



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

“ESTUDO DE EFICIENTIZAÇÃO DE USO DE ENERGIA EM
UMA USINA SIDERÚRGICA INTEGRADA”

ANGELA MENIN TEIXEIRA DE SOUZA

Belo Horizonte, 17 de dezembro de 2009

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

Angela Menin Teixeira de Souza

**“ESTUDO DE EFICIENTIZAÇÃO DE USO DE ENERGIA EM
UMA USINA SIDERÚRGICA INTEGRADA”**

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

Área de concentração: Calor e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Augusto Campolina França

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2009

A Isaac Newton,
que construiu o caminho.

Aos que virão.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Geraldo Campolina, por sua acolhida, disponibilidade e competente orientação;

ao Prof. Roberto Márcio pelo seu auxílio e amizade;

à Ângela Mara pela amizade, carinho e valiosa cooperação, nas muitas horas em que compartilhamos trabalho, preocupações e resultados;

à minha família, pela convivência feliz e pelo sempre presente e irrestrito apoio, especialmente ao Pompilio pela grande ajuda com revisões, edições e traduções;

aos meus colegas pelo inesquecível e sempre alegre tempo de UFMG, especialmente à Lis, pela participação e coleguismo;

aos professores e funcionários da pós-graduação do DEMEC;

ao Prof. Luiz Fernando pela ajuda;

aos Profs. Omar Campos Ferreira, Rudolf Hübner e Márcio Fonte Boa pelos conselhos e sugestões;

a todos aqueles que contribuíram para viabilizar a realização deste estudo, em especial ao Guilherme, que acolheu a proposta;

e a UFMG, onde tive o privilégio de estudar;

meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| LISTA DE FIGURAS..... | 8 |
| LISTA DE TABELAS..... | 9 |
| LISTA DE GRÁFICOS..... | 12 |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS..... | 13 |
| NOMENCLATURA..... | 15 |
| RESUMO..... | 17 |
| ABSTRACT..... | 18 |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 19 |
| 1.1 Seleção do tema..... | 19 |
| 1.2 Objetivos..... | 20 |
| 1.3 Metodologia proposta..... | 21 |
| 1.4 Energia e meio ambiente..... | 22 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 25 |
| 2.1 Introdução..... | 25 |
| 2.2 Siderurgia integrada a coque..... | 25 |
| 2.2.1 Breve história da siderurgia no Brasil..... | 25 |
| 2.2.2 Processos..... | 31 |
| 2.2.2.1 Preparação de matérias primas..... | 31 |
| 2.2.2.2 Redução do minério em altos-fornos..... | 37 |
| 2.2.2.3 Conversor a oxigênio: processo LD..... | 39 |
| 2.2.2.4 Lingotamento..... | 39 |
| 2.2.2.5 Máquinas de corte e laminação..... | 40 |
| 2.2.2.6 Carboquímica..... | 41 |
| 2.2.3 Matérias primas e outros insumos..... | 43 |
| 2.2.3.1 Composição dos minérios de ferro..... | 43 |
| 2.2.3.2 Composição do carvão mineral..... | 44 |
| 2.2.3.3 Composição do coque de petróleo..... | 47 |
| 2.2.3.4 Água utilizada no processo..... | 49 |
| 2.2.3.5 Outros insumos para os processos..... | 54 |
| 2.2.4 Produtos e subprodutos..... | 56 |
| 2.2.4.1 Coque de carvão mineral e alcatrão..... | 56 |
| 2.2.4.2 Cal..... | 58 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 2.2.4.3 | Sínter | 59 |
| 2.2.4.4 | Gusa e escória de alto-forno..... | 60 |
| 2.2.4.5 | Aço e escória de aciaria..... | 61 |
| 2.2.4.6 | Gases e lamas | 62 |
| 2.2.4.7 | Turbinas de topo..... | 63 |
| 2.3 | Balanços de massa e energia | 64 |
| 2.3.1 | Introdução | 64 |
| 2.3.2 | Consumo de energia em usinas integradas..... | 66 |
| 2.3.3 | Eficiência energética | 71 |
| 2.4 | Análise exergética | 76 |
| 2.4.1 | Conceitos..... | 76 |
| 2.4.2 | Aplicações do conceito de exergia na indústria siderúrgica | 89 |
| 2.5 | Mecanismos de desenvolvimento limpo | 93 |
| 2.6 | Conclusões da revisão bibliográfica..... | 107 |
| 3 | METODOLOGIA | 109 |
| 3.1 | Introdução | 109 |
| 3.2 | Metodologia de elaboração de balanços de massa, energia e exergia..... | 110 |
| 3.2.1 | Balanço de massa | 110 |
| 3.2.2 | Balanço de energia | 111 |
| 3.2.3 | Balanço de exergia | 112 |
| 3.3 | Desenvolvimento da análise..... | 114 |
| 4 | ESTUDO DE UMA USINA SIDERÚRGICA INTEGRADA..... | 116 |
| 4.1 | Modelo industrial adotado..... | 116 |
| 4.2 | Insumos e matérias-primas..... | 118 |
| 4.2.1 | Gases de processo | 120 |
| 4.2.2 | Líquidos..... | 120 |
| 4.2.3 | Sólidos..... | 121 |
| 4.2.3.1 | Minério de ferro | 121 |
| 4.2.3.2 | Carvão mineral | 123 |
| 4.2.3.3 | Coque de petróleo | 129 |
| 4.2.4 | Suprimento de energia elétrica..... | 129 |
| 4.3 | Produtos e efluentes industriais..... | 129 |
| 4.3.1 | Produtos e efluentes sólidos | 130 |
| 4.3.2 | Produtos e efluentes líquidos | 131 |
| 4.3.3 | Produtos e efluentes gasosos..... | 133 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.4 | Insumos e produtos na fabricação de gusa..... | 138 |
| 5 | RESULTADOS..... | 140 |
| 5.1 | Balances de massa da unidade industrial..... | 140 |
| 5.1.1 | Balanco de massa do VC1..... | 140 |
| 5.1.2 | Balanco de massa do VC2..... | 142 |
| 5.2 | Balanco de carbono e emissões de gases de efeito estufa..... | 143 |
| 5.3 | Balances de energia..... | 147 |
| 5.3.1 | Balanco de energia do VC1..... | 148 |
| 5.3.2 | Balanco de energia do VC2..... | 149 |
| 5.4 | Balances de exergia..... | 150 |
| 5.4.1 | Balanco de exergia do VC1..... | 151 |
| 5.4.2 | Balanco de exergia do VC2..... | 153 |
| 5.4.3 | Balanco de exergia global..... | 154 |
| 5.4.4 | Análise exergética dos setores industriais..... | 156 |
| 5.4.4.1 | Alto-forno..... | 156 |
| 5.4.4.2 | Preparação de matérias-primas..... | 159 |
| 5.4.4.3 | Aciaria..... | 160 |
| 5.4.4.4 | Lingotamento e laminação..... | 161 |
| 5.4.4.5 | Sistema de energia e utilidades..... | 162 |
| 5.4.4.6 | Diagrama de Grassmann do processo industrial..... | 162 |
| 5.5 | Usos da água..... | 165 |
| 6 | ANÁLISE DOS RESULTADOS..... | 167 |
| 6.1 | Análise do balanço energético global..... | 167 |
| 6.2 | Análise das perdas e destruições globais de exergia..... | 169 |
| 6.3 | Análise das perdas e destruições de exergia nos setores industriais..... | 174 |
| 6.3.1 | Análise do balanço exergético do alto-forno..... | 175 |
| 6.3.2 | Análise do balanço exergético da coqueria..... | 177 |
| 6.4 | Análise do uso da água..... | 178 |
| 6.5 | Emissões de gases de efeito estufa e projeto de mecanismo de desenvolvimento limpo.... | 179 |
| 6.6 | Considerações sobre a confiabilidade dos dados e resultados..... | 182 |
| 7 | CONCLUSÕES..... | 185 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 190 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|---|-----|
| FIGURA 2.1 | Fornos Antigos para Extração de Ferro | 26 |
| FIGURA 2.2 | Forno de Soleira | 26 |
| FIGURA 2.3 | Forjas Corsa e Catalã; Fornos Osmund e Stückoven | 27 |
| FIGURA 2.4 | Esquema do Alto Forno Bréscia | 28 |
| FIGURA 2.5 | Efeito do Carbono nas Propriedades do Aço | 32 |
| FIGURA 2.6 | Fluxograma do Processo Siderúrgico Integrado | 32 |
| FIGURA 2.7 | Esquema de uma Coqueria | 35 |
| FIGURA 2.8 | Produtos da Carbonização do Carvão Mineral | 36 |
| FIGURA 2.9 | Perfil Térmico do Alto-Forno | 37 |
| FIGURA 2.10 | Fatores que Afetam a Produtividade do Alto-Forno | 38 |
| FIGURA 2.11 | Processos de Lingotamento | 40 |
| FIGURA 2.12 | Composição do Alcatrão | 42 |
| FIGURA 2.13 | Consumo Específico em Usina Siderúrgica de 3 a 5 milhões de toneladas por ano | 68 |
| FIGURA 2.14 | Fluxos Típicos em Empresa Japonesa | 77 |
| FIGURA 2.15 | Processo de Combustão Isobárico, Adiabático | 82 |
| FIGURA 2.16 | Sistema de Geração de Energia Elétrica a Vapor | 87 |
| FIGURA 2.17 | Balanço de Energia na Geração Elétrica a Vapor | 88 |
| FIGURA 2.18 | Balanço de Exergia na Geração Elétrica a Vapor | 89 |
| FIGURA 4.1 | Fluxograma do Processo Produtivo Analisado | 117 |
| FIGURA 5.1 | Balanço Global de Massa | 144 |
| FIGURA 5.2 | Balanço de Carbono | 146 |
| FIGURA 5.3 | Balanço Global de Energia | 150 |
| FIGURA 5.4 | Diagrama de Grassmann da Usina Siderúrgica | 156 |
| FIGURA 5.5 | Esquema de Fluxos no Alto-Forno | 157 |
| FIGURA 5.6 | Diagrama de Grassmann dos Processos Siderúrgicos | 164 |
| FIGURA 5.7 | Fluxos de Água na Usina | 166 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|--|----|
| TABELA 2.1 | Produtos da Carbonização | 36 |
| TABELA 2.2 | Composição Química do Minério de Ferro da Mina de Carajás | 43 |
| TABELA 2.3 | Tipos de Carvão Mineral | 44 |
| TABELA 2.4 | Composição Elementar de Carvões Americanos | 46 |
| TABELA 2.5 | Composição Elementar de Carvões de Australianos | 47 |
| TABELA 2.6 | Composição do Coque Verde de Petróleo | 48 |
| TABELA 2.7 | Consumo de Água na Siderurgia Brasileira | 50 |
| TABELA 2.8 | Taxas de Recirculação de Água | 50 |
| TABELA 2.9 | Projetos da Weirton Steel Corporation | 51 |
| TABELA 2.10 | Composição de Insumos para Aciaria LD | 55 |
| TABELA 2.11 | Ferros-Liga Usados no Refino Secundário do Aço | 56 |
| TABELA 2.12 | Composição Típica do Coque Metalúrgico | 57 |
| TABELA 2.13 | Composição de Coque e Alcatrão da África do Sul | 57 |
| TABELA 2.14 | Características do Coque de Carvão Betuminoso | 57 |
| TABELA 2.15 | Características do Alcatrão | 58 |
| TABELA 2.16 | Caracterização de Amostras de Coque de Alto-Forno | 58 |
| TABELA 2.17 | Consumos Típicos de Fundentes na Fabricação de Sínter | 59 |
| TABELA 2.18 | Composição Típica do Gusa e da Escória de Alto- Forno Segundo Mourão | 60 |
| TABELA 2.19 | Composição Típica do Gusa e da Escória de Alto- Forno Segundo Moreira | 60 |
| TABELA 2.20 | Composição Típica do Gusa Segundo Figueira | 61 |
| TABELA 2.21 | Composição Típica do Gusa Segundo Penido | 61 |
| TABELA 2.22 | Composição Química do Aço Comum | 61 |
| TABELA 2.23 | Composição Química de Aços Especiais | 62 |
| TABELA 2.24 | Composição Típica do Aço e da Escória de Aciaria | 62 |
| TABELA 2.25 | Composição do Gás de Alto-Forno – GAF | 63 |
| TABELA 2.26 | Composição do Gás de Aciaria – GAC | 63 |
| TABELA 2.27 | Produção Brasileira de Aço | 65 |
| TABELA 2.28 | Faixas de Consumo de Energia Primária na Fabricação de Ferro e Aço | 66 |
| TABELA 2.29 | Consumos Específicos das Melhores Práticas | 67 |
| TABELA 2.30 | Consumo de Energia na Produção de Gusa Líquido nos Estados Unidos Segundo as Boas Práticas - 1997 – 1998 | 67 |
| TABELA 2.31 | Consumo de Energia na Produção de Aço nos Estados Unidos Segundo as Boas Práticas - 1997 – 1998 | 68 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| TABELA 2.32 | Consumo Específico de Energia em Processos Produtivos Futuros | 69 |
| TABELA 2.33 | Evolução dos Consumos Específicos da Produção de Aço | 70 |
| TABELA 2.34 | Melhores Práticas: Potencial Técnico de Economia de Energia Primária na Produção de Aço em 1995 | 71 |
| TABELA 2.35 | Melhores Práticas: Emissão de Dióxido de Carbono na Produção de Aço em 1995 | 72 |
| TABELA 2.36 | Medidas para Redução do Uso de Energia | 73 |
| TABELA 2.37 | Técnicas de Recuperação de Calor de Gases de Processo e de Sólidos | 75 |
| TABELA 2.38 | Perdas de Exergia por Etapa Produtiva | 90 |
| TABELA 2.39 | Balanço Exergético de Coqueria | 90 |
| TABELA 2.40 | Balanço Exergético de Alto-Forno | 91 |
| TABELA 2.41 | Balanço Exergético da Usina Siderúrgica Teórica do IISI | 91 |
| TABELA 2.42 | Principais Diferenças entre os Projetos de MDL de Pequena e o de Grande Escala | 99 |
| TABELA 2.43 | Mercados de Créditos de Carbono | 99 |
| TABELA 2.44 | Metodologias de Linhas de Base | 101 |
| TABELA 2.45 | Fatores e Coeficientes para Combustíveis | 104 |
| TABELA 2.46 | Fatores de Emissão por Fonte | 105 |
| TABELA 4.1 | Fluxos de Entrada e de Saídas dos Setores Industriais | 118 |
| TABELA 4.2 | Insumos Gasosos para os Processos Siderúrgicos | 120 |
| TABELA 4.3 | Composição do Minério de Ferro e do Sínter | 121 |
| TABELA 4.4 | Minérios de Ferro Utilizados na Produção de Aço | 122 |
| TABELA 4.5 | Procedência dos Carvões Coqueificados | 123 |
| TABELA 4.6 | Análise Imediata dos Carvões Mineraiis, por Procedência | 124 |
| TABELA 4.7 | Participação Internacional no Fornecimento de Carvão | 125 |
| TABELA 4.8 | Composição Elementar dos Carvões | 126 |
| TABELA 4.9 | Composição Elementar do Carvão Médio, Base Seca | 127 |
| TABELA 4.10 | Composição Elementar Final do Carvão Médio, Base Úmida | 127 |
| TABELA 4.11 | Composição das Cinzas dos Carvões | 128 |
| TABELA 4.12 | Composição Elementar do Coque de Petróleo | 129 |
| TABELA 4.13 | Composição Elementar do Alcatrão | 132 |
| TABELA 4.14 | Composição dos Gases Combustíveis | 134 |
| TABELA 4.15 | Poderes Caloríficos dos Gases Combustíveis | 134 |
| TABELA 4.16 | Condições de Saída dos Gases Combustíveis | 135 |
| TABELA 4.17 | Mistura de Gases Combustíveis Queimada nos Setores da Usina | 135 |
| TABELA 4.18 | Vazão dos Gases Combustíveis por Setor da Usina | 135 |
| TABELA 4.19 | Vazão dos Gases de Combustão Efluentes do Volume de Controle 2 | 136 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| TABELA 4.20 | Composição dos Gases de Combustão por Setor da Usina | 136 |
| TABELA 4.21 | Fluxos de Massa no Alto-Forno | 138 |
| TABELA 5.1 | Entradas de Massa do VC1 | 141 |
| TABELA 5.2 | Saídas de Massa do VC1 | 142 |
| TABELA 5.3 | Balanço de Massa do VC1 Consolidado | 142 |
| TABELA 5.4 | Balanço de Massa do VC2 | 143 |
| TABELA 5.5 | Balanço de Carbono | 145 |
| TABELA 5.6 | Composição Final Adotada para o Carvão Mineral, Base Úmida | 147 |
| TABELA 5.7 | Balanço de Energia do VC1 | 148 |
| TABELA 5.8 | Balanço de Energia do VC2 | 149 |
| TABELA 5.9 | Fluxos de Exergia no VC1 | 152 |
| TABELA 5.10 | Exergia dos Gases de Entrada do VC2 | 153 |
| TABELA 5.11 | Exergia dos Gases de Saída do VC2 | 153 |
| TABELA 5.12 | Participações Molares dos Produtos de Combustão nas Emissões, por Setor | 154 |
| TABELA 5.13 | Entradas de Exergia da Usina | 155 |
| TABELA 5.14 | Saída de Exergia da Usina | 155 |
| TABELA 5.15 | Balanço Exergético do Alto-Forno | 158 |
| TABELA 5.16 | Balanços de Massa, Energia e Exergia nos Regeneradores do Alto-Forno | 159 |
| TABELA 5.17 | Balanço Exergético da Calcinação | 159 |
| TABELA 5.18 | Balanço Exergético da Sinterização | 160 |
| TABELA 5.19 | Balanço Exergético da Coqueria | 160 |
| TABELA 5.20 | Balanço Exergético da Aciaria | 161 |
| TABELA 5.21 | Balanço Exergético dos Lingotamentos e Laminações | 161 |
| TABELA 5.22 | Balanço de Exergia do Sistema de Energia e Utilidades | 162 |
| TABELA 5.23 | Fluxos de Água na Usina | 165 |
| TABELA 6.1 | Balanço Global de Energia | 167 |
| TABELA 6.2 | Análise Comparativa entre Consumos Energéticos na Siderurgia | 168 |
| TABELA 6.3 | Potencial Sugerido de Economia de Energia no Parque Siderúrgico Mundial | 168 |
| TABELA 6.4 | Desempenho Exergético da Unidade Industrial | 170 |
| TABELA 6.5 | Perdas de Exergia na Usina de Referência IISI | 173 |
| TABELA 6.6 | Desempenho Exergético do Alto-Forno | 176 |
| TABELA 6.7 | Desempenho Exergético da Coqueria | 177 |
| TABELA 7.1 | Perdas Exergéticas nos Setores Produtivos da Usina Siderúrgica Estudada | 187 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | | |
|-------------|--|-----|
| GRÁFICO 2.1 | Produção Brasileira de Aço Bruto | 65 |
| GRÁFICO 2.2 | Preços Observados no Mercado de Carbono | 101 |
| GRÁFICO 2.3 | Participação dos Setores Industriais nas Emissões Totais do Setor de Energia | 103 |
| GRÁFICO 2.4 | Participação dos Energéticos nas Emissões Totais do Setor de Energia | 104 |
| GRÁFICO 2.5 | Atividades de Projetos de MDL no Mundo | 108 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|---|
| ABM | Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| AND | Autoridade Nacional Designada |
| BEN | Balanco Energético Nacional |
| BOF | Basic Oxygen Furnace |
| CCX | Chicago Climate Exchange |
| CEMIG | Companhia Energética de Minas Gerais |
| CGEE | Centro de Gestão e Estudos Estratégicos |
| CIMGC | Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima |
| CONSERVE | Programa de Conservação de Energia no Setor Industrial |
| CQNUMC | Convenção Quadro das Nações Unidas para Mudanças Climáticas |
| CQD | Extinção a Seco de Coque |
| CSBM | Companhia Siderúrgica Belgo Mineira |
| CSN | Companhia Siderúrgica Nacional |
| CST | Companhia Siderúrgica Tubarão |
| EES | Engineering Equation Solver |
| EOD | Entidade Operacional Designada |
| GAC | Gás de Aciaria |
| GASMIG | Companhia de Gás de Minas Gerais |
| GAF | Gás de Alto-Forno |
| GCO | Gás de Coqueria |
| GEE | Gás de Efeito Estufa |
| IBS | Instituto Aço Brasil |
| IISI | International Iron and Steel Institute |
| IPCC | Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima |
| MDL | Mecanismo de Desenvolvimento Limpo |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| OCDE | Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico |
| RCE | Reduções Certificadas de Carbono |
| SEC | Consumo Energético Específico Teórico |
| TRT | Turbina de Topo |
| UNEP | United Nations Environment Programme |

| | |
|--------|---|
| UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change |
| USEPA | United Nations Environmental Protection Agency |
| USIBA | Usina Siderúrgica da Bahia |
| WMO | World Meteorological Organization |
| WSA | World Steel Association |

NOMENCLATURA

Letras Latinas

| | |
|-----------|---|
| c | calor específico ou capacidade isobárica [J/kg.K] |
| c | teor de carbono [adimensional] |
| \dot{E} | taxa de exergia [W] |
| g | aceleração da gravidade [m/s ²] |
| h | entalpia [J/kg] |
| h | teor de hidrogênio [adimensional] |
| HHV | poder calorífico superior [J/kg ou J/m ³] |
| \dot{I} | taxa de irreversibilidade [W] |
| \dot{m} | vazão de massa [kg/s] |
| n | teor de nitrogênio [adimensional] |
| o | teor de oxigênio [adimensional] |
| P | pressão [kPa] |
| PCI | poder calorífico inferior [J/kg ou J/m ³] |
| PCS | poder calorífico superior [J/kg ou J/m ³] |
| Q | energia térmica [J] |
| R | constante específica dos gases perfeitos [J/kg.K] |
| s | entropia [J/kg.K] |
| s | teor de cinzas [adimensional] |
| T | temperatura [K ou °C] |
| tab | tonelada de aço bruto [t] |
| tC | tonelada de carbono [t] |
| tg | tonelada de gusa [t] |
| tmq | tonelada de metal quente [t] |
| trs | tonelada de aço laminado [t] |
| V | velocidade [m/s] |
| \dot{W} | trabalho [W] |
| x | fração molar [adimensional] |
| z | altitude [m] |
| z | teor de elemento [adimensional] |

Letras Gregas

| | |
|---------------|---------------------------------------|
| ΔG_0 | função de Gibbs [J] |
| ε | exergia [J] |
| η | eficiência [%] |
| ψ | eficiência racional [%] |
| τ | temperatura exergética [adimensional] |

Subscritos

| | |
|--------|--|
| DAF | livre de umidade e cinzas |
| e | fluxo de saída |
| i | fluxo de entrada ou i-ésimo componente de uma mistura |
| K | cinética |
| m | média |
| P | potencial |
| p | pressão constante |
| ph | física |
| r | refere-se a condições de um reservatório térmico |
| 0 | refere-se às condições do meio-ambiente ou à exergia química |
| 00 | refere-se ao estado morto |
| 1 | refere-se às condições iniciais ou de entrada |
| 2 | refere-se às condições finais ou de saída |
| \sim | indica que a variável está na base molar |

Sobrescritos

| | |
|---------------|---|
| M | mistura gasosa |
| Q | grandeza associada à transferência de calor |
| ε | exergética |
| ΔT | componente térmica |

RESUMO

O Brasil é o nono maior produtor de aço do mundo, sendo o estado de Minas Gerais o líder nacional da produção do metal, tendo respondido por 35,3% da produção do país em 2007. As usinas siderúrgicas integradas utilizam grandes quantidades de energia, principalmente provenientes de combustíveis fósseis, como o carvão mineral que, além de insumo energético, atua como redutor dos óxidos de ferro nos altos-fornos. Os insumos energéticos são, por isto, fortes componentes nos custos dos produtos de aço, além de ser grande fonte de gás carbônico, através da queima de combustíveis. Em 2007, a demanda setorial por carvão, no país, foi superior a 33 milhões de toneladas. Sendo o mercado mundial muito competitivo e havendo crescente preocupação internacional com o controle das emissões de gases de efeito estufa, como o gás carbônico, as empresas vêm se empenhando, desde a década de noventa, em melhorar seus índices de uso de energia. A análise exérgica foi a metodologia adotada neste trabalho para avaliação do uso de energia em uma usina típica, a partir de seus dados operacionais do ano de 2007. Esta abordagem é inovadora no país. Os trabalhos internacionais sobre o assunto não tiveram a mesma abrangência ou foram baseados em valores médios setoriais ou mesmo teóricos, não refletindo a real situação de uma indústria. No presente estudo, foi identificado, qualificado e quantificado o potencial de melhoria de eficiência, tendo sido sugeridos procedimentos e estudos futuros para identificar as ações de melhoramentos técnica e economicamente viáveis. Para isto, além de uma análise global da usina, foram feitas análises específicas das etapas do processo produtivo. A eficiência exérgica global da usina é da ordem de 40%. Os resultados indicaram o alto-forno, a coqueria e o sistema de energia e utilidades como responsáveis pelas irreversibilidades, ou perdas exérgicas, de 10,37 GJ/t de gusa, o que representa 81,5% da irreversibilidade total gerada na planta. Complementarmente foram identificadas medidas para redução do uso de água e sugerido projeto de substituição parcial do coque por finos de carvão vegetal, com vistas à captura de gás carbônico e obtenção de créditos de carbono.

Palavras-chave: siderurgia integrada, balanço energético, balanço exérgico, eficiência exérgica, irreversibilidades, gases de efeito estufa

ABSTRACT

Brazil is the 9th steel producer in the world and the state of Minas Gerais is the national leader, with 35.3% of the production in 2007. Integrated steel plants use large quantities of energy, mainly from fossil fuels such as coal, which, besides being an energy source, acts as the reducer for the iron oxides in the blast furnaces. Energy is both a strong component in the cost of steel products and a large source of carbon dioxide, due to the extensive use of the fossil fuels. In 2007, sector demand for coal, in the whole country, was larger than 33 million tonnes. Being the world market very competitive and considering the increasing international concern on the control of the greenhouse gases emissions, such as carbon dioxide, the companies are putting their best efforts, since the nineties, in improving their energy usage. This work adopted the methodology of performing an exergy analysis to evaluate the use of energy in a typical integrated steel mill, using the operational data of the year of 2007. This approach is innovative in Brazil. Even international publications on this subject or are focused on particular steps in a plant or are based on average sector or even on theoretical values, not reflecting the actual situation of an industry. In this study, the energy efficiency potential has been identified, qualified and quantified; and procedures and future studies to identify technically and economically feasible actions has been suggested. In order to do that, besides a global analysis of the steel mill, individual analysis of the production process steps has been made. Exergy efficiency for the whole plant lied around 40%. Results indicate that blast furnaces, coke oven and boilers are the responsible for the irreversibilities, or exergy losses, of 10.37 GJ/t of pig iron, which represents 81.5% of the total irreversibility found in the plant. As a complement, it has been identified measures for the reduction of water usage and suggested a project of the partial substitution of coke for charcoal fines, with the purpose of carbon dioxide capture and the possibility of applying for carbon credits.

Key words: integrated steel plant, energy balance, exergy balance, exergy efficiency, irreversibilities, greenhouse gases

1 INTRODUÇÃO

1.1 Seleção do tema

O Brasil é o nono maior produtor mundial de aço (IBS, 2009), sendo o parque siderúrgico brasileiro composto por 26 usinas administradas por oito grupos empresariais. A siderurgia é um dos setores âncora da economia mineira. O estado de Minas Gerais é líder nacional da produção de aço bruto, tendo sido responsável por 35,3% da produção nacional em 2007.

A produção do aço a partir do minério de ferro utiliza substanciais quantidades de carvão, que, além de ser o maior recurso energético empregado no processo, atua como agente redutor dos óxidos de ferro. Sendo um processo energo-intensivo, o ciclo de produção do aço é um grande emissor de gases de efeito estufa, principalmente gás carbônico. O consumo de carvão mineral na siderurgia integrada, com a rota tecnológica mais amplamente empregada, é da ordem de 500 kg por tonelada de aço bruto produzido (MOURÃO et al., 2007). Ou seja, no nível de produção nacional de aço de 2007, que foi de 33,8 milhões de toneladas (IBS, 2009), a demanda total de carvão mineral para uso em altos-fornos das usinas integradas foi da ordem de 14,5 milhões de toneladas por ano, já descontada a parcela da produção a carvão vegetal que ocorre em Minas Gerais (CEMIG, 2009). Por outro lado, se for considerado o fator de emissão para coque de 102,8 toneladas de CO₂ por TJ (CGEE, 2008), a queima desse carvão gera em torno de 43 milhões de toneladas de dióxido de carbono por ano.

