Global

| BALANÇO DE MASSA GLOBAL                            |              |                        |
|----------------------------------------------------|--------------|------------------------|
| Entradas                                           |              | Unid.                  |
| ar de combustão                                    | 2,144        | t/t aço líquido        |
| N <sub>2</sub> , Ar, O <sub>2</sub> e ar para o AF | 1,319        | t/t aço líquido        |
| sólidos                                            | 2,478        | t/t aço líquido        |
| <b>TOTAL</b>                                       | <b>5,941</b> | <b>t/t aço líquido</b> |
| Saídas                                             |              | Unid.                  |
| CO <sub>2</sub>                                    | 1,501        | t/t aço líquido        |

|                                    |              |                        |
|------------------------------------|--------------|------------------------|
| H2O                                | 0,182        | t/t aço líquido        |
| N2                                 | 2,432        | t/t aço líquido        |
| O2                                 | 0,017        | t/t aço líquido        |
| Gases<br>(N2, Ar e CO2 calcinação) | 0,21         | t/t aço líquido        |
| líquidos                           | 0,016        | t/t aço líquido        |
| sólidos                            | 1,546        | t/t aço líquido        |
| <b>TOTAL</b>                       | <b>5,904</b> | <b>t/t aço líquido</b> |

A TABELA 4.5 traz os desvios encontrados para os totais de massa que entram e que deixam os volumes de controle considerados, calculados a partir da determinação do quociente entre o total de massa na saída e na entrada de cada um dos volumes de controle.

A diferença encontrada para o balanço global justifica-se principalmente pela incerteza presente nas massas informadas, pois foram encontradas pequenas distorções entre os valores fornecidos, para os mesmos materiais, por fontes distintas.

Para minimizar a probabilidade de erros, optou-se por considerar apenas uma única fonte de dados.

TABELA 4.5- Desvios entre entradas e saídas

| Desvios        | %    |
|----------------|------|
| Balanço VC1    | 0,55 |
| Balanço VC2    | 0,36 |
| Balanço Global | 0,62 |

## 4.2 Balanço de massa - Águas

A entrada e a saída dos volumes totais de água foram consideradas separadamente e os resultados podem ser encontrados na TABELA 4.6

Tabela 4.6 – Balanço de massa Águas

| BALANÇO DE ÁGUA                                          | Consumos Específicos      |
|----------------------------------------------------------|---------------------------|
| <b>Entrada</b>                                           |                           |
| Água Bruta                                               | <b>9,445 t/t aço líq.</b> |
| <b>Saídas</b>                                            |                           |
| Produção de água potável                                 | 0,834 t/t aço líq.        |
| Geração de vapor                                         | 0,215 t/ t aço líq.       |
| Reposição de perdas por evaporação.<br>(make-up)         | 7,521 t/ t aço líq.       |
| Envio de água para uso direto<br>em sistemas industriais | 0,376 t/ t aço líq.       |



|                                         |                            |
|-----------------------------------------|----------------------------|
| Água para processo de extinção do coque | 0,498 t/ t aço líq.        |
| <b>Total</b>                            | <b>9,444 t/ t aço líq.</b> |

Apesar do índice de recirculação de água ser de 95%, superior em 1% à média nacional, destaca-se o grande volume de água utilizado na reposição de perdas por evaporação nas torres de refrigeração da usina, quase 80% de toda água enviada à planta.

Um cálculo simples pode ser feito para a determinação do total de água que necessita evaporar para promover o decaimento de temperatura necessário nas torres de refrigeração da usina.

Sabendo-se que  $mc_p \Delta T = \dot{m} h_{lv}$  e considerando-se valores médios:

Total de água recirculada = 150,42 t/t aço líq.

Calor específico da água a 37,5°C =  $4,18 \times 10^{-3}$  MJ/t . K

Entalpia de evaporação da água a 45°C = 2,3948 MJ/ t.

Temperatura média da água na entrada das torres: 45 °C.

Temperatura média da água na saída das torres: 30 °C.

Tem-se que a massa de água teórica necessária ao resfriamento nas torres é :

$$150,42 \times 4,18 \cdot 10^{-3} \times 15 = m \times 2,3948$$

$$m = 3,94 \text{ t/t aço líq.}$$

O que mostra que, aproximadamente, 52,4% do total de água utilizada na reposição de perdas nas torres seriam suficientes para garantir o resfriamento da água nas torres.

Esse resultado indica a possibilidade de se desenvolver alterações que permitam reduzir os volumes de água de reposição das torres de resfriamento, principalmente pela introdução de mecanismos que diminuam o arraste mecânico da água líquida.

Um melhor reaproveitamento da água também representa a garantia de abastecimento futuro, permitindo menores impactos quando da expansão da unidade produtiva ou da instalação de novos equipamentos.

Outro aspecto relevante deve-se a necessidade de se minimizar os descartes hídricos, afim de se garantir o cumprimento das legislações ambientais do estado ou da União.

### 4.3 Balanço de Energia

Aplicando-se a Primeira Lei da Termodinâmica, utilizando-se os fluxos de massa encontrados no balanço de massa e considerando-se a planta carboquímica como uma unidade em separado da usina, o balanço de energia foi realizado por meio da determinação das entradas e saídas sólidas, líquidas e gasosas.

Para a determinação das propriedades termodinâmicas (calores específicos e entalpias) dos insumos e produtos, utilizaram-se os valores disponíveis na literatura e na biblioteca interna do programa EES (2008).

Na TABELA 4.7 estão os insumos energéticos adquiridos pela empresa. Observa-se que o maior contribuinte em energia é o carvão, que responde por 68,5% do aporte energético na entrada do volume de controle; seguidos pelos gases combustíveis com 26,02%.

TABELA 4.7- Balanço de Energia – Entrada

| <b>ENTRADAS</b>    |                      |                |                       |                      |
|--------------------|----------------------|----------------|-----------------------|----------------------|
|                    | <b>temp.<br/>(K)</b> | <b>MWh/ano</b> | <b>PCI<br/>(MJ/t)</b> | <b>(GJ)</b>          |
|                    |                      |                |                       |                      |
| energia elétrica   |                      | 449.286,05     |                       | 1.617.429,78         |
| gás natural        | 298                  |                | 52.816,67             | 214.834,98           |
| carvão             | 298                  |                | 31.768,00             | 53.655.332,70        |
| coque de petróleo  | 298                  |                | 31.768,00             | 2.440.478,75         |
| gases combustíveis |                      |                |                       | 20.370.439,68        |
| <b>TOTAL</b>       |                      |                |                       | <b>78.298.515,89</b> |

Estes dados estão representados no GRÁFICO 4.1.

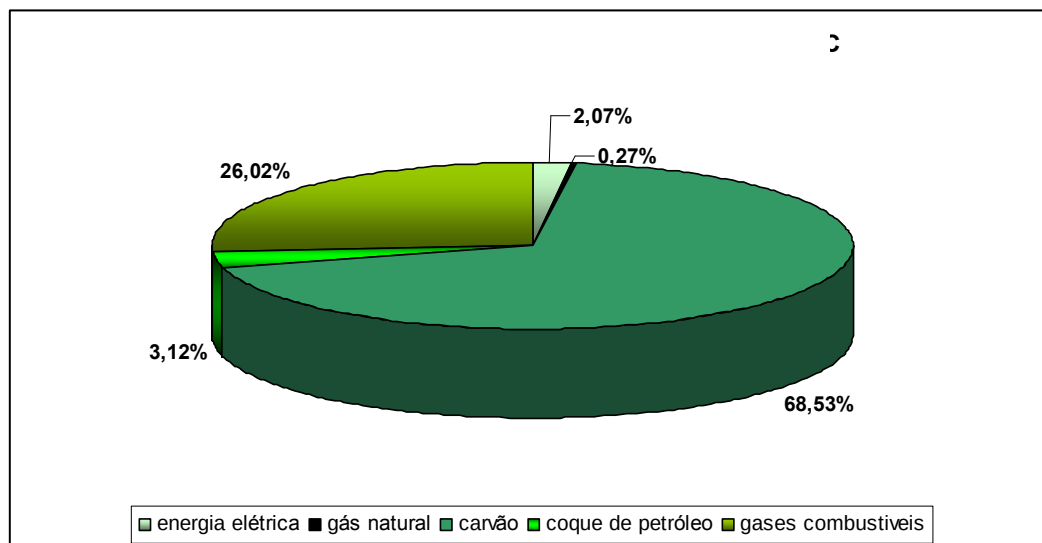


GRÁFICO 4.1 – Contribuição de Energia por insumo na entrada do volume de controle global

Na TABELA 4.8, onde estão listadas as fontes de energia na saída do volume de controle, pode-se observar que os gases GCO, GAF e GAC, que também representam uma parcela da energia na entrada do VC 2, contribuem com 35,2% do total de energia na saída do VC 1..

TABELA 4.8-Balanco de Energia - Saída

| SAÍDAS           |                  |                   |                                       |                      |           |             |                      |
|------------------|------------------|-------------------|---------------------------------------|----------------------|-----------|-------------|----------------------|
| SÓLIDOS          | temp. (K)        | cp ref. (MJ/t.K)  | cp a temperatura de produção (MJ/t.K) | cp médio (MJ/t.K)    | T ref (K) | Delta T (K) | mcpDeltaT (GJ)       |
| coque            | 1.373            | 0,850             | 1,571                                 | 1,211                | 298       | 1.075       | 1.521.890,10         |
| cal              | 365              | 0,810             | 0,810                                 | 0,810                | 298       | 67          | 9.269,55             |
| gusa líquido     | 1.760            | 0,398             | 0,786                                 | 0,592                | 298       | 1.462       | 2.479.443,58         |
| aço líquido      | 1.873            | 0,433             | 3,282                                 | 1,858                | 298       | 1.575       | 8.684.109,83         |
| laminação PBT    | 1.573            | 0,433             | 2,379                                 | 1,406                | 298       | 1.275       | 3.739.013,64         |
| laminação FM     | 1.453            | 0,433             | 2,265                                 | 1,349                | 298       | 1.155       | 691.036,95           |
| laminação Perfis | 1.500            | 0,433             | 2,390                                 | 1,412                | 298       | 1.202       | 744.983,26           |
| escória AF       | 1.673            | 0,752             | 1,242                                 | 0,997                | 298       | 1.375       | 993.838,04           |
| escória AC       | 1.373            | 0,701             | 0,742                                 | 0,722                | 298       | 1.075       | 586.363,05           |
| lama AF          | 393              | 0,660             | 0,660                                 | 0,660                | 298       | 95          | 378.713,58           |
| lama AC          | 1773             | 0,170             | 0,13                                  | 0,150                | 298       | 1.475       | 3.328,69             |
|                  |                  |                   |                                       |                      |           |             | <b>19.831.990,27</b> |
| GASOSAS          |                  |                   |                                       |                      |           |             |                      |
|                  | PCI (Mcal/Ndam³) | Ndam³/ t aço liq. | Gcal                                  | GJ                   |           |             |                      |
| GCO              | 4.376,23         | 0,14              | 1.822.455,06                          | <b>7.617.862,14</b>  |           |             |                      |
| GAF              | 825,98           | 1,34              | 3.273.875,80                          | <b>13.684.800,86</b> |           |             |                      |
| GAC              | 1.730,80         | 0,08              | 421.682,75                            | <b>1.762.633,89</b>  |           |             |                      |

|                                                              | temp.<br>(K)         | cp<br>(MJ/t.K)         | cp ref.<br>(MJ/t.K)                               | cp_medio<br>(MJ/t.K) | Delta<br>T (K)      | mcpDeltaT<br>(GJ) |                   |
|--------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------|---------------------------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| GCO                                                          | 850                  | 10,67                  | 9,29                                              | 9,98                 | 825                 | 1.580.286,27      |                   |
| GAF                                                          | 150                  | 1,54                   | 1,49                                              | 1,52                 | 125                 | 1.027.270,64      |                   |
| GAC                                                          | 1.500                | 1,42                   | 1,12                                              | 1,27                 | 1.475               | 626.789,17        |                   |
|                                                              |                      |                        |                                                   |                      |                     |                   |                   |
| perdas gases de<br>exaustão<br>(calor sensível)              | temp.<br>(K)         | cp saída<br>(MJ/t.K)   | cp<br>referência<br>(MJ/t.K)                      | cp médio<br>(MJ/t.K) | T ref<br>(K)        | Delta T<br>(K)    | mcpDeltaT<br>(GJ) |
| PBT                                                          | 773                  | 1,460                  | 1,35                                              | 1,405                | 298                 | 475               | 816.705,90        |
| Perfis                                                       | 523                  | 1,370                  | 1,35                                              | 1,360                | 298                 | 225               | 105.764,20        |
| Sinterização                                                 | 399                  | 1,320                  | 1,35                                              | 1,335                | 298                 | 101               | 10.881,61         |
| Caldeiras                                                    | 573                  | 1,390                  | 1,35                                              | 1,370                | 298                 | 275               | 1.978.665,50      |
| Aciaria                                                      | 1.373                | 1,610                  | 1,35                                              | 1,480                | 298                 | 1.075             | 336.768,23        |
| Calcinação                                                   | 493                  | 1,250                  | 1,35                                              | 1,300                | 298                 | 195               | 61.787,80         |
| Fio Máquina                                                  | 653                  | 1,410                  | 1,35                                              | 1,380                | 298                 | 355               | 111.547,45        |
| Alto Forno                                                   | 376                  | 1,240                  | 1,35                                              | 1,295                | 298                 | 78                | 252.251,95        |
| Coqueria                                                     | 1.073                | 1,540                  | 1,35                                              | 1,445                | 298                 | 775               | 2.469.665,63      |
|                                                              |                      |                        |                                                   |                      |                     |                   | 6.144.038,26      |
|                                                              |                      |                        |                                                   |                      |                     |                   |                   |
|                                                              | temp.<br>(K)         | cp ref.<br>(MJ/t.K)    | cp a<br>temperatura<br>de<br>produção<br>(MJ/t.K) | cp_médio<br>(MJ/t.K) | T_referencia<br>(K) | DELTA T<br>(K)    | mcpDeltaT<br>(GJ) |
| CO2 da<br>calcinação                                         | 493                  | 0,827                  | 1,011                                             | 0,919                | 298                 | 195               | 71.092,58         |
|                                                              |                      |                        |                                                   |                      |                     |                   |                   |
|                                                              |                      |                        |                                                   |                      |                     |                   |                   |
|                                                              | PCI<br>(Kcal/m³)     | KJ/m³                  | GJ                                                |                      |                     |                   |                   |
| GCO p/<br>carboquímica                                       | 4.410,00             | 18.433,80              | 318.693,86                                        |                      |                     |                   |                   |
|                                                              | temp.<br>(K)         | cp entrada<br>(MJ/t.K) | cp saída<br>(MJ/t.K)                              | cp médio<br>(MJ/t.K) | T ref<br>(K)        | Delta T<br>(K)    | mcpDeltaT<br>(GJ) |
| vapor a 12<br>kgf/cm2                                        | 543                  | 2,002                  | 4,183                                             | 3,09                 | 298                 | 245               | 66.982,34         |
| vapor a 25<br>kgf/cm2                                        | 543                  | 2,025                  | 4,183                                             | 3,10                 | 298                 | 245               | 39.817,02         |
| vapor na coqueria                                            | 373                  | 4,217                  | 4,183                                             | 4,20                 | 298                 | 75                | 466.200,00        |
| vapor de 12<br>Kgf/cm² para as<br>diversas<br>áreas da usina | 543                  | 2,00                   | 4,18                                              | 3,09                 | 298                 | 245               | 70.448,51         |
| ar de resfriamento<br>forçado sinter                         | 623                  | 1,005                  | 1,068                                             | 1,04                 |                     | 325               | 8.356,99          |
| <b>LÍQUIDOS</b>                                              |                      |                        |                                                   |                      |                     |                   |                   |
|                                                              | PCI<br>( KJ/kg)      | mcpDeltaT<br>(GJ)      |                                                   |                      |                     |                   |                   |
| alcatrão                                                     | 37.620,00            | 1.756.438,68           |                                                   |                      |                     |                   |                   |
|                                                              | temp.Entrada<br>(K)  | temp.Saída<br>(K)      | cp entrada<br>(MJ/t.K)                            | cp ref.<br>(MJ/t.K)  | Delta T<br>(K)      | mcpDeltaT<br>(GJ) |                   |
| Perda água na<br>torre de<br>refrigeração                    | 318                  | 308                    | 4,183                                             | 4,182                | 10                  | 18.674.565,27     |                   |
| Perda de água por<br>purgas/drenos                           | 318                  | 308                    | 4,183                                             | 4,18                 | 10                  | 259.160,00        |                   |
| Perda de água<br>circuito aberto                             | 318                  | 298                    | 4,183                                             | 4,18                 | 20                  | 116.873,51        |                   |
|                                                              | MWh                  | GJ                     |                                                   |                      |                     |                   |                   |
| energia elétrica p/<br>carboquímica                          | 17678,72             | 63.643,39              |                                                   |                      |                     |                   |                   |
|                                                              |                      |                        |                                                   |                      |                     |                   |                   |
| <b>TOTAL</b>                                                 | <b>74.187.943,65</b> |                        |                                                   |                      |                     |                   |                   |

O GRÁFICO 4.2 traz as contribuições de energia na saída por material.

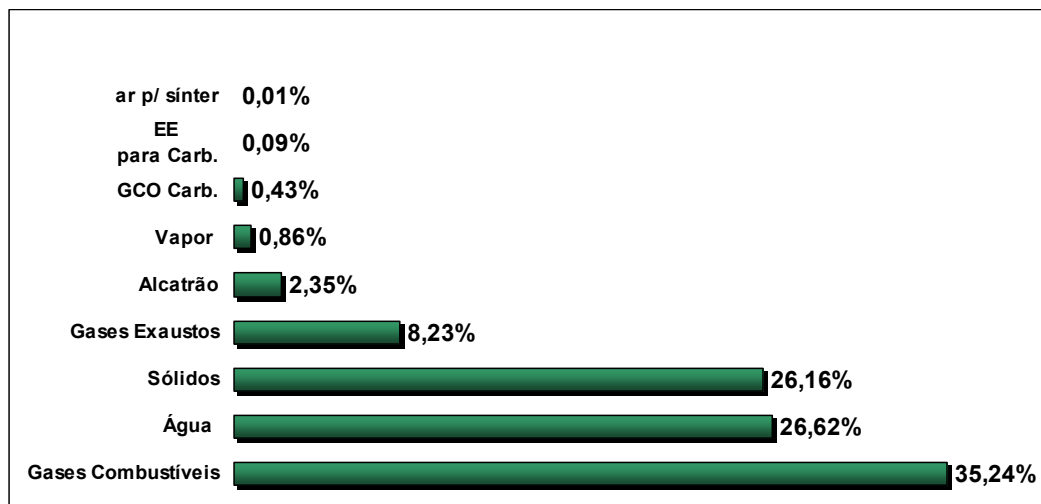


GRÁFICO 4.2 – Contribuição de Energia por produto na saída do volume de controle global.

Do total de material sólido produzido a maior quantidade de energia foi encontrada no aço líquido 8.684.109,83 GJ, seguido pelo produto da laminação PBT com 3.739.013,64 GJ.

A energia perdida através dos gases queimados por processo, totalizam 6.144.038,26 GJ. Ou seja, do total da energia (calor sensível e PCI) contida nos gases consumidos na empresa, 22% não foram realmente utilizados durante o ano em análise (TABELA 4.8).

A maior parte da energia perdida provém da coqueria, 2.469.655,63 GJ, sendo seguida pelas caldeiras, responsáveis pela emissão de 1.978.655,5 GJ.

Um outro ponto de destaque refere-se a energia liberada no processo de geração de CO<sub>2</sub> na produção de cal, 71.092,58 GJ, que não são reaproveitados.

O vapor, gerado a partir da água lançado ao coque para o resfriamento do mesmo, ao final de sua fabricação, apresenta o total de 466.200,00 GJ, significando um potencial interessante para estudos de reaproveitamento de energia, ou até mesmo para a análise da substituição desse tipo de resfriamento por outro que não envolva um consumo de água tão significativo, nem a perda dessa grande quantidade de energia.

O grande volume de água envolvido no processo de resfriamento direto de máquinas e equipamentos proporciona a geração de 18.674.565,27 GJ de energia. Que apesar da grande quantidade, é uma energia de difícil aproveitamento.

A diferença entre os totais de energia que entram e deixam o volume de controle global, é de 4.110.572,2 GJ, ou 5,2% do total da energia recebida pela planta.

A relação entre as energias que entram e saem do volume de controle, os principais consumidores e as maiores perdas são apresentados na forma de um diagrama de Sankey.

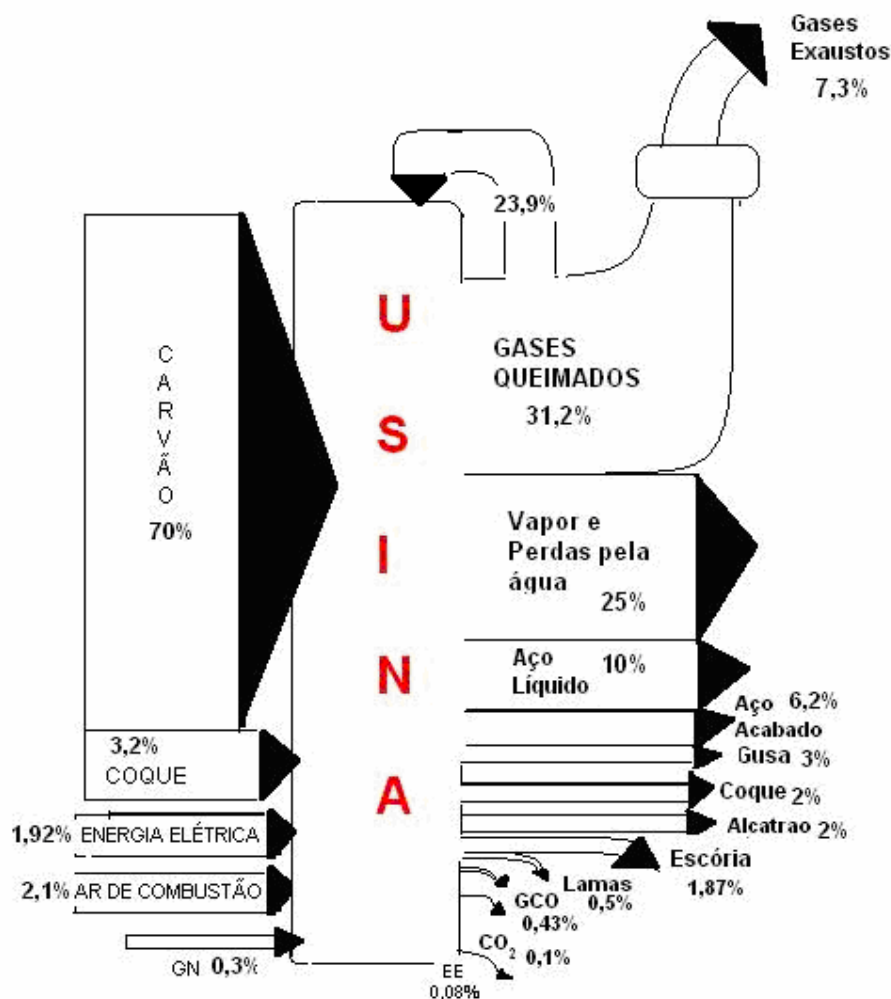


Figura 4.2 – Balanço de Energia – Diagrama de Sankey

#### 4.4 Balanço de Exergia

Para o balanço de exergia também se utilizou do recurso da separação do volume de controle global em dois volumes de controles intermediários (VC 1 e VC 2). Serão, então, apresentados os resultados encontrados para os dois casos, assim como, o resultado do balanço de exergia global.