A água é outro insumo utilizado em grandes quantidades na siderurgia, principalmente nas sucessivas etapas de resfriamento pela qual passam os equipamentos e os produtos intermediários, apesar de os níveis de reaproveitamento serem, usualmente, superiores a 95% (ABM, 2007). O consumo médio de água de reposição no Brasil apresenta elevada dispersão, entre 2 m³ e 50 m³ por tonelada de aço fabricada, em função de fatores diversos como uso de água do mar para refrigeração e tecnologia produtiva da unidade industrial, entre outros. No entanto, mesmo nos menores níveis de reposição, os volumes de água utilizados são muito grandes e, em diversas usinas, representam um fator importante de pressão sobre as nascentes.

Todos esses fatores já seriam suficientes para o desenvolvimento dos programas industriais de melhoria do uso de recursos energéticos e de água nos processos, apoiados pelo governo. Concorre

ainda para isto o fato de que, após um período de expansão do consumo mundial de aço, ocorreu uma desaceleração do setor a partir de setembro de 2008, em função da crise econômica mundial. Segundo a WSA (2009), a produção mundial de aço declinou em todos os maiores países produtores e em todas as regiões em 2008. Entretanto a Ásia, particularmente a China e o Oriente Médio, ainda apresentaram crescimento positivo no ano. Com o início da crise em 2008, em dezembro daquele ano foi registrado um decréscimo na produção global de aço de 24,3% em comparação com o mesmo mês no ano anterior. A crise prosseguiu em 2009, com registro de queda de produção nos quatro primeiros meses de 22,7% em relação ao mesmo período de 2008.

Com base em informações do Instituto Brasileiro de Siderurgia, atual Instituto Aço Brasil - IBS, a imprensa (O ESTADO DE SÃO PAULO, 2007) noticiou a retomada do crescimento iniciado após as privatizações da década de 1990 e que havia sido interrompido devido à estagnação econômica. Após o início da crise, todos os investimentos foram postergados.

Com capacidade instalada para fabricar 37,1 milhões de toneladas de aço, se todos os projetos em andamento e estudos fossem implantados, o parque siderúrgico no Brasil teria crescimento de, pelo menos, 21,9 milhões de toneladas anuais até 2012.

Os projetos previstos pelo IBS incluíam os já definidos, com investimentos totais de US\$ 17,2 bilhões, correspondentes a ampliações de 2,5 milhões de toneladas por ano na ArcelorMittal Tubarão, 4,0 milhões de toneladas por ano no Grupo Gerdau, 0,6 milhões de toneladas por ano na Aços Villares, 1,3 milhões de toneladas por ano na Siderúrgica Barra Mansa, 4,5 milhões de toneladas por ano na Companhia Siderúrgica Nacional e 2,2 milhões de toneladas por ano na Usiminas. Havia a previsão de novos projetos, com investimento total de US\$ 5,8 bilhões, como o da Companhia Siderúrgica do Atlântico, de 5,0 milhões de toneladas por ano, o da Aços Cearense, de 0,4 milhões de toneladas por ano, o da Vallourec Sumitomo, de 1,0 milhão de toneladas por ano e o da Companhia Siderúrgica do Planalto, de 0,4 milhão de toneladas por ano.

O IBS relacionava, ainda, projetos promissores no total de 19,0 milhões de toneladas por ano, representando investimentos de US\$ 15,6 bilhões, das empresas Baosteel (ES), CSN (MG), MMX (MS), Ceará Steel (CE), Usiminas (MG) e Siderúrgica do Mearim (MA).

O cenário financeiro obriga as empresas do setor a disputarem espaço no mercado internacional com mais afinco. Para se manterem competitivas, necessitam reduzir custos de produção, nos quais há forte participação dos insumos energéticos, principalmente do carvão mineral que, além de

combustível, atua no processo como agente redutor dos óxidos de ferro nos altos-fornos. A bibliografia demonstra que as empresas vêm realizando programas e ações destinados a reduzir seus consumos específicos. Paralelamente, vêm sendo também relatados trabalhos de desenvolvimento de equipamentos e processos com tecnologia energeticamente mais eficiente.

1.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral avaliar o uso de energia em uma usina siderúrgica integrada a coque, estabelecida em Minas Gerais, visando identificar o potencial de melhoria de sua eficiência, através da técnica de Análise Exergética ou de Segunda Lei da Termodinâmica.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- identificar, através da realização de balanços de massa, energia e exergia, o potencial de melhoria do uso de recursos energéticos no processo produtivo, comparativamente às melhores práticas;
- identificar as etapas do processo produtivo onde ocorrem as maiores irreversibilidades, com decorrente destruição exergética, e que devem, portanto, ser objeto de estudos detalhados;
- identificar e quantificar as medidas de economia de uso de água industrial;
- estabelecer o cenário de emissões de gases de efeito estufa, como base para projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL;
- sugerir projetos para obtenção de créditos de carbono.

A partir da década de noventa, o conceito de exergia passou a ser utilizado com mais intensidade na análise de processos. A exergia é definida como o trabalho máximo que uma dada forma de energia pode realizar, tendo como referência o meio ambiente. Na análise exergética, são avaliadas as irreversibilidades que ocorrem nos processos de transformação energética e as correspondentes degradações de energias envolvidas. Esta abordagem permite identificar o potencial de economia de energia ao longo das diversas etapas produtivas.

Apesar de o conceito metodológico ter sido apresentado há bastante tempo, sua aplicação é ainda bastante restrita. Na pesquisa bibliográfica realizada, foram encontrados alguns trabalhos conduzidos em empresas estrangeiras do setor siderúrgico e até mesmo um trabalho realizado a partir de dados de empresas brasileiras. Nenhum dos trabalhos estudados apresenta uma análise exaustiva de uma usina siderúrgica integrada a coque, típica do parque produtivo nacional. Os

estudos ou foram feitos em unidades teóricas, ou se restringem a algumas das operações do processo produtivo, ou ainda foram desenvolvidos para fornos a carvão vegetal.

1.3 Metodologia proposta

Tradicionalmente, as empresas fazem seus balanços energéticos com base na Primeira Lei da Termodinâmica ou Lei da Conservação da Energia. Essa técnica permite visualizar as procedências e destinos dos fluxos de energia, porém não gera informações suficientes para que possam ser identificados e avaliados os potenciais de redução de consumo. Melhorias podem ser obtidas através da redução ou eliminação de irreversibilidades que ocorrem nas transformações energéticas. O conceito de irreversibilidade decorre da Segunda Lei da Termodinâmica.

A metodologia aplicada neste trabalho aborda uma usina siderúrgica integrada a coque em duas etapas consecutivas. A primeira etapa consiste na avaliação global da unidade e a segunda refina a análise através da avaliação de cada etapa do processo produtivo. A abordagem permite a identificação e quantificação do potencial de otimização do uso de energia e de água, bem como o estabelecimento das bases para elaboração de Projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo – MDL. O cenário de referência das emissões de uma dada indústria, denominado Linha de Base, é requisito para a definição de projetos de MDL. O United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC, responsável pela aprovação dos projetos a nível internacional, aprova e divulga metodologias para elaboração dos cenários (UNFCCC, 2008). Não há metodologia aprovada para o setor siderúrgico, portanto, cada empresa pode submeter sua própria metodologia à aprovação daquela instituição.

A análise foi efetuada com base em valores anuais registrados no ano de 2007. Os dados primários foram, em grande parte, fornecidos pela empresa e complementados, sempre que necessário, por dados bibliográficos ou por resultados de cálculos.

Foi mantida a subdivisão tradicional da usina nas etapas de sinterização, coqueria, alto-forno, aciaria, lingotamento, laminação, sistema de energia e utilidades. No caso estudado, há também uma calcinação, que foi incorporada à planta, e uma unidade carboquímica, que foi considerada como sistema externo aos limites da unidade siderúrgica. Esta consideração permite a comparação entre os dados encontrados no estudo e os disponíveis na literatura relativamente aos consumos de energia, possibilitando a identificação e quantificação de melhorias.

Os cálculos efetuados utilizaram recursos de planilhas eletrônicas e do programa Engineering Equation Solver – EES (BECKMAN e KLEIN, 2008), que, além de ser uma ferramenta avançada de resolução de sistemas de equações, dispõe de bibliotecas internas e externas de funções matemáticas, propriedades termofísicas e de transporte para materiais e substâncias.

Dentre as planilhas eletrônicas utilizadas ou organizadas, deve ser destacada a planilha em formato Excel, desenvolvida por SÁ (2008), para a determinação de parâmetros de combustão de gases mistos compostos por gás de alto-forno, gás de coqueria, gás de aciaria e gás natural.

Nos balanços, são discriminados os fluxos dos diferentes tipos de insumos, de produtos, de subprodutos e de energéticos e utilidades da usina.

1.4 Energia e meio ambiente

No Brasil, o acompanhamento do consumo de energia pelos diversos segmentos é feito em nível estadual e federal. O Ministério de Minas e Energia – MME (2008), vem elaborando o Balanço Energético Nacional – BEN desde 1970. Em Minas Gerais, a CEMIG vem também fazendo o Balanço Energético, com metodologia daquele Ministério, desde 1978 (CEMIG, 2007).

Esses trabalhos mostram que, de 1978 a 2006, o consumo de carvão mineral no país passou de 119,2 a 565,8 milhões de GJ (4.982 a 13.537 mil tep). No mesmo período, em Minas Gerais, o consumo de carvão metalúrgico cresceu de 47,4 a 133,1 milhões de GJ (1.135 a 3.183,9 mil tep), ou seja, manteve-se em torno de 23% do nacional. A participação relativamente pequena, considerando que Minas Gerais é um estado de grande atividade sidero-metalúrgica, decorre da forte presença do carvão vegetal como energético, principalmente na siderurgia não integrada.

No que se refere ao desempenho energético do setor siderúrgico, é importante ressaltar que, a partir da crise do petróleo do início dos anos 80, as empresas vêm se empenhando não só na redução do consumo de derivados de petróleo, como também na melhoria da eficiência energética de seus processos. Alguns indicadores dessas medidas são, por exemplo, o aproveitamento dos gases siderúrgicos como fonte de calor para os processos. Ainda segundo os Balanços Energéticos (MME, 2008; CEMIG, 2007), em 2006, somente 12,2% do Gás de Alto-Forno – GAF, das siderúrgicas mineiras a coque não estavam sendo utilizados. No entanto, há uma razoável dispersão em torno

desta média, pois, enquanto algumas empresas fazem um aproveitamento de quase 100% de seus gases, em outras há ainda perdas de gases de alto-forno da ordem de 16 a 17% (ABM, 2007). As centrais autoprodutoras de energia elétrica responderam pelo consumo de 23,3% do GAF.

O declínio do emprego do óleo combustível foi sensível. Passou de 335.000 m³, em 1978, para 127.000 m³ em 2006, com um valor mínimo de 27.000 m³ em 2000. Já em 1983, ou seja, em um período de cinco anos, o consumo havia caído para 114.000 m³, o que representou queda de 66%. Este baixo consumo foi devido a dois fatores: redução do consumo mundial de aço e lançamento pelo governo federal do Programa de Conservação de Energia no Setor Industrial – CONSERVE (GODOI E OLIVEIRA, 2009). Foram fixadas metas de redução de consumo de derivados de petróleo para o setor industrial em geral e, mais especificamente, foram assinados termos de compromisso com a indústria siderúrgica, de papel e celulose e de cimento.

Desde o ano de 1996, o gás natural vem sendo usado na siderurgia mineira, em substituição ao óleo combustível. O gás substitui o óleo com vantagens técnicas e ambientais e tornou-se possível com a implantação de gasodutos no Estado pela Companhia de Gás de Minas Gerais - GASMIG.

O Relatório de Sustentabilidade do IBS (2008) registra também que o consumo médio de energia na siderurgia nacional é, atualmente, de 19 GJ por tonelada de aço.

A pressão para a redução de emissões de gases de efeito estufa a nível mundial é também um fator que fortalece a tendência de substituição de combustíveis fósseis por renováveis bem como as ações de efficientização dos processos industriais. As empresas brasileiras, através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL, lançado pelo Protocolo de Quioto, podem se beneficiar financeiramente com a obtenção de créditos de carbono, comercializáveis no mercado internacional. O papel vem apresentando tendências de altas de demanda e, por consequência, de elevação de preço.

O uso de insumos com alto teor de carbono produz CO₂, que é um dos gases de efeito estufa. Entre as práticas adotadas para o controle das emissões, destacam-se a recuperação de gases gerados no processo produtivo para co-geração de energia elétrica e a substituição de óleo combustível por gás natural. Vários dos projetos desenvolvidos pelo setor para a redução das emissões de CO₂ visam à obtenção de créditos de carbono, segundo os critérios do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (IBS, 2008).

O Instituto informa ainda que os esforços do setor para melhoria dos índices de desempenho ambiental e preservação do meio ambiente resultaram em investimentos, ao longo de 2007, superiores a R\$ 570 milhões. Além disto, todas as empresas do siderúrgicas possuem certificação NBR ISO 14001.

Finalmente, foi também citada a importância da água nos processos siderúrgicos. Ao todo, cerca de 16 milhões de metros cúbicos de água circulam por dia nas unidades produtivas do país. A principal iniciativa para a redução da demanda de água pelo setor é o aumento do índice de reaproveitamento, que era, em 2006, da ordem de 94%, ou seja, aproximadamente 15 milhões de metros cúbicos circulam por dia em circuito fechado, o que situa as empresas brasileiras entre as de melhor índice no cenário mundial. O uso específico de água nas usinas em 2007 estava em 14,2 m³ por tonelada de aço bruto. As usinas que trabalham somente com água doce apresentaram, naquele ano, índice inferior à média, 10,05 m³ por tonelada de aço bruto.

As empresas têm como meta eliminar o lançamento de efluentes nos corpos d'água. No ano de 2007, a vazão total dos efluentes foi de, aproximadamente, 326 milhões de metros cúbicos.

Outras iniciativas para a otimização do uso da água compreendem o aprimoramento das tecnologias de tratamento de efluentes e a preservação da qualidade e disponibilidade dos corpos hídricos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Para analisar uma planta siderúrgica integrada a coque sob o enfoque de uso de insumos, especificamente de energia e de água, tornou-se necessário o estudo e levantamento do estado-da-arte e das melhores práticas do setor. Complementarmente, para estabelecer a base de dados para elaboração de projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo, foi necessário conhecer a regulamentação internacional sobre o assunto, bem como identificar os trabalhos já disponíveis e que seriam, eventualmente, aplicáveis ao processo siderúrgico. Para isto, a revisão bibliográfica contempla as seguintes áreas:

- processo siderúrgico;
- balanços de energia e massa: técnicas de elaboração e dados de referência;
- análise exergética: técnicas de elaboração;
- projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo: regulamentação para obtenção de créditos de carbono.

2.2 Siderurgia integrada a coque

2.2.1 Breve história da siderurgia no Brasil

MOURÃO et al. (2007) apresentam um relato sobre o histórico dos processos de obtenção de ferro e aço, que é resumido a seguir.

A metalurgia é o conjunto de processos físicos e químicos destinados a retirar os metais dos minérios. A idade do ferro teve início em 1000 a.C. Nestes 3000 anos, o processo siderúrgico de transformação do minério de ferro em produtos de aço evoluiu muito, mantendo o mesmo princípio: reação do ar com uma mistura de carbono e minério de ferro, usando uma fonte térmica fornecedora de energia ao processo.

Nos primórdios, o forno de redução do minério de ferro consistia simplesmente de um poço revestido com pedras e provido de tubos para injeção de ar, no qual era inserida a carga de mistura

de minério de ferro e carvão vegetal, como mostrado na FIG.2.1. Como a temperatura de fusão do ferro não era atingida, era obtida uma massa sólida de ferro, de baixo teor de carbono, com muita ganga agregada. Para retirada da escória, o material necessitava de reaquecimento e trabalho em forjas. Esses fornos apresentavam elevado consumo específico de carvão, da ordem de 75 quilos de carvão por quilo de ferro, ou seja, 150 vezes os atuais 0,5 quilo de carvão por quilo de ferro.

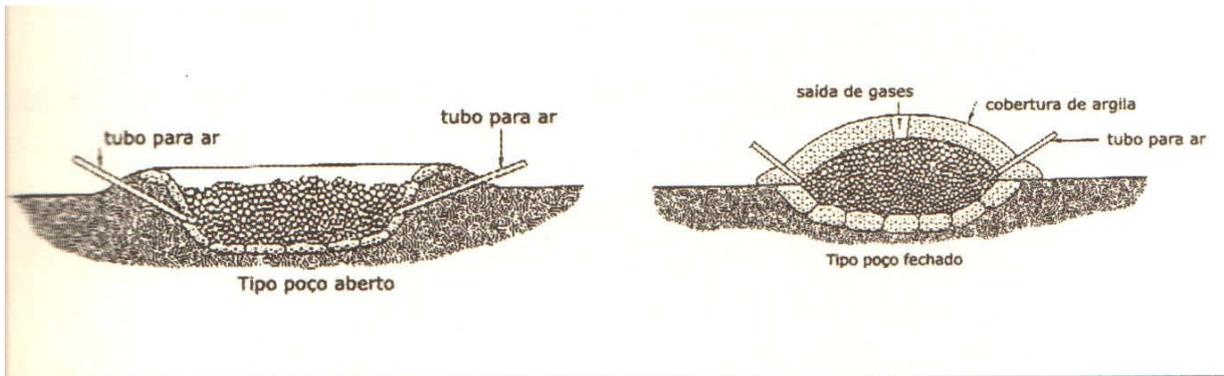


FIGURA 2.1 - Fornos Antigos para Extração de Ferro

FONTE - MOURÃO et al., 2007, p. 3

Como evolução dos fornos, surgiu o forno de soleira, FIG. 2.2, com sopro de ar mais intenso. A temperatura de fusão da escória era atingida, permitindo que fosse vazada periodicamente, o que levava à obtenção de um produto mais limpo.

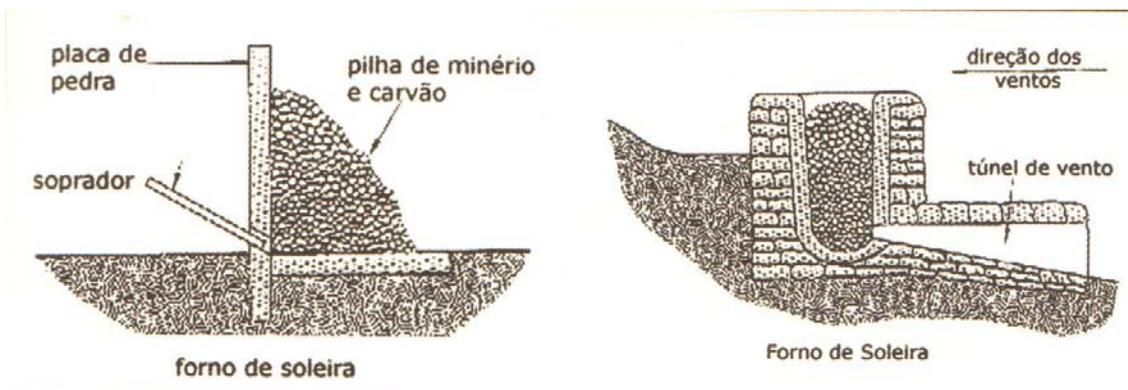


FIGURA 2.2 – Forno de Soleira

FONTE - MOURÃO et al., 2007 p.5

A fabricação de aço por têmpera do ferro, com teor de carbono superior a 0,3%, passa a ter regularidade a partir do sexto século a.C. A metalurgia do ferro começou a especializar-se e a crescer em escala, principalmente no império romano. Para a redução, eram usados fornos tipo cuba ou poço.

A partir do século X, surgiram novas tecnologias. A principal foi o uso de foles acionados por rodas d'água. Com sopro mais intenso, podiam ser atingidas temperaturas mais elevadas. Ocorreu a evolução dos fornos de redução, tendo surgido a forja Corsa (A), a forja Catalã (B), o forno Osmund (C) e o Stückoven (D), apresentados na FIG. 2.3. Nesses fornos, o consumo específico de carvão cai para 22,8 kg C/kg Fe na forja Corsa, 11,5 kg C/kg Fe na Catalã e 6 kg C/kg Fe no Stückoven. Neste último era possível a obtenção de ferro líquido com alto carbono, em torno de 4%.

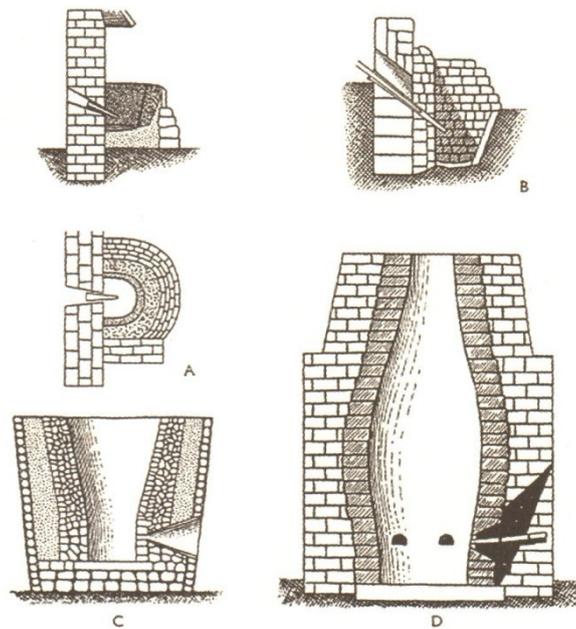


FIGURA 2.3 - Forjas Corsa e Catalã; Fornos Osmund e Stückoven

FONTE - MOURÃO et al., 2007 p.8

O alto-forno surgiu em decorrência da demanda por ferro fundido de melhor qualidade, para fabricação de balas de canhão. A FIG. 2.4 apresenta, esquematicamente, o primeiro alto-forno, construído em Bréscia no ano de 1450.

No princípio do século XVIII, teve início o uso do coque como combustível e redutor. O coque apresentava as vantagens de ter boa resistência mecânica e não liberar alcatrão. O maior problema com seu uso eram as impurezas que introduzia, as quais prejudicavam a conversão em ferro doce, problema este que, posteriormente, teve solução técnica.

Ainda no século XVIII, foi desenvolvido o processo de cadinho para produção do aço líquido para fundição a partir do ferro doce e adotado o processo contínuo, que produziu maior queda no consumo específico de carvão. A partir de então, foram introduzidas máquinas a vapor para sopro

de ar, que passou também a ser pré-aquecido. Na seqüência, foram incorporadas várias melhorias ao processo como a substituição das pedras de revestimento dos fornos por refratários, o fechamento do topo, o aumento da altura dos fornos e a melhoria na casa de corrida.

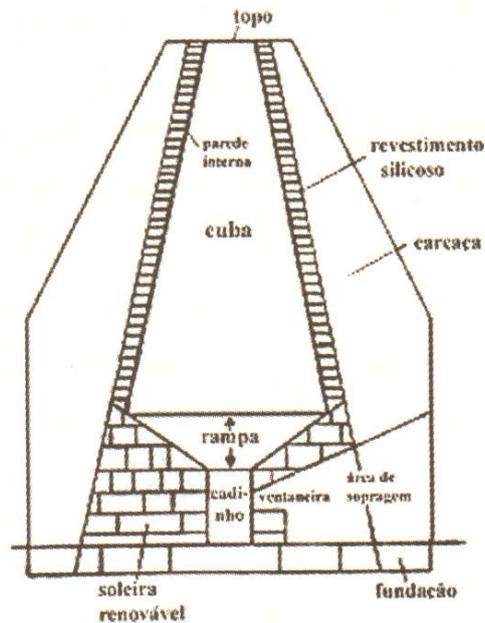


FIGURA 2.4 – Esquema do Alto Forno Bréscea
 FONTE - MOURÃO et al., 2007, p. 10

Com o aumento do consumo de aço, sua produção foi aprimorada através de fatos tais como a “queima” de carbono com sopro de ar; desenvolvimento de conversores, desenvolvimento do processo de soleira aberta (Siemens-Martin), sinterização ou pelletização do minério e, por fim, a injeção de combustíveis pelas ventaneiras dos altos-fornos. A injeção de óleo combustível pelas ventaneiras foi disseminada a partir da constatação de que essa prática leva a significativa economia de coque. Atualmente, são feitas também injeções de carvão pulverizado e de gás natural.

Os modernos altos-fornos podem produzir 13.000 toneladas de ferro gusa por dia, com consumo de combustível da ordem de 470 a 500 kg de coque, além do combustível injetado.

Como relatado pelo IBS (2009), a produção de ferro no Brasil teve início em 1587, na região de Sorocaba – São Paulo. As forjas então construídas operaram até 1629. Nessa época, a siderurgia brasileira passou por um século de estagnação.

Apesar da demanda por ferramentas para trabalhos nas minas de ouro de Minas Gerais, Portugal reprimiu o desenvolvimento de uma siderurgia no país, com a proibição da existência de fundições.

A construção de novas unidades somente foi permitida em 1795. A indústria siderúrgica iniciou seu desenvolvimento a partir de chegada da família real ao Brasil, em 1808.

Em 1815, a usina do Morro do Pilar em Minas Gerais e a fábrica de Ipanema em Sorocaba iniciaram operação. Outras unidades foram abertas em Congonhas, Caeté e São Miguel de Piracicaba, todas em Minas Gerais.

Um marco importante desse período para o progresso da siderurgia brasileira foi a fundação da Escola de Minas de Ouro Preto, voltada para a formação de engenheiros de minas, metalurgistas e geólogos.

No século XX, entre 1917 e 1930, ocorreu um surto industrial, que acarretou avanços na siderurgia nacional. O fato mais importante da época foi a construção, em Sabará – MG, da Companhia Siderúrgica Mineira, posteriormente Companhia Siderúrgica Belgo Mineira – CSBM e atual Arcelor Mittal Brasil. Nos anos 30, a produção brasileira estava em 36 mil toneladas de gusa por ano. Com a fábrica da CSBM em João Monlevade, a capacidade produtiva cresceu em 50 mil toneladas de lingotes de aço por ano. Também naquela década foram inauguradas a Companhia Siderúrgica de Barra Mansa e Companhia Metalúrgica Barbará.

O Brasil, ainda dependia de produtos importados. A partir dos anos 40 o cenário começou a mudar. Foi inaugurada a Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, em Volta Redonda, que começou a produzir seu próprio coque metalúrgico. Além dos altos-fornos, a empresa possuía aciaria e laminações, que marcaram o início da autonomia brasileira em ferro e aço. Em 1950, a produção nacional de aço alcançou 788 mil toneladas, passando a 5,5 milhões de toneladas em 1970.

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

Na década de 80, com retração no mercado interno, o país voltou-se para a exportação de aço, porém a crise tinha amplitude mundial e em muitos países havia restrições à importações.

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

A previsão de investimentos no setor, no período 2005-2010 era de US\$ 12,5 bilhões, em função da elevada demanda apresentada não só pelo mercado internacional, como pelo crescimento da demanda interna, estimado em mais de um milhão de toneladas por ano. Com isto, a capacidade instalada ficaria em 49,7 milhões de toneladas de aço. Esta previsão foi anterior à crise financeira americana, que vem repercutindo em todos os países e cuja influência no mercado de aço dos próximos anos não está ainda bem estabelecida. Segundo SILVA (2002), em artigo da revista FAE Business, o preço de insumos de baixo valor unitário flutua de acordo com a oferta e demanda mundial, o que prejudica a estabilidade do resultado no segmento. A flutuação da oferta decorre de novos investimentos e a demanda depende da situação conjuntural e estrutural da economia. O aço é um bem intermediário associado diretamente a construções e bens de capital, portanto diretamente relacionado com o crescimento da renda nacional. A elasticidade preço-demanda é alta, por isso, as empresas devem buscar baixos custos, mantendo a qualidade do produto, e agregar mais valor aos seus produtos. Para isso, vêm sendo efetuados elevados investimentos em inovação tecnológica.