Os valores de exergia para as substâncias que entram e saem dos volumes de controle, estabelecidas a partir das equações apresentadas no capítulo 3, são mostrados nas tabelas 4.8 a 4.15.

As TABELAS 4.9 a 4.13 contém dados referentes ao VC 2 (sistema de combustão de gases).

TABELA 4.9-  
Exergia química dos gases combustíveis

| Exergia química: T0=298,15K |                        |           |                      |              |                       |
|-----------------------------|------------------------|-----------|----------------------|--------------|-----------------------|
| Gás                         | $\epsilon_0$ (kJ/kmol) | (kg/kmol) | $\epsilon_0$ (kJ/kg) | massa(t)     | $\epsilon_0$ (GJ/ano) |
| GAF                         | 77.582,796             | 30,971    | 2.505,037            | 5.422.741,73 | 13.584.169,816        |
| GAC                         | 159.116,884            | 30,799    | 5.166,337            | 335.259,81   | 1.732.065,054         |
| GCO                         | 413.005,847            | 9,600     | 43.023,563           | 184.573,66   | 7.941.016,489         |
| GN                          | 871.146,779            | 17,342    | 50.234,619           | 4.067,56     | 204.332,328           |
| ar                          | 128,433                | 28,850    | 4,452                | 6.362.982,25 | 28.326,102            |
| <b>TOTAL</b>                |                        |           |                      |              | <b>23.489.909,78</b>  |

TABELA 4.10 -Exergia física dos gases combustíveis

| Exergia Física |                                           |                                |                           |                        |                         |
|----------------|-------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|
| gás            | componente                                | Exergia física molar (kJ/kmol) | massa molecular (kg/kmol) | Exergia física (kJ/kg) | Exergia física (GJ/ano) |
| GAF            | Dióxido de carbono - CO <sub>2</sub>      |                                | 44,0095                   |                        |                         |
|                | Hidrogênio - H <sub>2</sub>               |                                | 2,0159                    |                        |                         |
|                | Monóxido de carbono - CO                  |                                | 28,0105                   |                        |                         |
|                | Nitrogênio - N <sub>2</sub>               |                                | 28,0134                   |                        |                         |
|                | Oxigênio - O <sub>2</sub>                 |                                | 31,9988                   |                        |                         |
|                |                                           | <b>2.813,37</b>                | <b>30,9707</b>            | <b>90,84</b>           | <b>492.600,18</b>       |
| GAC            | Dióxido de carbono - CO <sub>2</sub>      |                                | 44,0095                   |                        |                         |
|                | Hidrogênio - H <sub>2</sub>               |                                | 2,0159                    |                        |                         |
|                | Monóxido de carbono - CO                  |                                | 28,0105                   |                        |                         |
|                | Nitrogênio - N <sub>2</sub>               |                                | 28,0134                   |                        |                         |
|                | Oxigênio - O <sub>2</sub>                 |                                | 31,9988                   |                        |                         |
|                |                                           | <b>35.219,84</b>               | <b>30,7988</b>            | <b>1.143,55</b>        | <b>383.385,17</b>       |
| GCO            | Acetileno - C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |                                | 26,0382                   |                        |                         |
|                | Dióxido de carbono - CO <sub>2</sub>      |                                | 44,0095                   |                        |                         |
|                | Etano - C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>     |                                | 30,0701                   |                        |                         |
|                | Etileno - C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>   |                                | 28,0542                   |                        |                         |
|                | Hidrogênio - H <sub>2</sub>               |                                | 2,0159                    |                        |                         |

|              |                                         |                  |                |                 |                     |
|--------------|-----------------------------------------|------------------|----------------|-----------------|---------------------|
|              | Metano - CH <sub>4</sub>                |                  | 16,0430        |                 |                     |
|              | Monóxido de carbono - CO                |                  | 28,0105        |                 |                     |
|              | Nitrogênio - N <sub>2</sub>             |                  | 28,0134        |                 |                     |
|              | Oxigênio - O <sub>2</sub>               |                  | 31,9988        |                 |                     |
|              |                                         | <b>22.796,11</b> | <b>9,5995</b>  | <b>2.374,71</b> | <b>438.309,32</b>   |
| GN           | Dióxido de carbono - CO <sub>2</sub>    |                  | 44,0095        |                 |                     |
|              | Etano - C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>   |                  | 30,0701        |                 |                     |
|              | Metano - CH <sub>4</sub>                |                  | 16,0430        |                 |                     |
|              | Nitrogênio - N <sub>2</sub>             |                  | 28,0134        |                 |                     |
|              | Oxigênio - O <sub>2</sub>               |                  | 31,9988        |                 |                     |
|              | Propano - C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> |                  | 44,0972        |                 |                     |
|              |                                         | <b>7.894,40</b>  | <b>17,3416</b> | <b>455,23</b>   | <b>1.851,68</b>     |
| Ar Combustão | Nitrogênio - N <sub>2</sub>             |                  |                |                 |                     |
|              | Oxigênio - O <sub>2</sub>               |                  |                |                 |                     |
|              |                                         | <b>0,00</b>      |                | <b>0,00</b>     | <b>0,00</b>         |
| <b>TOTAL</b> |                                         |                  |                |                 | <b>1.316.146,34</b> |

TABELA 4.11 - Exergia química dos produtos de combustão

| Exergia Química |                          |                                      |                        |                      |                         |
|-----------------|--------------------------|--------------------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|
| Setor           | ε <sub>0</sub> (kJ/kmol) | massa molecular da mistura (kg/kmol) | ε <sub>0</sub> (kJ/kg) | massa(t)             | ε <sub>0</sub> (GJ/ano) |
| PBT             | 3.165,760                | 29,31                                | 108,021                | 1.222.239,98         | 132.027,499             |
| Perfis          | 2.867,570                | 28,78                                | 99,633                 | 340.523,59           | 33.927,255              |
| Fio Máquina     | 3.134,329                | 29,24                                | 107,187                | 227.525,20           | 24.387,709              |
| Coqueria        | 4.525,343                | 31,73                                | 142,639                | 2.202.497,81         | 314.162,343             |
| Alto Forno      | 4.546,327                | 31,80                                | 142,949                | 2.495.461,26         | 356.724,226             |
| Sinterização    | 2.091,837                | 27,02                                | 77,420                 | 74.192,72            | 5.743,997               |
| Caldeiras       | 3.447,819                | 31,17                                | 110,616                | 5.246.467,56         | 580.341,368             |
| Aciaria         | 2.091,837                | 27,02                                | 77,420                 | 211.670,77           | 16.387,541              |
| Calcinação      | 2.013,818                | 67,74                                | 29,728                 | 243.738,78           | 7.245,878               |
| <b>TOTAL</b>    |                          |                                      |                        | <b>12.264.317,67</b> | <b>1.470.947,817</b>    |

TABELA 4.12- Exergia física dos produtos de combustão

| Exergia Física |     |                                |                                      |                        |                         |
|----------------|-----|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------|
| setor          | gás | Exergia física molar (kJ/kmol) | massa molecular da mistura (kg/kmol) | Exergia física (kJ/kg) | Exergia física (GJ/ano) |
| PBT            |     | <b>6.567,93</b>                | <b>29,31</b>                         | <b>224,11</b>          | <b>273.914,25</b>       |
| Perfis         |     | <b>1.873,33</b>                | <b>28,78</b>                         | <b>65,09</b>           | <b>22.164,05</b>        |
| Fio Máquina    |     | <b>4.086,35</b>                | <b>29,24</b>                         | <b>139,74</b>          | <b>31.795,22</b>        |
| Coqueria       |     | <b>14.621,56</b>               | <b>31,73</b>                         | <b>460,87</b>          | <b>1.015.070,86</b>     |
| Alto Forno     |     | <b>288,87</b>                  | <b>31,80</b>                         | <b>9,08</b>            | <b>22.665,96</b>        |
| Caldeiras      |     | <b>2.672,55</b>                | <b>31,17</b>                         | <b>85,74</b>           | <b>449.846,92</b>       |
| Aciaria        |     | <b>21.934,53</b>               | <b>27,02</b>                         | <b>811,81</b>          | <b>171.836,06</b>       |
| Calcinação     |     | <b>1.341,45</b>                | <b>27,02</b>                         | <b>49,65</b>           | <b>12.101,04</b>        |
| <b>TOTAL</b>   |     |                                |                                      |                        | <b>2.000.630,82</b>     |



Fechando-se o balanço para o VC 2, tem-se que:

TABELA 4.13 - Balanço de Exergia VC 2

| <b>Entrada de exergia</b>            | <b>GJ/ano</b>        |
|--------------------------------------|----------------------|
| Gases comb. - exergia química        | 23.489.909,79        |
| Gases comb. - exergia física         | 1.316.146,34         |
| <b>TOTAL</b>                         | <b>24.806.056,13</b> |
| <b>Saída de exergia</b>              | <b>GJ/ano</b>        |
| Prod. da combustão - exergia química | 1.470.947,82         |
| Prod. da combustão - exergia física  | 2.000.630,82         |
| <b>TOTAL</b>                         | <b>3.471.578,64</b>  |

Devido às altas temperaturas envolvidas em um processo de combustão, é inevitável alguma perda de calor. Essa forma de irreversibilidade é calculada por:

$$\dot{I}^Q = \dot{Q}_0 \cdot \frac{T_m - T_0}{T_m} \quad (4.1)$$

onde  $T_m$  é a temperatura média dos processos de combustão e  $\dot{Q}_0$  é a taxa de calor transferida ao ambiente.

A irreversibilidade intrínseca média dos processos de combustão pode, então, ser admitida por

$$I = E_e - E_s - \dot{I}^Q \quad (4.2)$$

$$I = 6.344.060,5 \text{ GJ/ano}$$

Do total de 24.806.056,13 GJ de exergia gerados por ano, a partir da queima dos gases combustíveis, 6.344.060,50 GJ são destruídos pelas irreversibilidades inerentes ao processo.

Esse resultado aproxima-se bastante daquele encontrado para a energia presente nos gases exaustos, 6.144.038,26 GJ, que são lançados à atmosfera sem reuso.

Para as entradas e saídas do VC1, tem-se que:

TABELA 4.14 -Balanço de Exergia VC 1 - Entrada

| BALANÇO DE EXERGIA |                          |               |                          |                            |                          |
|--------------------|--------------------------|---------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| VC1                |                          |               |                          |                            |                          |
| ENTRADAS           |                          |               |                          |                            |                          |
| Material           | exergia química (GJ/ano) | Material      | exergia química (GJ/ano) | Material                   | exergia química (GJ/ano) |
| Minério de Ferro   | 715.869,17               |               |                          |                            |                          |
| Calcário           | 1.172.072,73             | FeCrBC        | 624,33                   | Cal Dolomitica             | 141.167,21               |
| Carvão             | 51.488.378,74            | FeTi          | 1.450,62                 | Carbureto de Silício       | 162.437,70               |
| Dolomita           | 53.112,51                | FeV           | 756,41                   | Grafite                    | 66.278,16                |
| Serpentinito       | 164.055,77               | FeMoBC        | 1.798,41                 | Argônio                    | 1.076,12                 |
| Antracito          | 597.743,40               | Ni elet       | 403,92                   | N2                         | 57.303,51                |
| Hematitinha        | 5.024,39                 | Sucata        | 654,05                   | O2                         | 54.705,44                |
| Quartzo            | 114,98                   | FeB           | 177,33                   | Coque de Petróleo          | 2.611.637,92             |
| FeSiMn             | 352.745,89               | FeMnMC        | 190,44                   | Ar de Combustão            | 28.326,10                |
| FeMnAC             | 38.969,99                | FeSi em fio   | 2.391,16                 | Ar de processo             | 743.820,46               |
| Mn                 | 10.679,90                | Al            | 71.411,75                | GN ( exergia Química)      | 204.332,33               |
| FeSi75             | 110.675,28               | CaSi em fio   | 6.491,86                 | GN (exergia Física)        | 2.136,17                 |
| FeCrAC             | 47.842,15                | Dolomita Crua | 83.722,62                | Energia Elétrica Adquirida | 1.617.429,78             |
| Nefelina           | 10.080,10                | Fluorita      | 1.291,91                 | água                       | 1.277.030,42             |
|                    |                          |               |                          | <b>TOTAL</b>               | <b>61.906.411,10</b>     |

TABELA 4.15 - Balanço de Exergia VC 1 - Saída

| BALANÇO DE EXERGIA   |                          |                         |                          |
|----------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| VC 1                 |                          |                         |                          |
| SAÍDAS               |                          |                         |                          |
| Material             | Exergia Química (GJ/ano) | Material                | Exergia Química (GJ/ano) |
| Alcatrão             | 1.874.561,74             | Lama AC                 | 370.291,63               |
| Argônio              | 1.076,12                 | Escoria AC              | 1.200.763,72             |
| N2                   | 57.303,51                | Escoria AF              | 1.026.121,55             |
| O2                   | 54.705,44                | Lama AF                 | 67.070,93                |
| Aço+Carepa           | 20.665.784,21            | CO2 (calcinação)        | 10.077.273,67            |
| <b>TOTAL PARCIAL</b> |                          |                         | <b>35.394.952,52</b>     |
| Água e Vapor:        |                          |                         |                          |
|                      | Exergia química (GJ/ano) | Exergia física (GJ/ano) | Exergia total (GJ/ano)   |
| torres               | 960.413,75               | 22.781,20               | 983.194,95               |
| perda cerca. Fechado | 154.868,02               | 3.673,50                | 158.541,52               |
| Refrig. Direta       | 55.872,53                | 1.325,31                | 57.197,84                |
| Vapor p/áreas        | 49.055,52                | 14.326,08               | 63.381,60                |
| vapor 12 kgf/cm2     | 46.619,29                | 13.614,61               | 60.233,90                |

|                                         |            |           |                      |
|-----------------------------------------|------------|-----------|----------------------|
| carboq.                                 |            |           |                      |
| vapor 25 kgf/cm <sup>2</sup><br>carboq. | 27.609,73  | 13.351,23 | 40.960,95            |
| extinção do coque                       | 780.446,00 | 22.540,40 | 802.986,40           |
| <b>TOTAL PARCIAL</b>                    |            |           | <b>2.166.497,17</b>  |
|                                         |            |           |                      |
| <b>TOTAL</b>                            |            |           | <b>37.561.449,69</b> |

Para os materiais listados nas TABELAS 4.14 e 4.15 observa-se uma degradação significativa da exergia, pois do total disponível na entrada 61.906.411,10 GJ, apenas 35.394.952,52 GJ são observados na saída, ou seja, 57% do total da exergia é, realmente, incorporada aos produtos e resíduos diretamente resultantes do processo de produção do aço.

Os demais materiais presentes na saída do VC 1 (vapor e água) possuem um total de exergia importante 2.166.497,17 GJ; porém não representam subprodutos diretos da fabricação de aço.

Apesar desse fato, vapores e água apresentam um potencial relevante para reuso da exergia, demandando, portanto, estudos para avaliar a implantação de alterações nos processos, ou projetos que permitam reaproveitar a maior parcela possível de exergia, principalmente no que se refere aos vapores gerados.

A produção de vapor, para os mais variados fins, implica na queima de gases combustíveis e, conseqüentemente, na geração de poluentes. Um melhor rendimento dos processos consumidores de vapor implica, portanto, em um uso mais racional dos combustíveis, promovendo economias, diminuindo o consumo de água e reduzindo emissões.

Considerando o volume de controle global, no qual a exergia disponibilizada pelos gases combustíveis representa uma das saídas do VC 2 e uma das entradas do VC 1; o balanço de exergia da planta siderúrgica em estudo apresenta os seguintes resultados:

TABELA 4.16 - Balanço de Exergia Global

| <b>Balanço de Exergia Global</b> | <b>GJ/ano</b> |
|----------------------------------|---------------|
| Total Entradas                   | 80.368.406,73 |
| Total Saídas                     | 44.504.606,97 |
| Diferença                        | 35.863.799,76 |

Pela TABELA 4.16 observa-se que 35.863.799,76 GJ/ano não são incorporados aos produtos nem aos resíduos gerados pela usina, sendo destruídos ao longo do processo de

produção do aço. Esse valor representa 47% de toda a exergia disponibilizada pelas matérias primas e utilidades necessárias ao processo produtivo.

Para o valor da eficiência exergética, calculado a partir da determinação do quociente entre a exergia do aço acabado produzido e a exergia total de entrada (TABELA 4.15), tem-se o resultado de:

$$\eta = \frac{20.665.784,21}{80.368.606,97} ;$$

$$\eta = 25,7\%$$

Considerando-se por produtos dessa planta todos os materiais produzidos que são comercializados, agregam-se, ainda, ao aço acabado os seguintes materiais: alcatrão, escória de aciaria e escória de alto forno.

E assim sendo, o valor da eficiência exergética passa a ser:

$$\eta = \frac{22.892.669,48}{80.368.606,97} ;$$

$$\eta = 28,5\%$$

A eficiência exergética encontrada nesse estudo, apresenta-se bem próxima da faixa de eficiências apresentada no estudo de Costa et al., (2001), que apresenta resultados de eficiência exergética para uma planta integrada dentro de uma faixa de 30 a 53%,

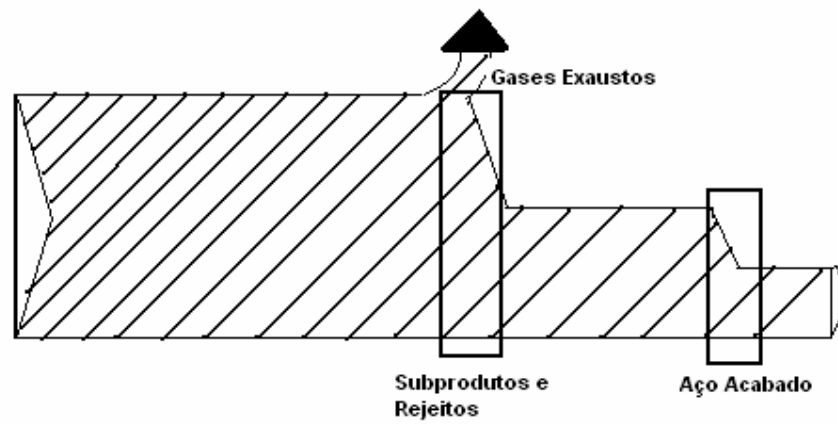


Figura 4.4 – Diagrama de Grassmann – Balanço Global.

## 5. CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi realizada a análise exergetica de uma usina siderúrgica integrada. Para isso foram calculados os balanços de massa, de energia e exergia da unidade, com base na produção da planta durante o período de um ano.

O agrupamento de todas as informações necessárias à realização do balanço de massa mostrou-se ser tarefa bastante trabalhosa, uma vez que, fontes de informação diferentes, por vezes, possuíam dados não coincidentes para o mesmo material.

A grande variabilidade de fornecedores para um único insumo, aliada a dificuldade de se confirmar a composição química de alguns materiais, representaram um outro ponto de dificuldades, exigindo maior pesquisa e várias consultas as diversas fontes de informação.

As diferenças encontradas para as massas totais nas entradas e saídas do VC 1, do VC 2 e do volume de controle global (TABELA 4.4), todas inferiores à 1%, podem ser admitidas dentro da incerteza das balanças utilizadas na pesagem dos vários materiais, conforme descrito por Zanoni (2004)..

Na realização dos balanços de massa destaca-se o grande volume de água utilizada pela planta. O consumo específico médio obtido para essa unidade foi de 9,44 m<sup>3</sup> de água para cada tonelada de aço líquido produzido (TABELA 4.5), o que significa que durante o período de um ano esse volume de água foi retirado da natureza, utilizado e posteriormente descartado.

Observa-se que a maior parcela dessa água é utilizada para a reposição do total perdido nos sistemas de refrigeração de água através das torres de resfriamento. Essas perdas ocorrem, principalmente, pela evaporação da água (80%) sendo o restante utilizado para a reposição das perdas de água líquida, ocorridas através de drenos e sistemas de purga, utilizados no balanceamento das quantidades de produtos químicos consumidos no tratamento da água.

Cálculos para a determinação da massa teórica de água necessária à evaporação, mostraram que bastariam 3,940 t água/ t aço líquido para promover o resfriamento necessário aos diversos processos, porém são consumidos 7,521 t água/ t aço líquido.

Pode-se, então, concluir, que 3,581 t água/ t aço líquido (diferença entre os valores reais e teóricos para a água necessária ao resfriamento) é perdida não pela mudança de

estado, mas sim, por fatores tais como: arraste mecânico ou *drift*, quando algumas gotas são levadas em suspensão, junto com o ar para a atmosfera, formando uma pluma visível.

A melhoria do material de enchimento das torres, que geralmente constituem-se de pequenas placas de madeira perfurada, por material que minimize o arraste mecânico pode ser uma alternativa para a redução do grande volume de água perdido

Outra possibilidade para a redução de, até, 6% do consumo de água no processo industrial refere-se ao resfriamento do coque por outro tipo de fluido, como, por exemplo, o nitrogênio.

Já para as perdas de água líquida que ocorrem através de purgas e drenos, podem ser desenvolvidos mecanismos mais eficientes de balanceamento dos produtos químicos, que minimizem a perda para equalização de parâmetros físico - químicos, ou, ainda, podem ser desenvolvidos meios para se reutilizar a água descartada, utilizando-a para a lavagem de ruas ou de espaços externos às áreas de produção, por exemplo.

A diferença encontrada entre a entrada e a saída do balanço de energia - 5,74% - pode ser avaliada através dos seguintes itens:

- ✓ Não mensuração dos valores de energia mecânica gerada e consumida na empresa.
- ✓ Pelo erro na determinação da massa de algum dos materiais que considerados no balanço.

Pelo balanço de exergia pode-se avaliar que existe uma grande destruição da exergia durante o processo global de produção do aço; o que leva a uma baixa eficiência do processo como um todo.

Há uma grande quantidade de exergia acumulada nos gases exaustos (TABELA 4.10), sendo que parte dessa exergia poderia ser utilizada para promover o aquecimento de água, por exemplo, ou ainda para reaquecer os combustíveis gasosos utilizados, proporcionando um ganho de eficiência nos processos de combustão.

No caso do aquecimento de água, gases exaustos da sinterização poderiam ser utilizados para aquecer a água utilizada no processo de hidratação da cal e, dessa maneira, promover uma redução da quantidade de coque que compõe a mistura de sinter, reduzindo, ainda, a energia necessária à secagem da sinter.

Para a planta siderúrgica em estudo, avaliações já realizadas mostram que a adição da água aquecida à cal, por meio dos produtos de exaustão, pode levar à redução de até 0,5 kg

de coque para cada tonelada de sínter produzida, e, ainda, proporcionar uma redução de 0,05 kg/ t de sínter de gás combustível utilizado no forno de secagem de sínter.

Para as demais perdas líquidas, a substituição de linhas de refrigeração que não voltam às torres, sendo diretamente descartadas ao ambiente, também representa um potencial de reuso de água e diminuição dos consumos.

Outra maneira de se reduzir o total de exergia descartado ao ambiente (TABELAS 4.7 e 4.15) seria minimizar a água de lavagem de filtros e utilizar lavagem em contra corrente em vários estágios.

A exergia total presente nesse volume de água descartado ao meio ambiente, 1.198.93431 GJ, ( TABELA 4.7) seria suficiente para gerar 333.037,31 MWh/ano.



## **6. PROPOSTA DE CONTINUIDADE**

O trabalho teve por objetivo apresentar os resultados dos balanços de massa, energia e exergia de uma usina siderúrgica integrada, a partir da análise global da planta.

Apresentou-se ainda o valor da destruição de exergia ao longo do processo de produção do aço e algumas possibilidades para a recuperação dessa.

Como proposta de continuidade de estudos, alguns pontos podem ser destacados:

- ✓ Desenvolver os balanços setoriais, das unidades internas da planta.
- ✓ Identificar quais unidades são as maiores destruidoras ou geradoras de exergia.
- ✓ Propor alteração no modo de execução de alguns processos de maneira a melhorar a eficiência energética dos mesmos.
- ✓ Propor a instalação de novas tecnologias para promover ganhos de eficiência.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ahern, J. E., *the Exergy Method of Energy Systems Analysis*, Wiley ed. 1980.
2. Andrade, M. L., Cunha, L.M.S., Souza E.S.S., *Siderurgia no Brasil: Produzir mais para exportar*,. Mineração e Siderurgia, No 5. BNDES, pp. 3- 28, 2007.
3. Andrade, M., L., Cunha, L., M., Vieira, J., R., Keller M., *Setores Minero Metalúrgico e Siderúrgico*, BNDES, pp., 2-28, 2001.
4. Associação Brasileira de Metais, *Sistema de Energia na Siderurgia*, Édile, pp.11, São Paulo, 1984.
5. Atanasova, L., *Exergy Analysis of the Process of Thermal Decomposition of Phosphogypsum to Lime and Sulfur Dioxide*, Int. J. Applied Thermodynamics, vol. 5, pp., 119-126, 2002.
6. Beer De J., Worrell E., Blok K., *Future Technologies for Energy Efficient Iron and Steel Making*. Ammu Rev Energy Envirom., pp.123-205,1998.
7. Bilgen, S., Kaygusuz, K., *The calculation of the chemical exergys of coal- based fuels by using the higher heating values*, Applied Energy, Elsevier, vol. 85, pp., 776-785, 2008.
8. Bisio, G., Bosio, A., Rubatto, G., *Thermodynamics applied to oxygen enrichment of combustion air*, Energy Conversion and Management, Pergamon, vol. 43, pp. 2589-2600, 2002.
9. Brasil - Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética, *Balanço Energético Nacional 2007: ano base 2006/ Sumário Executivo*, EPE, pp.19, 2007.
10. Brauer, M., Jeshar, *Exergie für die thermodynamische Untersuchung des Hochofenverfahrens*, Arch. für das Eisenhüttenwesen, vol. 34, no. 1, pp. 9-16, 1963.
11. Costa M.M., Schaeffer R., Worrell E., *Exergy accounting of energy and materials flows in steel production systems*. Universidade Federal do Rio de Janeiro e Lawrence Berkeley National Laboratory, pp.213 a 220, Brasil – Canadá, 2000.
12. Costa, M., M., Schaeffer, R., Worrel, E., *Exergy accounting of energy materials flows in steel productions systems*, Pergamon, vol. 26, pp.363-384, 2001.
13. Dincer, I., Cengel, Y.A. *Energy, Entropy and Exergy concepts and Their Roles in Thermal Engineering*. Entropy. Vol 3, pp. 116-149, 2001.
14. Dincer, I., Rosen, M. A., *Exergy as driver for achieving sustainability*, Int. J.Green

15. Energy, vol. 1, Elsevier, pp.1-19, 2004
16. E&E – Economia e Energia. *Participação do setor industrial no PIB*. [.http://ecen.com/eee28/6setindust.htm](http://ecen.com/eee28/6setindust.htm), consultado em maio 2008.
17. Ertesvag, I., S., *Sensitive of the chemical exergy for atmospheric gases and gaseous fuels to variations in ambient conditions*, pp. 1- 26, 2006.
18. Fox, R., W., et al., *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, 6ª edição, LTC ed., Rio de Janeiro 2006.
19. Gong, M., Wall, G., *on exergy and sustainable development – part 2: Indicators and methods*, Exergy Int. J., vol. 4, pp. 217-233, 2001.
20. Incropera, F., R., DeWitt, D., P., *Fundamentos de transferência de calor e massa*, 4ª edição, LTC ed., Rio de Janeiro, 1996.
21. Instituto Brasileiro de Siderurgia., *A história da Siderurgia no Brasil*, [http://www.ibs.org.br/numeros\\_siderurgia.asp](http://www.ibs.org.br/numeros_siderurgia.asp), consultado em maio de 2008.
22. Kotas, T.J., *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, Krieger, Florida, 1995
23. Kotas, T. J., *Exergy concepts for thermal plants*. Int. Journal Heat & Fluid Flow, vol.2, No 3, pp 105 -114, 1980.
24. Leal P. M., Cortez L. A. B., Nebra S. A., *Avaliação exergética de processos psicrométricos*. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental. Unicamp, pp.1-7, 2000.
25. Lopez, L., Blanco, J., M., Bonilla, J., J., Baeza, S., Sala, J., M., *Determination of energy and exergy of waste heat in the industry of the basque country*. Applied Thermal Engineering, Pergamon, vol, 18, pp., 187-197, 1998.
26. Michaelis P., Jackson T., Clift R., *Exergy analysis of the life cycle of steel*. Energy, vol. 23, No 3, pp. 213-220, Elsevier, 1998.
27. Moody's Investors Service, *Moody's Global Infrastructure – Regulatory Environment Improves for Brazilian electric utilities* pp., 2-29, 2008.
28. Moran J., Shapiro N., et al., *Introduction to Thermal Systems Engineering – Thermodynamics, Fluid Mechanics and Heat Transfer*, 1ª edição, John Wiley & Sons, Inc, New York, 2003.

29. Pinheiro, P.C. *Aspectos da Conservação de energia no setor de automóveis e auto peças*. I Encontro de Conservação de Energia, Setor Automóveis e Auto Peças. CEMIG, pp.1-17., 1996.
30. Sahin A., *Importance of Exergy Analysis in Industrial Processes*. King Fahd University of Petroleum and Minerals, pp.1-6, 2002.
31. Szargut J., Morris D.R., Steward F.R., *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical process*. Hemisphere Publishing Corporation, New York 1988.
32. Szargut J., Morris D.R., Steward F.R., *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical process*. Hemisphere Publishing Corporation, New York 1988.
33. Sciuba, E., Bastianoni, S., Tiezzi., *Exergy and extended exergy accounting of very large complex systems with an application to the province of Siena, Italy*, Journal of Environmental Management, vol. 86, no 2, pp., 372-382, 2005.
34. Som S.K., Datta A., *Thermodynamic irreversibilities and exergy balance in combustion processes*, Progress in Energy and Combustion Science, Elsevier, vol. 34, pp., 351-376, 2008.
35. Torres, E.A., *Análise Exergética*, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.
36. Torres, E., A., Gallo, W., L., R., *Exergetic evaluation of a cogeneration system in a petrochemical complex*, Energy Convers, Pergamon, vol. 39, no 16-18, pp. 1845-1852.
37. Van Wylen G.J., et al., *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*, 5ª edição, Edgard Blucher ed. São Paulo, 1995.
38. Vasconcelos E. L., *Cenários e Perspectivas Energéticas*. Seminário CICE. CEMIG., Slides 2 – 48, 2008.
39. Zanoni, Cícero., *Análise Exergética de um Forno Elétrico a Arco*, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2004.
40. Zhang G.et. al., *Energy and exergy analyses of iron smelting processes*. Energy, vol. 15, pp. 2772-2783, 2004.
41. Wall, G. *Exergy – A useful concept within resource accounting*, Institute of Theoretical Physics. Report no.77-142, 1977.
42. Wall G. *On exergy and sustainable development Part 1: Conditions and concepts*, Exergy Int. J. p128-145, Elsevier, 2001.

43. Winter, C.J., *Energy efficiency, no: It's exergy efficiency*, International Journal of Hydrogen Energy, Elsevier, vol.32, pp.,4109-4111.
44. Woudstra, N., *Value diagrams and exergy efficiencies*, [www.3me.tudelft.nl/live/pagina.jsp/html/3me/3me.htm](http://www.3me.tudelft.nl/live/pagina.jsp?url=/html/3me/3me.htm), consultado em maio 2008.

## **8 ANEXOS**

# ANEXO A – DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS TERMODINÂMICOS DOS MATERIAIS

**TABELA 1- Propriedades termodinâmicas dos gases - entrada**

| gas             | Volume<br>(Nm <sup>3</sup> /ano) | P (kPa)  | T(K) | R (kJ/kg.K)                 | cp (kJ/kg.K) | s (kJ/kg.K) | ε <sub>0</sub> (kJ/kg) |
|-----------------|----------------------------------|----------|------|-----------------------------|--------------|-------------|------------------------|
|                 |                                  |          |      | ( a 298,15 K e 101,325 kPa) |              |             |                        |
| GN              | 7.249,57                         | 686,47   | 298  | 0,498                       | 2,2          | 11,25       | 51.040,36              |
| Ar de Combustão | 13.225.595,74                    | 101,325  | 298  | 0,204                       | 0,865        | 5,832       | 42,16                  |
| Argônio         | 2.062.000,00                     | 980,67   | 298  | 0,208                       | 0,5216       | 0           | 467,02                 |
| O <sub>2</sub>  | 308.777.390,00                   | 2.451,67 | 298  | 0,26                        | 0,92         | 6,404       | 127,04                 |
| N <sub>2</sub>  | 176.173.650                      | 686,47   | 298  | 0,297                       | 1,04         | 6,832       | 19,06                  |

**TABELA 2 - Propriedades termodinâmicas dos sólidos - entrada**

| sólido                | Massa<br>(t/aço liq.)* | Composição                             | T(K) | %<br>umidade | cp (EES)<br>(kJ/kgmol.K)              | h (kJ/kgmol)                            | s (kJ/kgmol.K)                       | ε <sub>0</sub> (kJ/kg)                  |
|-----------------------|------------------------|----------------------------------------|------|--------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| Carvão                | 0,00111                | Cinza 7,75%                            | 298  | 10           | Cinza                                 | Cinza                                   | Cinza                                | 30.474,70                               |
|                       |                        | C 68,11%                               |      |              | C 20,84                               | C 714924                                | C 158                                | C <sub>graf</sub> 34,1557               |
|                       |                        | H 4,52%                                |      |              | H 20,79                               | H 217965                                | H 114,6                              | H <sub>(g)</sub> 328,67                 |
|                       |                        | N 1,33%                                |      |              | N 20,79                               | N 472603                                | N 153,2                              | N <sub>(g)</sub>                        |
|                       |                        | S 0,5%                                 |      |              | S 23,69                               | S 277337                                | S 167,7                              | S <sub>(s)</sub> 19,01                  |
|                       |                        | O 7,8%                                 |      |              | O 21,9                                | O 249182                                | O 160,9                              | O <sub>(g)</sub> 14,60                  |
| Composição das cinzas |                        | SiO <sub>2</sub> : 50%                 |      |              | SiO <sub>2</sub> 44,05                | SiO <sub>2</sub> -322060                | SiO <sub>2</sub> 228,7               | SiO <sub>2</sub> 0,0316                 |
|                       |                        | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 25%   |      |              | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 86,87  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -546870  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 316,6 | Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> 1,965 |
|                       |                        | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 10%   |      |              | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 104,4  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -825280  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 87,34 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 199,448  |
|                       |                        | CaO : 10%                              |      |              | CaO 32,45                             | CaO 37998                               | CaO 219,7                            | CaO <sub>(s)</sub> 1,965                |
|                       |                        | MgO : 2,5%                             |      |              | MgO 31,45                             | MgO 4180                                | MgO 221,3                            | MgO 1,6571                              |
|                       |                        | Na <sub>2</sub> O : 1,0%               |      |              | Na <sub>2</sub> O 56,77               | Na <sub>2</sub> O -16567                | Na <sub>2</sub> O 271,3              | Na <sub>2</sub> O 4,77                  |
|                       |                        | K <sub>2</sub> O : 0,5%                |      |              | K <sub>2</sub> O 54,17                | K <sub>2</sub> O -74090                 | K <sub>2</sub> O 286,5               | K <sub>2</sub> O <sub>(s)</sub> 4,38    |
|                       |                        | TiO <sub>2</sub> =1%                   |      |              | TiO <sub>2</sub> 44,08                | TiO <sub>2</sub> -305418                | TiO <sub>2</sub> 260,1               | TiO <sub>2(s)</sub> 0,2678              |
| Minério de Ferro      | 1,56202                | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 82,855% | 298  | 9            | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 104,4  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -825280  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 87,34 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 199,448  |
|                       |                        | FeO 1,242%                             |      |              | FeO 31,45                             | FeO 215090                              | FeO 242                              | FeO <sub>(s)</sub> 1,7676               |
|                       |                        | SiO <sub>2</sub> 3,758%                |      |              | SiO <sub>2</sub> 44,05                | SiO <sub>2</sub> -322060                | SiO <sub>2</sub> 228,7               | SiO <sub>2</sub>                        |
|                       |                        | MnO 0,364%                             |      |              | MnO                                   | MnO                                     | MnO                                  | MnO <sub>(s)</sub> 119,4                |
|                       |                        | P 0,036%                               |      |              | P 20,79                               | P 333873                                | P 163,2                              | P 28,2716                               |
|                       |                        | H <sub>2</sub> O(L) 9,00%              |      |              | H <sub>2</sub> O <sub>(L)</sub> 75,28 | H <sub>2</sub> O <sub>(L)</sub> -285691 | H <sub>2</sub> O <sub>(L)</sub> 70,4 | H <sub>2</sub> O <sub>(L)</sub> 0,04995 |
| Calcário              | 0,31839                | CaO 53%                                | 298  |              | CaO 32,45                             | CaO 37998                               | CaO 219,7                            | CaO <sub>(s)</sub> 110,2                |
|                       |                        | CO <sub>2</sub> 44%                    |      |              | CO <sub>2</sub> 37,27                 | CO <sub>2</sub> -393415                 | CO <sub>2</sub> 231,9                | CO <sub>2(g)</sub> 0,4515               |

|                 |          |                                                                                                                               |     |  |                                                                                                                                                |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                             |
|-----------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                 |          | Outros 3%                                                                                                                     |     |  |                                                                                                                                                |                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                             |
| Dolomita        | 0,01572  | CaO 30%<br>MgO 22%<br>CO <sub>2</sub> 47,9%                                                                                   | 298 |  | CaO 32,45<br>MgO 31,41<br>CO <sub>2</sub> 37,25                                                                                                | CaO 37998<br>MgO 4180<br>CO <sub>2</sub> -393415                                                                                                       | CaO 219,7<br>MgO 221,3<br>CO <sub>2</sub> 231,9                                                                                                | CaO <sub>(s)</sub> 110,2<br>MgO 66,8<br>CO <sub>2(g)</sub> 19,87                                                                                                            |
| Serpentinito    | 0,03164  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 6%<br>H <sub>2</sub> O(L) 1,242%<br>SiO <sub>2</sub> 36,5%<br>MgO 40%<br>Outros 3%             | 298 |  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>H <sub>2</sub> O <sub>(L)</sub> 75,28<br>SiO <sub>2</sub> 44,05<br>MgO 31,45                                 | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>H <sub>2</sub> O <sub>(L)</sub> -285691<br>SiO <sub>2</sub> -322060<br>MgO 4243                                      | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub><br>H <sub>2</sub> O <sub>(L)</sub> 70,4<br>SiO <sub>2</sub> 228,7<br>MgO 221,5                                  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> 16,5<br>H <sub>2</sub> O <sub>(L)</sub> 0,9<br>SiO <sub>2</sub><br>MgO 66,8                                                               |
| Antracito       | 0,00003  | C 95%<br>O <sub>2</sub> 3%<br>H <sub>2</sub> 2%                                                                               | 300 |  | C 20,84<br>O <sub>2</sub> 29,36<br>H <sub>2</sub> 28,87                                                                                        | C 714966<br>O <sub>2</sub> 53,94<br>H <sub>2</sub> 56,39                                                                                               | C 158,1<br>O <sub>2</sub> 205,2<br>H <sub>2</sub> 130,8                                                                                        | C <sub>graf</sub> 410,26<br>O <sub>2(g)</sub> 0,124<br>H <sub>2(g)</sub> 117,11                                                                                             |
| Hematitinha     | 0,00021  | H <sub>2</sub> O 3,5%<br><br>Fe 65,5%<br>SiO <sub>2</sub> 3,0%<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1,20%<br>P 0,05%<br>Mn 0,30% | 298 |  | H <sub>2</sub> O <sub>(L)</sub> 33,56<br><br>Fe 25,72<br>SiO <sub>2</sub> 44,05<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 86,87<br>P 20,79<br>Mn 20,79 | H <sub>2</sub> O <sub>(L)</sub> -241812<br><br>Fe 16273<br>SiO <sub>2</sub> -322060<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -546870<br>P 333831<br>Mn 282380 | H <sub>2</sub> O <sub>(L)</sub> 188,7<br><br>Fe 180,4<br>SiO <sub>2</sub> 228,7<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 316,6<br>P 163,1<br>Mn 173,7 | H <sub>2</sub> O <sub>(L)</sub> 0,9<br><br>Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>SiO <sub>2</sub><br>Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> 200,4<br>P 875,8<br>Mn <sub>(s a)</sub> 482,3 |
| Quartzo         | 0,00122  | SiO <sub>2</sub>                                                                                                              | 298 |  | SiO <sub>2</sub> 44,02                                                                                                                         | SiO <sub>2</sub> -305426                                                                                                                               | SiO <sub>2</sub> 228,8                                                                                                                         | SiO <sub>2(s a quart)</sub> 1,9                                                                                                                                             |
| FeSiMn          | 0,00915  | Mn 66%<br>Fe 13,5%<br>Si 18%<br>P 0,20%<br>C 2,25%<br>S 0,05%                                                                 | 298 |  | Mn 20,79<br>Fe 25,72<br>Si 22,23<br>P 20,79<br>C 20,84<br>S 23,69                                                                              | Mn 20,79<br>Fe 416273<br>Si 450595<br>P 333831<br>C 714924<br>S 277337                                                                                 | Mn 173,7<br>Fe 180,4<br>Si 167,8<br>P 163,1<br>C 158<br>S 167,7                                                                                | Mn <sub>(s a)</sub> 482,3<br>Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>P 875,8<br>C <sub>graf</sub> 410,26<br>S <sub>(s)</sub> 609,6                         |
| FeMn AC         | 12,70402 | Mn 75%<br>Fe 16,7%<br>Si 0,5%<br>P 0,25<br>C 7,5%<br>S 0,05%                                                                  | 298 |  | Mn 20,79<br>Fe 25,72<br>Si 22,23<br>P 20,79<br>C 20,84<br>S 23,69                                                                              | Mn 20,79<br>Fe 416273<br>Si 450595<br>P 333831<br>C 714924<br>S 277337                                                                                 | Mn 173,7<br>Fe 180,4<br>Si 167,8<br>P 163,1<br>C 158<br>S 167,7                                                                                | Mn <sub>(s a)</sub> 482,3<br>Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>P 875,8<br>C <sub>graf</sub> 410,26<br>S <sub>(s)</sub> 609,6                         |
| Mn Eletrolítico | 0,00041  | Mn 99,7 %<br>C 0,06 %<br>P 0,05 %<br>S 0,06 %<br><br>Si 0,10 %                                                                | 298 |  | Si 22,23<br>P 20,79<br>C 20,84<br>S 23,69                                                                                                      | Si 450595<br>P 333831<br>C 714924<br>S 277337                                                                                                          | Si 167,8<br>P 163,1<br>C 158<br>S 167,7                                                                                                        | Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>P 875,8<br>C <sub>graf</sub> 410,26<br>S <sub>(s)</sub> 609,6                                                                                   |
| FeSi75          | 0,00157  | Si 70,56%<br>Fe 27,97%<br>Ca 0,93<br>Al 0,42%<br>P 0,032%<br>C 0,048%                                                         | 298 |  | Si 22,23<br>Fe 25,72<br>Ca 20,79<br>Al 21,38<br>P 20,79<br>C 20,84                                                                             | Si 450595<br>Fe 416273<br>Ca 177786<br>Al 326321<br>P 333831<br>C 714924                                                                               | Si 167,8<br>Fe 180,4<br>Ca 154,9<br>Al 164,4<br>P 163,1<br>C 158                                                                               | Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>P 875,8<br>Al <sub>(s)</sub> 32,93<br>Si <sub>(s)</sub> 30,427<br>Ca <sub>(s II)</sub> 17,774<br>C <sub>graf</sub> 410,26                      |



|         |         |                                                                                                         |     |  |                                                                                                                  |                                                                                                                           |                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                |
|---------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         |         | S 0,007%<br>Ti 0,033 %                                                                                  |     |  | S 23,69<br>Ti 24,43                                                                                              | S 277337<br>Ti472967                                                                                                      | S 167,7<br>Ti 180,3                                                                                           | S <sub>(s)</sub> 609,6<br>Ti 18,98                                                                                                                                                                                                             |
| FeCr AC | 0,00136 | Cr 50,00%.<br>Si 5,00 %<br>C 7,50 %<br>S 0,050 %<br>P 0,050 %.                                          | 298 |  | Cr 20,78<br>Fe 25,72<br>Si 22,23<br>P 20,79<br>C 20,84<br>S 23,69                                                | Cr 658456<br>Fe 416273<br>Si 450595<br>P 333831<br>C 714924<br>S 277337                                                   | Cr 174,3<br>Fe 180,4<br>Si 167,8<br>P 163,1<br>C 158<br>S 167,7                                               | Cr <sub>(s)</sub> 10,468<br>Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>P 875,8<br>C <sub>graf</sub> 410,26<br>S <sub>(s)</sub> 19,01                                                                                             |
| FeCr BC | 0,00002 | Cr 56 %<br>Si 1%<br>C 0,150<br>S 0,015%<br>P 0,035                                                      | 298 |  | Fe 25,72<br>Cr 20,78<br>Si 22,23<br>P 20,79<br>C 20,84<br><br>S 23,69                                            | Fe 416273<br>Cr 658456<br>Si 450595<br>P 333831<br>C 714924<br><br>S 277337                                               | Fe 180,4<br>Cr 174,3<br>Si 167,8<br>P 163,1<br>C 158<br><br>S 167,7                                           | Cr <sub>(s)</sub> 544,3<br>Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>P 875,8<br>C <sub>graf</sub> 410,26<br><br>S <sub>(s)</sub> 609,6                                                                                          |
| FeTi    | 0,00003 | Fe 56.25%<br>Ti 30%<br>C 0,10 %<br>Si 3%<br>P 0,10%<br>S 0,05%<br>Al 8,5%<br>Mn 2%                      | 298 |  | Fe 25,72<br>Al 21,38<br>Si 22,23<br>P 20,79<br>C 20,84<br>S 23,69<br>Ti 24,43<br>Mn 20,79                        | Fe 416273<br>Al 326321<br>Si 450595<br>P 333831<br>C 714924<br>S 277337<br>Ti 472967<br>Mn 282380                         | Fe 180,4<br>Al 164,4<br>Si 167,8<br>P 163,1<br>C 158<br>S 167,7<br>Ti 180,3<br>Mn 173,7                       | Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>P 875,8<br>Al <sub>(s)</sub> 888,4<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>C <sub>graf</sub> 410,26<br>S <sub>(s)</sub> 609,6<br>Ti 906,9<br>Mn <sub>(s a)</sub> 482,3                                                     |
| FeV     | 0,00002 | V 67%<br>C 0,30<br>Si 1,5%<br>P 0,05%<br>S 0,05%<br>Mo 1,5%<br>Cu 0,05%<br>Sn 0,10%<br>Al 1,5%<br>Mn 1% | 298 |  | Fe 25,72<br>V 26,01<br>C 20,84<br>Si 22,23<br>P 20,79<br>S 23,69<br>Mo 20,78<br>Cu 20,78<br>Sn 31,76<br>Mn 20,79 | Fe 416273<br>V 517231<br>C 714924<br>Si 450595<br>P 333831<br>S 277337<br>Mo 658456<br>Cu 337376<br>Sn 263562<br>Mn282380 | Fe 180,4<br>V 182,3<br>C 158<br>Si 167,8<br>P 163,1<br>S 167,7<br>Mo 181,9<br>Cu 166,4<br>Sn 221,9<br>Mn173,7 | Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>V <sub>(s)</sub> 14,55<br>C <sub>graf</sub> 410,26<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>P 875,8<br>S <sub>(s)</sub> 609,6<br>Mo 7,61<br>Cu <sub>(s)</sub> 2,11<br>Sn <sub>(s l)</sub> 4,59<br>Mn <sub>(s a)</sub> 482,3 |
| FeNb    | 0,00009 | Nb 63%<br>Ta 0,20%<br>Si 3%<br>P 0,200%<br>S 0,1%<br>Al 2%<br>C 0,2%                                    | 298 |  | Fe 25,72<br>Nb 30,16<br>Al 21,38<br>Si 22,23<br>P 20,79<br>C 20,84<br>S 23,69                                    | Fe 416273<br>Nb 723064<br>Al 326321<br>Si 450595<br>P 333831<br>C 714924<br>S 277337                                      | Fe 180,4<br>Nb 186,2<br>Al 164,4<br>Si 167,8<br>P 163,1<br>C 158<br>S 167,7                                   | Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>Nb<br>P 875,8<br>Al <sub>(s)</sub> 888,4<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>C <sub>graf</sub> 410,26<br>S <sub>(s)</sub> 609,6                                                                                        |
| FeMoBC  | 0,00008 | Fe 29,65%<br>Mo 68 %<br>C 0,10 %                                                                        | 298 |  | Fe 25,72<br>Mo 20,78<br>Cu 20,78                                                                                 | Fe 416273<br>Mo 658456<br>Cu 337376                                                                                       | Fe 180,4<br>Mo 181,9<br>Cu 166,4                                                                              | Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>Mo 730,3<br>Cu <sub>(s)</sub> 134,2                                                                                                                                                                               |