O IBS (2008) relata ainda que, nos últimos anos, as empresas vêm trabalhando com processos de gestão pautados na responsabilidade social. Em 2004, 26% da produção de aço foram baseados na reciclagem de oito milhões de toneladas de sucata. A indústria siderúrgica nacional é também intensiva no uso de energia renovável (carvão vegetal) e produz em torno de 25% da energia elétrica necessária às suas atividades.

Em 2006, com capacidade instalada de 37 milhões de toneladas de aço bruto por ano, o setor atendia 95% da demanda interna. A produção de aço bruto foi de 30,9 milhões de toneladas e os produtos siderúrgicos montaram a 29,9 milhões de toneladas.

O Brasil é o 10º exportador mundial de aço, com fatia de mercado de 3,5% ou 12,5 milhões de toneladas, divididas em 4,3 milhões de toneladas aços planos, 2,5 milhões de toneladas de aços longos e 5,7 milhões de toneladas de semi-acabados.

Ainda segundo o IBS (2008), a siderurgia brasileira apresentou, em 2007, recordes na produção, nas vendas internas, no consumo aparente de aço e na receita das exportações, como reflexo das atividades dos setores de petróleo e gás, de máquinas industriais e agrícolas, de eletrodomésticos, automotivo e de construção civil. A produção de aço bruto e cresceu 9,3% em 2007 e a de laminados 10,0% em relação ao ano anterior.

2.2.2 Processos

MOURÃO et al. (2007) descrevem o processo siderúrgico integrado, dividindo-o nas etapas de preparação de matérias-primas, redução, aciaria, lingotamento, laminação e produtos. A seguir são resumidos os principais pontos com relação ao histórico, à tecnologia, características de processo, insumos e produtos de cada uma das etapas.

A metalurgia, com 6000 anos de existência, é o conjunto de tratamentos físicos e químicos aplicados aos minerais para extração dos metais. Apesar de a evolução tecnológica ocorrida ao longo dos 3000 anos de existência oficial da siderurgia, a transformação do minério de ferro em produtos de aço continua a mesma em sua essência: uma fonte de carbono (coque ou carvão vegetal) reage com um sopro de ar para extrair o ferro do minério e para fornecer energia ao processo. O ferro obtido é trabalhado térmica e mecanicamente para obtenção do produto final

O teor de carbono presente no ferro, resultante do processo de redução do minério, afeta muito as propriedades do ferro obtido. Por exemplo, a FIG. 2.5 mostra a influência do teor de carbono na dureza do metal.

A usina integrada é aquela na qual o aço é obtido a partir do ferro primário, ou seja, a matéria prima é o minério de ferro. Esse minério é transformado em ferro gusa nos altos-fornos e o gusa é transformado em aço através da chamada operação de conversão. Na FIG. 2.6 o processo integrado completo é apresentado esquematicamente.

2.2.2.1 Preparação de matérias primas

Como descrito por MOURÃO et al. (2007), o processo é iniciado com a preparação das matérias primas para a redução no alto-forno. Basicamente, as operações envolvidas são :

- Tratamento, composto por britagem, moagem, peneiramento, classificação e separação.

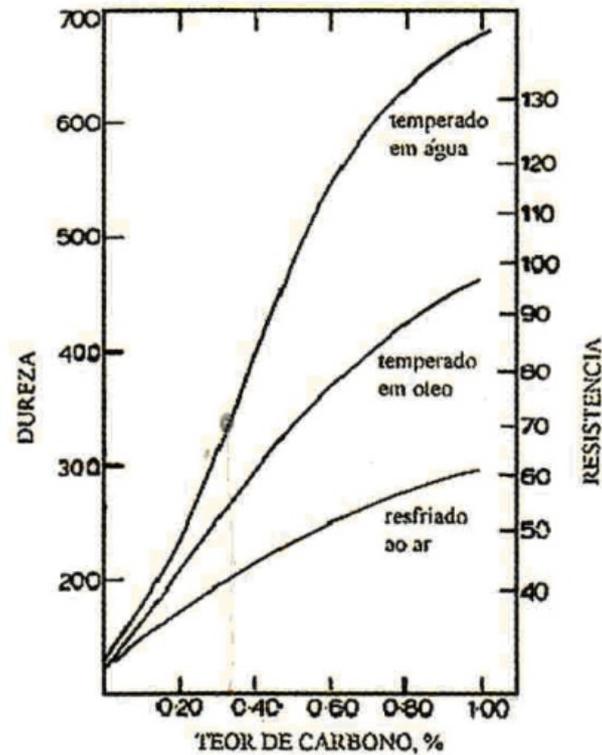


FIGURA 2.5 – Efeito do Carbono nas Propriedades do Aço

FONTE - MOURÃO et al., 2007, p. 3

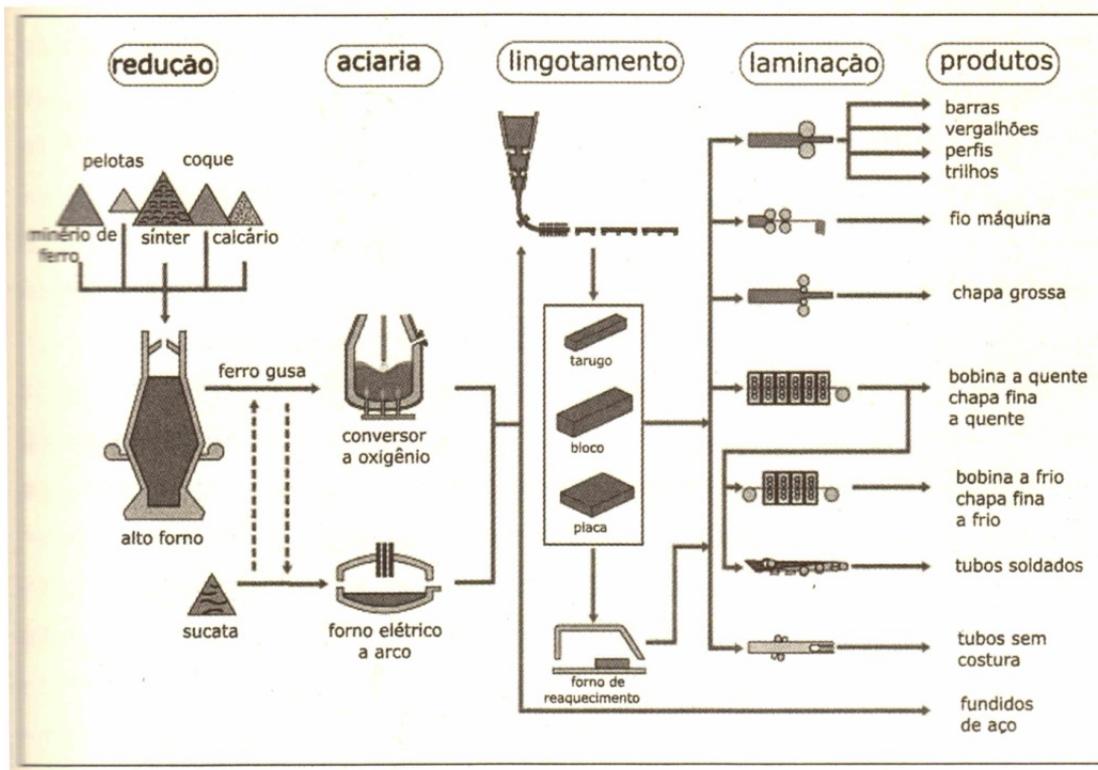


FIGURA 2.6 – Fluxograma do Processo Siderúrgico Integrado

FONTE - MOURÃO et al., 2007, p. 15

- Secagem, para retirar a umidade do material. Não é retirada a água de cristalização. Esta operação requer o uso de muita energia, já que a reação de vaporização da água consome 44,5 kJ/mol de água, porém não são necessárias altas temperaturas. Por isto, é comum o uso de gases efluentes ou de combustíveis de baixo poder calorífico. Em alguns casos, a temperatura fica limitada de forma tal que o material não oxide ou entre em combustão ou elimine voláteis, como é o caso do carvão.
- Calcinação do calcário para obtenção de cal. Este processo é bastante endotérmico, exigindo o fornecimento de grande quantidade de energia. Ocorre a temperaturas elevadas, entre 600°C e 1.100°C.
- Aglomeração, constituída por sinterização, pelotização e briquetagem. Tem por objetivo transformar os finos das matérias-primas em aglomerados de utilização viável no processo siderúrgico. Como os aglomerados apresentam desempenho superior ao do minério, estes últimos são propositalmente cominuídos e posteriormente aglomerados.

A sinterização é um dos processos de aglomeração mais usados na siderurgia e é feito por fusão incipiente de um leito composto por mistura de finos de minério, coque, fundentes, sínter de retorno e água. O calor é fornecido pela queima de Gás de Coqueria – GCO. Normalmente o processo tem bom rendimento térmico, já que o ar de combustão é pré-aquecido pelo próprio sínter e os produtos de combustão (CO_2 , N_2 , O_2 e H_2O) pré-aquecem a carga a ser ainda sinterizada. É, portanto, necessário controle da permeabilidade da carga para garantir o correto escoamento dos gases. A temperatura máxima na zona de combustão é da ordem de 1.300°C a 1.400°C.

FIGUEIRA (2009) cita as seguintes matérias-primas para o processo:

- a. Minério (*sinter feed*)
- b. Combustível:
 - Sólido: finos de carvão vegetal ou finos de coque
 - Gasoso: gás de alto-forno ou coqueria
 - Líquido: óleo
- c. Fundentes:
 - calcário (CaCO_3)
 - dolomita (MgCO_3)
- d. Outras adições:
 - resíduos da usina reciclados (pós, lama, etc.)

O processo de produção pode ser contínuo, Dwigh & Lloyd, ou por batelada, Greewalt. Este último, mais antigo, exige baixo investimento, porém produz síter de pior qualidade e apresenta baixa produtividade.

- Coqueificação, para conferir ao carvão as características necessárias, quais sejam: alta resistência, alto teor de carbono fixo, baixa reatividade com o CO_2 e baixo teor de enxofre (<1%). Para isto, o carvão é destilado a aproximadamente 1000°C em retortas verticais longas. Após seu descarregamento, o coque é resfriado bruscamente com água ou nitrogênio (extinção).

A coqueificação é um processo pelo qual o carvão mineral, ao ser submetido a temperaturas elevadas na ausência de oxigênio, libera gases presentes em sua estrutura, originando um resíduo sólido infusível, que é o coque. É um processo químico, na medida em que envolve quebra de moléculas, cujas principais etapas são:

- a. perda de umidade: ocorre a temperaturas entre 100°C e 120°C e caracteriza-se pela liberação de umidade presente no carvão;
- b. desvolatização primária: é o primeiro estágio da coqueificação propriamente dita e ocorre entre temperaturas da ordem de 350°C a 550°C , com a liberação de hidrocarbonetos pesados e alcatrão;
- c. fluidez: ocorre entre 450°C e 600°C , quando o material se torna fluido, pastoso, devido ao rompimento das pontes de oxigênio presentes em sua estrutura química;
- d. inchamento: etapa que ocorre paralelamente à fluidez, devida à pressão dos gases, difundindo-se na estrutura de microporos do carvão. A intensidade do inchamento será função da velocidade de liberação destes, através da massa fluida.
- e. ressolidificação: ocorre à temperaturas próximas de 700°C , formando o semi-coque. Determina em grande parte a qualidade do coque, uma vez que uma ressolidificação sem formação de fissuras originará um produto de elevada resistência mecânica;
- f. desvolatização secundária: última fase do processo, ocorre na faixa situada entre 850°C e 1300°C com eliminação sobretudo de hidrogênio.

Os produtos da coqueificação (CARVÃO MINERAL, ENERGIA E CARBOQUÍMICOS, 2008) são um resíduo sólido, poroso, juntamente com produtos voláteis que escapam da câmara de coqueificação.

Logo após a carga têm início as transformações químicas responsáveis pelo aparecimento do coque metalúrgico. O processo ocorre na ausência de oxigênio para evitar a combustão da mistura de carvões. O calor necessário para a coqueificação é fornecido por condução através das paredes dos fornos (fabricadas com material refratário de sílica e sílico-alumínio de alta qualidade) proveniente da combustão de gases em câmaras intercaladas àqueles, como ilustrado no diagrama da FIG. 2.7.

Ao ser desenformado, o coque incandescente a 1.200° C, é descarregado no interior de um carro de apagamento, que se locomove em trilhos dispostos na lateral da coqueria. Este carro conduz o material até a estação de apagamento, o qual pode ser feito por intermédio de jatos de água, ou a seco.

A pirólise do carvão mineral produz:

- Fração gasosa: gás de hulha
- Frações líquidas: águas amoniacais, óleo leve e alcatrão de hulha
- Fração sólida: coque

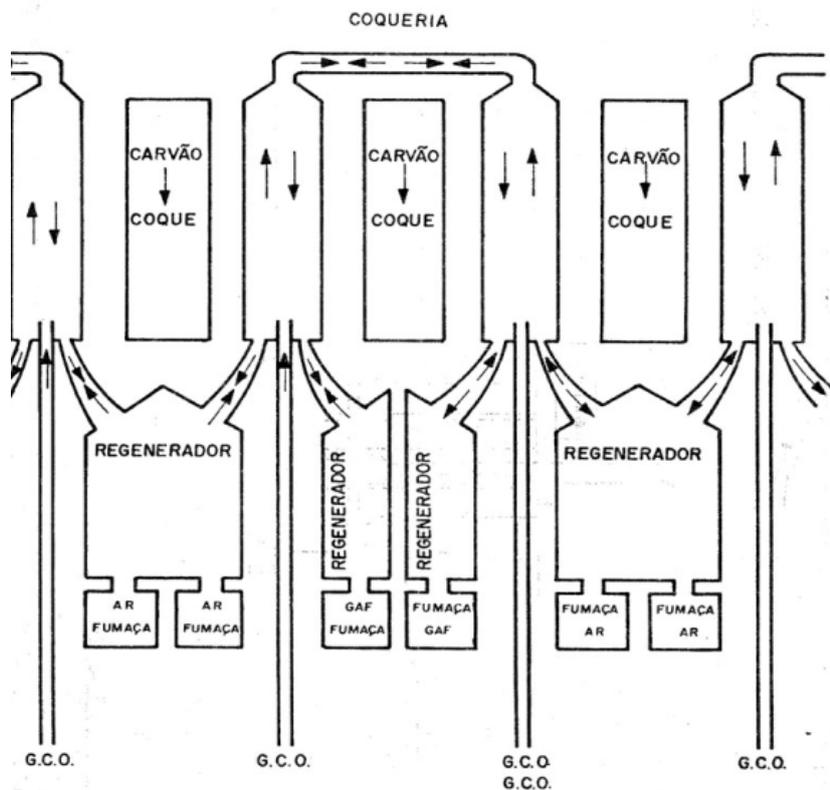


FIGURA 2.7 – Esquema de uma Coqueria

FONTE - Carvão Mineral Energia e Carboquímicos, 2008, lâmina 28

A FIG. 2.8 apresenta os integrantes dos diversos tipos de produtos da carbonização do carvão mineral

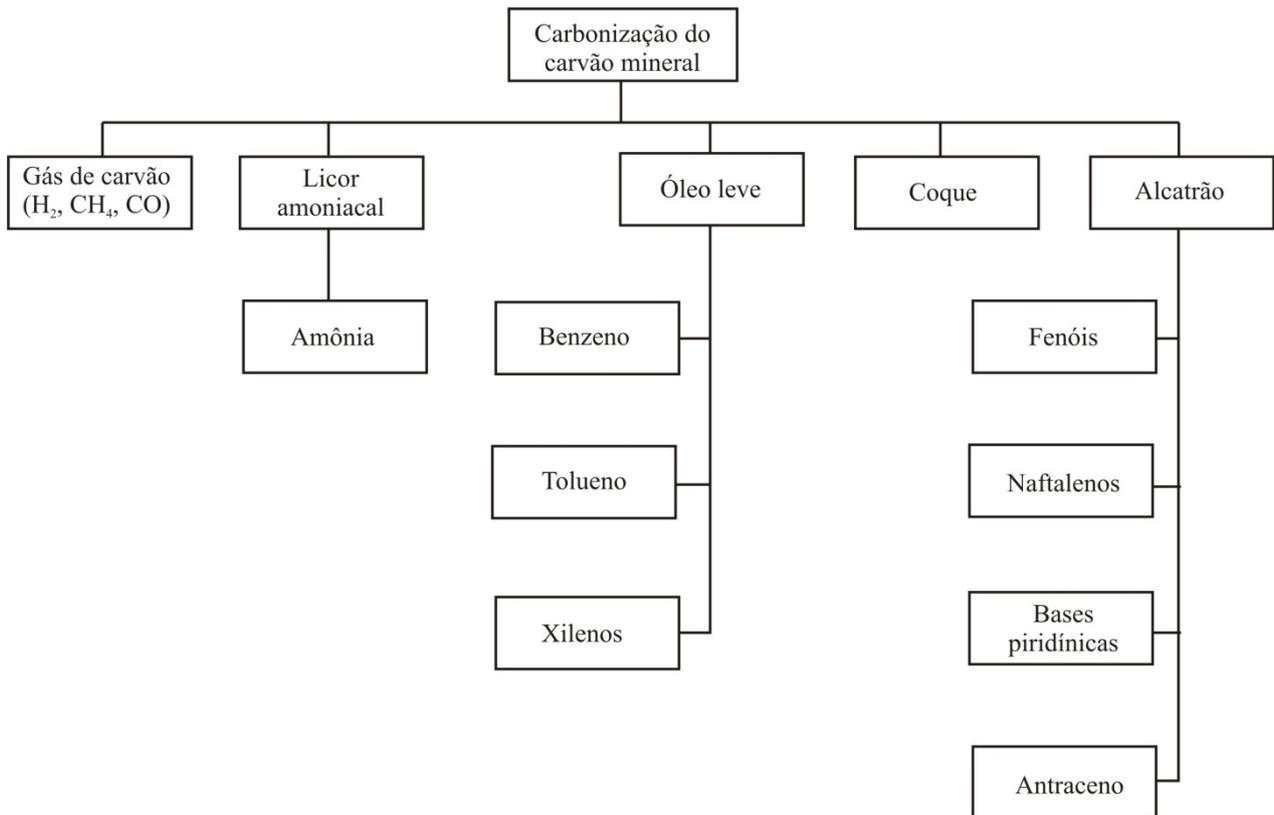


FIGURA 2.8 Produtos da Carbonização do Carvão Mineral

FONTE - Carvão Mineral Energia e Carboquímicos, 2008, lâmina 31

A produção aproximada de derivados por tonelada de carvão consta da TAB. 2.1.

TABELA 2.1.
Produtos da Carbonização

| Produto | Massa (kg/t carvão) |
|----------------------------------|------------------------|
| coque | 715,1 |
| moinha de coque | 46,5 |
| alcatrão | 39,0 |
| sulfato de amônio | 8,9 (2,4 kg de amônia) |
| óleo leve (removido por lavagem) | 8,9 |
| gás | 175,0 |

FONTE: Carvão Mineral Energia e Carboquímicos, 2008, lâmina 33

As características químicas dos carvões siderúrgicos e de seus derivados, coque e alcatrão, são bastante complexas e variáveis. Dada a importância desses materiais nas análises exérgicas e energéticas do processo siderúrgico, são objeto de uma discussão específica, apresentada no item 2.2.3.

2.2.2.2 Redução do minério em altos-fornos

O alto-forno é um equipamento desenvolvido para produção de ferro-gusa em estado líquido, a 1500°C, aproximadamente. Na produção de gusa ocorrem centenas de reações químicas e a temperatura no forno varia desde 150°C, na parte superior, até 2000°C, na zona de combustão.

O perfil térmico do alto-forno está esquematizado na FIG 2.9.

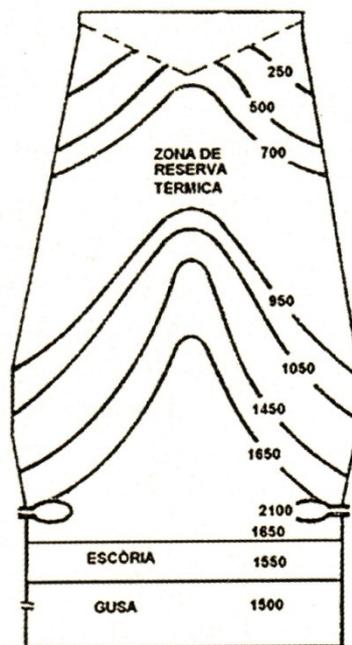


FIGURA 2.9- Perfil Térmico do Alto-Forno

FONTES - MOURÃO et al., 2007, p. 74

Para evitar desgaste prematuro, as paredes do forno são refrigeradas a água. Os sistemas mais usados são o de refrigeração por placas de cobre inseridas entre os tijolos refratários e o de aduelas (*staves*), que são peças fundidas de ferro ou cobre, instaladas entre a carcaça de aço e a carga do forno.

O ferro-gusa é produzido em estado líquido, a mais ou menos 1.500°C, e é constituído por uma liga de ferro (92 a 95%, aproximadamente), carbono (3,5 a 5,0%) e alguns elementos de liga como silício e manganês.

O preaquecimento do ar, injetado no alto-forno através das ventaneiras, é feito em trocadores de calor ou regeneradores. O combustível utilizado é, em geral, um gás misto composto por 85 a 95% de gás de alto-forno – GAF, e por gás de coqueria – GCO. Nos regeneradores, o ar proveniente dos

turbo-sopradores é aquecido a uma temperatura na faixa de 1000 a 1250°C. Normalmente os altos-fornos possuem conjuntos de três ou quatro regeneradores.

Ao sair do forno, o GAF arrasta partículas finas da carga, na taxa de 5 a 20 g/Nm³ de gás. O teor de partículas é reduzido, através de limpeza, para taxas inferiores a 0,01 g/Nm³. O sistema de limpeza é composto por coletor de pó, lavador tipo Venturi e desumidificador.

A operação de um alto-forno tem vários parâmetros monitorados, tais como temperaturas, pressões e vazões, além da realização de análises químicas e inspeção visual dos diferentes materiais e insumos do processo.

Um procedimento usual para a redução de custos da siderurgia é a injeção de finos de carvão nas ventaneiras do alto-forno, em substituição a parte da carga de coque. Essa injeção propicia também elevação de produtividade e maior estabilidade na qualidade do gusa. Além disto, muitos outros fatores afetam a produtividade dos fornos, como apresentado na FIG. 2.10.

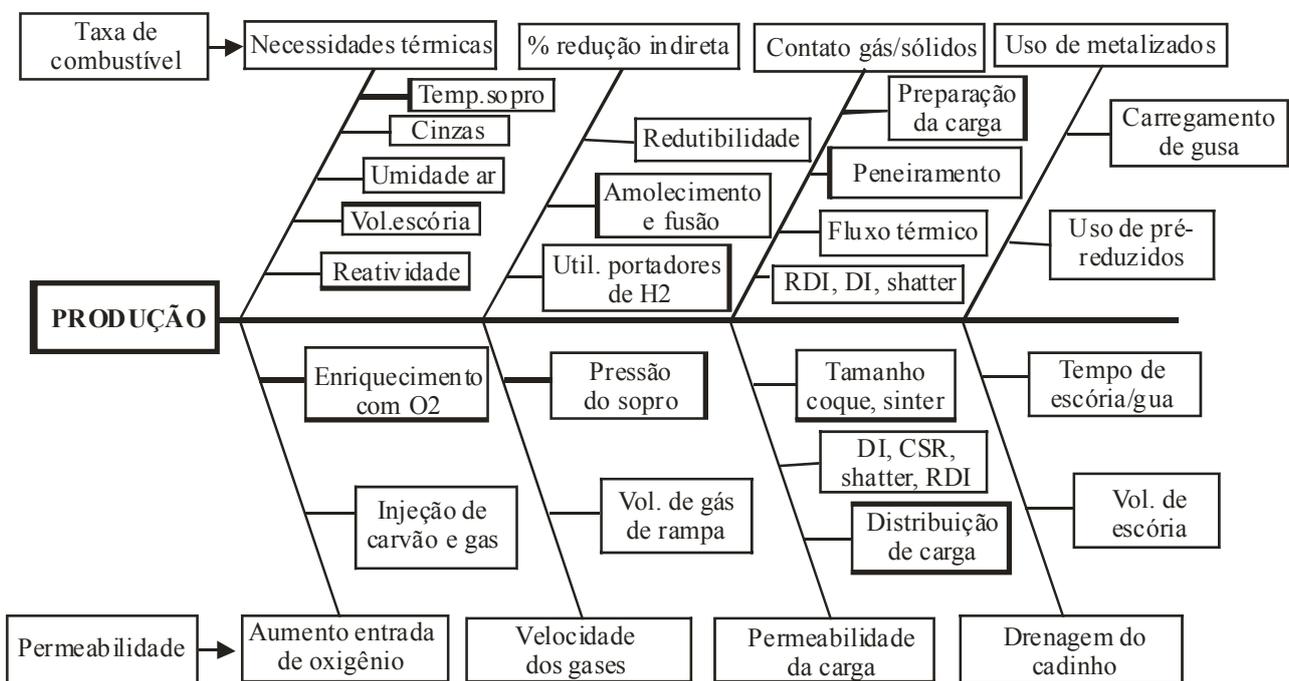


FIGURA 2.10 – Fatores que Afetam a Produtividade do Alto-Forno

FONTE - MOURÃO et al., 2007, p.100

2.2.2.3 Conversor a oxigênio: processo LD

Um dos equipamentos mais empregados na obtenção de aço a partir do ferro gusa é o conversor a oxigênio. O produto final, o aço, é uma liga que possui teor de carbono na faixa de 0,002% a 2,0%, além de outros elementos de liga.

O conversor LD foi responsável por cerca de 77% da produção de aço até 2005, pois pode produzir os mais variados tipos de aço a custos competitivos. No conversor é feito o refino do ferro. O gusa é uma liga impura, com quantidades excessivas de silício, fósforo, enxofre, carbono e manganês incorporadas. No refino, ocorrem reações de oxidação das impurezas, que são fixadas em materiais imiscíveis ao metal líquido, podendo, assim, ser removidas, e que constituem a escória da aciaria.

As principais matérias-primas usadas na fabricação de aço por esse processo são o gusa líquido, gusa sólido, sucatas de aço e ferro fundido, minério de ferro, cal, fluorita e oxigênio. Podem ser usados calcário e outros fundentes, carepa de laminação e sinter como refrigerantes, e minério de manganês.

A participação do gusa na carga depende de diversos fatores, como a qualidade desejada do aço, dimensões do equipamento e características do próprio gusa. Usualmente fica na faixa de 70% a 85%. Já o consumo de oxigênio varia com o tipo de equipamento. O consumo médio é da ordem de 50 Nm³/t de aço.

O aço passa ainda por um refino secundário, fora do equipamento de fabricação do aço bruto, em uma panela de aço revestida com refratários, também para a eliminação de substâncias indesejadas, como o fósforo. A agitação do aço na panela pode ser feita por borbulhamento de gás inerte, como o argônio, ou, mais raramente, por nitrogênio, ou por agitação devida a campo magnético.

2.2.2.4 Lingotamento

O lingotamento é o último estágio onde o metal é ainda trabalhado no estágio líquido.

O processo tradicional consiste em colocar o aço líquido em moldes individuais para resfriamento até completa solidificação. Os lingotes obtidos são aquecidos em fornos-poço para posterior laminação.

A partir das últimas décadas do século XX, esse processo vem sendo rapidamente substituído pelo lingotamento contínuo. A FIG. 2.11 compara os fluxos dos dois processos.

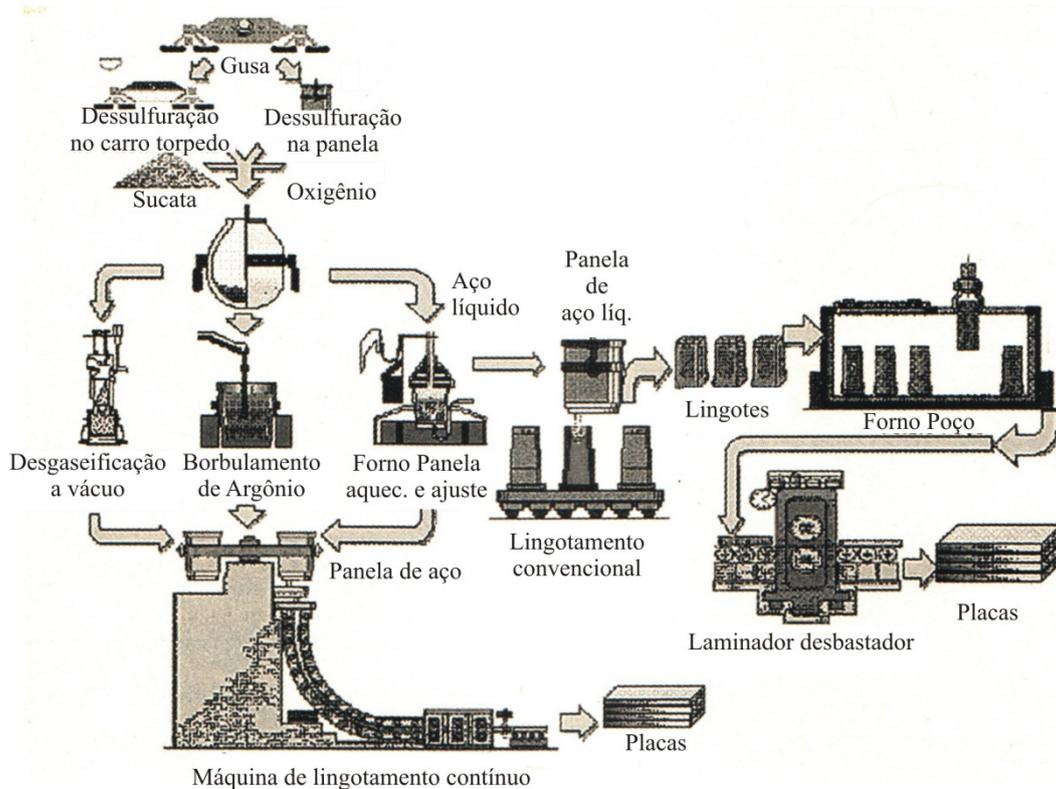


FIGURA 2.11 – Processos de Lingotamento

FONTE - MOURÃO et al., 2007, p.219

No lingotamento contínuo, o aço líquido é vazado em um molde de cobre refrigerado, aberto no topo e na base. O calor é extraído por circulação de água. Este resfriamento é chamado resfriamento primário ou indireto.

Abaixo dos moldes encontram-se bicos de spray que efetuam o resfriamento secundário ou direto. É comum a mistura de ar com a água nos vaporizadores para promover a atomização da água, tornando a troca de calor mais eficiente. O processo é chamado de “air-mist”.

2.2.2.5 Máquinas de corte e laminação

Ao entrar nas máquinas de corte, o veio de aço procedente do lingotamento contínuo se encontra completamente solidificado. É então fatiado em comprimentos pré-definidos, que variam conforme a aplicação final do produto. Comprimentos típicos vão de 2.200 mm a 12.000 mm.

Nas máquinas mais modernas, toda a operação de corte de placas, blocos e tarugos é controlada automaticamente.

Há algumas tecnologias em desenvolvimento, como a “thin-slab casting”, para obtenção de placas finas entre 40 mm e 70 mm de espessura, e a “strip-casting”, para a obtenção de chapas finas diretamente do aço líquido, com espessuras entre 2 e 3 mm e largas na faixa de 800 mm a 1.300 mm.

Na fundição convencional, os lingotes são conformados a quente em laminadores primários visando a produção de blocos, tarugos ou placas (MOREIRA, 2009). No processo de fundição contínua, blocos ou tarugos ou placas são obtidos diretamente das máquinas de lingotamento.

Na laminação, placas, blocos e tarugos são conformados mecanicamente para obtenção dos produtos de aço diversos: chapas finas, tubos, fios-máquina, perfis, placas e vergalhões. Anteriormente à conformação, o material é submetido a fornos de reaquecimento.

No lingotamento convencional (ARAÚJO, 1997), de 100 t de metal líquido são produzidas 84 t de placas. O restante é composto por 2 t de restos de panela e carepa, 14 t de pontas, oxidação e perdas na escarfação. Já no lingotamento contínuo, 100 t de aço produzem 97 t de placas. As 3 t restantes são constituídas por perdas de fundo de panelas, pontas e borras de escarfação.

Sob o enfoque energético (ARAÚJO, 1997), no lingotamento convencional 45% da energia do aço líquido são aproveitados. Os restantes 55% devem ser supridos por eletricidade, combustível ou vapor. Do total de energia fornecida, 79% são retirados no resfriamento, perdidos para o ambiente ou conduzidos através dos próprios equipamentos.

No lingotamento contínuo, 80% da energia necessária são fornecidos pelo próprio aço líquido. As perdas por resfriamento, vapor, ambiente, etc., são da ordem de 54%, menores que as do método convencional

2.2.2.6 Carboquímica

No processo de coqueificação do carvão mineral, há produção de Gás de Coqueria – GCO, normalmente usado como combustível na própria unidade industrial, e também de alcatrão, óleo leve e outras substâncias como a amônia.

Na carboquímica é feita a destilação do alcatrão para obtenção de diferentes produtos químicos.

O alcatrão contém mistura de compostos químicos, na sua maioria aromáticos, como mostrado na FIG.2.12. A quantidade de alcatrão varia de 30 a 80 l/t de carvão e o produto residual da destilação do alcatrão é o piche (mais de 60% do alcatrão bruto).

A destilação do alcatrão produz:

- óleos leves (até 199°C);
- óleos médios ou de creosoto (fração entre 200°C e 249°C). Contém naftaleno, fenol e cresóis.
- óleos pesados (fração entre 250°C e 299°C)
- óleo de antraceno (fração entre 300°C e 399°)

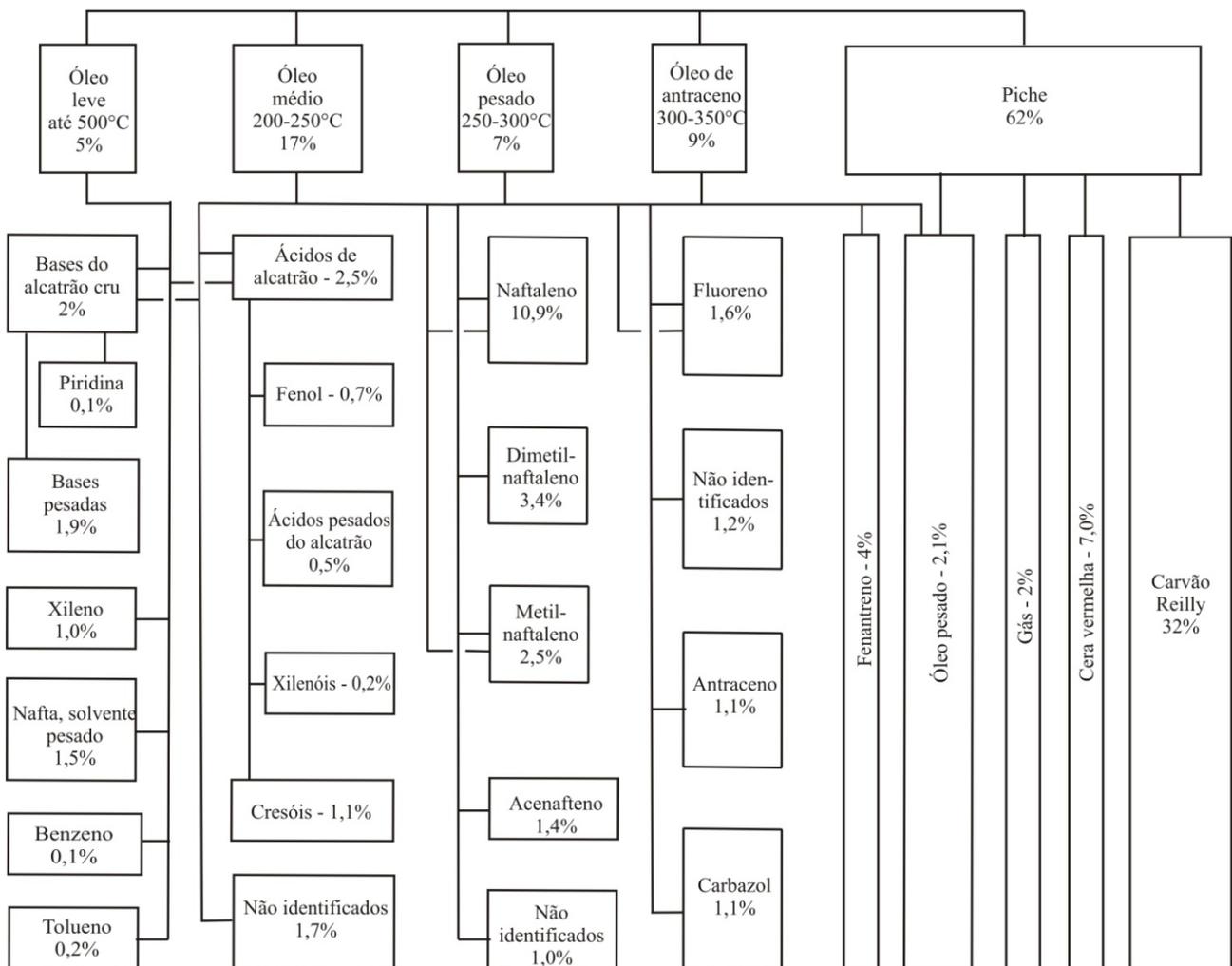


FIGURA 2.12 – Composição do Alcatrão

FONTE - Carvão Mineral Energia e Carboquímicos, 2008, lâmina 36

2.2.3 Matérias primas e outros insumos

As principais matérias primas para a produção de aço são o minério de ferro e o carvão mineral ou vegetal, sendo o coque metalúrgico produzido a partir do carvão mineral. São também necessários combustíveis, fundentes, sucatas, ferros-liga, desoxidantes, dessulfurantes e refratários, além de utilidades como água, gases e energia elétrica (MOURÃO et al., 2007).

2.2.3.1 Composição dos minérios de ferro

A composição elementar do minério depende de sua procedência. Normalmente a indústria utiliza mistura de diferentes minérios de diversas procedências.

Os minérios de ferro podem ser hematíticos (Fe_2O_3), magnetíticos (Fe_3O_4), ilmeníticos (FeTiO_3) ou limoníticos (óxido de ferro hidratado). Quanto maior o teor de ferro e menor o teor de ganga, melhor a qualidade do minério. Os minérios brasileiros são predominantemente hematíticos. Segundo PENIDO (2009), o minério típico apresenta teor de ferro de 65%, 28% de oxigênio e os restantes 7% são de impurezas.

Como exemplo de minério brasileiro, a TAB. 2.2 contém a composição do minério de ferro de uma das minas da empresa Vale em Carajás (SAMPAIO et al., 2002).

TABELA 2.2
Composição Química do Minério de Ferro da Mina de Carajás

| Elementos | Teores (%) | Compostos | Teores (%) |
|-----------|------------|-------------------------|------------|
| Fe | 66,32 | SiO_2 | 0,74 |
| P | 0,05 | Al_2O_3 | 1,06 |
| Mn | 0,37 | - | - |

FONTE : SAMPAIO et al., 2002, p.2

Sob o aspecto do consumo de energia, quanto menor a quantidade de ganga no minério e de cinzas no carvão, que são os principais responsáveis pela formação de escória, menor a necessidade de energia para o aquecimento desse material e, portanto, melhor o desempenho energético.

2.2.3.2 Composição do carvão mineral

A composição do carvão é muito complexa. Estritamente sob o ponto de vista químico, não há uma molécula de carvão. Através dos anos, foram identificados muitos subgrupos moleculares. Incluem benzeno, naftaleno e antraceno, assim como compostos de anéis maiores e cadeias de hidrocarbonetos. Essa mistura de subgrupos é interligada em uma variedade de modos quase infinita. Espalhados pela estrutura, há átomos de oxigênio, nitrogênio e enxofre (GIARDINO,1999).

A idade geológica do carvão brasileiro oscila entre 230 e 280 milhões de anos, era paleozóica – período carbonífero, que ainda pode ser dividido em duas classes: Mississippiana e Pensilvaniana. A TAB. 2.3 mostra a evolução das propriedades, desde os vegetais até o antracito, que possui os mais altos teores de carbono (CARBONÍFERA CATARINENSE, 2009). Pode ser notado que há uma faixa de teor de carbono característica de cada tipo. Por isto, nos cálculos em que é necessária a consideração da composição do combustível, deve ser adotada ou aquela específica do material estudado, se for disponível, ou os valores médios de materiais semelhantes.

Quanto maior o teor de carbono, maior também é o seu poder energético. Sendo assim, a turfa, que tem teores muito baixos e altas percentagens de umidade, nem sempre pode ser aproveitada como combustível. Já o linhito, bem mais compacto que a turfa, é empregado na siderurgia como redutor. A hulha tem como composição o carbono, restos vegetais parcialmente conservados, substâncias voláteis, detritos minerais e água. É empregada tanto como combustível quanto como redutor de óxidos de ferro e na síntese de substâncias de uso industrial. A última variedade de carvão, o antracito, caracteriza-se pelo alto teor de carbono fixo, baixo teor de compostos voláteis, cor negra brilhante, rigidez e dificuldade para queima, devido a sua pobreza de elementos voláteis. É matéria-prima para a fabricação de eletrodos, de grafite e também é usado como redutor na metalurgia.

TABELA 2.3
Tipos de Carvão Mineral

| Tipo | Composição | | |
|-----------|-----------------------|-----------------------|-------------|
| | O ₂ (%) | H ₂ (%) | C (%) |
| celulose | 49,4 | 6,2 | 44,4 |
| turfa | 40,0 | 6,0 | 54,0 a 60,0 |
| linhito | 25,0 | 5,0 | 65,0 a 75,0 |
| hulha | 15,0 | 4,5 | 75,0 a 85,0 |
| antracito | 3,0 | 2,0 | 95,0 |

FONTE: Carbonífera Catarinense Ltda., 2009

Os carvões usados nas siderúrgicas integradas são fornecidos por diversos produtores mundiais, com maior presença dos países do hemisfério norte, onde se concentram em torno de 90% das reservas mundiais. No Brasil, há produção de carvão mineral no Sul do país. No entanto, seu uso é bastante limitado, principalmente devido aos elevados teores de enxofre. Entre os maiores fornecedores mundiais de carvão metalúrgico estão a Austrália, o Canadá, os Estados Unidos e a Inglaterra.

A caracterização do carvão, sob o aspecto químico, é feita através das análises imediata e elementar.

A análise imediata, como definido pela American Society for Testing and Materials – ASTM (2008), é a determinação, através dos métodos pré-definidos, da umidade, material volátil, carbono fixo (por diferença) e cinza. A importância desta análise está relacionada com a classificação dos carvões, caracterização do combustível para aplicação industrial, bem como para efeitos comparativos entre alternativas energéticas (MCT et al., 2008).

O teor de umidade é também identificado. Segundo as normas brasileiras, metodologia ABNT - NBR 8293, devem ser considerados:

- Umidade superficial: água agregada à superfície externa do carvão, decorrente de manuseio e/ou agentes externos;
- Umidade residual ou inerente: água retida nos poros ou capilares do carvão;
- Umidade total: somatório da umidade superficial e residual ou inerente;
- Umidade de análise ou de higroscopia: água absorvida pelo carvão durante sua manipulação para análise.

A matéria volátil existente no carvão mineral é resultado das combinações de carbono, hidrogênio e outros gases. Sua determinação, no Brasil, é feita de acordo com a norma ABNT - NBR 8290.

A análise elementar do carvão e do coque, ainda por definição da ASTM (RILEY, 2007), consiste na determinação do carbono e do hidrogênio presentes no material, como encontrados nos produtos gasosos da sua combustão completa, na determinação do enxofre, do nitrogênio e da cinza e na estimativa do oxigênio, por diferença. Os elementos avaliados na análise elementar são aqueles que podem sofrer gaseificação e liberar ou absorver calor durante as etapas das reações de combustão.

O carbono, principal responsável pelo processo de combustão, está presente no carvão mineral tanto na matéria carbonosa, quanto nos minerais carbonatados das cinzas. A quantidade total de carbono é resultante do somatório entre os teores de carbono fixo e de carbono presente nas matérias voláteis.

a) Carvões americanos

GIARDINO (1999) apresentou composições características de carvões americanos e canadenses de diversas procedências. Foram incluídos dados do Alabama, Alaska, Arkansas, British Columbia, Colorado, Illinois, Indiana, Iowa, Kansas, Kentucky, Maryland, Montana, New México, Ohio, Oklahoma, Pennsylvania, Rhode Island, Texas, Virginia, Washington, West Virginia e Wyoming.

As faixas de variação dos teores dos componentes das análises elementares estão apresentadas na TAB. 2.4.

TABELA 2.4
Composição Elementar de Carvões Americanos

| Componente | Teor (%) |
|-------------------|-----------------|
| hidrogênio | 3,28 – 5,90 |
| carbono | 54,70 – 85,40 |
| nitrogênio | 0,80 – 1,90 |
| oxigênio | 3,40 – 26,64 |
| enxofre | 0,30 – 6,20 |

FONTE : GIARDINO, 1999, Appendix II

Embora a dispersão seja bastante grande, fica naturalmente muito menor quando são comparados carvões de mesma procedência. Esta constatação é importante na realização dos balanços energéticos e exergéticos na siderurgia, pois é o carvão a principal fonte energética da indústria.

Por exemplo, nos carvões de dois dos maiores estados fornecedores americanos, Pensilvânia e Virginia, os teores de carbono variam, respectivamente, entre 70,3 e 81,72%, com uma só exceção nos dados consultados, e entre 73,70 e 84,00%.

b) Carvões australianos

Entre os principais fornecedores australianos de carvão, está a CENTENNIAL COAL COMPANY LIMITED (2008). As composições dos carvões da empresa são apresentadas na TAB. 2.5, para suas diversas minas. Foram também descritas por MACARTHUR COAL LIMITED (2008).

TABELA 2.5
Composição Elementar de Carvões Australianos

| Carvão | Componente (%) | | | | | total |
|---------------------------------|----------------|------|------|------|------|--------|
| | C | H | N | S | O | |
| Centenial Port Kembla Thermal | 84,40 | 5,40 | 1,80 | 0,69 | 7,71 | 100,00 |
| Newstan - semi soft coking coal | 83,10 | 5,50 | 2,10 | 0,60 | 8,70 | 100,00 |
| Tahmoor coking coal | 87,50 | 5,20 | 1,80 | 0,40 | 5,10 | 100,00 |
| Newstan Semi Soft Coking Coal | 83,10 | 5,50 | 2,10 | 0,60 | 8,70 | 100,00 |
| Clarence Mine | 84,3 | 5,00 | 1,70 | 0,40 | 8,60 | |
| Charbon Mine | 84,4 | 5,4 | 1,80 | 0,69 | 7,71 | |
| Centenial Lithgow seam | 84,40 | 5,40 | 1,80 | 0,69 | 7,71 | 100,00 |
| Tahmoor Coking | 87,50 | 5,20 | 1,80 | 0,40 | 5,10 | 100,00 |
| Coppabella | 90,50 | 4,12 | 1,64 | 0,55 | 3,20 | 100,01 |

FONTE: Centennial Coal Company Limited, 2008 – Macarthur Coal Limited, 2008

Os fornecedores também informam a análise imediata, o poder calorífico e a composição das cinzas dos carvões de suas minas. É interessante notar que há boa uniformidade entre os teores dos componentes dos diversos carvões.

c) Carvões canadenses

A empresa canadense, COMPLIANCE COAL CORPORATION (2008) informa as características do carvão típico de British Columbia, no Canadá. A empresa opera a Mina Basin Coal, localizada próxima a Princeton, BC. Trata-se de um carvão alto volátil.

A análise elementar apresenta: 62,6% de carvão; 4,8% de hidrogênio; 1,3% de nitrogênio; 13,6% de oxigênio e 0,5% de enxofre.

A análise imediata mostra que a umidade é de 10%; as cinzas 12% e o material volátil 31%. Em geral, tanto os carvões americanos quanto os australianos apresentam teores de carvão mais elevados.

2.2.3.3 Composição do coque de petróleo

A PETROENERGIA (2008) define o coque de petróleo ou petrocoque, como o produto sólido resultante da destilação do petróleo, obtido a partir do craqueamento das frações residuais pesadas. É material sólido e com granulometria inferior a 75 mm. O produto pode ser utilizado diretamente

como combustível ou ser calcinado para ser utilizado como matéria prima em outras aplicações industriais, como a indústria de eletrodos.

Os petrocoques são diferenciados geralmente em função do processo de produção, quais sejam:

- a) Processo Retardado (*Delayed Process*): Os óleos residuais do refino do petróleo são processados a alta pressão e temperatura. O produto resultante, chamado *coque verde de petróleo (green delayed coke)*, é extraído através de jatos de água a altíssima pressão que o tornam granulado e muito poroso. É utilizado como combustível sólido e, em alguns processos, como agente redutor.
- b) Processo Fluido (*Fluid Process*): Processo que produz partículas esféricas de coque, com menos de 1,0 cm de diâmetro, extremamente duras, chamadas de *coque fluido (fluid coke)*. A produção ocorre por circulação contínua em leito fluidizado a alta temperatura e baixa pressão. As partículas possuem menor teor de voláteis e menos hidrocarbonetos do que o coque verde, porém mais do que o coque calcinado.
- c) Processo Flex (*Flex Process*): É um processo que converte a maior parte do coque em um gás combustível de baixo poder calorífico para uso na própria refinaria. O produto sólido restante é chamado de *flexi-coque (flex coke)* e tem tamanho menor que o coque fluido, porém libera mais poeira devido ao seu menor conteúdo de hidrocarbonetos residuais.

As propriedades do coque de petróleo variam com sua origem. Na TAB. 2.6 são apresentadas as características do produto ofertado no mercado pela Petroenergia.

TABELA 2.6
Composição do Coque Verde de Petróleo

| Tipo de análise | Componente | Participação (%) |
|-----------------|------------------|------------------|
| imediate | umidade | 8,0 a 10,0 |
| | material volátil | 10,0 a 13,0 |
| | teor de cinzas | 0,3 a 0,7 |
| elementar | carbono total | 81,0 a 89,0 |
| | hidrogênio | 3,6 |
| | nitrogênio | 1,77 |
| | enxofre | < 5,5 |
| | cloretos | < 0,0001 |
| | oxigênio | 1,6 |

FONTE: PETROENERGIA, 2008

Segundo a empresa, o Poder Calorífico Inferior – PCI do produto varia entre 31.770 kJ/kg e 34.700 kJ/kg e a densidade a granel entre 850 kg/m³ e 1.000 kg/m³.

2.2.3.4 Água utilizada no processo

NEUMANN (2009) registra que a água, um importante recurso natural do planeta, é fundamental nos processos siderúrgicos. Desde o início da revolução industrial, a demanda por água tem crescido continuamente.

No passado, não havendo prioridade de proteção ambiental, era comum a indústria utilizar a água de refrigeração em circuitos abertos e descartá-la sem tratamento nos corpos d'água. Atualmente, os projetos industriais são feitos de forma a maximizar o reaproveitamento de água e minimizar o volume de água de reposição.

A água é usada, principalmente, para refrigeração de equipamentos e produtos. No Brasil 16 milhões de metros cúbicos de água circulam nas usinas siderúrgicas (IBS, 2009). Segundo RIBEIRO et al. (2005), o uso específico médio de água gira em torno de 200 m³ por tonelada de aço produzido no Brasil. Atualmente, a taxa de reaproveitamento está em torno de 94%, o que corresponde a 15 milhões de m³ por dia de água de reposição e a 14 m³ por tonelada de aço produzida.

Uma importante meta do setor é eliminar a descarga de efluentes líquidos em rios ou lagos. Em 2007, a vazão total de efluentes líquidos foi de 326 milhões de m³, aproximadamente. Entre as medidas para reduzir a disposição de águas contaminadas, a indústria está tentando melhorar a tecnologia de tratamento de efluentes. CIMINELLI (2005) escreveu sobre o impacto no uso da água pelo setor minero-metalúrgico, indicando que são necessários mais investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

A água é usada nos seguintes processos:

- Refrigeração direta e indireta. No primeiro caso, há incorporação de sólidos e óleos; no segundo, há perdas devidas à evaporação.
- Lavagem de gases, normalmente empregando um lavador Venturi. É freqüente a presença de sólidos, cianetos, amônia e fenóis. Na fabricação de aço, a lavagem visa remover material particulado.
- Tratamento de superfície: há geração de águas ácidas.
- Refrigeração de coque: há evaporação e incorporação de sólidos.
- Granulação de escória: são gerados efluentes com fenóis.

O volume total de água utilizado pelas plantas varia com as características do processo e com a localização da unidade industrial. Algumas ficam próximas do litoral, possibilitando o uso de água do mar. A TAB. 2.7 mostra o consumo de água apresentado por sete siderúrgicas brasileiras (ABM, 2007). As unidades 2 e 3 estão localizadas na costa e usam tanto água do mar quanto água doce.

TABELA 2.7
Consumo de Água nas Principais Usinas Siderúrgicas Brasileiras

| Unidade industrial | Valores Específicos (m ³ /t de aço) | | | | |
|-----------------------|---|------|------|------|------|
| | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 |
| 1 – água total | 19,0 | 17,0 | 15,0 | 17,0 | 17,0 |
| 2 – água de reposição | 3,6 | 3,6 | 3,6 | 3,9 | 3,8 |
| 3 – água total | 39,7 | 39,1 | 36,4 | 37,2 | 37,5 |
| 3 – água de reposição | 5,7 | 5,4 | 4,8 | 4,8 | 5,0 |
| 4 – água total | 51,0 | 42,0 | 36,0 | 42,0 | 50,0 |
| 5 – água total | 13,7 | 13,5 | 11,4 | 11,5 | 11,0 |
| 6 – água total | 2,5 | 2,7 | 2,3 | 1,9 | 2,0 |
| 7 – água total | 3,6 | 3,1 | 1,8 | 2,0 | 2,0 |

FONTE: ABM, 2007

Durante esta década, a taxa de recirculação de água nas principais usinas brasileiras apresentou tendência crescente, chegando a atingir, em uma delas, valor de 99%, como apresentado na TAB.2.8.

Em todo o mundo, produtores de aço estão envolvidos em programas de conservação de água, alguns com bastante sucesso.

TABELA 2.8
Taxas de Recirculação de Água

| Unidade Industrial | Taxa de Recirculação (%) | | | | |
|--------------------|-----------------------------|------|------|------|------|
| | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 |
| 1 | 95,0 | 95,0 | 96,0 | 95,0 | 95,0 |
| 2 | 96,6 | 96,8 | 97,4 | 96,7 | 97,2 |
| 3 | 95,8 | 95,7 | 96,2 | 96,4 | 96,2 |
| 4 | 83,0 | 84,9 | 86,4 | 85,3 | 87,9 |
| 5 | 92,0 | 93,0 | 93,7 | 94,1 | 94,3 |
| 6 | 97,3 | 97,1 | 97,6 | 97,9 | 97,7 |
| 7 | 98,4 | 98,8 | 99,0 | 98,9 | 98,9 |

FONTE: ABM, 2007

De acordo com o U.S.DEPARTMENT OF ENERGY (2004), a Weirton Steel Corporation começou um amplo programa de avaliação do uso de energia em sua unidade de Weirton, West Virginia, no outono de 2001 e continuou os estudos em 2002. Com base nos resultados, a companhia encontrou

forte justificativa econômica para seis projetos que reduziriam o uso de combustíveis fósseis, energia elétrica e água.

As linhas de recozimento contínuo possuem lavadores e secadores que consomem grandes quantidades de água quente e ar aquecido com vapor, respectivamente. Quatro dos seis projetos continham alternativas para conservação desses recursos. A economia anual de água era de 540.000 m³. Todos os projetos se aplicam a outras usinas siderúrgicas. A TAB. 2.9 lista os projetos e suas respectivas economias primárias tanto de energia quanto de utilidades, como a água. São também explicitados o custo do projeto, a economia estimada e o tempo de retorno simples em meses.