|                 |          |                                                                                                                                                                                                      |     |  |                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-----------------|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                 |          | P 0,10 %<br>S 0,15 %<br>Si 1,50 %<br>Cu 1,00 %                                                                                                                                                       |     |  | Si 22,23<br>P 20,79<br>C 20,84<br>S 23,69                                                                                                                              | Si 450595<br>P 333831<br>C 714924<br>S 277337                                                                                                                                      | Si 167,8<br>P 163,1<br>C 158<br>S 167,7                                                                                                                             | C <sub>graf</sub> 410,26<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>P 875,8<br>S <sub>(s)</sub> 609,6                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Ni Eletrolítico | 0,00003  | Ni 99.900 %<br>Co 0.0350%<br>Fe 0.0070 %<br>S 0.0050%<br>Cu 0.0015%<br>Pb 0.0015%<br>Cd 0.0010%<br><br>P 0.0010%<br>Si 0.0010%<br>Zn 0.0005%<br>Mn 0.0002%<br>Mg 0,0001%<br>O2 0,0050%<br>N2 0,0010% | 298 |  | Ni 23,36<br>Fe 25,72<br>Si 22,23<br>P 20,79<br>S 23,69<br>Pb 20,78<br>Cd 20,78<br><br>Zn 20,79<br>Mg 20,79<br>O <sub>2</sub> 29,38<br>Cu 20,78<br>Sn 31,76<br>Mn 20,79 | Ni 430087<br>Fe 416273<br>Si 450595<br>P 333831<br>S 277337<br>Pb 195185<br>Cd 111790<br><br>Zn 130389<br>Mg 147088<br>O <sub>2</sub> -4,406<br>Cu 337376<br>Sn 263562<br>Mn282380 | Ni 182,2<br>Fe 180,4<br>Si 167,8<br>P 163,1<br>S 167,7<br>Pb 175,4<br>Cd 167,7<br><br>Zn 161<br>Mg 148,6<br>O <sub>2</sub> 205,1<br>Cu 166,4<br>Sn 221,9<br>Mn173,7 | Ni <sub>(s)</sub> 232,7<br>Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>Cu <sub>(s)</sub> 134,2<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>Pb <sub>(s)</sub> 1,236<br>S <sub>(s)</sub> 609,6<br>Co <sub>(s α hexagonal)</sub> 4,4966<br>Cd <sub>(s a)</sub> 2,13<br>P 875,8<br>Zn <sub>(s)</sub> 5,188<br>Mn <sub>(s a)</sub> 482,3<br>Mg <sub>(s)</sub> 26,06<br>H <sub>2(g)</sub> 236,1<br>O <sub>2(g)</sub> 3,97 |
| Sucata          | 0,00003  | C 0,00265%<br>Si 0,00398 %<br>P 0,000438 %<br>Cr 0,00179 %<br>Ni 0,0000774%<br>Mo 0,00178 %<br>V 0,000481%<br>Mn 0,000138%<br>Fe 98,88%                                                              | 298 |  | Ni 23,36<br>Fe 25,72<br>Si 22,23<br>P 20,79<br>C 20,84<br>Cr 20,78<br>Mo 20,78<br>V 26,01<br>Mn 20,79                                                                  | Ni 430087<br>Fe 416273<br>Si 450595<br>P 333831<br>C 714924<br>Cr 397453<br>Mo 658456<br>V 517231<br>Mn282380                                                                      | Ni 182,2<br>Fe 180,4<br>Si 167,8<br>P 163,1<br>C 158<br>Cr 166,4<br>Mo 181,9<br>V 182,3<br>Mn173,7                                                                  | Ni <sub>(s)</sub> 232,7<br>Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>Mo 730,3<br>C <sub>graf</sub> 410,26<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>P 875,8<br>V <sub>(s)</sub> 721,1<br>Mn <sub>(s a)</sub> 482,3<br>Cr <sub>(s)</sub> 544,3                                                                                                                                                                   |
| FeB             | 0,00001  | B 19%<br>C 0,5%<br>Si 2%<br>Fé 77%                                                                                                                                                                   | 298 |  | B 20,8<br>Fe 25,72<br>C 20,84<br>Si 22,23                                                                                                                              | B 575560<br>Fe 416273<br>C 714924<br>Si 450595                                                                                                                                     | B 153,4<br>Fe 180,4<br>C 158<br>Si 167,8                                                                                                                            | B <sub>(s)</sub> 628,5<br>Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>C <sub>graf</sub> 410,26<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| FeMnMC          | 0,000007 | Mn 79%<br>Fe 18,3%<br>Si 0,10%<br>P 0,30<br>C 2,25%<br>S 0,05%                                                                                                                                       | 298 |  | Mn 20,79<br>Fe 25,72<br>Si 22,23<br>P 20,79<br>C 20,84<br>S 23,69                                                                                                      | Mn282380<br>Fe 416273<br>Si 450595<br>P 333831<br>C 714924<br>S 277337                                                                                                             | Mn173,7<br>Fe 180,4<br>Si 167,8<br>P 163,1<br>C 158<br>S 167,7                                                                                                      | Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>C <sub>graf</sub> 410,26<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>P 875,8<br>S <sub>(s)</sub> 609,6<br>Mn <sub>(s a)</sub> 482,3                                                                                                                                                                                                                                     |
| FeSi em fio     | 0,03164  | Fe 18%<br>Si 75 a 79%<br>Ca 0,7%<br>Al 0,7%<br>P 0,03                                                                                                                                                | 298 |  | Al 21,38<br>Ca 20,79<br>Fe 25,72<br>Si 22,23<br>P 20,79                                                                                                                | Al 326321<br>Ca 197786<br>Fe 416273<br>Si 450595<br>P 333831                                                                                                                       | Al 164,4<br>Ca 154,9<br>Fe 180,4<br>Si 167,8<br>P 163,1                                                                                                             | Ca <sub>(s II)</sub> 712,4<br>C <sub>graf</sub> 410,26<br>S <sub>(s)</sub> 609,6<br>Fe <sub>(s a)</sub> 376,4<br>P 875,8                                                                                                                                                                                                                                                                |

|                       |         |                                                                                             |     |  |                                                                                           |                                                                                                        |                                                                                           |                                                                                                              |
|-----------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                       |         | S 0,10<br>C 0,10                                                                            |     |  | C 20,84<br>S 23,69                                                                        | C 714924<br>S 277337                                                                                   | C 158<br>S 167,7                                                                          | Al <sub>(s)</sub> 888,4<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>S <sub>(s)</sub> 609,6                                |
| Aluminio              | 0,00073 | 99,9%                                                                                       | 298 |  | Al 21,38                                                                                  | Al 326321                                                                                              | Al 164,4                                                                                  | Al <sub>(s)</sub> 888,4                                                                                      |
| Grafite               | 0,00071 | C                                                                                           | 298 |  | C 20,84                                                                                   | C 714924                                                                                               | C 158                                                                                     | C <sub>graf</sub> 410,26                                                                                     |
| Cálcio Silício em Fio | 0,00008 | Si: 58 - 65%<br>Ca: 31,5 %<br>Al: 1%<br>C: 1%                                               | 298 |  | Si 22,23<br>Al 21,38<br>C 20,84                                                           | Si 450595<br>Al 326321<br>C 714924                                                                     | Si 167,8<br>Al 164,4<br>C 158                                                             | Al <sub>(s)</sub> 888,4<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>C <sub>graf</sub> 410,26                              |
| Dolomita Crua         | 0,02479 | CaO 30%<br>MgO 22%<br>CO <sub>2</sub> 47,9%                                                 | 298 |  | CaO 32,45<br>MgO 31,41<br>CO <sub>2</sub> 37,25                                           | CaO 37998<br>MgO 4180<br>CO <sub>2</sub> -393415                                                       | CaO 219,7<br>MgO 221,3<br>CO <sub>2</sub> 231,9                                           | CaO <sub>(s)</sub> 110,2<br>MgO <sub>(s)</sub> 66,8<br>CO <sub>2</sub> 19,87                                 |
| Fluorita              | 0,00009 | CaF <sub>2</sub> 82,55%<br>Si 15%<br>S 0,3%                                                 | 298 |  | CaF <sub>2</sub> 51,2<br>Si 22,23<br>S 23,69                                              | CaF <sub>2</sub> -790788<br>Si 450595<br>S 277337                                                      | CaF <sub>2</sub> 274,4<br>Si 167,8<br>S 167,7                                             | CaF <sub>2</sub> 11,4<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>S <sub>(s)</sub> 609,6                                  |
| Nefelina              | 0,00215 | Na <sub>2</sub> O 21,8%,<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 35,9%,<br>SiO <sub>2</sub> 42,3% | 298 |  | Na <sub>2</sub> O 56,77<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 86,87<br>SiO <sub>2</sub> 44,05 | Na <sub>2</sub> O -16567<br><br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -546870<br><br>SiO <sub>2</sub> -322060 | Na <sub>2</sub> O 271,3<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 316,6<br>SiO <sub>2</sub> 228,7 | Na <sub>2</sub> O 296,2<br><br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s α corundum) 200,4<br>SiO <sub>2</sub>       |
| Cal Dolomítica        | 0,02753 | S 0,01%<br>SiO <sub>2</sub> 2,895%<br>P 0,0155%<br>MgO 40,6%<br>CaO 56,48%                  | 298 |  | CaO 32,45<br>MgO 31,41<br>SiO <sub>2</sub> 44,05<br>S 23,69<br>P 20,79                    | CaO 37998<br>MgO 4180<br>SiO <sub>2</sub> -322060<br>S 277337<br>P 333831                              | CaO 219,7<br>MgO 221,3<br>SiO <sub>2</sub> 228,7S 167,7<br>P 163,1                        | CaO <sub>(s)</sub> 110,2<br>MgO <sub>(s)</sub> 66,8<br>S <sub>(s)</sub> 609,6<br>SiO <sub>2</sub><br>P 875,8 |

TABELA 3 - Propriedades produtos de combustão - Saídas

| setor       | gás | massa (t/ano) | Tadiab (K) | T_ref (K) | cp a 298 (kJ/kg.K) | cp a temp saída (kJ/kg.K) |
|-------------|-----|---------------|------------|-----------|--------------------|---------------------------|
| PBT         | CO2 | 316.352,64    | 2.054      | 298       | 0,840              | 1,156                     |
|             | H2O | 111.157,32    | 2.054      | 298       | 4,183              | 2,134                     |
|             | N2  | 789.022,68    | 2.054      | 298       | 1,041              | 1,120                     |
|             | O2  | 5.707,34      | 2.054      | 298       | 0,922              | 1,048                     |
| Perfis      | CO2 | 77.226,47     | 2.132      | 298       | 0,840              | 1,029                     |
|             | H2O | 34.527,80     | 2.132      | 298       | 4,183              | 1,990                     |
|             | N2  | 227.298,98    | 2.132      | 298       | 1,041              | 1,059                     |
|             | O2  | 1.470,33      | 2.132      | 298       | 0,922              | 0,981                     |
| Fio Máquina | CO2 | 58.086,38     | 2.063      | 298       | 0,840              | 1,102                     |

|              |     |              |       |     |       |       |
|--------------|-----|--------------|-------|-----|-------|-------|
|              | H2O | 21.043,33    | 2.063 | 298 | 4,183 | 2,058 |
|              | N2  | 147.323,46   | 2.063 | 298 | 1,041 | 1,090 |
|              | O2  | 1.072,03     | 2.063 | 298 | 0,922 | 1,019 |
| Coqueria     | CO2 | 837.250,54   | 1.762 | 298 | 0,840 | 1,250 |
|              | H2O | 84.664,18    | 1.762 | 298 | 4,183 | 2,343 |
|              | N2  | 1.277.022,02 | 1.762 | 298 | 1,041 | 1,182 |
|              | O2  | 3.561,07     | 1.762 | 298 | 0,922 | 1,097 |
| Alto Forno   | CO2 | 954.853,90   | 1.745 | 298 | 0,840 | 0,917 |
|              | H2O | 90.825,32    | 1.745 | 298 | 4,183 | 2,037 |
|              | N2  | 1.443.194,70 | 1.745 | 298 | 1,041 | 1,041 |
|              | O2  | 6.587,34     | 1.745 | 298 | 0,922 | 0,933 |
| Sinterização | CO2 | 9.024,14     | 2.332 | 298 | 0,840 | 0,938 |
|              | H2O | 10.998,11    | 2.332 | 298 | 4,183 | 2,000 |
|              | N2  | 53.401,73    | 2.332 | 298 | 1,041 | 1,042 |
|              | O2  | 768,73       | 2.332 | 298 | 0,922 | 0,940 |
| Caldeiras    | CO2 | 2.146.376,94 | 1.745 | 298 | 0,840 | 1,059 |
|              | H2O | 120.868,26   | 1.745 | 298 | 4,183 | 2,013 |
|              | N2  | 2.952.886,74 | 1.745 | 298 | 1,041 | 1,070 |
|              | O2  | 26.335,63    | 1.745 | 298 | 0,922 | 0,997 |
| Aciaria      | CO2 | 25.745,74    | 2.318 | 298 | 0,840 | 1,309 |
|              | H2O | 31.377,45    | 2.318 | 298 | 4,183 | 2,541 |
|              | N2  | 152.354,38   | 2.318 | 298 | 1,041 | 1,226 |
|              | O2  | 2.193,19     | 2.318 | 298 | 0,922 | 1,131 |
| Calcinação   | CO2 | 29.646,21    | 2.332 | 298 | 0,840 | 0,971 |
|              | H2O | 36.131,12    | 2.332 | 298 | 4,183 | 1,980 |
|              | N2  | 175.436,00   | 2.332 | 298 | 1,041 | 1,053 |
|              | O2  | 2.525,46     | 2.332 | 298 | 0,922 | 0,971 |

TABELA 4 - Propriedades termodinâmicas dos materiais – Sólidos Saída

| sólido     | Massa.<br>(t/t aço liq.) | Composição                           | T(K) | cp (kJ/kg.K)                         | h (kJ/kg)                              | s (kJ/kg.K)                          | ε <sub>0</sub> (kJ/kg)                  |
|------------|--------------------------|--------------------------------------|------|--------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| Escória AF | 0,2435                   | 45% CaO                              | 298  | CaO 32,45                            | CaO 37998                              | CaO 219,7                            | CaO <sub>(s)</sub> 110,2                |
|            |                          | 35%SiO <sub>2</sub>                  |      | SiO <sub>2</sub> 44,11               | SiO <sub>2</sub> -322060               | SiO <sub>2</sub> 229,1               | SiO <sub>2</sub> 119,4                  |
|            |                          | 12,4% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 86,97 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -548860 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 316,6 | Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> 200,4 |
|            |                          | 6% MgO                               |      | MgO 32,11                            | MgO 32255                              | MgO 213,3                            | MgO 66,8                                |
|            |                          | 0,97% S                              |      | S 23,67                              | S 277149                               | S 167,8                              | S <sub>(s)</sub> 609,6                  |
|            |                          | 0,46% TiO <sub>2</sub>               |      | TiO <sub>2</sub> 44,08               | TiO <sub>2</sub> -305418               | TiO <sub>2</sub> 260,1               | TiO <sub>2(s)</sub> 21,4                |
| Escória AC | 0,1189                   | MnO 4,45%                            | 298  | Fe 25,72                             | Fe 416273                              | Fe 180,4                             | Fe <sub>(s a)</sub> 376,4               |
|            |                          | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 0,685% |      | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 105,9  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -119,144 | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 366,5  | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>           |
|            |                          | SiO <sub>2</sub> 12,76%              |      | SiO <sub>2</sub> 44,11               | SiO <sub>2</sub> -322060               | SiO <sub>2</sub> 229,1               | SiO <sub>2</sub> 119,4                  |
|            |                          | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 7,92% |      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 86,97 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -546870 | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 316,6 | Al <sub>2</sub> O <sub>3(s)</sub> 200,4 |

|                  |      |                                                                                                                                                                                              |     |                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |      | CaO 46,43%<br>MgO 7,9%<br>Fe 3,22%                                                                                                                                                           |     | CaO 32,45<br>MgO 32,11                                                                                                                                                                    | CaO 37998<br>MgO 32255                                                                                                                                                                                     | CaO 219,7<br>MgO 213,3                                                                                                                                                                  | CaO(s) 110,2<br>MgO 66,8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Aço e<br>Carepas | 1,00 | C 0,18%<br>Mn 1,19%<br>Si 0,23%<br>P 0,02%<br>S 0,01%<br>Nb 0,03%<br>V 0,03%<br>N <sub>2</sub> 45 %<br>Cr 0,05%<br>Cu 0,05%<br>Mo 0,05%<br>Ni 0,05%<br><br>Sn 0,01%<br>Ti 0,01%<br>Fe 51,73% | 298 | C20,84<br>Mn 20,79<br>Si 22,23<br>P20,79<br>S23,69<br>Nb 30,16<br>V 26,01<br>N <sub>2</sub> 29,12<br>Cr 20,78<br>Cu 20,78<br>Mo 20,78<br>Ni 23,36<br>Sn 31,79<br><br>Ti 24,43<br>Fe 25,72 | C714924<br>Mn 282380<br>Si 450595<br>P 333831<br>S 277337<br>Nb 723064<br>V 517231<br>N <sub>2</sub> -4,386<br>Cr 397453<br>Cu 337378<br>Mo 658456<br>Ni 430087<br>Sn 267367<br><br>Ti 472967<br>Fe 416273 | C158<br>Mn 173,7<br>Si 167,8<br>P163,1<br>S167,7<br>Nb 186,2<br>V 182,3<br>N <sub>2</sub> 191,6<br>Cr 174,3<br>Cu 166,4<br>Mo 181,9<br>Ni 182,2<br>Sn 221,1<br><br>Ti 180,3<br>Fe 180,4 | C <sub>graf</sub> 410,26<br>Mn <sub>(s,a)</sub> 482,3<br>Si <sub>(s)</sub> 1204,6<br>P 875,8<br>S <sub>(rombic)</sub> 609,6<br>Nb<br>V <sub>(s)</sub> 721,1<br>N <sub>2(g)</sub> 0,72<br>Cr <sub>(s)</sub> 544,3<br>Cu <sub>(s)</sub> 134,2<br>Mo 730,3<br>Ni <sub>(s)</sub> 232,7<br>Sn <sub>(s,II, gray)</sub> 544,9<br><br>Ti <sub>(s)</sub> 906,9<br>Fe <sub>(s,a)</sub> 376,4 |

## ANEXO B – BALANÇO DE EXERGIA

TABELA 5 – Exergia entrada VC1

| ENTRADAS         |                      |              |                     |                     |                                 |                           |                         |                        |                          |
|------------------|----------------------|--------------|---------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| Material         | Componente           | % base seca  | fração da particip. | massa (t)           | Exergia Química Molar (kJ/kmol) | Massa Molecular (kg/kmol) | exergia química ( MJ/t) | exergia química (GJ/t) | exergia química (GJ/ano) |
|                  |                      |              |                     | <b>4.202.080,71</b> |                                 |                           |                         |                        |                          |
| Minério de Ferro | Fe2O3                | 82,85        | 0,829               | 3.481.465,89        | 16.500                          | 159,692                   | 103,32                  | 0,103                  | 359.718,63               |
|                  | SiO2                 | 1,24         | 0,012               | 52.105,80           | 1.900                           | 60,085                    | 31,62                   | 0,032                  | 1.647,68                 |
|                  | FeO                  | 3,76         | 0,038               | 157.998,23          | 127.000                         | 71,846                    | 1.767,67                | 1,768                  | 279.288,70               |
|                  | MnO                  | 0,364        | 0,004               | 15.295,57           | 119.400                         | 134,810                   | 885,69                  | 0,886                  | 13.547,15                |
|                  | H2O                  | 9            | 0,090               | 378.187,26          | 900                             | 18,015                    | 49,96                   | 0,050                  | 18.893,26                |
|                  | P                    | 0,036        | 0,000               | 1.512,75            | 875.800                         | 30,974                    | 28.275,51               | 28,276                 | 42.773,75                |
| <b>TOTAL</b>     |                      | <b>97,25</b> | <b>0,973</b>        | <b>4.086.565,51</b> |                                 |                           |                         | <b>31,11</b>           | <b>715.869,17</b>        |
|                  |                      |              |                     | <b>945.100,93</b>   |                                 |                           |                         |                        |                          |
| Calcário         | CaO                  | 53,00        | 0,530               | 500.903,49          | 110.200                         | 56,080                    | 1.965,05                | 1,97                   | 984.300,38               |
|                  | CO2                  | 44,00        | 0,440               | 415.844,41          | 19.870                          | 44,005                    | 451,54                  | 0,45                   | 187.772,35               |
| <b>TOTAL</b>     |                      | <b>97</b>    | <b>0,970</b>        | <b>916.747,90</b>   |                                 |                           |                         | <b>2,42</b>            | <b>1.172.072,73</b>      |
| Carvão           |                      |              |                     |                     |                                 |                           |                         |                        |                          |
| <b>TOTAL</b>     |                      |              |                     | <b>1.688.974,21</b> |                                 |                           | <b>30485</b>            | <b>30,49</b>           | <b>51.488.378,74</b>     |
|                  |                      |              |                     | <b>46.676,41</b>    |                                 |                           |                         |                        |                          |
| Dolomita         | CaO                  | 30           | 0,3                 | 14.002,92           | 110.200                         | 56,080                    | 1.965,05                | 1,97                   | 27.516,44                |
|                  | MgO                  | 22           | 0,22                | 10.268,81           | 66.800                          | 44,311                    | 1.507,53                | 1,51                   | 15.480,50                |
|                  | CO2                  | 48           | 0,48                | 22.404,68           | 19.870                          | 44,010                    | 451,49                  | 0,45                   | 10.115,56                |
| <b>TOTAL</b>     |                      | <b>100</b>   | <b>1,000</b>        | <b>46.676,41</b>    |                                 |                           |                         | <b>3,92</b>            | <b>53.112,51</b>         |
|                  |                      |              |                     | <b>93.904,38</b>    |                                 |                           |                         |                        |                          |
| Serpentinito     | Fe2O3                | 6            | 0,06                | 5.634,26            | 16.500                          | 159,692                   | 103,32                  | 0,10                   | 582,15                   |
|                  | H2O                  | 1,24         | 0,0124              | 1.164,41            | 900                             | 18,015                    | 49,96                   | 0,05                   | 58,17                    |
|                  | SiO2                 | 36,5         | 0,365               | 34.275,10           | 1.900                           | 60,085                    | 31,62                   | 0,03                   | 1.083,84                 |
|                  | MgO                  | 40           | 0,4                 | 37.561,75           | 66.800                          | 44,311                    | 1.507,53                | 1,51                   | 56.625,33                |
|                  | Ni (Cr, Mn, Co e Ni) | 16,26        | 0,1626              | 15.268,85           |                                 |                           | 6.923                   | 6,92                   | 105.706,27               |
| <b>TOTAL</b>     |                      | <b>100</b>   | <b>1,000</b>        | <b>93.904,38</b>    |                                 |                           |                         | <b>1,69</b>            | <b>164.055,77</b>        |
|                  |                      |              |                     | <b>75.698,21</b>    |                                 |                           |                         |                        |                          |
| Antracito        | C                    | 95           | 0,95                | 71.913,30           | 41.260                          | 44,311                    | 931,15                  | 0,93                   | 66.961,76                |
|                  | O                    | 3            | 0,03                | 2.270,95            | 233.700                         | 15,999                    | 14.606,80               | 14,61                  | 33.171,25                |
|                  | H                    | 2            | 0,02                | 1.513,96            | 331.300                         | 1,008                     | 328.680,42              | 328,68                 | 497.610,38               |
| <b>TOTAL</b>     |                      | <b>100</b>   | <b>1,000</b>        | <b>75.698,21</b>    |                                 |                           |                         | <b>344,22</b>          | <b>597.743,40</b>        |
|                  |                      |              |                     | <b>623,94</b>       |                                 |                           |                         |                        |                          |
| Hematitinha      | H2O                  | 3,5          | 0,035               | 21,84               | 900                             | 18,015                    | 49,96                   | 0,05                   | 1,09                     |
|                  | Fe                   | 65,5         | 0,655               | 408,68              | 376.400                         | 55,847                    | 6.739,84                | 6,74                   | 2.754,43                 |
|                  | SiO2                 | 3            | 0,03                | 18,72               | 1.900                           | 60,085                    | 31,62                   | 0,03                   | 0,59                     |
|                  | Al2O3                | 1,2          | 0,012               | 7,49                | 200.400                         | 101,961                   | 1.965,45                | 1,97                   | 14,72                    |
|                  | P                    | 0,05         | 0,0005              | 0,31                | 875.800                         | 30,974                    | 28.275,51               | 28,28                  | 8,82                     |
|                  | Mn                   | 0,3          | 0,003               | 1,87                | 482.300                         | 54,938                    | 8.778,97                | 8,78                   | 16,43                    |
|                  | O                    | 24,45        | 0,2445              | 152,55              | 233.700                         | 15,999                    | 14.606,80               | 14,61                  | 2.228,31                 |
|                  | Ni                   | 2            | 0,02                | 12,48               |                                 |                           |                         |                        |                          |
| <b>TOTAL</b>     |                      | <b>100</b>   | <b>1,000</b>        | <b>623,94</b>       |                                 |                           |                         | <b>60,45</b>           | <b>5.024,39</b>          |
|                  |                      |              |                     | <b>3.636,01</b>     |                                 |                           |                         |                        |                          |