TABELA 2.9
Projetos da Weirton Steel Corporation

| Projeto | Fonte Primária Conservada | Custo do Projeto (US\$) | Economia Anual (US\$) | Tempo de Retorno (meses) |
|---|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Reciclagem de água de lavagem final e água de enxágüe | energia térmica/água | 225.000 | 780.000 | 3 |
| Redução do fluxo do secador de chapas, melhoria da instrumentação | energia térmica /eletricidade | 58.000 | 55.000 | 13 |
| Uso dos gases de chaminé de fornos para secagem das chapas | energia térmica | 130.000 | 120.000 | 13 |
| Uso do ar lento do recozimento para secagem das chapas | energia térmica | 190.000 | 120.000 | 18 |
| Reparação e ajustamento do forno de recozimento | energia térmica | 260.000 | 180.000 | 17 |
| Modificação do sistema de conforto na planta de estanho | energia térmica /vapor | 81.000 | 100.000 | 10 |

FONTE: U.S.DEPARTMENT OF ENERGY, 2004, p.3

Com relação à conservação de água, o projeto mais importante é o de reciclagem das águas de lavagem final e de enxágüe. Os lavadores de chapas finas da entrada dos fornos de recozimento usam grandes quantidades de água fluvial filtrada, que deve ser aquecida a 82°C. A seção posterior, consistindo de um dos lavadores e enxágüe final, perde todo o spray de água para um dreno. O projeto recomenda a instalação de um novo sistema para capturar e reciclar a água na linha de lavagem. O sistema deve incluir uma bomba de baixa pressão, um hidro-ciclone para limpar a água, uma bomba de alta pressão e um soprador-aquecedor.

Port Kembla Steelworks (HIRD, 2006) é uma planta integrada, com capacidade produtiva de 5,1 milhões de toneladas por ano, que se situa no quartil superior dos produtores mundiais de mais baixo custo. Em 1992, usava 55 milhões de litros de água por dia, com um indicador de desempenho de 5,5 m³ por tonelada de placa. No fim de 2004, através de uma série de melhorias e esquemas de reciclagem, o consumo de água havia sido reduzido e a eficiência havia dobrado, com

um consumo de água de 36 milhões de litros por dia e um indicador de 2,6 m³ por tonelada de placa. Um esquema de reciclagem de efluentes líquidos foi responsável pelas maiores reduções no uso de água. Em junho de 2005, a demanda havia sido reduzida em outros 20.000 litros por dia.

Uma das plantas da empresa, a Blue Scope Steel, possui dois sistemas de suprimento de água completamente independentes. Um deles é constituído por água doméstica, destinada ao consumo humano e para banhos, sanitários, etc. O segundo é de água industrial, usada em três áreas principais:

- remoção de calor, resfriamento do coque, resfriamento de metal e torres de refrigeração;
- limpeza e enxágüe de chapas e geração de vapor para fins de aquecimento;
- preservação ambiental (supressão de pó; lavagem de ruas; lavagem de caminhões).

O uso principal da água industrial ocorre nas torres de resfriamento, 41%, entretanto, o maior ponto de demanda por refrigeração é a turbina, que, no caso, demanda 850.000 m³/dia de água do mar em circuito aberto. Os demais 59% são distribuídos entre supressão de pó, 12%, uso no processo, 29%, geração de vapor, 9%, e outros usos, 9%.

Como exemplo de circuito de recirculação, pode ser citado o aumento de reutilização interdepartamental da água, tal como uso de descarte de água de uma unidade em outra:

- uso da água de apagamento da laminação de placas na laminação de chapas;
- uso da água da laminação de chapas na aciaria;
- uso do efluente da planta de tratamento de água de unidade de estanho na granulação de escória;
- implantação de sistemas de coleta da água usada para extinção de coque para reutilização na própria coqueria;
- implantação de sistema de tratamento e reutilização de esgotos domésticos;
- reutilização do efluente da osmose reversa pela empresa encarregada da destinação da escória.

Finalmente, como mais um exemplo de conservação de água, pode ser citado o caso da empresa indiana, Bhilai Steel Plant, apresentado por TAMBE (1990).

Como um primeiro passo para a preparação da estratégia de gerenciamento da água na empresa, foi feito um inventário para identificar as áreas da planta onde a reutilização e a reciclagem poderiam ser realizadas e foi auditado o uso da água para verificar as áreas onde o consumo de água poderia ser reduzido. Em consequência, alguns drenos de água pluvial foram interceptados e enviados para bombeamento e reciclagem. Do mesmo modo, a lama das cinzas da unidade de potência foi enviada

para um poço para deposição de sólidos e reciclagem da água clarificada. Aproximadamente 1.000 m³/h passaram a ser reutilizados na laminação. Foram, também, identificados e eliminados vazamentos devidos à falta de manutenção adequada em tanques e canais. Adicionalmente à reciclagem de efluentes de saídas selecionadas, as infiltrações no reservatório foram interceptadas e direcionadas para reciclagem e as descargas de água da laminação de placa, anteriormente enviadas para uma área alagada no subsolo, passaram a ser usadas como água de reposição do sistema de bombeamento.

Foram realizadas ainda outras ações para reduzir o consumo de água, incluindo: a interrupção no suprimento para as plantas que estivessem paralisadas por qualquer razão, eliminação de alagamentos nas bombas do sistema de bombeamento e das torres de resfriamento, melhorias na manutenção e eliminação de perdas nas linhas de água industrial, isolamento de linhas danificadas para paralisar as perdas e redução do uso da água com jardinagem.

Os esforços para conservação de água em empresas tais como Bhilai Steel mostram claramente que existem oportunidades significativas para a conservação de grandes quantidades de água, no caso 14.000 m³/h, usando métodos relativamente simples, tais como melhor manutenção, reutilização de água de processos e recirculação. Entretanto, é também importante que, concomitantemente, seja explorada a redução de água através de modificações tecnológicas. Tal estratégia, no longo prazo, poderá reduzir os custos operacionais relativamente altos de sistemas baseados em recirculação.

Devido à implementação da estratégia de conservação de água, o consumo de água de reposição foi reduzido de 16,74 m³/h para 3,00 m³/h. O custo das mudanças incluiu aquisição e operação de bombas, interconexão de tubos e limpeza. O consumo de água industrial por tonelada de aço produzida foi reduzido de 52,2 m³ para 9,3 m³.

NEUMANN (2009) lembra que os parâmetros a serem considerados para assegurar processos otimizados incluem o tipo e combinação de sistema de refrigeração (aberto com contato, aberto sem contato ou fechado), a temperatura ideal de resfriamento e a pressão da água, para cada unidade da planta, e a qualidade e quantidade necessária de água, ou seja, concentrações permitidas de sólidos dissolvidos. Além disso, a seleção correta dos equipamentos e do material da tubulação, sistemas de automação e instrumentação integrada dentro de um *layout* geral é a base para operações do processo eficientes e confiáveis no longo prazo.

O ponto de início para cada sistema de tratamento de água é uma análise da qualidade e disponibilidade da água suprida, considerando as possíveis restrições legais, assim como as condições climáticas. Esta é a base para definir os passos de tratamento necessários e uma estratégia de refrigeração eficiente. A meta é otimizar a qualidade da água para os vários usos identificados tais como água potável, água de serviço e aplicações para resfriamento. Para sistemas de água autárquicos, todas as fontes possíveis devem ser consideradas para uso, incluindo água de chuva, esgotos e efluentes tratados. É somente com a utilização de fontes alternativas que as siderúrgicas podem operar sem qualquer água de reposição externa adicional. Certamente, os custos de investimento e os operacionais são ainda altos comparados com o consumo de água convencional, mas a tecnologia já é disponível para a conservação de água.

Há várias fontes de produção de efluentes líquidos na siderurgia, como esgoto, evaporações e efluentes líquidos industriais. Estes últimos compreendem a água de purga dos circuitos abertos, concentrados de plantas de osmose reversa e efluentes das plantas de dessalinização e abrandamento, assim como água das plantas de evaporação. É gerada lama no refluxo dos filtros de saibro e nos clarificadores e espessadores de várias etapas do processo. A lama é secada para facilitar seu manuseio. Tratamentos apropriados da água descartada e da lama dependem de regulamentação, de oportunidades de reciclagem e de possibilidades de disposição final.

2.2.3.5 Outros insumos para os processos

Como já citado no item 2.2.2.1, o processo de produção de aço requer, além do minério de ferro e do carvão, combustíveis líquidos ou gasosos, fundentes e outros aditivos. São também necessários gases industriais e energia elétrica.

As usinas modernas no Brasil produzem uma parcela substancial de sua demanda por energia elétrica. A geração é feita em centrais termoelétricas e através da instalação de Turbinas de Topo – TRT nos altos-fornos. Nas centrais, são normalmente utilizados derivados de petróleo líquidos e gasosos, bem como gases siderúrgicos produzidos internamente.

Os fundentes são adicionados à carga para que ocorra a formação de escória, tanto na etapa de fusão/redução quanto na elaboração do aço. Normalmente são carbonatos, fluoretos ou cloretos. A cal é empregada nas cargas do alto-forno e da aciaria. O calcário é também adicionado ao sinter.

Para a produção de aço de alta pureza, as impurezas das gangas do minério, das cinzas dos combustíveis e dos redutores sólidos devem ser eliminadas. Essas impurezas compõem a escória do alto-forno ou são eliminadas no refino do aço.

Na produção de aço, são adicionados até 20% de sucata, que atuam no controle da temperatura final produto. São utilizados também desoxidantes para eliminação do oxigênio dissolvido no metal; os óxidos estáveis formados são eliminados com a escória. Finalmente, são acrescentados dessulfurantes, como Ca, Mg, Terras Raras, CaO e MgO, e elementos de ligas como Fe-Mn, Fe-V, Fe-Cr, Fe-Mb, Fe-Nb e Fe-Ni.

Em relação à composição química das matérias-primas, quanto mais puras forem, menos energia será necessária. Será também gerada menor quantidade de escória e serão necessários menos corretivos e adições. O processo será, portanto, mais eficiente.

Como insumos de referência para a aciaria, FIGUEIRA (2009) apresenta, além de 750 kg de gusa por tonelada de aço, o uso dos materiais relacionados na TAB.2.10.

No refino secundário, a adição de elementos químicos ao aço líquido é feita por ferros-liga. Os principais ferros-liga usados no refino secundário são apresentados na TAB. 2.11.

TABELA 2.10
Composição de Insumos para Aciaria LD

| Insumos para a Aciaria LD | kg/ t de aço | Composição (%) | |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|
| | | líquidos/sólidos | |
| sucata | 340 | C | 0,05 |
| | | Si | 0,03 |
| | | Mn | 0,05 |
| | | P | 0,03 |
| | | S | 0,009 |
| cal | 80 | | |
| gases | Nm³/t de aço | | |
| oxigênio | 56 | | |
| gás inerte – argônio e nitrogênio | 1,6 | | |

FONTE: FIGUEIRA, 2009, lâmina 5

TABELA 2.11
Ferros-Liga Usados no Refino Secundário do Aço

| Liga | Participação Percentual do Componente | | | | | | | |
|------------------|---------------------------------------|------|------|-------|-------|------|----------------|---------|
| | C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Outros |
| FeMn AC | 6,5 | 73,0 | 0,6 | 0,22 | 0,08 | 1,5 | 0,8 | |
| FeMn BC | 1,3 | 80,7 | 0,6 | 0,03 | 0,04 | | | |
| FeCr AC | 7,4 | | 3,3 | 0,03 | 0,007 | 55,6 | | |
| FeCr BC | 0,05 | | 0,5 | 0,02 | 0,002 | 54,3 | | |
| FeSi 75 | 0,05 | | 72,2 | 0,03 | 0,002 | | | Al=0,13 |
| FeSiMn | 1,7 | 63,0 | 15,4 | 0,12 | 0,01 | | | |
| FeP | | | 0,2 | 20,40 | 0,20 | | | |
| FeB | | | | | | | | B=14,7 |
| FeV | 0,1 | | 0,8 | 0,01 | 0,026 | | | V=53,0 |
| FeW | | | | | | | | W=32,5 |
| S | | | | | 96,00 | | | |
| Al | | | | | | | | Al=98,6 |
| CaSi | 0,2 | | 51,2 | | | | | Ca=31,1 |
| SiC | 30,0 | | 64,0 | | | | | |
| coque | 98,0 | | | | 0,81 | | | |
| grafite | 97,5 | | | | | | | |
| FeNb | 0,1 | | 1,6 | 0,03 | | | | Nb=66,2 |
| MoO ₃ | | | 1,1 | 0,05 | | | | Mo=62,0 |
| FeTi | | | 1,5 | 0,03 | 0,025 | | | Ti=37,5 |
| Cu | | | | | | | | Cu=99,9 |
| Mn | | 99,0 | | | 0,002 | | | |
| Si | 0,10 | | 98,0 | | | | | |
| FeS | | | | | 30,00 | | | |
| FeMo | | | 0,7 | 0,05 | 0,015 | | | Mo=59,0 |
| FeNi | 0,08 | | | | | | 18,0 a 50,0 | |
| Ni | | | | | 0,005 | | 99,5 | |

FONTE: MOURÃO, 2007, p.197

2.2.4 Produtos e subprodutos

O processo de produção de aço é constituído por diversas etapas em seqüência, sendo que, em cada uma, são gerados produtos intermediários, que ou são insumos para a etapa subsequente ou efluentes líquidos, gasosos e resíduos sólidos. Os efluentes e resíduos são parcialmente reaproveitados, sendo o excedente descartado. As características dos produtos e subprodutos são apresentadas a seguir.

2.2.4.1 Coque de carvão mineral e alcatrão

Na preparação da matéria prima, o carvão mineral é coqueificado para posterior uso no alto-forno. Como as características químicas dos carvões são bastante variáveis, também o coque possui composição variável. Na mesma etapa, é produzido alcatrão que, pelo mesmo motivo, apresenta variação na sua composição química.

SZARGUT et al. (1998) fornecem a composição típica para o coque de carvão mineral apresentada na TAB.2.12.

TABELA 2.12
Composição Típica do Coque Metalúrgico

| C (%) | H2 (%) | N2+S (%) | O2 (%) |
|-------|--------|----------|--------|
| 95 | 1 | 2 | 2 |

FONTE: SZARGUT et al., 1988, p.111

MATTHESIUS et al. (1987) analisaram 5 amostras da área de Umgala, ao norte de Natal na África do Sul, para carvões de duas jazidas diferentes, mas da mesma era geológica. As composições obtidas constam da TAB. 2.13.

TABELA 2.13
Composição de Coque e Alcatrão da África do Sul

| Material | C (%) | H2 (%) | O2 (%) | N2 (%) | S (%) |
|----------|-------|--------|--------|--------|-------|
| coque | 96,32 | 0,59 | 0,36 | 1,29 | 1,44 |
| alcatrão | 83,42 | 6,79 | 6,52 | 1,97 | 1,30 |

FONTE: MATTHESIUS et a., 1987, p.160

Estudo da agência americana de proteção ambiental USEPA (2008) reúne informações sobre a composição e as características de combustíveis tradicionais usados em combustão estacionária e de seus sub-produtos, dentre os quais, o coque de petróleo, o coque betuminoso, o alcatrão e o gás de alto-forno. Para o coque do carvão betuminoso, foram apresentadas características incluídas na TAB.2.14.

TABELA 2.14
Características do Coque de Carvão Betuminoso

| Componente | Participação (%) |
|--------------------------|------------------|
| Análise imediata | |
| umidade | 0,4 a 0,5 |
| material volátil | 0,6 a 1,4 |
| teor de cinzas | 7,5 a 11,0 |
| Análise elementar | |
| carbono total | 87,0 a 88,0 |
| hidrogênio | 0,5 a 1,0 |
| nitrogênio | 1,1 a 1,5 |
| enxofre | 0,6 a 1,1 |
| oxigênio | 0,1 a 0,2 |
| Poder Calorífico (kJ/kg) | 30.700 |

FONTE: USEPA, 2008, p.6

As composições de dois tipos de alcatrão analisados pela agência constam da TAB. 2.15

TABELA 2.15
Características do Alcatrão

| Componente tipo de alcatrão (*) | Participação (%) | |
|------------------------------------|------------------|-----------------|
| | CTF 50 | CTF 400 |
| teor de cinzas | <0,1 | 0,15 |
| carbono total | 87 | 90,1 |
| hidrogênio | 7,9 | 5,4 |
| nitrogênio | 3,6 | 2,4 |
| enxofre | 0,2 | 0,7 |
| oxigênio | 0,9 | 1,4 |
| Poder Calorífico (kJ/kg) | 38.400 a 40.700 | 36.750 a 37.900 |

(*) Perry, R.H., Green, D.W., Mahoney, J.O., "Perry's Chemical Engineers' Handbook, 1997, 7th Edition, McGraw Hill

FONTE: FONTE: USEPA, 2008, p.7

DONG et al. (2007) analisaram 5 amostras de coque retiradas pelas ventaneiras de um alto-forno, operando a 1112°C. As composições obtidas são apresentadas na TAB. 2.16, em porcentagem de massa, base seca.

TABELA 2.16
Caracterização de Amostras de Coque de Alto-Forno

| Componente amostra | Composição (% em massa – base seca) | | | | |
|-----------------------|-------------------------------------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| carbono | 76.3 | 77.5 | 85.4 | 79.2 | 79.0 |
| hidrogênio | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 | <0.1 |
| nitrogênio | 0,7 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,7 |
| oxigênio | 5,6 | <0.1 | <0.1 | 7,1 | 5,7 |

FONTE: DONG et al., 2007, p.3448

Os valores destas três últimas tabelas confirmam as divergências existentes entre os diversos coques metalúrgicos.

2.2.4.2 Cal

A cal é usada no alto-forno como fundente, ou seja, destina-se a conferir à escória uma proporção adequada de CaO (MOURÃO et al., 2007). Desta proporção depende sua fluidez e propriedades dessulfurantes e de remoção de impurezas.

SUSAKI (2008) registra que nos altos-fornos a coque, é normal que os fundentes sejam incorporados ao sinter ou pelota. São feitas pequenas adições diretamente no alto-forno para ajustes. Apresentou os consumos típicos dos fundentes na siderurgia brasileira, mostrados na TAB. 2.17.

Chama a atenção para o fato de que as quantidades adotadas em cada usina dependem das características do minério de ferro, carvão e coque utilizados.

TABELA 2.17

Consumos Típicos de Fundentes na Fabricação de Sínter

| Escorificante | Carga (kg/t de sinter) |
|---------------------|---------------------------|
| cal calcítica | 22 – 30 |
| calcáreo calcítico | 80 – 100 |
| calcáreo dolomítico | 40 – 50 |
| quartzito | 1,5 – 3,5 |

FONTE: SUSAKI, 2008, p.10

FIGUEIRA (2009) registra que na aciaria LD também é usada a cal como fundente, na faixa de 80 kg por tonelada de aço. Tem por funções neutralizar a sílica proveniente da oxidação do silício do gusa, formando $3\text{Ca}\cdot\text{SiO}_2$, de modo a reduzir o consumo de refratários, e obter uma basicidade ($\% \text{CaO} / \% \text{SiO}_2$) adequada para permitir a remoção de fósforo e enxofre. Possui, como característica importante, a elevada velocidade de dissolução da escória. A dissolução depende, além da qualidade da cal, das condições operacionais. Deve apresentar densidade entre 1,5 e 1,7 g/cm^3 ; granulometria de 15 a 40 mm, com no máximo 10% inferior a 5 mm; teor de CO_2 inferior a 5%; baixos teores de sílica e de enxofre.

SUSAKI (2008) considera que, nas usinas integradas brasileiras, esse consumo equivale, aproximadamente, a 35 kg de cal calcítica e 23 kg de cal dolomítica por tonelada de aço líquido.

2.2.4.3 Sínter

O sinter deve apresentar boa redutibilidade e resistência mecânica (MOURÃO et al., 2007). A primeira decorre da formação de ferritas de cálcio. Para tanto, no processo de sinterização a composição da mistura deve apresentar uma relação CaO/SiO_2 maior que 1,8. Já a resistência mecânica se torna maior quando ocorrem no processo picos de temperatura superiores a 1.300°C . Durante o processamento, parte do enxofre contido na carga é eliminada na forma gasosa, juntamente com os gases de combustão.

A empresa OUTOKUMPU (2005) se encontra entre os maiores fornecedores mundiais de equipamentos para sinterização. Dados de referência de suas plantas incluem o consumo de

combustíveis sólidos e gasosos da ordem de 1250 a 1400 MJ, demanda de 25 a 32 kWh e uso de 0,03 a 0,05 m³ de água por tonelada de sinter produzido.

2.2.4.4 Gusa e escória de alto-forno

Para a produção de aço de alta pureza, as impurezas das gangas do minério, das cinzas dos combustíveis e dos redutores sólidos devem ser eliminadas. MOURÃO et al. (2007) relacionam as quantidades típicas de sub-produtos do alto-forno, quais sejam, a escória, com formação entre 200 e 250 kg por tonelada de gusa, e o gás de alto forno – GAF, de 1.750 a 2.300 Nm³ por tonelada de gusa.

Um dos critérios de avaliação do desempenho do alto-forno é o consumo de combustível. Ainda segundo os autores, os dados das siderúrgicas brasileiras, relativos a 2005, mostraram que os consumos específicos de 12 usinas ficaram entre 465 e 550 kg/t de gusa. A variação dos dados é, portanto, da ordem de 18%.

As TABELAS 2.18 a 2.21 apresentam as composições típicas do gusa e da escória produzidos em altos-fornos. Podem ser constatadas as variações existentes entre os dados dos diversos autores.

TABELA 2.18

Composição Típica do Gusa e da Escória de Alto-Forno Segundo Mourão

| Ferro-Gusa (% em peso) | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------|------|-------|------|------------------|--------|--------|
| Ti | Si | S | Mn | P | C | Fe | outros | |
| 0,03 | 0,38 | 0,026 | 0,69 | 0,091 | 4,82 | 93,86 | 0,1 | |
| Escória de Alto-forno (% em peso) | | | | | | | | |
| SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | S | MnO | TiO ₂ | FeO | outros |
| 34,65 | 11,59 | 42,8 | 6,81 | 1,22 | 0,83 | 0,53 | 0,35 | 1,22 |

FONTE: MOURÃO et al., 2007, p.69

TABELA 2.19

Composição Típica do Gusa e da Escória de Alto-Forno Segundo Moreira

| Ferro-Gusa (% em peso) | | | | | |
|-----------------------------------|---------------|-----------|-------------|-----------|--------------------------------|
| Si | S | Mn | P | C | Fe |
| 0,5 a 3,0 | 0,035 a 0,050 | 1,0 a 2,0 | 0,04 a 0,40 | 3,0 a 4,5 | balanço |
| Escória de Alto-forno (% em peso) | | | | | |
| SiO ₂ | CaO | MgO | S | FeO | Al ₂ O ₃ |
| 23 a 55 | 27 a 55 | 1 a 12 | 0,4 a 1,2 | 0,5 a 2 | 5 a 25 |

FONTE : MOREIRA, 2009, p. 10 e 11

TABELA 2.20
Composição Típica do Gusa Segundo Figueira

| Ferro-Gusa (% em peso) | | | | | |
|-------------------------------|-------|-----|------|-----|---------|
| Si | S | Mn | P | C | Fe |
| 0,4 | 0,007 | 0,3 | 0,01 | 4,2 | balanço |

FONTE : FIGUEIRA, 2009, lâmina 5

TABELA 2.21
Composição Típica do Gusa Segundo Penido

| Ferro-Gusa (% em peso) | | | | | |
|-------------------------------|-----------|-----------|--------------------------------|-----------|---------|
| Si | S | Mn | P | C | Fe |
| 0,5 a 4,0 | 0,007 | 0,5 a 2,5 | 0,05 a 2,0 | 3,0 a 4,5 | balanço |
| Escória (% em peso) | | | | | |
| SiO ₂ | CaO + MgO | FeO | Al ₂ O ₃ | | |
| 29 a 38 | 1,0 a 3,0 | 3,0 a 4,5 | 10 a 22 | | |

FONTE : PENIDO, 2009, lâmina 11

2.2.4.5 Aço e escória de aciaria

Como salientado por MOURÃO et al.(2007), há diversos tipos de aço produzidos em conversor a oxigênio, sendo que as composições dependem do tipo de produto final a que se destinam. O processo LD permite a fabricação de uma gama variada de tipos de aço, desde os de baixo-carbono até mesmo alguns altamente ligados.

O aço comum ou aço carbono é uma liga de ferro carbono, contendo também outros elementos como manganês, silício, fósforo e enxofre (ROMEIRO, 1997). Já os aços especiais contêm outros metais adicionados intencionalmente. As composições químicas são apresentadas nas TAB. 2.22 e 2.23 a seguir.

TABELA 2.22
Composição Química do Aço Comum

| Aço SAE | C (%) | Mn (%) | Si (%) | P (max) (%) | S (max) (%) |
|----------------|--------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|
| 1010 | 0,08 a 0,13 | 0,3 a 0,6 | 0,1 a 0,3 | 0,04 | 0,05 |
| 1020 | 0,18 a 0,25 | 0,3 a 0,6 | 0,1 a 0,3 | 0,04 | 0,05 |
| 1045 | 0,42 a 0,45 | 0,6 a 0,9 | 0,1 a 0,3 | 0,04 | 0,05 |
| 1070 | 0,65 a 0,75 | 0,6 a 0,9 | 0,1 a 0,3 | 0,04 | 0,05 |
| 1090 | 0,85 a 1,0 | 0,6 a 0,9 | 0,1 a 0,3 | 0,04 | 0,05 |

FONTE: ROMEIRO, 1997, p. 15

TABELA 2.23
Composição Química de Aços Especiais

| Aço SAE | C (%) | Mn (%) | Ni (%) | Cr (%) | Mo (%) |
|---------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|
| 4320 | 0,17 a 0,22 | 0,45 a 0,65 | 1,65 a 2,0 | 0,4 a 0,6 | 0,2 a 0,3 |
| 8615 | 0,13 a 0,18 | 0,7 a 0,9 | 0,4 a 0,7 | 0,4 a 0,6 | 0,15 a 0,25 |
| 8620 | 0,18 a 0,23 | 0,7 a 0,9 | 0,4 a 0,7 | 0,4 a 0,6 | 0,15 a 0,25 |
| 1340 | 0,38 a 0,43 | 1,6 a 1,9 | - | - | - |
| 4140 | 0,38 a 0,43 | 0,75 a 1,0 | - | 0,8 a 0,11 | 0,15 a 0,25 |
| 4340 | 0,38 a 0,43 | 0,6 a 0,8 | 1,65 a 2,0 | 0,7 a 0,9 | 0,2 a 0,3 |
| 5140 | 0,38 a 0,43 | 0,7 a 0,9 | - | 0,7 a 0,9 | - |

FONTE: ROMEIRO, 1997, p. 20

FIGUEIRA (2009) indica as composições típicas do aço e da escória do processo LD (BOF) conforme discriminado na TAB. 2.24.

TABELA 2.24
Composição Típica do Aço e da Escória de Aciaria

| Aço Líquido (% em peso) | | | | |
|-------------------------|-------|------|------|------|
| Si | S | Mn | P | C |
| 0,01 | 0,007 | 0,15 | 0,01 | 0,04 |
| Escória (% em peso) | | | | |
| SiO ₂ | CaO | MgO | FeO | |
| 15 | 50 | 8 | 35 | |

FONTE : FIGUEIRA, 2009, lâmina 5

2.2.4.6 Gases e lamas

Nas usinas siderúrgicas integradas ocorre produção de gases na coqueria, no alto-forno e na aciaria, que podem ser empregados internamente como gases combustíveis. Antes de serem usados, os gases de alto-forno e de aciaria devem ser tratados para eliminação de material particulado, o que gera uma lama como efluente do processo. O gás de coqueria – GCO é também beneficiado, principalmente para a remoção de produtos químicos, como alcatrão, amônia, benzeno/tolueno/xileno -BTX e enxofre. Após a limpeza, contém basicamente metano, hidrogênio e monóxido de carbono, sendo, portanto, um gás combustível, consumido internamente em diversos setores da unidade siderúrgica, inclusive na própria coqueria.

MOREIRA (2009) relata que a quantidade de pó no gás de alto-forno varia entre 5 e 40 g/Nm³, sendo que o gás limpo deve apresentar no máximo 10 mg/Nm³. Quanto à composição química, a USEPA (2008) relata os componentes detalhados na TAB.2.25.

TABELA 2.25
Composição do Gás de Alto-Forno - GAF

| Composição volumétrica | |
|---------------------------------------|------------|
| (%) | |
| hidrogênio | 2,4 |
| metano | 0,1 |
| monóxido de carbono | 23 |
| dióxido de carbono | 14 |
| nitrogênio | 56 |
| água | 3,4 |
| cianetos - HCN | 0,01 a 0,1 |
| Poder Calorífico (kJ/m ³) | 3.170 |

FONTE: USEPA, 2008, p.8

Para o gás de aciaria LD, FIGUEIRA (2009) fornece a composição química apresentada na TAB. 2.26.

TABELA 2.26
Composição do Gás de Aciaria - GAC

| Composição volumétrica | |
|-------------------------------|----|
| (%) | |
| CO | 68 |
| CO ₂ | 8 |
| N ₂ | 12 |
| H ₂ | 12 |

FONTE: FIGUEIRA, 2009, lâmina 5

2.2.4.7 Turbinas de topo

A turbina de topo utiliza a pressão e a temperatura do gás de alto-forno para a geração de energia elétrica ao mesmo tempo em que controla a pressão dentro do forno.

Originalmente, a pressão do gás na saída do alto-forno, que fica em torno de 2 a 3 kgf/cm² era reduzida em uma válvula de expansão para ser utilizado no processo industrial (ASEAN CENTRE FOR ENERGY, 2009). Melhorias tecnológicas recentes possibilitam a remoção a seco do material particulado, o que permite aumento da temperatura de entrada do gás na turbina e, portanto, maior geração de energia elétrica.

No Brasil, já há unidades instaladas em algumas plantas siderúrgicas. Por exemplo, CAMPOS e SOUZA (2003) relatam o projeto da Usiminas para aumento de potência de uma turbina de topo no alto-forno 03 da empresa. O volume de gás processado inicialmente era de 522.000 Nm³/h. Alterações no soprador do alto-forno permitiram aumento da potência nominal do equipamento,

originalmente de 11 MW, para 16 MW. Para isto, o volume de gás processado passou a 600.000 Nm³/h, a pressão de entrada na turbina sofreu um aumento de 44,8% e a temperatura de entrada foi aumentada em 42,9%.

2.3 Balanços de massa e energia

2.3.1 Introdução

Como exposto no item 1.1, o efeito da recente crise econômica na demanda global de ferro e aço foi grande, resultando na queda da produção de aço, em dezembro de 2008, de 26,4% em relação ao mesmo mês de 2007 (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2009). Os registros da Associação mostram também que, em 2008, a produção foi menor em todos os países que são grandes produtores, à exceção da China e do Oriente Médio que ainda registraram crescimento positivo. Em 2009, o desempenho setorial foi ainda mais fraco, com queda de produção 22,7% de janeiro a abril em comparação com 2008. Esse decréscimo corresponde a 324 milhões de toneladas.

Das 34 milhões de toneladas produzidas em 2007 (IBS, 2009), as vendas de produtos acabados e semi-acabados totalizaram 20,6 milhões de toneladas, e foram direcionadas para bens de capital, construção, setor automotivo e utilidades comerciais. Os produtos planos responderam pela maior fatia do mercado.

A TABELA 2.27 e o GRÁFICO 2.1 mostram os dados registrados nos primeiros quatro meses de 2008 e de 2009.

Como consequência do mau desempenho, as empresas postergaram projetos de novas plantas e de expansão.

Este cenário tem forçado o setor a buscar redução de custos de produção para se manter competitivo no mercado global. Entre as medidas a serem adotadas, a eficiência energética merece destaque.

A avaliação da eficiência energética de uma indústria deve ser iniciada com a realização de balanços nos quais são identificados os fluxos de energia e massa. Esta técnica é tradicional e vem sendo utilizada há décadas pelo setor industrial e sistematicamente pela siderurgia brasileira. Além disto, os balanços são o ponto de partida para a análise exergética, que é objeto deste estudo.

TABELA 2.27
Produção Brasileira de Aço

| Produtos | Produção de Janeiro a Abril (10 ³ t) | | 2009/2008 (%) |
|----------------------------|--|----------|------------------|
| | 2009 ^(*) | 2008 | |
| aço bruto | 6.729,9 | 11.540,9 | (41,7) |
| aço laminado | 4.938,5 | 8.716,8 | (43,3) |
| planos | 2.729,0 | 5.148,4 | (47,0) |
| longos | 2.209,5 | 3.568,4 | (38,1) |
| semi-acabados | 1.372,6 | 2.124,1 | (35,4) |
| placas | 979,6 | 1.491,8 | (34,3) |
| lingotes, tarugos e blocos | 393,0 | 632,3 | (37,8) |
| gusa | 6.477,1 | 11.960,1 | (45,8) |
| usinas integradas | 5.354,1 | 9.019,9 | (40,6) |
| altos-fornos independentes | 1.123,0 | 2.940,2 | (61,8) |
| ferro esponja | 11,0 | 102,6 | (89,3) |

(*) dados preliminares

FONTE: IBS, 2009

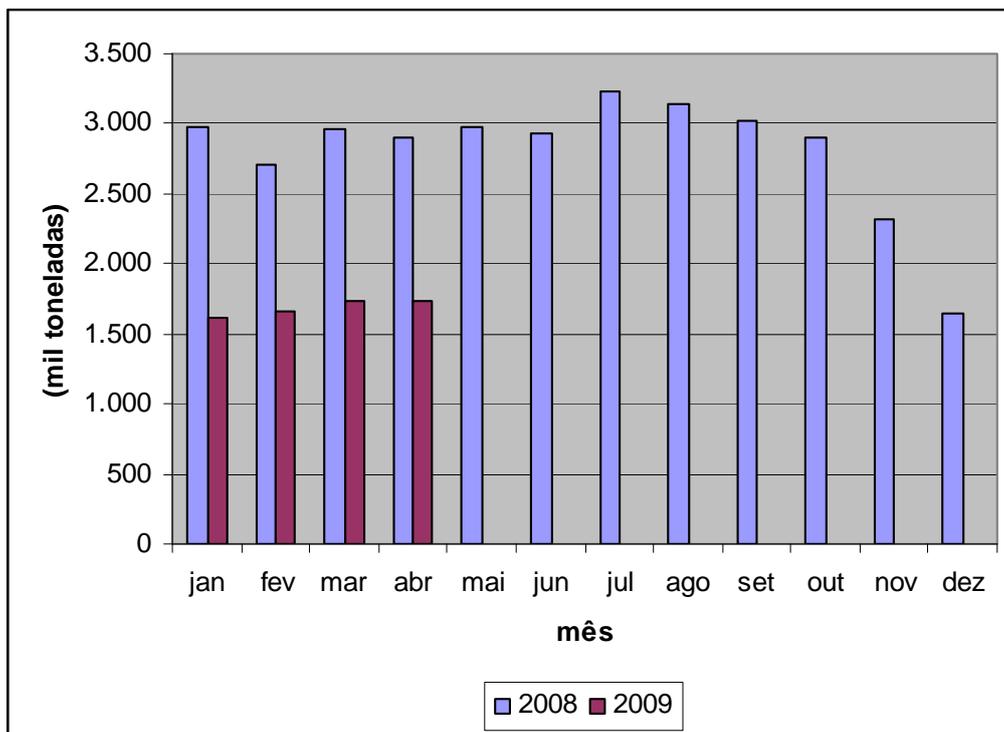


GRÁFICO 2.1 - Produção Brasileira de Aço Bruto
FONTE – IBS, 2009

A seguir são apresentados e comentados trabalhos disponíveis na literatura que tratam de balanços de energia em indústrias siderúrgicas.

2.3.2 Consumo de energia em usinas integradas

PRICE et al. (2001) analisaram as rotas para produção de aço a partir de minério de ferro e a partir de sucata. Os correspondentes consumos de energia constam da TAB. 2.28. Os valores correspondem à demanda de energia primária. Os autores assumiram que a eficiência de conversão de energia térmica em eletricidade é de 33%.

TABELA 2.28
Faixas de Consumo de Energia Primária na Fabricação de Ferro e Aço

| Processo | Rota | Produto | Consumo específico de energia primária (GJ/t de aço) |
|-------------------|---|---------------------------------|--|
| Produção de ferro | Alto-forno (inclui coqueria e preparo de minério) | gusa | 12,7 – 18,6 |
| | Fusão - redução (inclui preparo de minério) | gusa | 13,0 – 18,0 |
| | Redução direta (inclui preparo de minério) | ferro esponja | 10,9 – 16,9 |
| Produção de aço | Forno aberto - OHF | | 3,9 – 5,0 |
| | Forno básico a oxigênio - BOF | aço primário | 0,7 – 1,0 |
| | Redução direta e forno elétrico | aço primário | 4,0 – 6,7 |
| | Sucata e forno elétrico a arco | aço secundário | 4,0 – 6,5 |
| Lingotamento | Batelada | lingotes | 1,2 – 3,2 |
| | Contínuo | placas, blocos e tarugos | 0,1 – 0,3 |
| | Laminação de placas finas – thin slab cast (reduz necessidade de laminação) | produtos próximos à forma final | 0,6 – 0,9 |
| Laminação | A quente | chapas grossas | 2,3 – 5,4 |
| | A frio (redução de espessura das chapas da laminação a quente) | chapas finas | 1,6 – 2,8 |

FONTE: PRICE et al., 2001, p.3

WORRELL et al. (1999) adotaram em seus estudos o conceito de melhores práticas, que são as que levam ao menor consumo de energia na produção do aço, nas plantas existentes. As unidades industriais que apresentam os menores consumos específicos estão localizadas na Alemanha e na Holanda e foram consideradas como referências.

A TABELA 2.29 apresenta os consumos específicos de energia de cada processo. Os valores de consumo das melhores práticas são coerentes com aqueles mostrados na TAB.2.28.

STUBBLES (2000) definiu como boas práticas aquelas que são sustentáveis com as tecnologias existentes. Aplicando o conceito de boas práticas às unidades siderúrgicas existentes em 1997 e 1998, foi calculado um consumo específico de energia de 15,48 Mbtu por tonelada curta de metal líquido, ou seja, 18 GJ por tonelada de metal líquido, como detalhado na TAB. 2.30.

TABELA 2.29
Consumos Específicos das Melhores Práticas

| Processo | Combustível (GJ/t) | Eletricidade (GJ/t) | Energia Primária (GJ/t) (*) | Observações |
|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------|--|
| BOF – placa | 14,24 | 0,36 | 15,3 | Usina integrada da Holanda, com 10% de sucata, 1988 |
| EAF – placa | 0,79 | 1,52 | 5,4 | Usina integrada alemã, com lingotamento contínuo, 1989 |
| Laminação a quente | 1,82 | 0,37 | 2,9 | Usina da Holanda, 1988 |
| Laminação a frio | 1,10 | 0,53 | 2,7 | 1988 |

FONTE: WORRELL et al, 1999, p.6

TABELA 2.30
Consumo de Energia na Produção de Gusa Líquido nos Estados Unidos Segundo as Boas Práticas
1997 - 1998

| Operação | Demanda energética (GJ/t) |
|---------------------------|---------------------------|
| sinterização | 0,62 |
| pelotização | 2,87 |
| coqueria | 1,93 |
| coque | 9,82 |
| injeção pelas ventaneiras | 4,36 |
| alto-forno | 3,74 |
| subtotal | 23,34 |
| crédito dos gases de topo | (5,35) |
| total | 17,99 |

FONTE: STUBBLES, 2000, p.8

Essa demanda energética não inclui a aciaria e os processos de lingotamento e laminação, referindo-se somente à produção de gusa. Como pode ser constatado, também estes valores são semelhantes aos da TAB. 2.28.

O mesmo trabalho registra os consumos de energia para produção de aço em fornos a oxigênio – BOF, mostrados na TAB.2.31. O valor total corresponde a 16,36 GJ por tonelada, incluindo a energia usada nas etapas anteriores de produção de gusa. Considerando somente os processos de produção de aço e lingotamento, a demanda energética passa a 1,36 GJ por tonelada (1,17 Mbtu por tonelada curta ou 2.000 libras). Este valor encontra-se dentro da faixa de consumo apresentada na TAB. 2.28.

DE BEER et al. (1998) calcularam o menor consumo energético específico – SEC teórico na produção de ferro, usando as melhores práticas da década de 80. Ou seja, foi estimada a menor quantidade de energia requerida teoricamente para a execução de um serviço de energia, sem levar em consideração os processos práticos.

TABELA 2.31

Consumo de Energia na Produção de Aço nos Estados Unidos Segundo as Boas Práticas
1997 - 1998

| Operação | Demanda energética GJ/t de produtos fundidos |
|--------------|---|
| metal quente | 14,99 |
| oxigênio | 0,37 |
| cal | 0,29 |
| eletricidade | 0,30 |
| lingotamento | 0,17 |
| outros | 0,40 |
| total | 16,35 |

FONTE: STUBBLES, 2000, p.10

As etapas do processo produtivo consideradas foram a separação do óxido de ferro dos demais compostos no minério, a redução do minério, o ajuste da composição para o aço desejado e a conformação do aço na forma do produto final

As usinas atuais mais eficientes demandam em torno de 19 GJ por tonelada de aço bruto (tcs), como mostra o esquema da FIG. 2.13, onde estão representados os consumos por etapa produtiva, com o emprego da tecnologia contemporânea. Para comparação, a estimativa dos autores para o consumo médio mundial foi de 24 GJ/tcs.

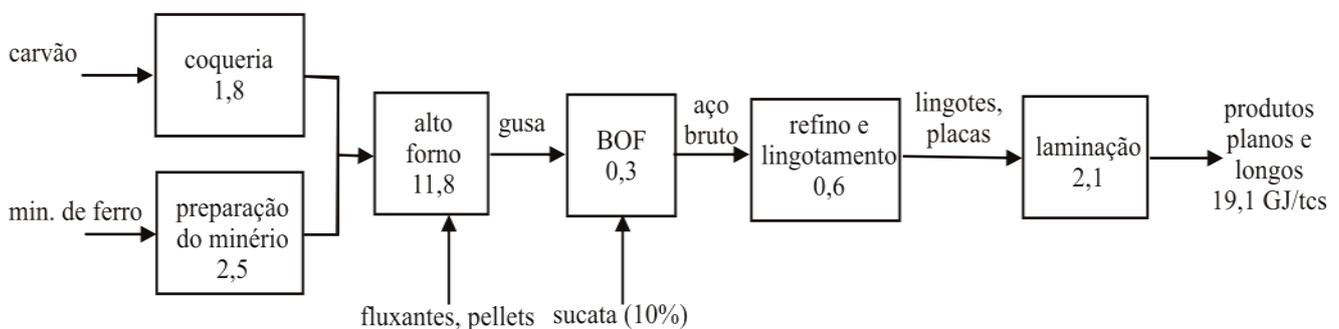


FIGURA 2.13 - Consumo Específico em Usina Siderúrgica de 3 a 5 milhões de toneladas por ano

FONTE - DE BEER et al., 1998, p. 133

O estudo concluiu que, teoricamente, a grande demanda ocorre no alto-forno (6,6 GJ/ t de ferro ou hematita). A demanda das outras etapas em conjunto é inferior a 1% da que ocorre na redução. No entanto, nos processos práticos, são também necessários, pelo menos, 6,8 GJ por tonelada de ferro, para aquecer e fundir o ferro. É ainda citado que, na prática:

- energia adicional é fornecida pelo sopro quente;
- o SEC líquido de um alto-forno moderno está na faixa de 12,5 a 15 GJ por tonelada de gusa, ou seja, em torno do dobro da menor SEC teórica;

- a demanda real de energia nas siderúrgicas está em torno de três vezes o SEC mínimo, o que leva a um potencial de redução de 65%;
- na teoria o potencial de redução para os processos secundários de produção de aço a partir de sucata é de 100%.

O cálculo da demanda mínima de energia foi realizado considerando uma usina teórica descrita pelo International Iron and Steel Institute – IISI, que emprega a tecnologia mais eficiente disponível na década de 80. Os autores consideraram também os processos baseados na redução direta e no forno elétrico a arco. A TABELA 2.32 fornece uma visão de quatro rotas futuras para produção de aço e as respectivas demandas energéticas mínimas esperadas, expressas como GJ de energia primária por tonelada de aço laminado (trs).

TABELA 2.32
Consumo Específico de Energia em Processos Produtivos Futuros

| rota | operação unitária | SEC (GJ/trs) |
|---|-----------------------------------|--------------|
| usina integrada melhorada (3 – 5 milhões t/ano): produção de produtos planos e longos de qualidade | coqueria | 1,1 |
| | preparação do minério | 2,1 |
| | alto-forno | 11,3 |
| | aciaria BOF | -1,0 |
| | refino, lingotamento | 0,6 |
| | laminação | 1,5 |
| | total | 15,5 |
| usina com tecnologia avançada (0,5 – 1,0 milhão t/ano): produção de produtos planos e longos de qualidade | fusão - redução | 12,8 |
| | aciaria BOF | -1,0 |
| | refino, lingotamento, conformação | 0,75 |
| | total | 12,5 |
| usina com redução direta e fusão a eletricidade (1,0 – 2,0 milhões t/ano): produtos planos e perfis | preparação do minério | 1,3 |
| | redução direta | 9,0 |
| | forno elétrico a arco | 3,5 |
| | refino, lingotamento, conformação | 0,75 |
| | total | 14,5 |
| mini usina baseada em sucata (0,5 – 1,5 milhão t/ano): produção de barras, perfis e produtos planos | melhoramento da sucata | 0,5 |
| | forno elétrico a arco | 2,3 |
| | refino, lingotamento, conformação | 0,75 |
| | total | 3,5 |

FONTE: DE BEER et al., 1998, p. 194 - 195

Uma comparação entre os resultados apresentados pelos diversos autores relativamente aos consumos específicos de energia na siderurgia permite concluir que, embora haja coerência entre os dados, há alguma diferença entre eles, o que sugere que cada caso deve ser tratado individualmente na estimativa de potencial de economia e na identificação de ações pela busca pelo menor consumo.

As usinas siderúrgicas brasileiras apresentam anualmente seus balanços energéticos globais, com informações sobre as produções por setor da usina e com os consumos externos e internos, bem como sobre as produções de insumos energéticos e utilidades. Ao longo dos anos, as empresas vem se dedicando a aumentar sua eficiência energética e a ampliar a geração própria de energia elétrica. O aumento da eficiência se reflete no consumo global de energia por tonelada de aço bruto produzido.

A ABM (2007) e empresas do setor no Brasil (AÇOMINAS, 1990 E 1991; AFM-CEBDS-CST , 2004) informaram os valores de consumo específico de energia na produção de aço apresentados na TAB.2.33. Os dados referem-se a uso final e não a fontes primárias, como metodologia adotada por diversos autores. Comparando com os valores fornecidos anteriormente nas TAB. 2.29 a 2.32 e FIG. 2.13, para consumo específico empregando as melhores práticas, pode ser verificado que quatro das seis usinas brasileiras apresentam consumos superiores, o que sugere a existência de um potencial de aumento de eficiência energética.

TABELA 2.33
Evolução dos Consumos Específicos da Produção de Aço

| Ano | Consumo por tonelada de aço bruto GJ/tab | | | | | |
|------|---|------------------------------|-----------------------------|--------|-------|----------|
| | Gerdau Açominas | Arcelor Mittal Tubarão | Arcelor Mittal Brasil | Cosipa | CSN | Usiminas |
| 1990 | 25,8 | | | | | |
| 1991 | 25,3 | | | | | |
| 1999 | | 19,0 | | | | |
| 2000 | | 20,1 | | | | |
| 2001 | | 18,6 | | | | |
| 2002 | | 19,1 | 21,97 | 16,19 | 21,35 | 25,5 |
| 2003 | 20,3 | 19,9 | 21,74 | 17,12 | 22,23 | 25,71 |
| 2004 | 21,3 | 19,7 | 21,55 | 17,61 | 23,06 | 25,34 |
| 2005 | 22,1 | 20,0 | 21,92 | 17,19 | 21,69 | 25,39 |
| 2006 | 23,2 | 19,4 | 21,18 | 17,36 | 14,62 | 25,74 |

FONTE: ABM, 2007; AFM-CEBDS-CST, 2004; AÇOS MINAS GERAIS S.A., 1990 e 1991

No que diz respeito à geração própria de energia elétrica pelas usinas, que reflete diretamente nos respectivos consumos específicos, houve a seguinte evolução:

- Açominas: a produção própria de energia elétrica ficou em torno de 0,67 GJ/tab. Em 2006 teve início o uso de gás natural.
- Usina Siderúrgica Tubarão – CST, atualmente Arcelor-Mittal Tubarão: a geração de energia elétrica na turbina de topo – TRT já data de 11 anos. Em 2006, a potência da turbina era de 15 MW.

- Cia. Siderúrgica Belgo Mineira, atual Arcelor-Mittal Brasil: apresentou, entre 2002 e 2006, um aumento na geração própria de 4,61 GJ/tab para 5,07 GJ/tab, o que significou acréscimo de 10% aproximadamente.
- COSIPA: a geração interna de energia elétrica permaneceu na faixa entre 0,12 e 0,16 GJ/tab.
- Companhia Siderúrgica Nacional – CSN: a energia elétrica gerada ficou na faixa entre 1,16 e 1,5 GJ/tab. Para isto, houve um aumento de consumo de gás natural de 76 para 112 kg/tab.
- Usiminas: a energia elétrica gerada passou de 0,29 GJ/tab para 0,33 GJ/tab.

2.3.3 Eficiência energética

A identificação do potencial de efficientização energética de uma usina siderúrgica integrada é iniciada pela análise dos balanços de energia e massa de planta. Os dados apresentados na TAB. 2.33 para empresas brasileiras permitem observar que os consumos específicos das usinas mantiveram-se razoavelmente estáveis no período de 2002 a 2006, ou seja, não foram desenvolvidos programas relevantes de conservação de energia pela indústria. Sendo assim, as proposições feitas em 2001 por PRICE et al. (2001) podem ser consideradas atualizadas e aplicáveis às unidades siderúrgicas nacionais.

Os autores quantificaram os potenciais de economia de energia primária e da redução das emissões de CO₂ para os países em desenvolvimento, com relação às melhores práticas, a partir dos dados de produção de aço de 1995. Esses potenciais são apresentados, respectivamente, nas TAB. 2.34 e TAB. 2.35. Os levantamentos dos potenciais regionais referenciados às melhores práticas foram baseados nos perfis de produção e de matérias primas de cada país estudado.

TABELA 2.34

Melhores Práticas: Potencial Técnico de Economia de Energia Primária na Produção de Aço em 1995

| País | Intensidade Atual de Energia Primária (GJ/t) | Intensidade de Energia Primária das Melhores Práticas (GJ/t) | Potencial Técnico de Economia de Energia Primária (GJ/t) |
|---------------|---|---|---|
| Brasil | 23,1 | 18,6 | 4,5 |
| China | 36,7 | 20,2 | 16,5 |
| Índia | 37,3 | 20,5 | 16,8 |
| México | 22,6 | 13,5 | 9,1 |
| África do Sul | 44,4 | | |

FONTE: PRICE et al., 2001, p. 21

Para concretizar o aumento da eficiência energética até os níveis das melhores práticas, torna-se necessário um refinamento da análise de cada etapa do processo produtivo do aço. Em cada uma,

além da consideração do consumo energético correspondente ao estado-da-arte, deve também ser avaliado o panorama da evolução tecnológica em curso.

TABELA 2.35

Melhores Práticas: Emissão de Dióxido de Carbono na Produção de Aço em 1995

| País | Intensidade Atual de Emissão de CO ₂ (tC/t) | Intensidade de Emissão de CO ₂ das Melhores Práticas (tC/t) | Potencial Técnico de Redução de Emissão de CO ₂ (tC/t) |
|---------------|--|--|---|
| Brasil | 0,36 | 0,27 | 0,09 |
| China | 0,87 | 0,48 | 0,39 |
| Índia | 0,98 | 0,53 | 0,45 |
| México | 0,42 | 0,24 | 0,18 |
| África do Sul | 1,11 | | |

FONTE: PRICE et al., 2001, p. 24

WORRELL e GALITSKY (2006) analisaram as medidas que poderão proporcionar redução do uso de energia nos processos siderúrgicos, através do uso de tecnologia comercialmente disponível e de alguns processos de tecnologia avançada que ainda se encontram em desenvolvimento, como os de produção de gusa com fusão-redução. A TABELA 2.36 relaciona as medidas propostas, por etapa do processo produtivo da siderurgia integrada com alto-forno, indicando o potencial de economia de energia primária de cada uma, por tonelada de aço bruto.

DE BEER et al. (1998) relatam que a demanda total de carbono (coque, carvão e óleo combustível), segundo a World Steel Association, varia entre 350 e 400 quilos de carbono por tonelada de gusa, sendo que até 40% do coque podem ser substituídos por carvão vegetal pulverizado. Esta medida reduz a demanda energética na coqueria, mas aumenta a do alto-forno, já que a razão de substituição do carvão vegetal pelo coque é de 1,04 a 1,25 em massa, havendo também maior demanda de oxigênio.

Foram também apontadas, pelos autores, técnicas destinadas à redução de perdas de exergia decorrentes de aplicações de altas temperaturas, divididas nos seguintes grupos:

- Técnicas que impedem pelo menos uma etapa de aquecimento e resfriamento: fusão-redução (smelting reduction) e laminação em forma próxima da final (near-net-shape casting). O primeiro usa diretamente o carvão e o minério, eliminando etapas de coqueificação e de sinterização ou pelletização. O segundo elimina ou reduz o reaquecimento na laminação dos produtos. Neste grupo foi identificado o processo COREX, comercialmente disponível. Unidades, que o utilizam, apresentam consumos específicos de 15,5 a 17,5 GJ/t de metal quente.

TABELA 2.36

Medidas para Redução do Uso de Energia

| opção | economia de combustível (GJ/tab) | economia de energia elétrica (GJ/tab) | economia total de energia primária (GJ/tab) | participação (%) |
|--|----------------------------------|---------------------------------------|---|------------------|
| sinterização | | | | |
| recuperação de calor da planta de sinter | 0,12 | 0,00 | 0,12 | |
| redução da perda de ar | 0,00 | 0,00 | 0,01 | |
| aumento profundidade leito | 0,02 | 0,00 | 0,02 | |
| melhor controle processo | 0,01 | 0,00 | 0,01 | |
| uso rejeitos de combustíveis na sinterização | 0,04 | 0,00 | 0,04 | |
| sub-total | | | 0,20 | 1,14 |
| coqueria | | | | |
| controle da umidade do coque | 0,09 | 0,00 | 0,09 | |
| aquecimento programado | 0,05 | 0,00 | 0,05 | |
| extinção a seco | 0,37 | 0,00 | 0,37 | |
| sub-total | | | 0,51 | 2,90 |
| alto-forno | | | | |
| injeção de carvão pulverizado a 130 kg/tmq | 0,69 | 0,00 | 0,69 | |
| injeção de carvão pulverizado a 225 kg/tmq | 0,51 | 0,00 | 0,51 | |
| injeção de gás natural a 140 kg/tmq | 0,80 | 0,00 | 0,80 | |
| melhorias em sistemas de controle e automação | 0,69 | 0,00 | 0,69 | |
| turbinas de topo – tipo úmido | 0,00 | 0,10 | 0,30 | |
| processos de fusão-redução ^(*) | 3,2 | 0,00 | 3,20 | |
| sub-total | | | 6,19 | 35,23 |
| lingotamento | | | | |
| adoção de lingotamento contínuo | 0,24 | 0,08 | 0,49 | |
| preaquecimento eficiente da panela | 0,02 | 0,00 | 0,02 | |
| laminação de placas finas | 3,13 | 0,57 | 4,89 | |
| laminação de chapas ^(*) | - | - | 0,22 | |
| sub-total | | | 5,62 | 31,99 |
| laminação a quente | | | | |
| carregamento a quente | 0,52 | 0,00 | 0,52 | |
| controle de processo na laminação de tiras | 0,26 | 0,00 | 0,26 | |
| queimadores recuperativos | 0,61 | 0,00 | 0,61 | |
| isolamento dos fornos | 0,14 | 0,00 | 0,14 | |
| controle de O ₂ e controles de vel. variável | 0,29 | 0,00 | 0,29 | |
| comandos eficientes (laminação) | 0,00 | 0,01 | 0,03 | |
| recuperação de calor da água de refrigeração | 0,03 | 0,00 | 0,03 | |
| queimadores de baixo NO _x | 0,77 | -0,02 | 0,70 | |
| sub-total | | | 2,58 | 14,68 |
| laminação a frio e acabamento | | | | |
| recuperação de calor na linha de recozimento | 0,17 | 0,01 | 0,19 | |
| redução de uso de vapor na linha de decapagem | 0,11 | 0,00 | 0,11 | |
| monitoramento automático e sistema de metas | 0,00 | 0,12 | 0,38 | |
| sub-total | | | 0,68 | 3,87 |
| geral | | | | |
| manutenção preventiva | 0,43 | 0,02 | 0,49 | |
| monitoramento energético e gerenciamento de sistemas | 0,11 | 0,01 | 0,14 | |
| cogeração | 0,03 | 0,35 | 1,1 | |
| controle de velocidade variável: gás de chaminé, bombas e ventiladores | 0,00 | 0,02 | 0,06 | |
| sub-total | | | 1,79 | 10,19 |
| total | | | 17,57 | 100,00 |

* tecnologias avançadas, em desenvolvimento

FONTE: WORRELL e GALITSKY, 2006, p.3

Os consumos dos processos convencionais, em base primária, foram estimados na faixa de 16 a 17,5 GJ/t de gusa. Quanto à laminação com forma próxima da final, disponível para produção de chapas de até 90 mm, foi calculado um consumo energético, em base primária, entre 2,4 e 2,7 GJ/t de aço laminado, conforme o valor adotado para eficiência da geração elétrica (40% e 60%). Foram avaliados quatro processos: produção de placas finas, produção de placas finas com redução do núcleo líquido, lingotamento de chapas e fundição por spray.