|              |      |            |              |                  |         |        |           |               |                   |
|--------------|------|------------|--------------|------------------|---------|--------|-----------|---------------|-------------------|
| Quartzo      | SiO2 |            |              | 3.636,01         | 1.900   | 60,085 | 31,62     | 0,03          | 114,98            |
| <b>TOTAL</b> |      |            |              |                  |         |        |           | <b>0,03</b>   | <b>114,98</b>     |
|              |      |            |              | <b>27.175,02</b> |         |        |           |               |                   |
| FeSiMn       | Mn   | 66,18      | 0,6618       | 17.984,43        | 482.300 | 54,938 | 8.778,97  | 8,78          | 157.884,76        |
|              | Fe   | 13,5       | 0,135        | 3.668,63         | 376.400 | 55,847 | 6.739,84  | 6,74          | 24.725,97         |
|              | Si   | 18         | 0,18         | 4.891,50         | 854.600 | 28,086 | 30.427,97 | 30,43         | 148.838,51        |
|              | P    | 0,02       | 0,0002       | 5,44             | 875.800 | 30,974 | 28.275,51 | 28,28         | 153,68            |
|              | C    | 2,25       | 0,0225       | 611,44           | 410.260 | 12,011 | 34.156,60 | 34,16         | 20.884,64         |
|              | S    | 0,05       | 0,0005       | 13,59            | 609.600 | 32,064 | 19.011,98 | 19,01         | 258,33            |
| <b>TOTAL</b> |      | <b>100</b> | <b>1,000</b> | <b>27.175,02</b> |         |        |           | <b>127,39</b> | <b>352.745,89</b> |
|              |      |            |              | <b>3.710,06</b>  |         |        |           |               |                   |
| FeMnAC       | Mn   | 75         | 0,75         | 2.782,55         | 482.300 | 54,938 | 8.778,97  | 8,78          | 24.427,90         |
|              | Fe   | 16,7       | 0,167        | 619,58           | 376.400 | 55,847 | 6.739,84  | 6,74          | 4.175,88          |
|              | Si   | 0,5        | 0,005        | 18,55            | 854.600 | 28,086 | 30.427,97 | 30,43         | 564,45            |
|              | P    | 0,25       | 0,0025       | 9,28             | 875.800 | 30,974 | 28.275,51 | 28,28         | 262,26            |
|              | C    | 7,5        | 0,075        | 278,25           | 410.260 | 12,011 | 34.156,60 | 34,16         | 9.504,23          |
|              | S    | 0,05       | 0,0005       | 1,86             | 609.600 | 32,064 | 19.011,98 | 19,01         | 35,27             |
| <b>TOTAL</b> |      | <b>100</b> | <b>1,000</b> | <b>3.710,06</b>  |         |        |           | <b>127,39</b> | <b>38.969,99</b>  |
|              |      |            |              | <b>1.216,39</b>  |         |        |           |               |                   |
| Mn           | Mn   | 100        | 1            |                  | 482.300 | 54,938 | 8.778,97  | 8,78          |                   |
| <b>TOTAL</b> |      |            |              |                  |         |        |           | <b>8,78</b>   | <b>10.679,90</b>  |
|              |      |            |              | <b>4.673,54</b>  |         |        |           |               |                   |
| FeSi75       | Si   | 70,5       | 0,705        | 3294,8457        | 854.600 | 28,086 | 30.427,97 | 30,43         | 100.255,47        |
|              | Fe   | 28         | 0,28         | 1308,5912        | 376.400 | 55,847 | 6.739,84  | 6,74          | 8.819,70          |
|              | Ca   | 1          | 0,01         | 46,7354          | 712.400 | 40,080 | 17.774,45 | 17,77         | 830,70            |
|              | Al   | 0,5        | 0,005        | 23,3677          | 888.400 | 26,982 | 32.926,26 | 32,93         | 769,41            |
| <b>TOTAL</b> |      | <b>100</b> | <b>1,000</b> | <b>4.673,54</b>  |         |        |           | <b>87,87</b>  | <b>110.675,28</b> |
|              |      |            |              | <b>4.039,14</b>  |         |        |           |               |                   |
| FeCrAC       | Cr   | 50         | 0,5          | 2019,5695        | 544.300 | 51,996 | 10.468,11 | 10,47         | 21.141,08         |
|              | Si   | 5          | 0,05         | 201,95695        | 854.600 | 28,086 | 30.427,97 | 30,43         | 6.145,14          |
|              | C    | 7,5        | 0,075        | 302,935425       | 410.260 | 12,011 | 34.156,60 | 34,16         | 10.347,24         |
|              | Fe   | 37,5       | 0,375        | 1514,677125      | 376.400 | 55,847 | 6.739,84  | 6,74          | 10.208,69         |
| <b>TOTAL</b> |      | <b>100</b> | <b>1,000</b> | <b>4.039,14</b>  |         |        |           | <b>75,05</b>  | <b>47.842,15</b>  |
|              |      |            |              | <b>67,46</b>     |         |        |           |               |                   |
| FeCrBC       | Si   | 1          | 0,01         | 0,6746           | 854.600 | 28,086 | 30.427,97 | 30,43         | 20,53             |
|              | C    | 0,15       | 0,0015       | 0,10119          | 410.260 | 12,011 | 34.156,60 | 34,16         | 3,46              |
|              | Cr   | 60         | 0,6          | 40,476           | 544.300 | 51,996 | 10.468,11 | 10,47         | 423,71            |
|              | Fe   | 38,85      | 0,3885       | 26,20821         | 376.400 | 55,847 | 6.739,84  | 6,74          | 176,64            |
| <b>TOTAL</b> |      | <b>100</b> | <b>1,000</b> | <b>67,46</b>     |         |        |           | <b>81,79</b>  | <b>624,33</b>     |
|              |      |            |              | <b>100,55</b>    |         |        |           |               |                   |
| FeTi         | Ti   | 35         | 0,35         | 35,1932          | 906.900 | 47,900 | 18.933,19 | 18,93         | 666,32            |
|              | C    | 0,1        | 0,001        | 0,100552         | 410.260 | 12,012 | 34.155,60 | 34,16         | 3,43              |
|              | Si   | 3          | 0,03         | 3,01656          | 854.600 | 28,086 | 30.427,97 | 30,43         | 91,79             |
|              | P    | 0,1        | 0,001        | 0,100552         | 875.800 | 30,974 | 28.275,51 | 28,28         | 2,84              |
|              | Al   | 10         | 0,1          | 10,0552          | 888.400 | 26,982 | 32.926,26 | 32,93         | 331,08            |
|              | Mn   | 2          | 0,02         | 2,01104          | 482.300 | 54,938 | 8.778,97  | 8,78          | 17,65             |
|              | Fe   | 49,8       | 0,498        | 50,074896        | 376.400 | 55,847 | 6.739,84  | 6,74          | 337,50            |
| <b>TOTAL</b> |      | <b>100</b> | <b>1,000</b> | <b>100,55</b>    |         |        |           | <b>160,24</b> | <b>1.450,62</b>   |
|              |      |            |              | <b>59,13</b>     |         |        |           |               |                   |
| FeV          | V    | 70         | 0,7          | 41,391           | 721.100 | 50,942 | 14.155,31 | 14,16         | 585,90            |
|              | C    | 0,3        | 0,003        | 0,17739          | 410.260 | 12,012 | 34.155,60 | 34,16         | 6,06              |
|              | Si   | 1,5        | 0,015        | 0,88695          | 854.600 | 28,086 | 30.427,97 | 30,43         | 26,99             |

|              |    |              |              |               |         |         |           |               |                 |
|--------------|----|--------------|--------------|---------------|---------|---------|-----------|---------------|-----------------|
|              | Mo | 1,5          | 0,015        | 0,88695       | 730.300 | 95,940  | 7.612,05  | 7,61          | 6,75            |
|              | Sn | 0,1          | 0,001        | 0,05913       | 544.900 | 118,690 | 4.590,95  | 4,59          | 0,27            |
|              | Al | 1,5          | 0,015        | 0,88695       | 888.400 | 26,982  | 32.926,26 | 32,93         | 29,20           |
|              | Mn | 1            | 0,01         | 0,5913        | 482.300 | 54,938  | 8.778,97  | 8,78          | 5,19            |
|              | Fe | 24,1         | 0,241        | 14,25033      | 376.400 | 55,847  | 6.739,84  | 6,74          | 96,04           |
| <b>TOTAL</b> |    | <b>100</b>   | <b>1,000</b> | <b>59,13</b>  |         |         |           | <b>139,39</b> | <b>756,41</b>   |
|              |    |              |              | <b>232,75</b> |         |         |           |               |                 |
| FeMoBC       | Mo | 70           | 0,7          | 162,925       | 730.300 | 95,940  | 7.612,05  | 7,61          | 1.240,19        |
|              | C  | 0,1          | 0,001        | 0,23275       | 410.260 | 12,012  | 34.155,60 | 34,16         | 7,95            |
|              | P  | 0,1          | 0,001        | 0,23275       | 875.800 | 30,974  | 28.275,51 | 28,28         | 6,58            |
|              | S  | 0,15         | 0,0015       | 0,349125      | 609.600 | 32,064  | 19.011,98 | 19,01         | 6,64            |
|              | Si | 1,5          | 0,015        | 3,49125       | 854.600 | 28,086  | 30.427,97 | 30,43         | 106,23          |
|              | Cu | 1            | 0,01         | 2,3275        | 134.200 | 63,540  | 2.112,06  | 2,11          | 4,92            |
|              | Fe | 27,15        | 0,2715       | 63,191625     | 376.400 | 55,847  | 6.739,84  | 6,74          | 425,90          |
| <b>TOTAL</b> |    | <b>100</b>   | <b>1,000</b> | <b>232,75</b> |         |         |           | <b>128,34</b> | <b>1.798,41</b> |
|              |    |              |              | <b>101,91</b> |         |         |           |               |                 |
| Ni elet      | Ni | 100,00       | 1,00         | 101,91        | 232.700 | 58,710  | 3.963,55  | 3,96          | 403,92          |
| <b>TOTAL</b> |    |              |              |               |         |         |           | <b>3,96</b>   | <b>403,92</b>   |
|              |    |              |              | <b>94,45</b>  |         |         |           |               |                 |
| Sucata       | C  | 0,26         | 0,0026       | 0,2455622     | 410.260 | 12,012  | 34.155,60 | 34,16         | 8,39            |
|              | Si | 0,4          | 0,004        | 0,377788      | 854.600 | 28,086  | 30.427,97 | 30,43         | 11,50           |
|              | P  | 0,043        | 0,00043      | 0,04061221    | 875.800 | 30,974  | 28.275,51 | 28,28         | 1,15            |
|              | Cr | 0,178        | 0,00178      | 0,16811566    | 544.300 | 51,996  | 10.468,11 | 10,47         | 1,76            |
|              | Ni | 0,08         | 0,0008       | 0,0755576     | 232.700 | 58,710  | 3.963,55  | 3,96          | 0,30            |
|              | Mo | 0,176        | 0,00176      | 0,16622672    | 730.300 | 95,940  | 7.612,05  | 7,61          | 1,27            |
|              | V  | 0,049        | 0,00049      | 0,04627903    | 721.100 | 50,942  | 14.155,31 | 14,16         | 0,66            |
|              | Mn | 0,014        | 0,00014      | 0,01322258    | 482.300 | 54,938  | 8.778,97  | 8,78          | 0,12            |
|              | Fe | 98,8         | 0,988        | 93,313636     | 376.400 | 55,847  | 6.739,84  | 6,74          | 628,92          |
| <b>TOTAL</b> |    | <b>100</b>   | <b>1,000</b> | <b>94,45</b>  |         |         |           | <b>144,58</b> | <b>654,05</b>   |
|              |    |              |              | <b>29,71</b>  |         |         |           |               |                 |
| FeB          | B  | 20,5         | 0,205        | 6,09014       |         |         |           |               |                 |
|              | C  | 0,5          | 0,005        | 0,14854       | 410.260 | 12,012  | 34.155,60 | 34,16         | 5,07            |
|              | Si | 2            | 0,02         | 0,59416       | 854.600 | 28,086  | 30.427,97 | 30,43         | 18,08           |
|              | Fe | 77           | 0,77         | 22,87516      | 376.400 | 55,847  | 6.739,84  | 6,74          | 154,17          |
| <b>TOTAL</b> |    | <b>100</b>   | <b>1,000</b> | <b>29,71</b>  |         |         |           | <b>71,32</b>  | <b>177,33</b>   |
|              |    |              |              | <b>21,02</b>  |         |         |           |               |                 |
| FeMnMC       | Mn | 79           | 0,79         | 16,60185      | 482.300 | 54,938  | 8.778,97  | 8,78          | 145,75          |
|              | Fe | 18,3         | 0,183        | 3,845745      | 376.400 | 55,847  | 6.739,84  | 6,74          | 25,92           |
|              | Si | 0,1          | 0,001        | 0,021015      | 854.600 | 28,086  | 30.427,97 | 30,43         | 0,64            |
|              | P  | 0,3          | 0,003        | 0,063045      | 875.800 | 30,974  | 28.275,51 | 28,28         | 1,78            |
|              | C  | 2,25         | 0,0225       | 0,4728375     | 410.260 | 12,012  | 34.155,60 | 34,16         | 16,15           |
|              | S  | 0,05         | 0,0005       | 0,0105075     | 609.600 | 32,064  | 19.011,98 | 19,01         | 0,20            |
| <b>TOTAL</b> |    | <b>100</b>   | <b>1,000</b> | <b>21,02</b>  |         |         |           | <b>127,39</b> | <b>190,44</b>   |
|              |    |              |              | <b>93,16</b>  |         |         |           |               |                 |
| FeSi em fio  | Fe | 18           | 0,18         | 16,76844      | 376.400 | 55,847  | 6.739,84  | 6,74          | 113,02          |
|              | Si | 79           | 0,79         | 73,59482      | 854.600 | 28,086  | 30.427,97 | 30,43         | 2.239,34        |
|              | Ca | 0,7          | 0,007        | 0,652106      | 712.400 | 40,080  | 17.774,45 | 17,77         | 11,59           |
|              | Al | 0,7          | 0,007        | 0,652106      | 888.400 | 26,982  | 32.926,26 | 32,93         | 21,47           |
|              | P  | 0,03         | 0,0003       | 0,0279474     | 875.800 | 30,974  | 28.275,51 | 28,28         | 0,79            |
|              | S  | 0,1          | 0,001        | 0,093158      | 609.600 | 32,064  | 19.011,98 | 19,01         | 1,77            |
|              | C  | 0,1          | 0,001        | 0,093158      | 410.260 | 12,012  | 34.155,60 | 34,16         | 3,18            |
| <b>TOTAL</b> |    | <b>98,63</b> | <b>0,986</b> | <b>91,88</b>  |         |         |           | <b>169,31</b> | <b>2.391,16</b> |





|                            |  |  |  |               |     |        |             |             |                      |
|----------------------------|--|--|--|---------------|-----|--------|-------------|-------------|----------------------|
| Energia Elétrica Adquirida |  |  |  |               |     |        |             |             | 1.617.429,78         |
| água                       |  |  |  | 25.562.374,75 | 900 | 18,015 | 49,95742517 | 0,049957425 | 1.277.030,42         |
| <b>TOTAL</b>               |  |  |  |               |     |        |             |             | <b>61.906.411,10</b> |

TABELA 6 – Exergia Saída VC 1

| SAÍDAS       |            |        |            |              |                       |                 |                         |                        |                          |
|--------------|------------|--------|------------|--------------|-----------------------|-----------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
|              | Componente | %      |            | massa (t)    | Exergia Química Molar | Massa Molecular | exergia química ( MJ/t) | Exergia Química (GJ/t) | Exergia Química (GJ/ano) |
| Alcatrão     | C          | 80,276 |            | 46.688,96    |                       |                 | 40.150,00               | 40,15                  | 1.874.561,74             |
|              | H          | 8,519  |            |              |                       |                 |                         |                        |                          |
|              | O          | 8,519  |            |              |                       |                 |                         |                        |                          |
|              | S          | 0,686  |            |              |                       |                 |                         |                        |                          |
| <b>TOTAL</b> |            |        |            |              |                       |                 |                         |                        | <b>1.874.561,74</b>      |
| Argônio      | 3.677,39   |        | 1          |              | 11690                 | 39,948          | 292,6304195             | 0,293                  | 1.076,12                 |
| N2           | 222.953,62 |        | 1          |              | 7200                  | 28,0134         | 257,0198548             | 0,257                  | 57.303,51                |
| O2           | 440.934,11 |        | 1          |              | 3970                  | 31,9988         | 124,0671525             | 0,124                  | 54.705,44                |
| <b>TOTAL</b> |            |        |            |              |                       |                 |                         |                        | <b>113.085,06</b>        |
| Aço+Carepa   |            |        |            | 2.988.410,60 |                       |                 |                         |                        |                          |
|              | Cr         | 0,150  | 0,00150000 | 4.482,62     | 544300                | 51,996          | 10.468,11               | 10,47                  | 46.924,53                |
|              | Mo         | 0,035  | 0,00035000 | 1.045,94     | 730300                | 95,94           | 7.612,05                | 7,61                   | 7.961,77                 |
|              | Al         | 0,028  | 0,00027500 | 821,81       | 888400                | 26,9815         | 32.926,26               | 32,93                  | 27.059,23                |
|              | C          | 0,305  | 0,00305000 | 9.114,65     | 410260                | 12,0115         | 34.155,60               | 34,16                  | 311.316,43               |
|              | Mn         | 1,213  | 0,01212500 | 36.234,48    | 482300                | 54,9381         | 8.778,97                | 8,78                   | 318.101,44               |
|              | Si         | 0,200  | 0,00200000 | 5.976,82     | 854600                | 28,086          | 30.427,97               | 30,43                  | 181.862,54               |
|              | P          | 0,028  | 0,00027500 | 821,81       | 875800                | 30,9738         | 28.275,51               | 28,28                  | 23.237,18                |
|              | S          | 0,021  | 0,00020750 | 620,10       | 609600                | 32,064          | 19.011,98               | 19,01                  | 11.789,24                |
|              | Fe         | 97,995 | 0,97994750 | 2.928.485,50 | 376400                | 55,847          | 6.739,84                | 6,74                   | 19.737.531,84            |
| <b>TOTAL</b> |            | 99,97  | 1,00       | 2.987.603,73 |                       |                 |                         |                        | <b>20.665.784,21</b>     |
| Escoria AC   |            |        |            | 756.000,00   |                       |                 |                         |                        |                          |
|              | MnO        | 2,19   | 0,02190000 | 16.556,40    | 119400                | 134,81          | 885,69                  | 0,89                   | 14.663,85                |
|              | SiO2       | 16,78  | 0,16780000 | 126.856,80   | 1900                  | 60,085          | 31,62                   | 0,03                   | 4.011,45                 |
|              | Al2O3      | 15,04  | 0,15040000 | 113.702,40   | 200400                | 101,9612        | 1.965,45                | 1,97                   | 223.476,78               |
|              | CaO        | 53,97  | 0,53970000 | 408.013,20   | 110200                | 56,08           | 1.965,05                | 1,97                   | 801.766,31               |
|              | MgO        | 6,43   | 0,06430000 | 48.610,80    | 66800                 | 44,311          | 1.507,53                | 1,51                   | 73.282,06                |
|              | FeT        | 1,64   | 0,01640000 | 12.398,40    | 376400                | 55,847          | 6.739,84                | 6,74                   | 83.563,27                |
|              | NI         | 3,87   | 0,03870000 | 29.257,20    |                       |                 |                         |                        |                          |
| <b>TOTAL</b> |            | 99,92  | 1,00       | 755.395,20   |                       |                 |                         |                        | <b>1.200.763,72</b>      |
| Lama AC      |            |        |            | 107.354,00   |                       |                 |                         | -                      | -                        |
|              | Al2O3      | 0,35   | 0,00350000 | 375,74       | 200400                | 101,9612        | 1.965,45                | 1,97                   | 738,50                   |
|              | CaO        | 11,8   | 0,11800000 | 12.667,77    | 110200                | 56,08           | 1.965,05                | 1,97                   | 24.892,80                |
|              | Fe         | 19,94  | 0,19940000 | 21.406,39    | 376400                | 55,847          | 6.739,84                | 6,74                   | 144.275,69               |
|              | FeO        | 58,4   | 0,58400000 | 62.694,74    | 127000                | 71,846          | 1.767,67                | 1,77                   | 110.823,59               |
|              | K2O        | 0,1    | 0,00100000 | 107,35       | 413100                | 94,203          | 4.385,21                | 4,39                   | 470,77                   |
|              | MgO        | 3,24   | 0,03240000 | 3.478,27     | 66800                 | 44,311          | 1.507,53                | 1,51                   | 5.243,58                 |
|              | Mn         | 0,89   | 0,00890000 | 955,45       | 482300                | 54,9381         | 8.778,97                | 8,78                   | 8.387,87                 |
|              | N2O        | 0,2    | 0,00200000 | 214,71       | 55600                 | 46,0055         | 1.208,55                | 1,21                   | 259,49                   |
|              | P          | 0,1    | 0,00100000 | 107,35       | 875800                | 30,9738         | 28.275,51               | 28,28                  | 3.035,49                 |