- Técnicas que reduzem as temperaturas requeridas em diferentes etapas do processo: o processo de redução direta, que já é comercial, promove a redução do minério a temperaturas inferiores à de fusão. Laminação sem fusão pode ser feita através da metalurgia do pó, que já é comercial para alguns produtos especiais.
- Tecnologias que recuperam e aplicam calor a altas temperaturas: como recuperação do calor de gases de combustão; a recuperação de calor de sólidos não é muito relevante. A TABELA 2.37 relaciona essas técnicas.

Entre 65 e 75% do calor sensível das escórias podem ser recuperados. Ao ser feita granulação do material, o calor é cedido por convecção.

O calor sensível do sinter é parcialmente recuperado no refrigerador e utilizado no pré-aquecimento de ar de combustão. A maior quantidade que pode ser recuperada exige o emprego de técnicas avançadas de resfriamento e sinterização em uma única máquina.

Para impedir perda de calor sensível de lingotes, pode ser usada a técnica chamada carregamento a quente, onde os lingotes são transportados em túnel isolado e inseridos quentes no forno de reaquecimento. Após a laminação, normalmente o material é resfriado com spray de água, cuja temperatura de saída fica entre 70 e 80°C e o calor pode ser recuperado. Mesmo assim ainda há muita perda, que pode ser reduzida com o uso de bombas de calor, já que a temperatura do aço é em torno de 800°C na saída do lingotamento. Podem ser usados a caldeira de radiação ou o resfriador de placas.

AKIYAMA e YAGI (1998) estudaram os limites de redução de consumo de energia e de emissão de CO₂ no processo de fabricação de ferro. Registram que a indústria japonesa de ferro também tem feito esforços contínuos para economizar energia e, conseqüentemente, reduzir as emissões de CO₂. Como resultado, os níveis de emissão de 1995 caíram 15% comparados com os de 1970. A queda

foi devida, principalmente, à redução da taxa de combustível no alto-forno e a melhorias na recuperação de calor.

TABELA 2.37
Técnicas de Recuperação de Calor de Gases de Processo e de Sólidos

| operação unitária | fluxo quente | calor sensível (GJ/trs) | exergia (GJ/trs) | temp.máx. (°C) | técnica | estágio de desenvolvimento |
|-------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------|----------------|---|----------------------------|
| coqueria | coque quente | 0,24 | 0,14 | 1100 | extinção | comercial |
| | GCO | 0,24 | 0,12 | 700 | recuperação de calor | paralisada |
| sinterização | gás de resfriamento da sinterização | 0,97 | 0,28 | 350 | sinterização avançada | comercial |
| | gás exaustão sinterização | 0,23 | 0,12 | 350 | emissão otimizada | demonstração |
| alto-forno | GAF | 0,82 | 0,33 | 500 | TRT, com limpeza a seco | comercial |
| | escória | 0,39 | 0,26 | 1300 | caldeira de radiação | protótipo P&D paralisado |
| aciaria BOF | GAC | 0,19 | 0,12 | 1200 | recuperação do gás | comercial |
| | escória | 0,02 | 0,01 | 1500 | caldeira de radiação | protótipo P&D paralisado |
| lingotamento | lingotes | 1,39 | 1,06 | 1600 | caldeira de radiação com tubos de calor | comercial |
| | | | | | caldeira de resfriamento da placa | |
| laminação | aço laminado | 1,04 | 0,62 | 900 | spray de água e bombas de calor | comercial |
| total | | 5,53 | 3,06 | | | |

FONTE: DE BEER et al., 1998, p.189

No período, novas tecnologias foram estabelecidas nas usinas integradas: CQD (Coke Dry Quench) – extinção do coque com gás inerte; TRT (Top-gas Recovery Turbine) – turbina de topo do alto-forno, e OG (Oxygen Converter Gas Recovery) – recuperação de gás de aciaria, além de recuperação de calor de fornos e da sinterização. No estudo, foi sugerida a adoção de outras medidas de efficientização, como recuperação do gás de coqueria, atualmente já realizada em diversas empresas, recuperação de calor sensível da escória, aumento da injeção de carvão pulverizado, pré-aquecimento da sucata, produção de oxigênio com alta eficiência e produção de metanol do gás de alto-forno. Além disto, a redução da ganga do minério e da cinza do carvão antes do aquecimento, levam a menores formação de escória e necessidade de carvão. Como exemplo, foi calculada a necessidade de carvão para um aço com teor de carbono de 4,8%. Se não houvesse

formação de escória, o consumo específico de carvão mínimo teórico seria de 361 kg/t de metal líquido. Como comparação, foi registrado que as empresas japonesas atingiram índices entre 380 e 400 kg/t metal líquido na década de 80.

A planta típica analisada pelos autores, com indicação dos fluxos internos e externos, é apresentada na FIG. 2.14.

2.4 Análise exergética

Este item apresenta os conceitos utilizados em análises exergéticas, a formulação teórica e empírica e trabalhos e resultados disponíveis na bibliografia internacional.

2.4.1 Conceitos

KOTAS (1995) classifica as diversas formas de energia como:

- Ordenadas
 - potencial (gravitacional, elétrica, magnética);
 - cinética (escoamento laminar).

Essas formas podem ser completamente convertidas em trabalho mecânico e possuem as características:

- em um processo reversível, uma forma pode ser completamente convertida em outra.
- a transferência de energia ordenada entre dois sistemas aparece nas fronteiras como trabalho e não como fluxo de calor.
- a transferência reversível de energia ordenada ocorre sem modificação na entropia dos sistemas e pode ser analisada pela Primeira Lei da Termodinâmica.
- durante transferência de energia de alto grau entre dois sistemas, não são utilizados parâmetros do ambiente.

- Desordenadas
 - energia interna;
 - radiação térmica;
 - energia química;
 - energia de escoamento turbulento.

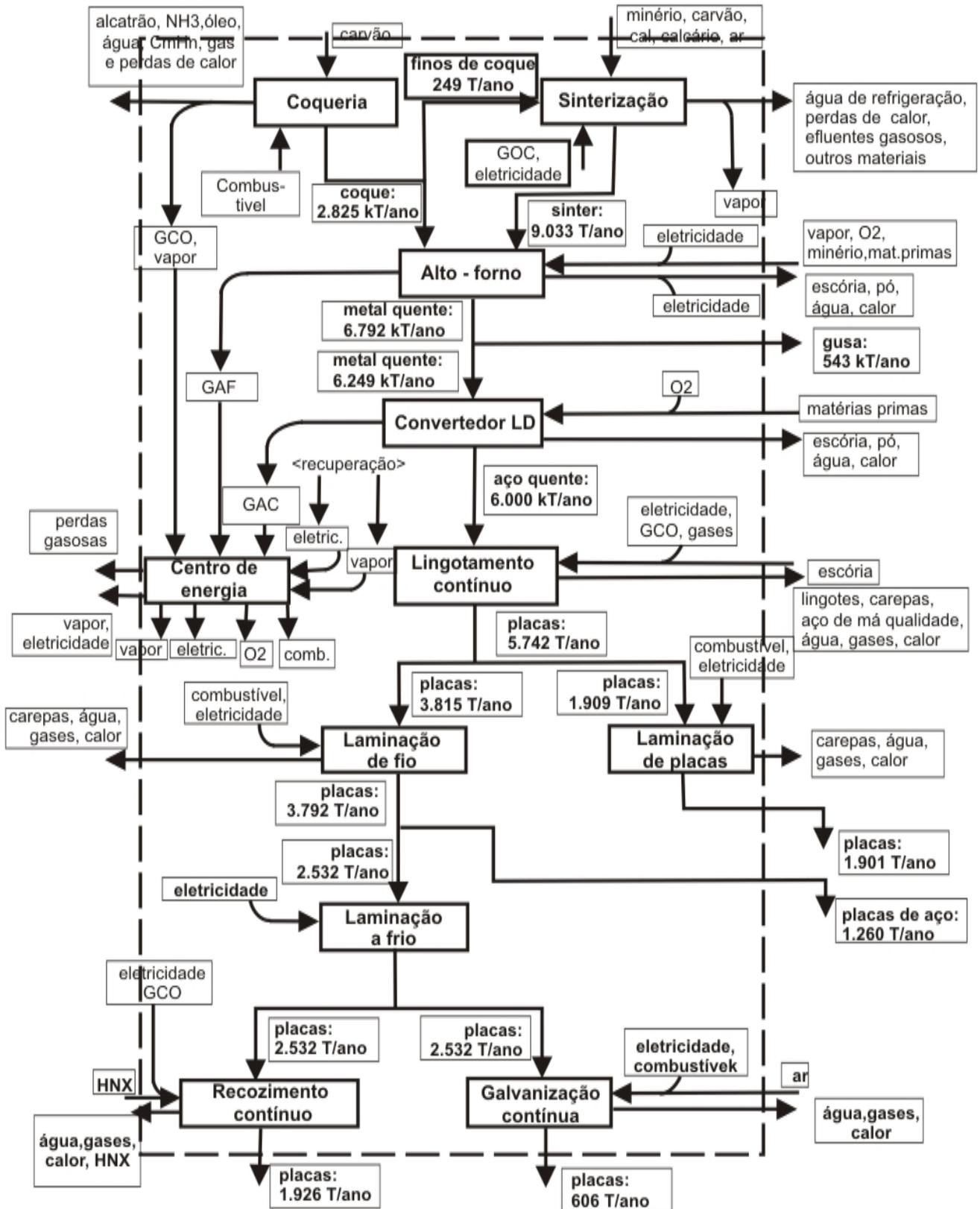


FIGURA 2.14 - Fluxos Típicos em Empresa Japonesa

FONTE - AKIYAMA e YAGI, 1998, p.901

O autor também define exergia como o trabalho máximo que uma dada forma de energia pode realizar, tendo como referência as condições do ambiente. O balanço de exergia é semelhante ao de energia. A principal diferença está no fato que o balanço de exergia, fundamentado na Segunda Lei da Termodinâmica, expressa a degradação da energia, ao passo que o balanço de energia é baseado na Lei da Conservação da Energia.

As formas ordenadas de energia não são caracterizadas pela entropia. Essas formas tem qualidade imutável e são completamente conversíveis, por meio de trabalho, em outras formas diferentes de energia.

A qualidade das formas desordenadas de energia, que são caracterizadas pela entropia, é variável. Depende tanto da forma de energia em si (química, térmica, etc.), quanto do agente de transporte da energia. Depende, ainda, das condições do ambiente.

Os termos considerados em um balanço de exergia, em regime permanente, são:

- exergia associada à transferência de calor: é o máximo trabalho que pode ser extraído de uma quantidade de calor que atravessa a superfície de controle, usando-se o ambiente como um reservatório de energia térmica de grau zero.

$$\varepsilon^Q = Q_r \tau \quad \text{onde :} \quad (2.1)$$

$$\tau = 1 - \frac{T_0}{T_r} \quad (\text{temperatura exergética}) \quad (2.2)$$

ε^Q é a exergia associada à transferência de calor;

Q_r é a quantidade de calor transferida de um reservatório r ;

T_0 é a temperatura do ambiente;

T_r é a temperatura do reservatório r .

- exergia associada ao trabalho transferido – realizado ou recebido pelo sistema;
- exergia associada ao fluxo de massa em regime permanente (física + química): é a maior quantidade de trabalho que se pode obter quando o fluxo passa de seu estado inicial ao estado morto, interagindo somente com o ambiente. Na ausência de efeitos nucleares, magnetismo, eletricidade e tensão superficial, o fluxo de exergia é:

$$\varepsilon_K + \varepsilon_P + \varepsilon_{ph} + \varepsilon_0, \quad \text{onde:} \quad (2.3)$$

ε_K é a exergia cinética;

ε_P é a exergia potencial;

ε_{ph} é a exergia física e representa a máximo trabalho que pode ser obtido quando o fluxo passa de seu estado inicial para o estado do ambiente (P_0, T_0), interagindo somente com este;

ε_0 é a exergia química e representa a diferença entre a exergia do fluxo no estado do ambiente (P_0, T_0) e no estado morto (equilíbrio irrestrito como o ambiente). Corresponde ao máximo trabalho que pode ser obtido quando o fluxo é levado do estado do ambiente ao estado morto através de processo envolvendo transferência de calor e trocas somente com o ambiente.

Assim, o fluxo de exergia é composto, pela exergia química e pelos termos:

$$\varepsilon_K = \frac{V_0^2}{2}; \text{ onde } V_0^2 \text{ é a velocidade média do escoamento.} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon_P = gz_0; \text{ onde } g \text{ é a aceleração da gravidade e } z_0 \text{ é a altitude acima do nível do mar.} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{ph} = (h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2); \text{ onde } h_1 \text{ e } h_2 \text{ são as entalpias específicas do fluido no estado 1 e no estado 2;} \quad (2.6)$$

s_1 e s_2 são entropias específicas do fluido no estado 1 e no estado 2.

Para um gás perfeito, a exergia física é:

$$\varepsilon_{ph} = c_p(T - T_0) - T_0 \left[c_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - R \ln\left(\frac{P}{P_0}\right) \right]; \quad (2.7)$$

onde c_p é o calor específico; T é a temperatura absoluta do gás; P é a pressão absoluta do gás.

Esta equação mostra que, à temperatura e pressão ambientes, a exergia física do gás é nula.

Ainda segundo KOTAS (1995), a exergia física, em sua definição mais geral, pode ser expressa, na forma molar, como:

$$\tilde{\varepsilon}_{ph} = (\tilde{h} - \tilde{h}_0) - T_0(\tilde{s} - \tilde{s}_0) \quad (2.8)$$

Pode ser usada com dados tabelados para vapor, água e outros líquidos e sólidos. Para um gás ideal, a exergia física pode ser mais convenientemente expressa como:

$$\tilde{\varepsilon}_{ph} = \tilde{c}_p^\varepsilon (T - T_0) + \tilde{R}T_0 \ln \frac{P}{P_0}, \text{ onde:} \quad (2.9)$$

\tilde{c}_p^ε é a capacidade exergetica média molar isobárica. Os valores são disponíveis em tabelas para diversos gases usuais.

A exergia física de uma mistura de N gases pode ser expressa como:

$$(\tilde{\mathcal{E}}_{ph})_M = \sum_{i=1}^N x_i \tilde{\mathcal{E}}_i^{\Delta T} + \tilde{R}T_0 \ln \frac{P}{P_0}, \text{ onde:} \quad (2.10)$$

$\tilde{\mathcal{E}}_i^{\Delta T}$ é o componente térmico da exergia física do gás i.

Para valores tabulados das capacidades exergéticas, pode ser usada a forma alternativa da equação:

$$(\tilde{\mathcal{E}}_{ph})_M = (T - T_0) \sum_{i=1}^N x_i \tilde{c}_{P,i}^{\epsilon} + \tilde{R}T_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (2.11)$$

ou:

$$(\tilde{\mathcal{E}}_{ph})_M = \sum_{i=1}^N x_i [\tilde{c}_P^h (T - T_0) - T_0 \tilde{c}_P^s \ln(\frac{T}{T_0})]_i + \tilde{R}T_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (2.12)$$

onde x_i é a fração molar do i-ésimo componente da mistura.

A exergia química molar é:

$$\tilde{\mathcal{E}}_0 = RT_0 \ln \left(\frac{P}{P_{00}} \right) \quad (2.13)$$

onde R é a constante específica dos gases ideais; P_{00} é a pressão parcial das substâncias gasosas de referência sob consideração, como componentes da atmosfera.

Corresponde ao trabalho por mol da substância, obtido na expansão exotérmica de T_0, P_0 a T_0, P_{00} , P_{00} sendo a pressão parcial da substância no ambiente.

No caso de combustíveis gasosos, a exergia química corresponde ao valor da Função de Gibbs, ΔG_{0gas} , mais a diferença entre a exergia dos produtos da combustão, $Exergasprod$, e a exergia do Oxigênio envolvido na reação, $Exergasref$.

$$\tilde{\mathcal{E}}_{0gás} = -\Delta G_{0gás} + Exergasprod - Exergasref \quad (2.14)$$

A exergia química molar de um combustível gasoso envolve complicações adicionais, porque os combustíveis não fazem parte do sistema de substâncias comuns do meio ambiente (KOTAS, 1995).

A exergia química de misturas de gases ideais, como combustíveis gasosos e produtos de combustão, é dada por:

$$\tilde{\varepsilon}_{0M} = \sum_i x_i \tilde{\varepsilon}_{0,i} + RT_0 \sum_i x_i \ln(x_i) \quad (2.15)$$

- Irreversibilidade: para região de controle, pode ser calculada pela relação de Gouy-Stodola :

$$\dot{I} = T_0 \left[\sum_{out} \dot{m}_e s_e - \sum_{in} \dot{m}_i s_i - \sum_r \frac{\dot{Q}_r}{T_r} \right] \quad (2.16)$$

onde \dot{m} e s representam, respectivamente, a vazão de massa e a entropia do fluido, e os subscritos e e i indicam condições de saída e de entrada.

Em uma região de controle, o balanço de exergia em regime permanente, sem a presença de reações químicas, é dado por:

$$\dot{E}_i + \dot{E}^Q = \dot{E}_e + \dot{W}_x + \dot{I}, \text{ onde:} \quad (2.17)$$

$$\dot{E}_i = \sum_{in} \dot{m} \varepsilon \text{ é a exergia dos fluxos de entrada} \quad (2.18)$$

$$\dot{E}_e = \sum_{out} \dot{m} \varepsilon \text{ é a exergia dos fluxos de saída} \quad (2.19)$$

ε é a exergia específica, dada por:

$$\varepsilon = (h - T_0 s) - (h_0 - T_0 s_0) + \frac{V_0^2}{2} + gz_0 \quad (2.20)$$

A transferência total de calor para o volume de controle é:

$$\dot{E}^Q = \sum_r \left[\dot{Q}_r \frac{T_r - T_0}{T_r} \right] \quad (2.21)$$

s é a entropia,

\dot{Q}_r é a quantidade de calor transferida ao volume por um reservatório térmico

T_r é a temperatura do reservatório térmico

T_0 é a temperatura de referência

\dot{W}_x é o trabalho realizado pelo volume;

\dot{I} é a irreversibilidade.

O autor aborda também as irreversibilidades que ocorrem em um processo de combustão adiabática. Os processos de combustão são usualmente acompanhados por transferência de calor, atritos de fluidos e misturas. Há, portanto, mais de uma forma de irreversibilidade presente. Em princípio é impossível avaliar qual é a parcela da irreversibilidade total devida a cada uma das causas. Por isto, o processo de combustão pode ser analisado considerando, primeiramente, que se trata de um processo adiabático e que as irreversibilidades devidas ao atrito e à mistura são desprezíveis.

O processo de combustão adiabático, correspondente a um sistema aberto, está apresentado no diagrama T-s da FIG. 2.15. Os reagentes se encontram nas condições ambientes, R₀, e os produtos da combustão deixam o processo nas condições P₂.

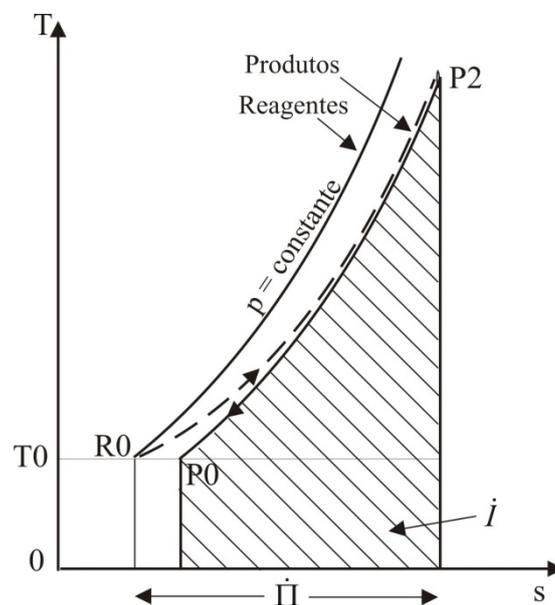


FIGURA 2.15 - Processo de Combustão Isobárico, Adiabático

FONTE - KOTAS, 1995, p. 151

Pelo balanço de exergia, a irreversibilidade é:

$$\dot{I} = \dot{E}_{R0} - \dot{E}_{P2} \quad (2.22)$$

Ou, pela equação de Gouy Stodola, sem troca de calor,

$$\dot{I} = T_0 \dot{\Pi} = T_0 (\dot{S}_{P2} - \dot{S}_{R0}) \quad (2.23)$$

A variação total da entropia é muito maior do que a diferença de entropia entre os produtos e reagentes na condição ambiente ($\dot{S}_{P0} - \dot{S}_{R0}$).

Além da irreversibilidade inerente ao processo de combustão, há ainda outras causas de irreversibilidade. Dentre elas destaca-se a perda de calor, que pode ser avaliada aproximadamente por:

$$\dot{I}^0 = \dot{Q}_0 \frac{(T_m - T_0)}{T_m} \quad (2.24)$$

Onde T_m é a temperatura média do processo de combustão e T_0 é a temperatura ambiente.

Um modo usual de reduzir a irreversibilidade é o pré-aquecimento dos reagentes. Para isto é comum a utilização do calor dos próprios produtos da combustão, após sua utilização térmica e antes de seu descarte para a atmosfera.

Neste trabalho, as irreversibilidades estão classificadas, segundo sua origem, em **irreversibilidades de fluxos e outras irreversibilidades**.

As irreversibilidades de fluxos são aquelas que aparecem nos balanços das regiões de controle associadas a fluxos de massa que não incluem produtos. Nos processo siderúrgicos, podem ser citados, como exemplos, as emissões atmosféricas de produtos de combustão, vazamentos, descarbonação de calcário, lamas e escórias.

Quanto às outras irreversibilidades, incluem as destruições de exergia em decorrência de processos tais como combustão, etapas de aquecimento seguidas por resfriamento de equipamentos, como fornos, e de materiais, transporte de materiais quentes e perdas de calor para o ambiente. Os aquecimentos seguidos por resfriamentos estão presentes na siderurgia integrada entre as etapas sucessivas do processo produtivo, a saber, coqueificação de carvão, calcinação de calcário, sinterização de minério, redução de minério, produção, lingotamento e laminação do aço.

Em todos os tipos de irreversibilidade, existem as intrínsecas e as evitáveis. As intrínsecas correspondem às necessidades mínimas teóricas de destruição de exergia para a realização de um dado processo. Dependem, portanto, da tecnologia empregada e das características do produto.

As irreversibilidades evitáveis são as que podem ser eliminadas sem alteração da tecnologia usada e do produto fabricado. São tipicamente evitáveis as que podem ser eliminadas ou reduzidas através de sistemas e métodos adequados de controle, melhor isolamento térmico ou aproveitamento de calores sensíveis para pré-aquecimentos, por exemplo.

BILGEN e KAYGUSUZ (2008) demonstraram a aplicação do conceito de exergia para melhorar a compreensão das propriedades do carvão, especialmente no que se refere à exergia química e à exergia química específica. Os estudos e cálculos feitos pelos autores mostraram que a composição química do carvão influencia fortemente os valores da exergia química. A exergia do carvão é relacionada às razões H/C e O/C. Altas proporções de hidrogênio e ou oxigênio geralmente reduzem o valor da exergia. Altos conteúdos de umidade e ou de cinza também levam a baixos valores de exergia química. No trabalho, foram calculadas exergias químicas de carvões através de equações disponíveis na literatura para detectar e avaliar quantitativamente o efeito das irreversibilidades decorrentes de imperfeições termodinâmicas dos processos.

A análise de Segunda Lei é especialmente importante nos processos químicos em que ocorrem reações, tal como a queima de combustíveis, pois permite a determinação da parcela da disponibilidade energética do combustível que é destruída durante a reação química irreversível e não pode ser convertida em trabalho devido ao acréscimo de entropia. A análise de Primeira Lei, ou seja, pela conservação de energia, não fornece meios para identificar irreversibilidades.

Os autores chamam a atenção para o fato de que a análise exérgica permite avaliar quantitativamente as causas dos decréscimos de exergia decorrentes de imperfeições termodinâmicas dos processos térmicos e químicos. A exergia de um sistema é uma medida da qualidade da energia, pois é determinada pelo menor trabalho necessário para produzir a substância em um estado específico a partir de espécies presentes no ambiente, por meio de processos reversíveis nos quais calor e massa são trocados somente com o ambiente.

O estudo calculou dados de exergia para carvões turcos terciários.

A exergia química dos combustíveis foi calculada a partir das seguintes equações:

- Para o combustível sozinho, no estado morto :

$$\bar{e}_F^{CH}(T_0, p_0) = \bar{g}_F(T_0, p_0) - \left(\sum_P v_\lambda \mu_\lambda^0 - \sum_R v_l \mu_l^0 \right) \quad (2.25)$$

Onde:

$\bar{e}_F^{CH}(T_0, p_0)$ é a exergia química molar do combustível,

$\bar{g}_F(T_0, p_0)$ é a função de Gibbs molar do combustível;

v são os coeficientes estequiométricos por mol de combustível;

μ são os potenciais químicos.

- Para os combustíveis, em geral, a exergia química pode ser calculada pela expressão:

$$\bar{e}_F^{CH} = \left[\bar{g}_F + \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{g}_{O_2} - a \bar{g}_{CO_2} - \frac{b}{2} \bar{g}_{H_2O(l)} \right] (T_0, p_0) + \left\{ a \bar{e}_{CO_2}^{CH} + \frac{b}{2} \bar{e}_{H_2O(l)}^{CH} - \left(a + \frac{b}{4} \right) \bar{e}_{O_2}^{CH} \right\} \quad (2.26)$$

O primeiro termo do segundo membro desta expressão envolve as funções de Gibbs do combustível e dos produtos da queima e o último termo refere-se às exergias químicas desses produtos.

- Para combustíveis baseados em carvão mineral, a partir de seus poderes caloríficos: foi usada a definição convencional de exergia química, qual seja, que é o máximo trabalho que pode ser obtido da substância, a partir de seu equilíbrio químico com o ambiente, a temperatura e pressão constantes, o que foi descrito como:



onde, C_F , C_l e C_λ representam, respectivamente, o combustível, os reagentes e os produtos no ambiente; v_l e v_λ são os coeficientes estequiométricos dos reagentes e produtos, por mol de combustível.

A exergia química é dada por:

$$\bar{e}_F^{CH}(T_0, p_0) = \bar{g}_F(T_0, p_0) - \left(\sum_P v_\lambda \mu_\lambda^0 - \sum_R v_l \mu_l^0 \right) \quad (2.28)$$

onde μ é o potencial químico em kJ/kmol e o subscrito 0 refere-se ao estado padrão.

Os autores salientam que a exergia dos combustíveis corresponde aos recursos necessários para prover a exergia dos produtos. Com a reação química da combustão, as ligações intramoleculares se quebram e os átomos e elétrons se rearranjam para formar os produtos. Há rápida oxidação dos elementos do combustível, que leva à liberação de energia.