|                         |       |               |                   |                   |                |               |                  |              |                      |
|-------------------------|-------|---------------|-------------------|-------------------|----------------|---------------|------------------|--------------|----------------------|
|                         | C     | 1,91          | 0,01910000        | 2.050,46          | 41260          | 44,311        | 931,15           | 0,93         | 1.909,28             |
|                         | Si    | 2,15          | 0,02150000        | 2.308,11          | 854600         | 28,086        | 30.427,97        | 30,43        | 70.231,14            |
|                         | TiO2  | 0,05          | 0,00050000        | 53,68             | 21400          | 79,9          | 267,83           | 0,27         | 14,38                |
|                         | ZnO   | 0,03          | 0,00030000        | 32,21             | 22900          | 81,37         | 281,43           | 0,28         | 9,06                 |
|                         | NI    | 0,84          | 0,00840000        | 901,77            |                |               |                  |              |                      |
| <b>TOTAL</b>            |       | <b>100</b>    | <b>1,00</b>       | <b>107.354,00</b> |                |               |                  |              | <b>370.291,63</b>    |
| Escoria AF              |       |               |                   | 724.966,20        |                |               |                  |              |                      |
|                         | CaO   | 44,85         | 0,44847083        | 325.126,20        | 110200         | 56,08         | 1.965,05         | 1,97         | 638.889,21           |
|                         | SiO2  | 35,04         | 0,35042208        | 254.044,17        | 1900           | 60,085        | 31,62            | 0,03         | 8.033,35             |
|                         | Al2O3 | 12,04         | 0,12043958        | 87.314,63         | 200400         | 101,9612      | 1.965,45         | 1,97         | 171.612,84           |
|                         | MgO   | 5,99          | 0,05991250        | 43.434,54         | 66800          | 44,311        | 1.507,53         | 1,51         | 65.478,71            |
|                         | MnO   | 0,59          | 0,00587917        | 4.262,20          | 119400         | 134,81        | 885,69           | 0,89         | 3.774,99             |
|                         | FeO   | 0,26          | 0,00260833        | 1.890,95          | 127000         | 71,846        | 1.767,67         | 1,77         | 3.342,58             |
|                         | S     | 0,97          | 0,00972917        | 7.053,32          | 609600         | 32,064        | 19.011,98        | 19,01        | 134.097,49           |
|                         | TiO2  | 0,46          | 0,00459583        | 3.331,82          | 21400          | 79,9          | 267,83           | 0,27         | 892,38               |
| <b>TOTAL</b>            |       | <b>100</b>    | <b>1,00</b>       | <b>726.457,82</b> |                |               |                  |              | <b>1.026.121,55</b>  |
| Lama AF                 |       |               |                   | 13.152,00         |                |               |                  |              |                      |
|                         | CaO   | 3,27          | 0,03270000        | 430,07            | 110200         | 56,08         | 1.965,05         | 1,97         | 845,11               |
|                         | SiO2  | 8,36          | 0,08360000        | 1.099,51          | 1900           | 60,085        | 31,62            | 0,03         | 34,77                |
|                         | Al2O3 | 3,01          | 0,03010000        | 395,88            | 200400         | 101,9612      | 1.965,45         | 1,97         | 778,07               |
|                         | MnO   | 0,5           | 0,00500000        | 65,76             | 119400         | 134,81        | 885,69           | 0,89         | 58,24                |
|                         | P     | 0,07          | 0,00070000        | 9,21              | 875800         | 30,9738       | 28.275,51        | 28,28        | 260,32               |
|                         | S     | 0,53          | 0,00530000        | 69,71             | 609600         | 32,064        | 19.011,98        | 19,01        | 1.325,24             |
|                         | C     | 10,18         | 0,10180000        | 1.338,87          | 41260          | 44,311        | 931,15           | 0,93         | 1.246,69             |
|                         | MgO   | 0,46          | 0,00460000        | 60,50             | 66800          | 44,311        | 1.507,53         | 1,51         | 91,20                |
|                         | FeO   | 1,91          | 0,01910000        | 251,20            | 127000         | 71,846        | 1.767,67         | 1,77         | 444,04               |
|                         | K2O   | 1,84          | 0,01840000        | 242,00            | 413100         | 94,203        | 4.385,21         | 4,39         | 1.061,21             |
|                         | Na2O  | 0,38          | 0,00380000        | 49,98             | 55600          | 46,0055       | 1.208,55         | 1,21         | 60,40                |
|                         | ZnO   | 0,82          | 0,00820000        | 107,85            | 22900          | 81,37         | 281,43           | 0,28         | 30,35                |
|                         | Ni    | 0,051         | 0,00051000        | 6,71              | 232700         | 58,71         | 3.963,55         | 3,96         | 26,59                |
|                         | Fe    | 68,6          | 0,68600000        | 9.022,27          | 376400         | 55,847        | 6.739,84         | 6,74         | 60.808,69            |
| <b>TOTAL</b>            |       | <b>99,981</b> | <b>1,00</b>       | <b>13.149,50</b>  |                |               |                  |              | <b>67.070,93</b>     |
|                         |       |               |                   | 396.710,36        |                |               |                  |              |                      |
| <b>CO2 (calcinação)</b> |       |               | <b>1,00000000</b> |                   | <b>1934090</b> | <b>76,139</b> | <b>25.402,09</b> | <b>25,40</b> | <b>10.077.273,67</b> |

## "PROPRIEDADES DOS COMPONENTES "

"Foram usadas as funções internas que consideram as seguintes propriedades de referência:

-O<sub>2</sub> : O estado de referência para a entalpia específica é baseado na entalpia de formação relativa dos elementos (0 kJ/kmol) a 25 °C. O estado de referência para entropia específica é determinada pela Terceira Lei da Termodinâmica. Considerado comportamento de gás ideal.

-N<sub>2</sub> : O estado de referência para entalpia específica é baseado na entalpia de formação relativa aos elementos a 25 °C (0 kJ/kmole). O estado de referência para entropia específica é determinada pela Terceira Lei da Termodinâmica. Considerado comportamento de gás ideal.

-CO<sub>2</sub> : O estado de referência para entalpia específica é baseado na entalpia de formação relativa aos elementos a 25 °C (-393.514). O estado de referência para entropia específica é determinado pela Terceira Lei da Termodinâmica. Considerado comportamento de gás ideal.

- C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> : O estado de referência para a entalpia específica é baseado na entalpia de formação relativa aos elementos a 25 °C (-84.659 kJ/kmole). O estado de referência para entropia específica é determinado pela Terceira Lei da Termodinâmica. Considerado comportamento de gás ideal.

-C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> : O estado de referência para entalpia específica é baseado na entalpia de formação relativa aos elementos a 25 °C (-103.836 kJ/kmole). O estado de referência para entropia específica é determinado pela Terceira Lei da Termodinâmica. Considerado comportamento de gás ideal.

-CH<sub>4</sub> : O estado de referência para a entalpia específica é baseado na entalpia de formação relativa dos elementos a 25 °C (-74.865 kJ/kmol). O estado de referência para entropia específica é determinada pela Terceira Lei da Termodinâmica. Considerado comportamento de gás ideal.

As propriedades termodinâmicas são fornecidas , com base na correlação de calor específico a pressão constante de Van Wylen e Sonntag, Fundamentals of Classical Thermodynamics, 3rd ed, John Wiley and Sons, 1986."

ANEXO C- CALCULO DA COMBUSTÃO DOS  
GASES COMBUSTÍVEIS MISTOS POR  
PROCESSO:

Combustão de Gases Siderúrgicos - CGS  
Gerência de Engenharia Operacional e Utilidades - Diretoria Industrial

Data:  
Projeto:  
Identificação:  
Cálculo da temperatura de chama

Laminação de Perfis  
  
Entalpia  
  
Calor molecular

Características dos combustíveis

|          |                  |  |       |   |
|----------|------------------|--|-------|---|
| Gás 01 : | GAF              |  | 61,08 | % |
| Gás 02 : | GAC              |  | 0     | % |
| Gás 03 : | GCO              |  | 32,29 | % |
| Gás 04 : | GN               |  | 6,63  | % |
| Total:   | Gás misto (g.m.) |  | 100   | % |

Tabela das composições e PCI

| Componente               | Unidades      |  |  | GAF     | GAC      | GCO      | GN       | GÁS MISTO |
|--------------------------|---------------|--|--|---------|----------|----------|----------|-----------|
| Acetileno - C2H2         | % volumétrico |  |  | 0,000   | 0,000    | 0,110    | 0,000    | 0,036     |
| Dióxido de carbono - CO2 | % volumétrico |  |  | 24,500  | 18,690   | 1,900    | 0,468    | 15,609    |
| Etano - C2H6             | % volumétrico |  |  | 0,000   | 0,000    | 0,690    | 5,642    | 0,597     |
| Etileno - C2H4           | % volumétrico |  |  | 0,000   | 0,000    | 2,080    | 0,000    | 0,672     |
| Hidrogênio - H2          | % volumétrico |  |  | 3,830   | 0,850    | 60,200   | 0,000    | 21,778    |
| Metano - CH4             | % volumétrico |  |  | 0,000   | 0,000    | 26,020   | 92,098   | 14,508    |
| Monóxido de carbono - CO | % volumétrico |  |  | 24,100  | 56,630   | 6,130    | 0,000    | 16,700    |
| Nitrogênio - N2          | % volumétrico |  |  | 46,700  | 23,370   | 2,000    | 0,779    | 29,222    |
| Oxigênio - O2            | % volumétrico |  |  | 0,870   | 0,460    | 0,870    | 0,012    | 0,813     |
| Propano - C3H8           | % volumétrico |  |  | -       | -        | -        | 1,002    | 0,066     |
| TOTAL                    | % volumétrico |  |  | 100,000 | 100,000  | 100,000  | 100,000  | 100,000   |
| PCI                      | kcal/Nm3      |  |  | 825,980 | 1730,761 | 4376,226 | 8956,069 | 2511,379  |

|                                     |               |  |  |      |                           |  |  |
|-------------------------------------|---------------|--|--|------|---------------------------|--|--|
| <b>Características da combustão</b> |               |  |  |      |                           |  |  |
| Temperatura do ar atmosférico       | °C            |  |  | 380  | 25 °C a 2500 °C           |  |  |
| Excesso de ar                       | % volumétrico |  |  | 2    | -                         |  |  |
| Percentual de oxigênio              | % volumétrico |  |  | 21   | OBS.: Ar atmosférico: 21% |  |  |
| Temperatura do gás 01               | °C            |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C           |  |  |
| Temperatura do gás 02               | °C            |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C           |  |  |
| Temperatura do gás 03               | °C            |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C           |  |  |
| Temperatura do gás 04               | °C            |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C           |  |  |
| Rendimento pirométrico              | -             |  |  | 0,78 | Variação: 0 a 1           |  |  |

|                            |                          |  |  |           |                      |  |
|----------------------------|--------------------------|--|--|-----------|----------------------|--|
| Fator de ar total          | Nm3ar/ Nm3 g.m.          |  |  | 2,5635798 | -                    |  |
| Fator de oxigênio          | Nm3O2/ Nm3 g.m.          |  |  | 0         | -                    |  |
| Fator ar atmosférico total | Nm3ar atmtotal/ Nm3 g.m. |  |  | 2,5635798 | Ar teórico + excesso |  |
| Fator fumaças              | Nm3 fumaças/ Nm3 g.m.    |  |  | 3,374663  | -                    |  |

**Fumaças**

|                          |               |  |  |           |   |           |               |  |
|--------------------------|---------------|--|--|-----------|---|-----------|---------------|--|
| Água - H2O               | Nm3/ Nm3 g.m. |  |  | 0,5422894 | = | 16,069439 | % das fumaças |  |
| Dióxido de carbono - CO2 | Nm3/ Nm3 g.m. |  |  | 0,4962409 | = | 14,704902 | % das fumaças |  |
| Nitrogênio - N2          | Nm3/ Nm3 g.m. |  |  | 2,3174458 | = | 68,671919 | % das fumaças |  |
| Oxigênio - O2            | Nm3/ Nm3 g.m. |  |  | 0,0186869 | = | 0,5537403 | % das fumaças |  |
| Total                    | Nm3/ Nm3 g.m. |  |  | 3,374663  | = | 100       | % das fumaças |  |

|                                  |        |  |  |           |                |  |      |              |
|----------------------------------|--------|--|--|-----------|----------------|--|------|--------------|
| Temperatura adiabática da chama  | °C     |  |  | 2053,8649 |                |  | Dh = | -5,60016E-07 |
| Temperatura da chama prática     | °C     |  |  | 1602,0146 |                |  |      |              |
| Densidade do g.m. a 0 °C e 1 atm | kg/Nm3 |  |  | 1,034204  | a 0 °C e 1 atm |  |      |              |

|                                 |             |  |  |           |                                                   |  |  |  |
|---------------------------------|-------------|--|--|-----------|---------------------------------------------------|--|--|--|
| Densidade relativa do gás misto | -           |  |  | 0,7999721 | a 0 °C e 1 atm<br>(ar: 0°C/1atm:<br>1,293 kg/Nm3) |  |  |  |
| Calor específico do gás misto   | kcal/Nm3 °C |  |  | 0,3360058 | a 1 atm e na<br>temperatura de<br>entrada         |  |  |  |
| Índice de Wobbe Inferior        | kcal/Nm3    |  |  | 2807,856  | a 0 °C e 1 atm                                    |  |  |  |

Entalpia das fumaças

|     |             |      |           |      |             |      |           |      |           |
|-----|-------------|------|-----------|------|-------------|------|-----------|------|-----------|
| °C  | kcal/Nm3    | °C   | kcal/Nm3  | °C   | kcal/Nm3    | °C   | kcal/Nm3  | °C   | kcal/Nm3  |
| 0   | 0           | -    | -         | -    | -           | -    | -         | -    | -         |
| 100 | 33,20219929 | 600  | 213,75444 | 1100 | 417,458681  | 1600 | 633,37007 | 2100 | 859,06164 |
| 200 | 67,46048783 | 700  | 252,64313 | 1200 | 459,1625358 | 1700 | 677,76803 | 2200 | 904,59488 |
| 300 | 102,6448563 | 800  | 292,4579  | 1300 | 502,206772  | 1800 | 722,50443 | 2300 | 950,35594 |
| 400 | 138,7553047 | 900  | 333,19875 | 1400 | 545,5894398 | 1900 | 767,57925 | 2400 | 996,34485 |
| 500 | 175,791833  | 1000 | 374,86567 | 1500 | 589,3105393 | 2000 | 812,99251 | 2500 | 1042,5616 |

|                   |  |                  |  |     |             |    |           |     |   |       |             |
|-------------------|--|------------------|--|-----|-------------|----|-----------|-----|---|-------|-------------|
| Energia fornecida |  | kcal/Nm3 de g.m. |  | PCI | 2511,378993 | Ar | 290,40904 | Gás | 0 | Total | 2801,788031 |
|                   |  | %                |  |     | 89,63486764 |    | 10,365132 |     | 0 |       | 100         |

TOTAL DE GÁS CONSUMIDO

|         |            |       |
|---------|------------|-------|
| GCO+GAF | 79.247,88  | Ndam³ |
| GN      | 6,49151468 |       |
| TOTAL   | 79.254,38  |       |

Combustão de Gases Siderúrgicos - CGS  
Gerência de Engenharia Operacional e Utilidades - Diretoria Industrial

Data:

Projeto:

Identificação:

Cálculo da temperatura de chama

14/08/2008

FM

Lam de Fio  
Máquina

Entalpia

x

Calor molecular

|                                  |  |                  |  |  |     |   |  |  |  |
|----------------------------------|--|------------------|--|--|-----|---|--|--|--|
| Características dos combustíveis |  |                  |  |  |     |   |  |  |  |
| Gás 01 :                         |  | GAF              |  |  | 68  | % |  |  |  |
| Gás 02 :                         |  | GAC              |  |  | 0   | % |  |  |  |
| Gás 03 :                         |  | GCO              |  |  | 32  | % |  |  |  |
| Gás 04 :                         |  | GN               |  |  | 0   | % |  |  |  |
| Total:                           |  | Gás misto (g.m.) |  |  | 100 | % |  |  |  |

| Tabela das composições e PCI |               |  |         |          |          |          |           |  |
|------------------------------|---------------|--|---------|----------|----------|----------|-----------|--|
| Componente                   | Unidades      |  | GAF     | GAC      | GCO      | GN       | GÁS MISTO |  |
| Acetileno - C2H2             | % volumétrico |  | 0,000   | 0,000    | 0,110    | 0,000    | 0,035     |  |
| Dióxido de carbono - CO2     | % volumétrico |  | 24,500  | 18,690   | 1,900    | 0,468    | 17,268    |  |
| Etano - C2H6                 | % volumétrico |  | 0,000   | 0,000    | 0,690    | 5,642    | 0,221     |  |
| Etileno - C2H4               | % volumétrico |  | 0,000   | 0,000    | 2,080    | 0,000    | 0,666     |  |
| Hidrogênio - H2              | % volumétrico |  | 3,830   | 0,850    | 60,200   | 0,000    | 21,868    |  |
| Metano - CH4                 | % volumétrico |  | 0,000   | 0,000    | 26,020   | 92,098   | 8,326     |  |
| Monóxido de carbono - CO     | % volumétrico |  | 24,100  | 56,630   | 6,130    | 0,000    | 18,350    |  |
| Nitrogênio - N2              | % volumétrico |  | 46,700  | 23,370   | 2,000    | 0,779    | 32,396    |  |
| Oxigênio - O2                | % volumétrico |  | 0,870   | 0,460    | 0,870    | 0,012    | 0,870     |  |
| Propano - C3H8               | % volumétrico |  | -       | -        | -        | 1,002    | 0,000     |  |
| TOTAL                        | % volumétrico |  | 100,000 | 100,000  | 100,000  | 100,000  | 100,000   |  |
| PCI                          | kcal/Nm3      |  | 825,980 | 1730,761 | 4376,226 | 8956,069 | 1962,058  |  |

Características da combustão

|                               |  |  |  |               |  |  |     |                 |
|-------------------------------|--|--|--|---------------|--|--|-----|-----------------|
| Temperatura do ar atmosférico |  |  |  | °C            |  |  | 350 | 25 °C a 2500 °C |
| Excesso de ar                 |  |  |  | % volumétrico |  |  | 3   | -               |



|                        |  |  |  |               |  |  |      |                           |  |
|------------------------|--|--|--|---------------|--|--|------|---------------------------|--|
| Percentual de oxigênio |  |  |  | % volumétrico |  |  | 21   | OBS.: Ar atmosférico: 21% |  |
| Temperatura do gás 01  |  |  |  | °C            |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C           |  |
| Temperatura do gás 02  |  |  |  | °C            |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C           |  |
| Temperatura do gás 03  |  |  |  | °C            |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C           |  |
| Temperatura do gás 04  |  |  |  | °C            |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C           |  |
| Rendimento pirométrico |  |  |  | -             |  |  | 0,78 | Variação: 0 a 1           |  |

|                            |                          |          |                      |
|----------------------------|--------------------------|----------|----------------------|
| Fator de ar total          | Nm3ar/ Nm3 g.m.          | 1,943237 | -                    |
| Fator de oxigênio          | Nm3O2/ Nm3 g.m.          | 0        | -                    |
| Fator ar atmosférico total | Nm3ar atmtotal/ Nm3 g.m. | 1,943237 | Ar teórico + excesso |
| Fator fumaças              | Nm3 fumaças/ Nm3 g.m.    | 2,743075 | -                    |

|                          |  |               |          |   |                        |
|--------------------------|--|---------------|----------|---|------------------------|
| <b>Fumaças</b>           |  |               |          |   |                        |
| Água - H2O               |  | Nm3/ Nm3 g.m. | 0,4055   | = | 14,78268 % das fumaças |
| Dióxido de carbono - CO2 |  | Nm3/ Nm3 g.m. | 0,457872 | = | 16,69192 % das fumaças |
| Nitrogênio - N2          |  | Nm3/ Nm3 g.m. | 1,859117 | = | 67,77493 % das fumaças |
| Oxigênio - O2            |  | Nm3/ Nm3 g.m. | 0,020586 | = | 0,750465 % das fumaças |
| Total                    |  | Nm3/ Nm3 g.m. | 2,743075 | = | 100 % das fumaças      |

|                                  |             |          |                                             |             |
|----------------------------------|-------------|----------|---------------------------------------------|-------------|
| Temperatura adiabática da chama  | °C          | 1950,537 | Dh =                                        | 7,27887E-08 |
| Temperatura da chama prática     | °C          | 1521,419 |                                             |             |
| Densidade do g.m. a 0 °C e 1 atm | kg/Nm3      | 1,077312 | a 0 °C e 1 atm                              |             |
| Densidade relativa do gás misto  | -           | 0,833317 | a 0 °C e 1 atm (ar: 0°C/1atm: 1,293 kg/Nm3) |             |
| Calor específico do gás misto    | kcal/Nm3 °C | 0,331778 | a 1 atm e na temperatura de entrada         |             |
| Índice de Wobbe Inferior         | kcal/Nm3    | 2149,348 | a 0 °C e 1 atm                              |             |

Entalpia das fumaças

| °C                | kcal/Nm3  | °C               | kcal/Nm3  | °C   | kcal/Nm3 | °C   | kcal/Nm3 | °C   | kcal/Nm3 |       |             |
|-------------------|-----------|------------------|-----------|------|----------|------|----------|------|----------|-------|-------------|
| 0                 | 0         | -                | -         | -    | -        | -    | -        | -    | -        |       |             |
| 100               | 33,334891 | 600              | 215,25574 | 1100 | 420,8    | 1600 | 638,3153 | 2100 | 865,6701 |       |             |
| 200               | 67,829173 | 700              | 254,47475 | 1200 | 462,767  | 1700 | 683,0431 | 2200 | 911,5307 |       |             |
| 300               | 103,2684  | 800              | 294,6387  | 1300 | 506,15   | 1800 | 728,1071 | 2300 | 957,6159 |       |             |
| 400               | 139,65257 | 900              | 335,74759 | 1400 | 549,869  | 1900 | 773,5075 | 2400 | 1003,926 |       |             |
| 500               | 176,98168 | 1000             | 377,80143 | 1500 | 593,924  | 2000 | 819,2441 | 2500 | 1050,46  |       |             |
|                   |           |                  |           |      |          |      |          |      |          |       |             |
| Energia fornecida |           | kcal/Nm3 de g.m. |           | PCI  | 1962,06  | Ar   | 200,9187 | Gás  | 0        | Total | 2162,977056 |

|                               |           |                   |  |  |        |  |          |  |   |  |     |
|-------------------------------|-----------|-------------------|--|--|--------|--|----------|--|---|--|-----|
|                               |           | %                 |  |  | 90,711 |  | 9,288989 |  | 0 |  | 100 |
|                               |           |                   |  |  |        |  |          |  |   |  |     |
| <b>TOTAL DE GAS CONSUMIDO</b> |           |                   |  |  |        |  |          |  |   |  |     |
| GCO + GAF                     | 64.605,76 | Ndam <sup>3</sup> |  |  |        |  |          |  |   |  |     |

Combustão de Gases Siderúrgicos -  
CGS  
Gerência de Engenharia Operacional e Utilidades - Diretoria Industrial

Data: **14/08/2007**  
Projeto: **Utilidades**  
Identificação: **Sistema de Energia**  
Cálculo da temperatura de chama      Entalpia      x      Calor molecular

**Características dos combustíveis**

|          |  |  |  |                     |  |  |            |   |
|----------|--|--|--|---------------------|--|--|------------|---|
| Gás 01 : |  |  |  | GAF                 |  |  | 85,42      | % |
| Gás 02 : |  |  |  | GAC                 |  |  | 11,46      | % |
| Gás 03 : |  |  |  | GCO                 |  |  | 3,12       | % |
| Gás 04 : |  |  |  | GN                  |  |  | -2,665E-15 | % |
| Total:   |  |  |  | Gás misto<br>(g.m.) |  |  | 100        | % |

**Tabela das composições e PCI**

| Componente               |  |  |  | Unidades         |  |  | GAF    | GAC    | GCO    | GN     | GÁS<br>MISTO |
|--------------------------|--|--|--|------------------|--|--|--------|--------|--------|--------|--------------|
| Acetileno - C2H2         |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 0,000  | 0,000  | 0,110  | 0,000  | 0,003        |
| Dióxido de carbono - CO2 |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 24,500 | 18,690 | 1,900  | 0,468  | 23,129       |
| Etano - C2H6             |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 0,000  | 0,000  | 0,690  | 5,642  | 0,022        |
| Etileno - C2H4           |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 0,000  | 0,000  | 2,080  | 0,000  | 0,065        |
| Hidrogênio - H2          |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 3,830  | 0,850  | 60,200 | 0,000  | 5,247        |
| Metano - CH4             |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 0,000  | 0,000  | 26,020 | 92,098 | 0,812        |
| Monóxido de carbono - CO |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 24,100 | 56,630 | 6,130  | 0,000  | 27,267       |
| Nitrogênio - N2          |  |  |  | %                |  |  | 46,700 | 23,370 | 2,000  | 0,779  | 42,632       |

|                |               |  |  |         |          |          |          |          |
|----------------|---------------|--|--|---------|----------|----------|----------|----------|
|                | volumétrico   |  |  |         |          |          |          |          |
| Oxigênio - O2  | % volumétrico |  |  | 0,870   | 0,460    | 0,870    | 0,012    | 0,823    |
| Propano - C3H8 | % volumétrico |  |  | -       | -        | -        | 1,002    | 0,000    |
| TOTAL          | % volumétrico |  |  | 100,000 | 100,000  | 100,000  | 100,000  | 100,000  |
| PCI            | kcal/Nm3      |  |  | 825,980 | 1730,761 | 4376,226 | 8956,069 | 1040,435 |

Características da combustão

|                               |               |      |                           |  |  |
|-------------------------------|---------------|------|---------------------------|--|--|
| Temperatura do ar atmosférico | °C            | 100  | 25 °C a 2500 °C           |  |  |
| Excesso de ar                 | % volumétrico | 0    | -                         |  |  |
| Percentual de oxigênio        | % volumétrico | 21   | OBS.: Ar atmosférico: 21% |  |  |
| Temperatura do gás 01         | °C            | 25   | 25 °C a 1200 °C           |  |  |
| Temperatura do gás 02         | °C            | 25   | 25 °C a 1200 °C           |  |  |
| Temperatura do gás 03         | °C            | 25   | 25 °C a 1200 °C           |  |  |
| Temperatura do gás 04         | °C            | 25   | 25 °C a 1200 °C           |  |  |
| Rendimento pirométrico        | -             | 0,78 | Variação: 0 a 1           |  |  |

|                            |                          |         |                      |
|----------------------------|--------------------------|---------|----------------------|
| Fator de ar total          | Nm3ar/ Nm3 g.m.          | 0,86474 | -                    |
| Fator de oxigênio          | Nm3O2/ Nm3 g.m.          | 0       | -                    |
| Fator ar atmosférico total | Nm3ar atmtotal/ Nm3 g.m. | 0,86474 | Ar teórico + excesso |
| Fator fumaças              | Nm3 fumaças/ Nm3 g.m.    | 1,70226 | -                    |

Fumaças

|                          |               |         |   |           |               |
|--------------------------|---------------|---------|---|-----------|---------------|
| Água - H2O               | Nm3/ Nm3 g.m. | 0,07069 | = | 4,1525412 | % das fumaças |
| Dióxido de carbono - CO2 | Nm3/ Nm3 g.m. | 0,51388 | = | 30,188077 | % das fumaças |
| Nitrogênio - N2          | Nm3/ Nm3 g.m. | 1,10946 | = | 65,175897 | % das fumaças |
| Oxigênio - O2            | Nm3/ Nm3 g.m. | 0,00823 | = | 0,483484  | % das fumaças |
| Total                    | Nm3/ Nm3 g.m. | 1,70226 | = | 100       | % das fumaças |

|                                 |    |         |
|---------------------------------|----|---------|
| Temperatura adiabática da chama | °C | 1525,03 |
| Temperatura da chama prática    | °C | 1189,53 |

Dh = 5,538E-05

|                                  |             |         |                                             |
|----------------------------------|-------------|---------|---------------------------------------------|
| Densidade do g.m. a 0 °C e 1 atm | kg/Nm3      | 1,35197 | a 0 °C e 1 atm                              |
| Densidade relativa do gás misto  | -           | 1,04577 | a 0 °C e 1 atm (ar: 0°C/1atm: 1,293 kg/Nm3) |
| Calor específico do gás misto    | kcal/Nm3 °C | 0,33036 | a 1 atm e na temperatura de entrada         |
| Índice de Wobbe Inferior         | kcal/Nm3    | 1017,41 | a 0 °C e 1 atm                              |

Entalpia das fumaças

| °C  | kcal/Nm3    | °C   | kcal/Nm3  | °C   | kcal/Nm3    | °C   | kcal/Nm3  | °C   | kcal/Nm3  |
|-----|-------------|------|-----------|------|-------------|------|-----------|------|-----------|
| 0   | 0           | -    | -         | -    | -           | -    | -         | -    | -         |
| 100 | 34,13824722 | 600  | 224,55781 | 1100 | 441,4405809 | 1600 | 668,45069 | 2100 | 905,49411 |
| 200 | 70,1051044  | 700  | 265,81731 | 1200 | 484,9595049 | 1700 | 715,10401 | 2200 | 953,21691 |
| 300 | 107,1304896 | 800  | 308,13534 | 1300 | 530,3639877 | 1800 | 762,06954 | 2300 | 1001,1398 |
| 400 | 145,2144029 | 900  | 351,51189 | 1400 | 576,0806797 | 1900 | 809,34727 | 2400 | 1049,2629 |
| 500 | 184,3568442 | 1000 | 395,94697 | 1500 | 622,1095806 | 2000 | 856,93722 | 2500 | 1097,5861 |

|                   |  |                  |  |     |             |    |           |     |   |       |            |
|-------------------|--|------------------|--|-----|-------------|----|-----------|-----|---|-------|------------|
| Energia fornecida |  | kcal/Nm3 de g.m. |  | PCI | 1040,435214 | Ar | 20,107891 | Gás | 0 | Total | 1060,54311 |
|                   |  | %                |  |     | 98,1040006  |    | 1,8959994 |     | 0 |       | 100        |
|                   |  |                  |  |     |             |    |           |     |   |       |            |

TOTAL DE GÁS CONSUMIDO

|             |              |       |
|-------------|--------------|-------|
| GCO+GAF+GAC | 2.127.620,26 |       |
| GN          | 0,31172      |       |
| TOTAL       | 2.127.620,57 | Ndam³ |

Combustão de Gases Siderúrgicos - CGS  
Gerência de Engenharia Operacional e Utilidades - Diretoria Industrial

|                                 |                            |
|---------------------------------|----------------------------|
| Data:                           | 14/07/2008                 |
| Projeto:                        | Alto Forno                 |
| Identificação:                  | XXX-XXX                    |
| Cálculo da temperatura de chama | Entalpia x Calor molecular |

Características dos combustíveis

|          |                  |             |   |
|----------|------------------|-------------|---|
| Gás 01 : | GAF              | 93,6        | % |
| Gás 02 : | GAC              | 0           | % |
| Gás 03 : | GCO              | 6,4         | % |
| Gás 04 : | GN               | 5,32907E-15 | % |
| Total:   | Gás misto (g.m.) | 100         | % |

Tabela das composições e PCI

| Componente               | Unidades      | GAF     | GAC      | GCO      | GN       | GÁS MISTO |
|--------------------------|---------------|---------|----------|----------|----------|-----------|
| Acetileno - C2H2         | % volumétrico | 0,000   | 0,000    | 0,110    | 0,000    | 0,007     |
| Dióxido de carbono - CO2 | % volumétrico | 24,500  | 18,690   | 1,900    | 0,468    | 23,054    |
| Etano - C2H6             | % volumétrico | 0,000   | 0,000    | 0,690    | 5,642    | 0,044     |
| Etileno - C2H4           | % volumétrico | 0,000   | 0,000    | 2,080    | 0,000    | 0,133     |
| Hidrogênio - H2          | % volumétrico | 3,830   | 0,850    | 60,200   | 0,000    | 7,438     |
| Metano - CH4             | % volumétrico | 0,000   | 0,000    | 26,020   | 92,098   | 1,665     |
| Monóxido de carbono - CO | % volumétrico | 24,100  | 56,630   | 6,130    | 0,000    | 22,950    |
| Nitrogênio - N2          | % volumétrico | 46,700  | 23,370   | 2,000    | 0,779    | 43,839    |
| Oxigênio - O2            | % volumétrico | 0,870   | 0,460    | 0,870    | 0,012    | 0,870     |
| Propano - C3H8           | % volumétrico | -       | -        | -        | 1,002    | 0,000     |
| TOTAL                    | % volumétrico | 100,000 | 100,000  | 100,000  | 100,000  | 100,000   |
| PCI                      | kcal/Nm3      | 825,980 | 1730,761 | 4376,226 | 8956,069 | 1053,195  |

Características da combustão

|                               |               |      |                           |
|-------------------------------|---------------|------|---------------------------|
| Temperatura do ar atmosférico | °C            | 1250 | 25 °C a 2500 °C           |
| Excesso de ar                 | % volumétrico | 1    | -                         |
| Percentual de oxigênio        | % volumétrico | 21   | OBS.: Ar atmosférico: 21% |
| Temperatura do gás 01         | °C            | 25   | 25 °C a 1200 °C           |

|                        |    |  |  |      |                 |  |  |
|------------------------|----|--|--|------|-----------------|--|--|
| Temperatura do gás 02  | °C |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C |  |  |
| Temperatura do gás 03  | °C |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C |  |  |
| Temperatura do gás 04  | °C |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C |  |  |
| Rendimento pirométrico | -  |  |  | 0,78 | Variação: 0 a 1 |  |  |

|                            |                          |  |           |                      |
|----------------------------|--------------------------|--|-----------|----------------------|
| Fator de ar total          | Nm3ar/ Nm3 g.m.          |  | 0,9184209 | -                    |
| Fator de oxigênio          | Nm3O2/ Nm3 g.m.          |  | 0         | -                    |
| Fator ar atmosférico total | Nm3ar atmtotal/ Nm3 g.m. |  | 0,9184209 | Ar teórico + excesso |
| Fator fumaças              | Nm3 fumaças/ Nm3 g.m.    |  | 1,7666685 | -                    |

### Fumaças

|                          |               |           |   |           |               |  |
|--------------------------|---------------|-----------|---|-----------|---------------|--|
| Água - H2O               | Nm3/ Nm3 g.m. | 0,11174   | = | 6,3248991 | % das fumaças |  |
| Dióxido de carbono - CO2 | Nm3/ Nm3 g.m. | 0,4803744 | = | 27,190976 | % das fumaças |  |
| Nitrogênio - N2          | Nm3/ Nm3 g.m. | 1,1639445 | = | 65,883583 | % das fumaças |  |
| Oxigênio - O2            | Nm3/ Nm3 g.m. | 0,0106096 | = | 0,6005421 | % das fumaças |  |
| Total                    | Nm3/ Nm3 g.m. | 1,7666685 | = | 100       | % das fumaças |  |

|                                  |             |           |                                             |
|----------------------------------|-------------|-----------|---------------------------------------------|
| Temperatura adiabática da chama  | °C          | 1954,803  |                                             |
| Temperatura da chama prática     | °C          | 1524,7464 |                                             |
| Densidade do g.m. a 0 °C e 1 atm | kg/Nm3      | 1,3215559 | a 0 °C e 1 atm                              |
| Densidade relativa do gás misto  | -           | 1,0222431 | a 0 °C e 1 atm (ar: 0°C/1atm: 1,293 kg/Nm3) |
| Calor específico do gás misto    | kcal/Nm3 °C | 0,3310668 | a 1 atm e na temperatura de entrada         |
| Índice de Wobbe Inferior         | kcal/Nm3    | 1041,6741 | a 0 °C e 1 atm                              |

Dh = -1,50734E-05

### Entalpia das fumaças

| °C  | kcal/Nm3  | °C  | kcal/Nm3  | °C   | kcal/Nm3  | °C   | kcal/Nm3  | °C   | kcal/Nm3  |
|-----|-----------|-----|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|
| 0   | 0         | -   | -         | -    | -         | -    | -         | -    | -         |
| 100 | 33,950881 | 600 | 222,42491 | 1100 | 436,70229 | 1600 | 661,48247 | 2100 | 896,23338 |
| 200 | 69,58142  | 700 | 263,21612 | 1200 | 479,85458 | 1700 | 707,68118 | 2200 | 943,51211 |

|     |           |      |           |      |           |      |           |      |           |
|-----|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|------|-----------|
| 300 | 106,24409 | 800  | 305,03946 | 1300 | 524,7865  | 1800 | 754,1966  | 2300 | 990,99614 |
| 400 | 143,9389  | 900  | 347,89494 | 1400 | 570,03512 | 1900 | 801,02872 | 2400 | 1038,6855 |
| 500 | 182,66584 | 1000 | 391,78255 | 1500 | 615,60045 | 2000 | 848,17753 | 2500 | 1086,5801 |

|                                       |  |      |  |     |           |    |           |     |   |       |             |
|---------------------------------------|--|------|--|-----|-----------|----|-----------|-----|---|-------|-------------|
| Combustão de Gases Siderúrgicos - CGS |  |      |  |     |           |    |           |     |   |       |             |
| fornecida                             |  | g.m. |  | PCI | 1053,1954 | Ar | 389,00607 | Gás | 0 | Total | 1442,201457 |
|                                       |  | %    |  |     | 73,026926 |    | 26,973074 |     | 0 |       | 100         |

TOTAL DE GAS CONSUMIDO NO ALTO FORNO

1.012.619,50

 Ndam³



Gerência de Engenharia Operacional e Utilidades - Diretoria Industrial

|                                 |                            |
|---------------------------------|----------------------------|
| Data:                           | 14/07/2008                 |
| Projeto:                        | Sinterização               |
| Identificação:                  | XXX-XXX                    |
| Cálculo da temperatura de chama | Entalpia x Calor molecular |

Características dos combustíveis

|          |                  |  |  |     |   |
|----------|------------------|--|--|-----|---|
| Gás 01 : | GAF              |  |  | 0   | % |
| Gás 02 : | GAC              |  |  | 0   | % |
| Gás 03 : | GCO              |  |  | 100 | % |
| Gás 04 : | GN               |  |  | 0   | % |
| Total:   | Gás misto (g.m.) |  |  | 100 | % |

| Tabela das composições e PCI |  |  |  |               |  |  |           |           |           |           |             |
|------------------------------|--|--|--|---------------|--|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| Componente                   |  |  |  | Unidades      |  |  | GAF       | GAC       | GCO       | GN        | GÁS MISTO   |
| Acetileno - C2H2             |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0         | 0         | 0,11      | 0         | 0,11        |
| Dióxido de carbono - CO2     |  |  |  | % volumétrico |  |  | 24,5      | 18,69     | 1,9       | 0,4681051 | 1,9         |
| Etano - C2H6                 |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0         | 0         | 0,69      | 5,6417739 | 0,69        |
| Etileno - C2H4               |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0         | 0         | 2,08      | 0         | 2,08        |
| Hidrogênio - H2              |  |  |  | % volumétrico |  |  | 3,83      | 0,85      | 60,2      | 0         | 60,2        |
| Metano - CH4                 |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0         | 0         | 26,02     | 92,097596 | 26,02       |
| Monóxido de carbono - CO     |  |  |  | % volumétrico |  |  | 24,1      | 56,63     | 6,13      | 0         | 6,13        |
| Nitrogênio - N2              |  |  |  | % volumétrico |  |  | 46,7      | 23,37     | 2         | 0,7785385 | 2           |
| Oxigênio - O2                |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0,87      | 0,46      | 0,87      | 0,011707  | 0,87        |
| Propano - C3H8               |  |  |  | % volumétrico |  |  | -         | -         | -         | 1,0022794 | 0           |
| TOTAL                        |  |  |  | % volumétrico |  |  | 100       | 100       | 100       | 100       | 100         |
| PCI                          |  |  |  | kcal/Nm3      |  |  | 825,97965 | 1730,7605 | 4376,2256 | 8956,0691 | 4376,225578 |

| Características da combustão  |  |               |  |  |      |                           |
|-------------------------------|--|---------------|--|--|------|---------------------------|
| Temperatura do ar atmosférico |  | °C            |  |  | 33,6 | 25 °C a 2500 °C           |
| Excesso de ar                 |  | % volumétrico |  |  | 6,75 | -                         |
| Percentual de oxigênio        |  | % volumétrico |  |  | 21   | OBS.: Ar atmosférico: 21% |
| Temperatura do gás 01         |  | °C            |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C           |
| Temperatura do gás 02         |  | °C            |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C           |
| Temperatura do gás 03         |  | °C            |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C           |

|                        |  |    |  |  |      |                 |
|------------------------|--|----|--|--|------|-----------------|
| Temperatura do gás 04  |  | °C |  |  | 25   | 25 °C a 1200 °C |
| Rendimento pirométrico |  | -  |  |  | 0,78 | Variação: 0 a 1 |

|                            |                          |         |                         |
|----------------------------|--------------------------|---------|-------------------------|
| Fator de ar total          | Nm3ar/ Nm3 g.m.          | 4,7852  | -                       |
| Fator de oxigênio          | Nm3O2/ Nm3 g.m.          | 0       | -                       |
| Fator ar atmosférico total | Nm3ar atmtotal/ Nm3 g.m. | 4,7852  | Ar teórico +<br>excesso |
| Fator fumaças              | Nm3 fumaças/ Nm3 g.m.    | 5,45645 | -                       |

| Fumaças                  |               |  |         |   |                         |
|--------------------------|---------------|--|---------|---|-------------------------|
| Água - H2O               | Nm3/ Nm3 g.m. |  | 1,1858  | = | 21,732095 % das fumaças |
| Dióxido de carbono - CO2 | Nm3/ Nm3 g.m. |  | 0,3981  | = | 7,2959581 % das fumaças |
| Nitrogênio - N2          | Nm3/ Nm3 g.m. |  | 3,8003  | = | 69,647987 % das fumaças |
| Oxigênio - O2            | Nm3/ Nm3 g.m. |  | 0,07224 | = | 1,3239594 % das fumaças |
| Total                    | Nm3/ Nm3 g.m. |  | 5,45645 | = | 100 % das fumaças       |

|                                  |             |             |                   |
|----------------------------------|-------------|-------------|-------------------|
| Temperatura adiabática da chama  | °C          | 2040,354061 | Dh = -0,000673827 |
| Temperatura da chama prática     | °C          | 1591,476168 |                   |
| Densidade do g.m. a 0 °C e 1 atm | kg/Nm3      | 0,42853965  |                   |
| Densidade relativa do gás misto  | -           | 0,331481784 |                   |
| Calor específico do gás misto    | kcal/Nm3 °C | 0,333667881 |                   |
| Índice de Wobbe Inferior         | kcal/Nm3    | 7600,984847 |                   |

| Entalpia das fumaças |             |      |             |      |          |      |           |      |           |
|----------------------|-------------|------|-------------|------|----------|------|-----------|------|-----------|
| °C                   | kcal/Nm3    | °C   | kcal/Nm3    | °C   | kcal/Nm3 | °C   | kcal/Nm3  | °C   | kcal/Nm3  |
| 0                    | 0           | -    | -           | -    | -        | -    | -         | -    | -         |
| 100                  | 32,75501635 | 600  | 208,6438517 | 1100 | 406,117  | 1600 | 616,75152 | 2100 | 837,04545 |
| 200                  | 66,20602141 | 700  | 246,4117618 | 1200 | 446,953  | 1700 | 660,07899 | 2200 | 881,54261 |
| 300                  | 100,5204075 | 800  | 285,0430529 | 1300 | 488,876  | 1800 | 703,75757 | 2300 | 926,28079 |
| 400                  | 135,6981745 | 900  | 324,537725  | 1400 | 531,15   | 1900 | 747,78726 | 2400 | 971,26    |
| 500                  | 171,7393226 | 1000 | 364,8957781 | 1500 | 573,775  | 2000 | 792,16806 | 2500 | 1016,4802 |



Combustão de Gases Siderúrgicos - CGS  
Gerência de Engenharia Operacional e Utilidades - Diretoria Industrial

Data:

Projeto:

Identificação:

Cálculo da temperatura de chama

XX/XX/XXXX

Coqueria

XXX-XXX

Entalpia

x

Calor molecular

Características dos combustíveis

|          |  |  |  |                  |  |  |     |   |  |  |
|----------|--|--|--|------------------|--|--|-----|---|--|--|
| Gás 01 : |  |  |  | GAF              |  |  | 93  | % |  |  |
| Gás 02 : |  |  |  | GAC              |  |  | 0   | % |  |  |
| Gás 03 : |  |  |  | GCO              |  |  | 7   | % |  |  |
| Gás 04 : |  |  |  | GN               |  |  | 0   | % |  |  |
| Total:   |  |  |  | Gás misto (g.m.) |  |  | 100 | % |  |  |

Tabela das composições e PCI

| Componente               |  |  |  | Unidades      |  |  | GAF    | GAC       | GCO       | GN        | GÁS MISTO |
|--------------------------|--|--|--|---------------|--|--|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Acetileno - C2H2         |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0      | 0         | 0,11      | 0         | 0,0077    |
| Dióxido de carbono - CO2 |  |  |  | % volumétrico |  |  | 24,5   | 18,69     | 1,9       | 0,4681051 | 22,918    |
| Etano - C2H6             |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0      | 0         | 0,69      | 5,6417739 | 0,0483    |
| Etileno - C2H4           |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0      | 0         | 2,08      | 0         | 0,1456    |
| Hidrogênio - H2          |  |  |  | % volumétrico |  |  | 3,83   | 0,85      | 60,2      | 0         | 7,7759    |
| Metano - CH4             |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0      | 0         | 26,02     | 92,097596 | 1,8214    |
| Monóxido de carbono - CO |  |  |  | % volumétrico |  |  | 24,1   | 56,63     | 6,13      | 0         | 22,8421   |
| Nitrogênio - N2          |  |  |  | % volumétrico |  |  | 46,7   | 23,37     | 2         | 0,7785385 | 43,571    |
| Oxigênio - O2            |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0,87   | 0,46      | 0,87      | 0,011707  | 0,87      |
| Propano - C3H8           |  |  |  | % volumétrico |  |  | -      | -         | -         | 1,0022794 | 0         |
| TOTAL                    |  |  |  | % volumétrico |  |  | 100    | 100       | 100       | 100       | 100       |
| PCI                      |  |  |  | kcal/Nm3      |  |  | 825,98 | 1730,7605 | 4376,2256 | 8956,0691 | 1074,4969 |
|                          |  |  |  |               |  |  |        |           |           |           |           |

Características da combustão

|                               |  |  |  |               |  |  |    |                 |  |  |  |
|-------------------------------|--|--|--|---------------|--|--|----|-----------------|--|--|--|
| Temperatura do ar atmosférico |  |  |  | °C            |  |  | 25 | 25 °C a 2500 °C |  |  |  |
| Excesso de ar                 |  |  |  | % volumétrico |  |  | 1  | -               |  |  |  |

|                            |  |  |  |                          |  |  |         |                           |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|--------------------------|--|--|---------|---------------------------|--|--|--|
| Percentual de oxigênio     |  |  |  | % volumétrico            |  |  | 21      | OBS.: Ar atmosférico: 21% |  |  |  |
| Temperatura do gás 01      |  |  |  | °C                       |  |  | 25      | 25 °C a 1200 °C           |  |  |  |
| Temperatura do gás 02      |  |  |  | °C                       |  |  | 25      | 25 °C a 1200 °C           |  |  |  |
| Temperatura do gás 03      |  |  |  | °C                       |  |  | 25      | 25 °C a 1200 °C           |  |  |  |
| Temperatura do gás 04      |  |  |  | °C                       |  |  | 25      | 25 °C a 1200 °C           |  |  |  |
| Rendimento pirométrico     |  |  |  | -                        |  |  | 0,78    | Variação: 0 a 1           |  |  |  |
|                            |  |  |  |                          |  |  |         |                           |  |  |  |
| Fator de ar total          |  |  |  | Nm3ar/ Nm3 g.m.          |  |  | 0,94156 | -                         |  |  |  |
| Fator de oxigênio          |  |  |  | Nm3O2/ Nm3 g.m.          |  |  | 0       | -                         |  |  |  |
| Fator ar atmosférico total |  |  |  | Nm3ar atmtotal/ Nm3 g.m. |  |  | 0,94156 | Ar teórico + excesso      |  |  |  |
| Fator fumaças              |  |  |  | Nm3 fumaças/ Nm3 g.m.    |  |  | 1,78867 | -                         |  |  |  |
|                            |  |  |  |                          |  |  |         |                           |  |  |  |

#### Fumaças

|                                  |  |  |  |               |  |  |         |                                             |           |               |           |
|----------------------------------|--|--|--|---------------|--|--|---------|---------------------------------------------|-----------|---------------|-----------|
| Água - H2O                       |  |  |  | Nm3/ Nm3 g.m. |  |  | 0,11863 | =                                           | 6,6320276 | % das fumaças |           |
| Dióxido de carbono - CO2         |  |  |  | Nm3/ Nm3 g.m. |  |  | 0,47985 | =                                           | 26,827048 | % das fumaças |           |
| Nitrogênio - N2                  |  |  |  | Nm3/ Nm3 g.m. |  |  | 1,17954 | =                                           | 65,94508  | % das fumaças |           |
| Oxigênio - O2                    |  |  |  | Nm3/ Nm3 g.m. |  |  | 0,01066 | =                                           | 0,5958448 | % das fumaças |           |
| Total                            |  |  |  | Nm3/ Nm3 g.m. |  |  | 1,78867 | =                                           | 100       | % das fumaças |           |
|                                  |  |  |  |               |  |  |         |                                             |           |               |           |
| Temperatura adiabática da chama  |  |  |  | °C            |  |  | 1492,06 |                                             |           | Dh =          | 0,0007101 |
| Temperatura da chama prática     |  |  |  | °C            |  |  | 1163,81 |                                             |           |               |           |
| Densidade do g.m. a 0 °C e 1 atm |  |  |  | kg/Nm3        |  |  | 1,31583 | a 0 °C e 1 atm                              |           |               |           |
| Densidade relativa do gás misto  |  |  |  | -             |  |  | 1,01782 | a 0 °C e 1 atm (ar: 0°C/1atm: 1,293 kg/Nm3) |           |               |           |
| Calor específico do gás misto    |  |  |  | kcal/Nm3 °C   |  |  | 0,33108 | a 1 atm e na temperatura de entrada         |           |               |           |
| Índice de Wobbe Inferior         |  |  |  | kcal/Nm3      |  |  | 1065,05 | a 0 °C e 1 atm                              |           |               |           |

| Entalpia das fumaças |           |                     |           |      |          |      |          |      |           |       |           |
|----------------------|-----------|---------------------|-----------|------|----------|------|----------|------|-----------|-------|-----------|
| °C                   | kcal/Nm3  | °C                  | kcal/Nm3  | °C   | kcal/Nm3 | °C   | kcal/Nm3 | °C   | kcal/Nm3  |       |           |
| 0                    | 0         | -                   | -         | -    | -        | -    | -        | -    | -         |       |           |
| 100                  | 33,930173 | 600                 | 222,18082 | 1100 | 436,1612 | 1600 | 660,698  | 2100 | 895,20263 |       |           |
| 200                  | 69,521921 | 700                 | 262,91853 | 1200 | 479,274  | 1700 | 706,848  | 2200 | 942,43432 |       |           |
| 300                  | 106,14286 | 800                 | 304,68542 | 1300 | 524,1539 | 1800 | 753,315  | 2300 | 989,87201 |       |           |
| 400                  | 143,79299 | 900                 | 347,48151 | 1400 | 569,3512 | 1900 | 800,099  | 2400 | 1037,5157 |       |           |
| 500                  | 182,47231 | 1000                | 391,30678 | 1500 | 614,866  | 2000 | 847,201  | 2500 | 1085,3654 |       |           |
|                      |           |                     |           |      |          |      |          |      |           |       |           |
| Energia fornecida    |           | kcal/Nm3<br>de g.m. |           | PCI  | 1074,497 | Ar   | 0        | Gás  | 0         | Total | 1074,4969 |
|                      |           | %                   |           |      | 100      |      | 0        |      | 0         |       | 100       |

|                               |                   |                           |
|-------------------------------|-------------------|---------------------------|
| <b>Total de gas consumido</b> |                   | (INCLUINDO CARRO TORPEDO) |
| 32.846,86                     | Ndam <sup>3</sup> |                           |
| GN                            | 0,44633752        |                           |
| GCO                           | 32.846,41         |                           |

Combustão de Gases Siderúrgicos - CGS

Gerência de Engenharia Operacional e Utilidades - Diretoria Industrial

Data:

Projeto:

**ACIARIA**

Identificação:

Cálculo da temperatura de chama

Entalpia

x

Calor molecular

#### Características dos combustíveis

|          |  |  |  |                  |  |  |     |   |  |
|----------|--|--|--|------------------|--|--|-----|---|--|
| Gás 01 : |  |  |  | GAF              |  |  | 0   | % |  |
| Gás 02 : |  |  |  | GAC              |  |  | 0   | % |  |
| Gás 03 : |  |  |  | GCO              |  |  | 100 | % |  |
| Gás 04 : |  |  |  | GN               |  |  | 0   | % |  |
| Total:   |  |  |  | Gás misto (g.m.) |  |  | 100 | % |  |

#### Tabela das composições e PCI

| Componente               |  |  |  | Unidades      |  |  | GAF  | GAC   | GCO  | GN        | GÁS MISTO |
|--------------------------|--|--|--|---------------|--|--|------|-------|------|-----------|-----------|
| Acetileno - C2H2         |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0    | 0     | 0,11 | 0         | 0,11      |
| Dióxido de carbono - CO2 |  |  |  | % volumétrico |  |  | 24,5 | 18,69 | 1,9  | 0,4681051 | 1,9       |
| Etano - C2H6             |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0    | 0     | 0,69 | 5,6417739 | 0,69      |
| Etileno - C2H4           |  |  |  | % volumétrico |  |  | 0    | 0     | 2,08 | 0         | 2,08      |
| Hidrogênio - H2          |  |  |  | %             |  |  | 3,83 | 0,85  | 60,2 | 0         | 60,2      |

|                          |  |  |  |                  |  |  |           |           |           |           |           |
|--------------------------|--|--|--|------------------|--|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                          |  |  |  | volumétrico      |  |  |           |           |           |           |           |
| Metano - CH4             |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 0         | 0         | 26,02     | 92,097596 | 26,02     |
| Monóxido de carbono - CO |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 24,1      | 56,63     | 6,13      | 0         | 6,13      |
| Nitrogênio - N2          |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 46,7      | 23,37     | 2         | 0,7785385 | 2         |
| Oxigênio - O2            |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 0,87      | 0,46      | 0,87      | 0,011707  | 0,87      |
| Propano - C3H8           |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | -         | -         | -         | 1,0022794 | 0         |
| TOTAL                    |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 100       | 100       | 100       | 100       | 100       |
| PCI                      |  |  |  | kcal/Nm3         |  |  | 825,97965 | 1730,7605 | 4376,2256 | 8956,0691 | 4376,2256 |

#### Características da combustão

|                               |  |  |  |                  |  |  |           |                           |  |  |  |
|-------------------------------|--|--|--|------------------|--|--|-----------|---------------------------|--|--|--|
| Temperatura do ar atmosférico |  |  |  | °C               |  |  | 25        | 25 °C a 2500 °C           |  |  |  |
| Excesso de ar                 |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 1         | -                         |  |  |  |
| Percentual de oxigênio        |  |  |  | %<br>volumétrico |  |  | 21        | OBS.: Ar atmosférico: 21% |  |  |  |
| Temperatura do gás 01         |  |  |  | °C               |  |  | 25        | 25 °C a 1200 °C           |  |  |  |
| Temperatura do gás 02         |  |  |  | °C               |  |  | 25        | 25 °C a 1200 °C           |  |  |  |
| Temperatura do gás 03         |  |  |  | °C               |  |  | 25        | 25 °C a 1200 °C           |  |  |  |
| Temperatura do gás 04         |  |  |  | °C               |  |  | 25        | 25 °C a 1200 °C           |  |  |  |
| Rendimento pirométrico        |  |  |  | -                |  |  | 0,78      | Variação: 0 a 1           |  |  |  |
| Fator de ar total             |  |  |  | Nm3ar/ Nm3 g.m.  |  |  | 4,5274452 | -                         |  |  |  |



|                            |  |  |  |                                |  |  |           |                         |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|--------------------------------|--|--|-----------|-------------------------|--|--|--|
| Fator de oxigênio          |  |  |  | Nm3O2/<br>Nm3 g.m.             |  |  | 0         | -                       |  |  |  |
| Fator ar atmosférico total |  |  |  | Nm3ar<br>atmtotal/<br>Nm3 g.m. |  |  | 4,5274452 | Ar teórico +<br>excesso |  |  |  |
| Fator fumaças              |  |  |  | Nm3<br>fumaças/<br>Nm3 g.m.    |  |  | 5,1986952 | -                       |  |  |  |

#### Fumaças

|                                     |  |  |  |                  |  |  |           |                                                         |           |                  |                |
|-------------------------------------|--|--|--|------------------|--|--|-----------|---------------------------------------------------------|-----------|------------------|----------------|
| Água - H2O                          |  |  |  | Nm3/ Nm3<br>g.m. |  |  | 1,1858    | =                                                       | 22,809569 | % das<br>fumaças |                |
| Dióxido de carbono - CO2            |  |  |  | Nm3/ Nm3<br>g.m. |  |  | 0,3981    | =                                                       | 7,6576907 | % das<br>fumaças |                |
| Nitrogênio - N2                     |  |  |  | Nm3/ Nm3<br>g.m. |  |  | 3,5966817 | =                                                       | 69,184316 | % das<br>fumaças |                |
| Oxigênio - O2                       |  |  |  | Nm3/ Nm3<br>g.m. |  |  | 0,0181135 | =                                                       | 0,348424  | % das<br>fumaças |                |
| Total                               |  |  |  | Nm3/ Nm3<br>g.m. |  |  | 5,1986952 | =                                                       | 100       | % das<br>fumaças |                |
| Temperatura adiabática da<br>chama  |  |  |  | °C               |  |  | 2115,2748 |                                                         |           | Dh =             | -2,946E-<br>06 |
| Temperatura da chama<br>prática     |  |  |  | °C               |  |  | 1649,9143 |                                                         |           |                  |                |
| Densidade do g.m. a 0 °C e 1<br>atm |  |  |  | kg/Nm3           |  |  | 0,4285396 | a 0 °C e 1<br>atm                                       |           |                  |                |
| Densidade relativa do gás<br>misto  |  |  |  | -                |  |  | 0,3314818 | a 0 °C e 1<br>atm (ar:<br>0°C/1atm:<br>1,293<br>kg/Nm3) |           |                  |                |
| Calor específico do gás<br>misto    |  |  |  | kcal/Nm3 °C      |  |  | 0,3336679 | a 1 atm e na<br>temperatura<br>de entrada               |           |                  |                |
| Índice de Wobbe Inferior            |  |  |  | kcal/Nm3         |  |  | 7600,9848 | a 0 °C e 1<br>atm                                       |           |                  |                |

**Entalpia das fumaças**

| °C                | kcal/Nm3    | °C               | kcal/Nm3  | °C   | kcal/Nm3 | °C   | kcal/Nm3  | °C   | kcal/Nm3  |       |           |
|-------------------|-------------|------------------|-----------|------|----------|------|-----------|------|-----------|-------|-----------|
| 0                 | 0           | -                | -         | -    | -        | -    | -         | -    | -         |       |           |
| 100               | 32,83942109 | 600              | 209,32367 | 1100 | 407,7    | 1600 | 619,38458 | 2100 | 840,90931 |       |           |
| 200               | 66,38788578 | 700              | 247,2431  | 1200 | 448,7    | 1700 | 662,94799 | 2200 | 885,6634  |       |           |
| 300               | 100,8105434 | 800              | 286,03673 | 1300 | 490,8    | 1800 | 706,86784 | 2300 | 930,65989 |       |           |
| 400               | 136,1073939 | 900              | 325,70454 | 1400 | 533,3    | 1900 | 751,14413 | 2400 | 975,89879 |       |           |
| 500               | 172,2784373 | 1000             | 366,24655 | 1500 | 576,2    | 2000 | 795,77686 | 2500 | 1021,3801 |       |           |
|                   |             |                  |           |      |          |      |           |      |           |       |           |
| Energia fornecida |             | kcal/Nm3 de g.m. |           | PCI  | 4376     | Ar   | 0         | Gás  | 0         | Total | 4376,2256 |
|                   |             | %                |           |      | 100      |      | 0         |      | 0         |       | 100       |

*Combustão de Gases Siderúrgicos - CGS*  
*Gerência de Engenharia Operacional e Utilidades - Diretoria Industrial*

| Data:                            |                      |            |                 |            |           |                  |
|----------------------------------|----------------------|------------|-----------------|------------|-----------|------------------|
| Projeto:                         | <b>Carboquímicos</b> |            |                 |            |           |                  |
| Identificação:                   |                      |            |                 |            |           |                  |
| Cálculo da temperatura de chama  | Entalpia             | x          | Calor molecular |            |           |                  |
| Características dos combustíveis |                      |            |                 |            |           |                  |
| Gás 01 :                         | GAF                  | 0,00       | %               |            |           |                  |
| Gás 02 :                         | GAC                  | 0,00       | %               |            |           |                  |
| Gás 03 :                         | GCO                  | 100,00     | %               |            |           |                  |
| Gás 04 :                         | GN                   | 0,00       | %               |            |           |                  |
| Total:                           | Gás misto (g.m.)     | 100,00     | %               |            |           |                  |
| Tabela das composições e PCI     |                      |            |                 |            |           |                  |
| Componente                       | Unidades             | <i>GAF</i> | <i>GAC</i>      | <i>GCO</i> | <i>GN</i> | <b>GÁS MISTO</b> |
| Acetileno - C2H2                 | % volumétrico        | 0,00       | 0,00            | 0,11       | 0,00      | 0,11             |
| Dióxido de carbono - CO2         | % volumétrico        | 24,50      | 18,69           | 1,90       | 0,47      | 1,90             |
| Etano - C2H6                     | % volumétrico        | 0,00       | 0,00            | 0,69       | 5,64      | 0,69             |
| Etileno - C2H4                   | % volumétrico        | 0,00       | 0,00            | 2,08       | 0,00      | 2,08             |
| Hidrogênio - H2                  | % volumétrico        | 3,83       | 0,85            | 60,20      | 0,00      | 60,20            |
| Metano - CH4                     | % volumétrico        | 0,00       | 0,00            | 26,02      | 92,10     | 26,02            |
| Monóxido de carbono - CO         | % volumétrico        | 24,10      | 56,63           | 6,13       | 0,00      | 6,13             |
| Nitrogênio - N2                  | % volumétrico        | 46,70      | 23,37           | 2,00       | 0,78      | 2,00             |
| Oxigênio - O2                    | % volumétrico        | 0,87       | 0,46            | 0,87       | 0,01      | 0,87             |
| Propano - C3H8                   | % volumétrico        | -          | -               | -          | 1,00      | 0,00             |
| TOTAL                            | % volumétrico        | 100,00     | 100,00          | 100,00     | 100,00    | 100,00           |
| PCI                              | kcal/Nm3             | 826        | 1.731           | 4.376      | 8.956     | 4376             |
| Características da combustão     |                      |            |                 |            |           |                  |

|                                  |                          |        |                                             |        |               |          |
|----------------------------------|--------------------------|--------|---------------------------------------------|--------|---------------|----------|
| Temperatura do ar atmosférico    | °C                       | 25     | 25 °C a 2500 °C                             |        |               |          |
| Excesso de ar                    | % volumétrico            | 4,4    | -                                           |        |               |          |
| Percentual de oxigênio           | % volumétrico            | 21,0   | OBS.: Ar atmosférico: 21%                   |        |               |          |
| Temperatura do gás 01            | °C                       | 25     | 25 °C a 1200 °C                             |        |               |          |
| Temperatura do gás 02            | °C                       | 25     | 25 °C a 1200 °C                             |        |               |          |
| Temperatura do gás 03            | °C                       | 25     | 25 °C a 1200 °C                             |        |               |          |
| Temperatura do gás 04            | °C                       | 25     | 25 °C a 1200 °C                             |        |               |          |
| Rendimento pirométrico           | -                        | 0,78   | Variação: 0 a 1                             |        |               |          |
|                                  |                          |        |                                             |        |               |          |
| Fator de ar total                | Nm3ar/ Nm3 g.m.          | 4,679  | -                                           |        |               |          |
| Fator de oxigênio                | Nm3O2/ Nm3 g.m.          | 0,0000 | -                                           |        |               |          |
| Fator ar atmosférico total       | Nm3ar atmtotal/ Nm3 g.m. | 4,679  | Ar teórico + excesso                        |        |               |          |
| Fator fumaças                    | Nm3 fumaças/ Nm3 g.m.    | 5,351  | -                                           |        |               |          |
|                                  |                          |        |                                             |        |               |          |
| Fumaças                          |                          |        |                                             |        |               |          |
| Água - H2O                       | Nm3/ Nm3 g.m.            | 1,186  | =                                           | 22,16  | % das fumaças |          |
| Dióxido de carbono - CO2         | Nm3/ Nm3 g.m.            | 0,398  | =                                           | 7,44   | % das fumaças |          |
| Nitrogênio - N2                  | Nm3/ Nm3 g.m.            | 3,717  | =                                           | 69,46  | % das fumaças |          |
| Oxigênio - O2                    | Nm3/ Nm3 g.m.            | 0,050  | =                                           | 0,935  | % das fumaças |          |
| Total                            | Nm3/ Nm3 g.m.            | 5,351  | =                                           | 100,00 | % das fumaças |          |
|                                  |                          |        |                                             |        |               |          |
| Temperatura adiabática da chama  | °C                       | 2.067  |                                             |        | □□□           | 0        |
| Temperatura da chama prática     | °C                       | 1.612  |                                             |        |               |          |
| Densidade do g.m. a 0 °C e 1 atm | kg/Nm3                   | 0,429  | a 0 °C e 1 atm                              |        |               |          |
| Densidade relativa do gás misto  | -                        | 0,331  | a 0 °C e 1 atm (ar: 0°C/1atm: 1,293 kg/Nm3) |        |               |          |
| Calor específico do gás misto    | kcal/Nm3 °C              | 0,334  | a 1 atm e na temperatura de entrada         |        |               |          |
| Índice de Wobbe Inferior         | kcal/Nm3                 | 7.601  | a 0 °C e 1 atm                              |        |               |          |
|                                  |                          |        |                                             |        |               |          |
| Entalpia das fumaças             |                          |        |                                             |        |               |          |
| °C                               | kcal/Nm3                 | °C     | kcal/Nm3                                    | °C     | kcal/Nm3      | kcal/Nm3 |
|                                  |                          |        |                                             |        |               |          |

|                                         |     |                       |      |        |                |              |        |              |         |                |  |
|-----------------------------------------|-----|-----------------------|------|--------|----------------|--------------|--------|--------------|---------|----------------|--|
|                                         | 0   | 0,00                  | -    | -      | -              | -            | -      | -            | -       |                |  |
|                                         | 100 | 32,79                 | 600  | 208,91 | 1100           | 406,73       | 617,80 | 2100         | 838,59  |                |  |
|                                         | 200 | 66,28                 | 700  | 246,74 | 1200           | 447,65       | 661,22 | 2200         | 883,19  |                |  |
|                                         | 300 | 100,64                | 800  | 285,44 | 1300           | 489,66       | 705,00 | 2300         | 928,03  |                |  |
|                                         | 400 | 135,86                | 900  | 325,00 | 1400           | 532,02       | 749,13 | 2400         | 973,11  |                |  |
|                                         | 500 | 171,95                | 1000 | 365,43 | 1500           | 574,73       | 793,61 | 2500         | 1018,43 |                |  |
| Energia fornecida                       |     | kcal/Nm3 de g.m.<br>% |      | PCI    | 4376<br>100,00 | 0,00<br>0,00 | Gás    | 0,00<br>0,00 | Total   | 4376<br>100,00 |  |
| Total de gás consumido no Carboquímicos |     |                       |      |        |                |              |        |              |         |                |  |
| 17.288,56                               |     | Ndam³                 |      |        |                |              |        |              |         |                |  |

**Volume de Ar de Combustão  
(Anual)**

|                       | <b>Ndam<sup>3</sup></b> |
|-----------------------|-------------------------|
| Coqueria              | 93.000,00               |
| Sinterização          | 57.565,75               |
| Carboquimicos         | 17.288,56               |
| Aciaria               | 32.846,86               |
| Alto Forno            | 1.051.783,58            |
| Laminação PBT         | 702.423,20              |
| Laminação Perfis      | 257.218,14              |
| Laminação Fio Máquina | 193.817,28              |
| Caldeiras             | 10.638.101,31           |
| Calcinação            | 181.551,07              |
| TOTAL                 | 13.225.595,74           |

| <b>Área</b>           | <b>Temper. ar de combustão</b> | <b>Pressao</b>          |
|-----------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Coqueria              | 298                            | 3,0 Kgf/cm <sup>2</sup> |
| Sinterização          | 307                            | 20 mbar                 |
| Carboquimicos         | 298                            | atmosférica             |
| Aciaria               | 298                            | 30 mbar                 |
| Alto Forno            | 1523                           | 4,5 Kfg/cm <sup>2</sup> |
| Laminação PBT         | 673                            | 850mmca                 |
| Laminação Perfis      | 653                            | 9500 Pa                 |
| Laminação Fio Máquina | 623                            | 800mmca                 |
| Caldeiras             | 373                            | 160mmca                 |
| Calcinação            | 298                            | 450mmca                 |

## ANEXO D - EXERGIA QUIMICA DO ALCATRÃO.

zh2=8,519  
zc=80,2755  
zo2=8,519  
zn2=2  
zw=0  
zs=0,686  
za=0

bch\_w= 0,9\*1000/18

PCI=37620  
hlv=2442

BETA=1,0401+0,1728\*(zh2/zc)+0,0432\*(zo2/zc)+0,2169\*(zn2/zc)\*(1-2,0628\*(zh2/zc))

bch = PCI\*BETA

## RESULTADOS

Variables in Main

bch=40150  
bch\_w=50  
BETA=1,067  
hlv=2442  
PCI=37620  
za=0  
zc=80,28  
zh2=8,519  
zn2=2  
zo2=8,519  
zs=0,686  
zw=0

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)