- Para o carvão seco e livre de cinzas:

$$e_{DAF}^{CH} = (HHV)_{DAF} - T_0 [s_{DAF} + \nu_{O_2} \bar{s}_{O_2} - \nu_{CO_2} \bar{s}_{CO_2} - \nu_{H_2O} \bar{s}_{H_2O} - \nu_{SO_2} \bar{s}_{SO_2} - \nu_{N_2} \bar{s}_{N_2}] +$$

$$+ [\nu_{CO_2} \bar{e}_{CO_2}^{CH} + \nu_{H_2O} \bar{e}_{H_2O}^{CH} + \nu_{SO_2} \bar{e}_{SO_2}^{CH} + \nu_{N_2} \bar{e}_{N_2}^{CH} - \nu_{O_2} \bar{e}_{O_2}^{CH}] \quad (2.29)$$

sendo o Poder Calorífico Superior, do carvão seco e livre de cinzas, HHV_{DAF} , calculado por:

$$(HHV)_{DAF} = [152,19H + 98,767] \left[\left(\frac{C}{3} \right) + H - \frac{(O-S)}{8} \right] \quad (2.30)$$

H, C, O e S são as frações em massa de hidrogênio, carbono, oxigênio e enxofre.

Como alternativa e somente com o propósito de comparações entre combustíveis, no trabalho foi usada a equação:

$$HHV = 341C + 1323H + 68S - 15,3A - 120(O + N) \quad (2.31)$$

Para o cálculo da entropia absoluta para o carvão seco e livre de cinzas, foi usada:

$$s_{DAF} = c[37,1653 - 31,4767e^{(-0,564682 \frac{h}{c+n})} + 20,1145 \frac{o}{c+n} + \dots + 54,31111 \frac{n}{c+n} + 44,6712 \frac{s}{c+n}] \quad (2.32)$$

A partir das equações acima, a exergia específica do carvão é estimada, em MJ/kg, por meio de:

$$e^{CH} = (\%m_{DAF}) e_{DAF}^{CH} + (\%m_{H_2O} / M_{H_2O}) \bar{e}_{H_2O(l)}^{CH} \quad (2.33)$$

SZARGUT e STEWARD (1988) também apresentam expressões para determinação de exergias químicas de combustíveis, com base em método estatístico.

Para carvão betuminoso, linhito, coque, turfa e alcatrão, a exergia química é dada por:

$$\varepsilon_{o,c} = (PCI_c + h_{lv})\beta + (\varepsilon_{0,s} - PCI_s)z_s + \varepsilon_{0,cinza}z_{cinza} + \varepsilon_{0,h_2o}z_{h_2o} \quad (2.34)$$

Sendo, para o alcatrão :

$$\beta = 1,0401 + 0,1728 \frac{z_{H2}}{z_c} + 0,0432 \frac{z_{O2}}{z_c} + 0,2169 \frac{z_s}{z_c} (1 - 2,0628 \frac{z_{H2}}{z_c}) \quad (2.35)$$

e, para os combustíveis sólidos:

$$\beta = 1,0437 + 0,1896 \frac{z_{h2}}{z_c} + 0,0617 \frac{z_{o2}}{z_c} + 0,0428 \frac{z_{n2}}{z_c} \quad (2.36)$$

Foram apresentados diversos exemplos de análises exérgicas de processos, tais como a do sistema de geração de energia elétrica com turbina a vapor representado na FIG.2.16.

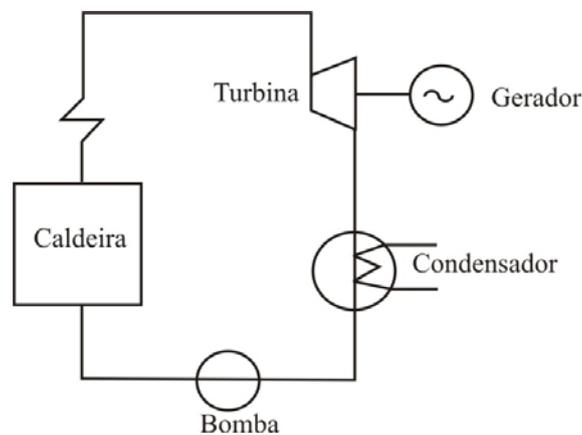


FIGURA 2.16 - Sistema de Geração de Energia Elétrica a Vapor
 FONTE - SZARGUT e STEWARD, 1988, p.141

A eficiência exérgica da planta foi expressa pelos autores como:

$$\eta = \frac{N}{(\dot{F}b_F + \dot{m}_f b_f + \dot{m}_w b_w)} \quad (2.37)$$

onde:

N é a potência elétrica liberada;

b_F é a exergia específica do combustível;

\dot{m}_f, b_f são, respectivamente, o fluxo de massa e a exergia específica da água de reposição.

\dot{m}_w, b_w são, respectivamente, o fluxo de massa e a exergia específica da água de reposição do sistema fechado de resfriamento.

Normalmente, o primeiro termo do denominador é muito maior que a soma dos outros dois, que, por isto, podem ser desprezados.

No sistema considerado, os valores usuais das perdas energéticas e exergéticas foram representados nos diagramas de Sankey e de Grassmann da FIG. 2.17 e da FIG. 2.18, respectivamente.

A comparação entre os dois diagramas mostra que, enquanto a maior perda de energia ocorre no condensador, através do calor rejeitado, a maior perda exergética aparece na caldeira, devido às irreversibilidades do processo. A grande quantidade de calor rejeitado no condensador é consequência das irreversibilidades presentes na caldeira. Já as perdas exergéticas devido a processos irreversíveis no condensador e no sistema de refrigeração são relativamente pequenas.

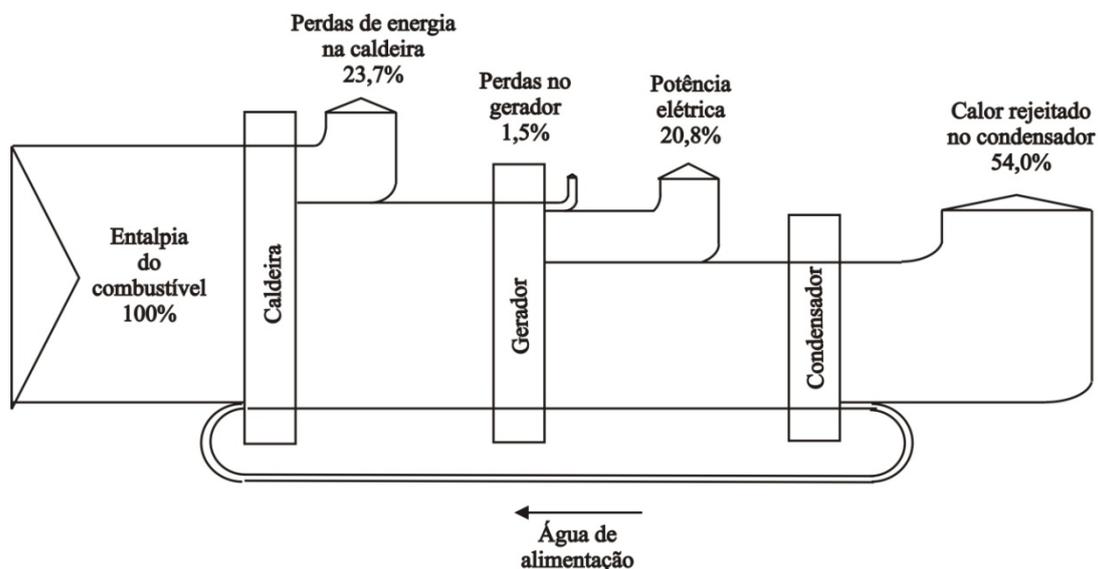


FIGURA 2.17 - Balanço de Energia na Geração Elétrica a Vapor

FONTE - SZARGUT e STEWARD, 1988, p.141

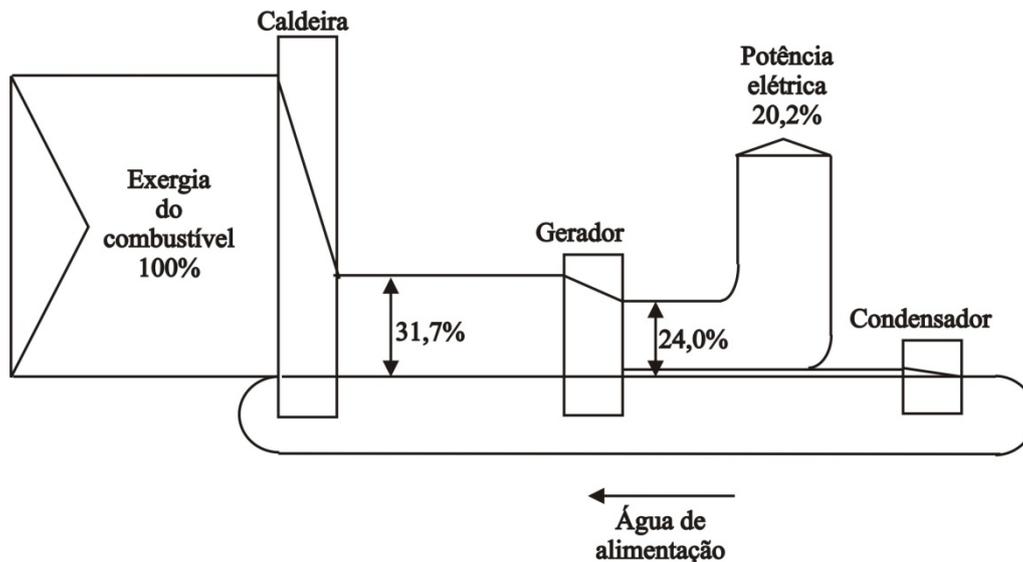


FIGURA 2.18 - Balanço de Exergia na Geração Elétrica a Vapor

FONTE - SZARGUT e STEWARD, 1988, p.141

2.4.2 Aplicações do conceito de exergia na indústria siderúrgica

COSTA et al. (2001) analisaram as perdas exergéticas e as eficiências referentes a diferentes rotas de produção de aço. As etapas de lingotamento, laminação e acabamento não foram contempladas. O estudo objetivou a realização de inventário do ciclo de vida, LCI, sob o enfoque de balanço exergético.

As perdas incluíram as principais matérias-primas, subprodutos, resíduos e alguns outros materiais envolvidos no processo, tais como ferroligas, dolomita, nitrogênio, refratários, ar comprimido, vapor, gases combustíveis, materiais reciclados, eletrodos de grafite e água.

As perdas exergéticas, apresentadas na TAB. 2.38, representam a diferença entre as entradas e saídas de exergia em cada etapa.

NOGAMI et al. (2004) apresentaram balanços exergéticos para coqueria e pequeno alto-forno (de 60 a 550 m³ de volume), como mostrado na TAB. 2.39 e na TAB. 2.40. No caso do alto-forno, foram comparados os desempenhos exergéticos com a utilização de coque e de carvão vegetal como termo-redutor.

Dentre as conclusões, foi citado que, apesar de o alto-forno a carvão vegetal requerer maiores entalpia e exergia de entrada do que o alto-forno a coque, as eficiências são comparáveis.

TABELA 2.38
Perdas de Exergia por Etapa Produtiva

| Produto | Unidade do produto | Entrada do produto | Perda de exergia |
|-----------------------|--------------------|-----------------------|------------------|
| | | unidade/t aço líquido | GJ/t aço líquido |
| Mineração de calcário | t | 0,447 | 0,97 |
| Calcinação | t | 0,065 | 0,05 |
| Minério de ferro | t | 1,633 | 0,14 |
| Óleo combustível | t | 0,035 | 0 |
| Gás natural | m ³ | 46 | 0,15 |
| Sistema de potência | kWh | 274 | 1,36 |
| Planta de oxigênio | m ³ | 86 | 0,20 |
| Pelotização | t | 0,381 | 0,23 |
| Sinterização | t | 1,132 | 2,20 |
| Carvão mineral | t | 0,676 | 0,13 |
| Coqueria | t | 0,412 | 2,64 |
| Sucata | t | 0,124 | 0 |
| Alto-Forno | t | 0,976 | 3,43 |
| BOF | t | 1 | 1,41 |
| Perdas totais | | | 12,92 |

FONTE: COSTA et al., 2000, p.373

A perda de exergia no sistema a carvão vegetal totaliza 4,52 GJ/t de gusa líquido, contra 4,29 GJ/t de gusa líquido no sistema a coque, incluindo a coqueria, o forno de aquecimento, a sinterização e o alto-forno. O processo a carvão vegetal apresenta também a vantagem de fixar carbono nas áreas florestadas, sendo menos agressivo sob o enfoque ambiental.

TABELA 2.39
Balanço Exergético de Coqueria

| Material | Fluxo | Exergia (MJ/t de metal quente) |
|-----------------|---------------------|--------------------------------|
| entradas | | |
| carvão | 552 kg | 17.429 |
| gás combustível | 341 kg | 1.168 |
| ar de combustão | 357 Nm ³ | 2 |
| eletricidade | | 7 |
| pré-tratamento | | 23 |
| total | | 18.692 |
| saídas | | |
| coque | 419 kg | 12.602 |
| GCO | 183 Nm ³ | 2.950 |
| gás de exaustão | 582 Nm ³ | 97 |
| subprodutos | 66 kg | 2.455 |
| total | | 18.104 |
| perdas | | 525 |

FONTE: NOGAMI et al., 2004, p.1649

TABELA 2.40
Balanço Exergético de Alto-Forno

| Material | Exergia (MJ/t de metal quente) | |
|--------------------------|-----------------------------------|------------------------|
| | Forno a coque | Forno a carvão vegetal |
| entradas | | |
| matérias-primas | 335 | 188 |
| Coque/carvão | 11.415 | 16.345 |
| carvão pulverizado | 3.135 | - |
| ar | 1.105 | 762 |
| eletricidade | 155 | 180 |
| total | 16.145 | 17.488 |
| saídas | | |
| metal quente | 8.121 | 8.410 |
| escória | 519 | 252 |
| GAF | 5.551 | 6.498 |
| pó | 71 | 224 |
| eletricidade | 112 | |
| perdas térmicas | 52 | |
| outros não identificados | 522 | |
| total | 14.948 | 15.384 |
| perdas | 1.197 | 2.148 |

FONTE: NOGAMI et al., 2004, p.1650

O balanço exergético apresentado por DE BEER et al. (1998) está detalhado na TAB. 2.41.

TABELA 2.41
Balanço Exergético da Usina Siderúrgica Teórica do IISI

| Entradas | Exergia GJ/trs | Saídas | Exergia GJ/trs |
|--------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| carvão | 20,20 | aço laminado | 6,62 |
| sucata | 1,87 | alcatrão | 0,92 |
| minério | 0,22 | GCO exportado | 0,84 |
| fluxantes | 0,20 | aço coletado | 0,76 |
| GLP | 0,05 | finos de coque | 0,72 |
| ar – vários fluxos | 0,03 | escória de AF | 0,56 |
| pellets | 0,03 | benzol | 0,25 |
| oxigênio | 0,01 | GAC exportado | 0,14 |
| | | vapor de média pressão | 0,10 |
| | | total de produtos úteis | 10,9 |
| | | perdas externas | 5,47 |
| | | perdas internas | 6,15 |
| total | 22,60 | total | 22,6 |

FONTE: DE BEER et al., 1998, p.147

As perdas de exergia, classificadas como externas e internas, correspondem, respectivamente, à terminologia adotada neste trabalho de irreversibilidades de fluxo e outras irreversibilidades. Juntas, representam 11,62 GJ por tonelada de aço bruto. A eficiência exergética é, portanto, de 48,23%.

No trabalho realizado por AKIYAMA e YAGI (1998) com o propósito de determinar a carga de carvão para que ocorra a mínima destruição exergetica, foi desenvolvido um modelo teórico para analisar as necessidades exergeticas, considerando as cinco diferentes reações que ocorrem no alto-forno, ou seja, redução, combustão completa do carbono, combustão incompleta do carbono, produção de metal quente e produção de escória. Foi considerado um aço com 95,2% de ferro e 4,8% de carbono. Para cada reação foram feitos os balanços de entalpia e exergetica, não tendo sido consideradas perdas térmicas. As variações entálpicas e exergeticas adotadas correspondem às mínimas necessárias para que as reações ocorram.

Na elaboração dos balanços, o estudo considerou as restrições impostas pela primeira e segunda leis da termodinâmica, bem como as restrições impostas à taxa de utilização do gás no forno para que sejam observados o equilíbrio Fe-O-C e a equação de Boudouard, para que não haja precipitação de carbono. Foram obtidas as equações para cálculo da temperatura do processo, demanda de carvão e consumo mínimo teórico de exergetica, em função dos parâmetros do sistema. Os autores encontraram um valor de temperatura mínima teórica para o processo de 983 K. A metodologia de análise exergetica adotada, através de diagramas entalpia x exergetica, é descrita por SATO (2004).

Na temperatura acima e com volume de escória de 250 kg/tmq, foi calculada uma necessidade de carbono de 382 kg/tmq, sendo a taxa de utilização de gás de 0,69. Para esta mesma temperatura, se não houvesse formação de escória, a necessidade de carbono seria a mínima teórica, de 361 kg.

A composição da escória produzida pela ganga do minério e pela cinza do carvão é de 43% de CaO, 35% de SiO₂, 15% de Al₂O₃ e 7% de Mg. O volume total de escória é um parâmetro do método.

Finalmente, foi calculado um consumo exergetico mínimo teórico de 1.458 MJ por tonelada de metal quente, considerando condições de operação do alto-forno citadas anteriormente e aço com 4,8% de carbono. Esse valor é inferior aos encontrados na prática. A parcela maior de perda exergetica ocorre na redução do óxido de ferro.

O documento refere-se a estudo anterior dos mesmos autores, mostrando que, em 1993, o consumo exergetico total, considerando além do alto-forno, a coqueria, outros fornos, a sinterização, a pelotização e a produção de oxigênio, a indústria siderúrgica japonesa apresentava uma perda exergetica entre 8,2 e 9,0 GJ/t de metal líquido. Este valor é de 5,5 a 6 vezes maior do que o mínimo teórico. Entretanto, o estudo mostra que, considerando somente o alto-forno e o sopro de ar, a perda de exergetica é de aproximadamente 1,6 vezes a perda teórica, tendo sido concluído que os fornos modernos são eficientes e que melhorias demandarão novas tecnologias.

2.5 Mecanismos de desenvolvimento limpo

A maior parte da irradiação infravermelha que a Terra emite é absorvida pelo vapor d'água, pelo dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa – GEE, que existem naturalmente na atmosfera. Esses gases impedem que a energia passe diretamente da superfície terrestre para o espaço.

O Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE (2008), do Ministério de Ciência e Tecnologia, publicou um manual de capacitação sobre mudanças do clima, do qual foram extraídas as informações apresentadas a seguir .

O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima das Nações Unidas, que avalia periodicamente o estado do conhecimento sobre o tema, desde fevereiro de 2007 concluiu que está ocorrendo mudança do clima. Foi identificada uma inequívoca diferença entre o clima com e sem o aumento da concentração atmosférica dos GEE não controlados pelo Protocolo de Montreal, em consequência das atividades antrópicas.

Os acordos internacionais tratam, principalmente, dos gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa, quais sejam:

- Dióxido de carbono (CO₂)
- Metano (CH₄)
- Óxido nitroso (N₂O)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Hexafluoreto de enxofre (SF₆)

As principais atividades humanas produtoras de emissões de GEE são: geração de energia pela queima de combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural), desmatamento e produção de cimento, que produzem emissões de dióxido de carbono; decomposição anaeróbica de matéria orgânica, que produz emissões de metano em aterros sanitários e na pecuária; uso de fertilizantes nitrogenados, que produz emissões de óxido nitroso; e processos industriais que produzem emissões de perfluorocarbonos, hidrofluorocarbonos e hexafluoreto de enxofre. A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, tratado em vigor desde 1994, tem como objetivo estabilizar a concentração atmosférica dos GEE.

A história recente das iniciativas internacionais na área de mudança do clima inclui os diversos eventos e acordos, iniciados em 1971 com a elaboração do Estudo do Impacto do Homem sobre o Clima, pela Academia de Ciências da Suécia.

Em 1992 foi feita a abertura para assinaturas da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (*United Nations Framework Convention on Climate Change-UNFCCC*), por ocasião da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a Rio-92. A Convenção entrou em vigor em 1994 e, finalmente, entrou em vigor o Protocolo de Quioto em 2005.

Como são tratados-quadro, a UNFCCC e o Protocolo de Quioto estipularam a realização periódica de Conferências das Partes, responsáveis pela edição das normas que compõem os detalhes do sistema normativo.

O Protocolo proporcionou um mecanismo de "mercado de emissão". As obrigações de redução pelas partes constituem cotas nacionais de emissão. Se um país não usa completamente sua cota de emissão, pode transferir ou vender porções não utilizadas para outro país.

O instrumento econômico que nasceu do Protocolo de Quioto foi o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL (WWF, 2008), proposto por países industrializados para facilitar os respectivos cumprimentos de metas estipuladas pelo Protocolo. Na essência, os países industrializados ganham créditos por seus investimentos em projetos de redução de emissão feitos nos países em desenvolvimento. As regras gerais que guiam a implementação do MDL estão de acordo com o tratado de Marrakesh.

Foi também criado o mecanismo de Implementação Conjunta – IC. Países desenvolvidos e países com economia em transição podem, em conjunto, implementar projetos de redução de emissões de gases do efeito estufa no território de um país e então compartilhar os efeitos desses projetos durante o período de 2008 a 2012, através da transferência internacional das unidades de redução de emissão geradas por tais projetos.

O regime criado pelo Protocolo de Quioto estabeleceu metas quantitativas de limitação e redução de emissões nacionais para os países membros da OCDE, países do Leste Europeu e a antiga União Soviética, relacionados no Anexo I da Convenção. Essa meta corresponde a uma redução média global de GEE de 5,2% abaixo das emissões de 1990, entre 2008 e 2012, período conhecido como o primeiro período de compromisso. Para os países não incluídos no Anexo I, como o Brasil, são

mantidos os compromissos gerais constantes da Convenção, que incluem o desenvolvimento de programas nacionais de mitigação de emissões.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL, aplicável no caso do Brasil, gera Reduções Certificadas de Emissões – RCE.

Nos países do Anexo I, o Protocolo de Quioto registrou o consenso de que as reduções de emissões seriam medidas, considerando-se a soma das emissões nacionais de todos os gases e em todos os setores de atividade. As reduções são expressas em relação a uma referência fixa em unidades de toneladas de dióxido de carbono equivalente por ano. A referência adotada toma por base as emissões de 1990, e as metas quantitativas são expressas em termos de porcentagens.

Nos países que não constam do Anexo I, as reduções de emissões são consideradas em projetos ou programas individuais. Além disso, a referência, adotada, denominada a linha de base, são as emissões que ocorreriam na ausência do projeto de MDL. O conceito gerou a necessidade de regulamentação sobre a escolha da linha de base, a partir da qual são contadas as reduções de emissões.

A estrutura institucional, que possibilita o funcionamento desse instrumento financeiro, é constituída, no Brasil, pela Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima, que aprova os projetos no país, e pelas Entidades Nacionais Designadas, EOD, que fazem a validação, verificação e certificação. Estas instâncias estão subordinadas ao Conselho Executivo do MDL, que faz a supervisão do MDL, credencia as EOD's, registra os projetos, emite os certificados e aprova, consolida ou propõe metodologias. O Conselho, por sua vez, é subordinado à Conferência das Partes, órgão supremo da UNFCC.

Vários sistemas, inclusive o comércio de emissões, vem sendo desenvolvidos internacionalmente. Alguns desses regimes, embora não aplicáveis ao Brasil, têm importância para a implantação de projetos de MDL no país, pois a sua existência afeta diretamente a demanda por RCE.

O esquema europeu de comércio de emissões, ou *European Trading Scheme* -ETS, consiste em um sistema de restrição de emissões no âmbito europeu, efetuado por regulamentação regional e nacional na Europa. As empresas recebem uma quantidade de permissões de emissão, que podem ser negociadas.

O *Chicago Climate Exchange* – CCX, é um regime voluntário pelo qual as reduções de emissões são comercializadas em bolsa, de acordo com regras diferentes daquelas do regime do Protocolo de Quioto. O regime do CCX exige que sejam demonstrados aumentos do estoque de carbono na área do projeto e que a empresa interessada adote metas de redução de emissões ou de seqüestro de carbono.

Em Nova York e em São Paulo foram introduzidos índices de sustentabilidade (*Dow Jones* e *Bovespa*, respectivamente), sistemas pelos quais as empresas de capital aberto recebem uma classificação. Observa-se que os investidores tendem, cada vez mais, a levar em consideração as políticas das empresas relativas à mudança do clima, assim como os clientes tem levado em conta as políticas sobre mudança do clima dos fornecedores em suas decisões de compra.

Em todo o processo de elaboração de projetos de MDL, um conceito fundamental é o da adicionalidade. Uma atividade de projeto de MDL é adicional se reduzir emissões antrópicas de gases de efeito estufa para níveis inferiores aos que teriam ocorrido na ausência da atividade de projeto de MDL registrada.

Para demonstração e avaliação da adicionalidade de um projeto, o Conselho Executivo do MDL desenvolveu o modelo chamado de “Ferramenta para demonstração e avaliação da adicionalidade”, para uma série de atividades e a “Ferramenta combinada para a identificação da linha de base e demonstração da adicionalidade”, que é complementar. Mesmo assim, nem todas as atividades podem ser incluídas nos modelos já desenvolvidos.

Dois aspectos são ainda exigidos para que uma atividade de projeto MDL seja considerada pelo Conselho Executivo: a participação voluntária das partes envolvidas e a contribuição para o desenvolvimento sustentável, conforme definido pelo país anfitrião.

A fim de viabilizar a operacionalização do MDL, foi necessário estabelecer regras claras e órgãos competentes para regulamentar, administrar, implementar e também executar os procedimentos exigidos. A regulamentação e a operacionalização ocorreram tanto no nível internacional como na estrutura governamental de cada país signatário do Protocolo de Quioto.

O Conselho Executivo deve supervisionar o MDL, sob a autoridade e a orientação da COP/MOP e tem como atribuições, dentre outras:

- aprovar novas metodologias relacionadas com linhas de base, planos de monitoramento e limites de projeto;
- tornar públicas informações sobre as atividades de projeto de MDL que necessitem de financiamento e sobre investidores que estejam buscando oportunidades.

As EOD - Entidades Operacionais Designadas devem, entre outras atividades,

- validar as atividades de projeto de MDL propostas;
- verificar e certificar as reduções das emissões antrópicas de gases de efeito estufa por fontes;
- cumprir as leis aplicáveis das partes anfitriãs das atividades de projeto de MDL e verificar seu cumprimento nos processos de validação e verificação realizados;
- demonstrar que ela e seus sub-contratantes não têm conflitos de interesse reais ou potenciais com os participantes das atividades de projeto de MDL para as quais tenha sido selecionada para desempenhar funções de validação ou verificação e certificação;
- manter uma lista disponível para o público de todas as atividades de projeto de MDL para as quais tenha realizado validação, verificação e certificação;
- tornar públicas as informações obtidas dos participantes de projeto de MDL que não tenham sido identificadas como proprietárias ou confidenciais, exceto se exigido por lei, conforme requisitado pelo Conselho Executivo.

No Brasil, as competências de Autoridade Nacional Designada (AND) são exercidas pela Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC).

Dentre suas atribuições, merecem registro:

- definir critérios de elegibilidade adicionais aos considerados pelos organismos da Convenção, encarregados do MDL, previsto no Artigo 12 do Protocolo de Quioto da CQNUMC, conforme estratégias nacionais de desenvolvimento sustentável;
- apreciar pareceres sobre projetos que resultem em reduções de emissões e que sejam considerados elegíveis para o MDL, e aprová-los, se for o caso.

Atualmente existem quatro tipos de atividades de projeto no âmbito do MDL, todas visando a obtenção de reduções de emissões de GEE. Duas delas são mais relevantes para o setor industrial

O primeiro tipo de atividade é o chamado MDL de grande escala ou de larga escala, que se caracteriza pelo fato de não haver limites para sua extensão. As metodologias utilizadas nesse tipo de projeto devem ser submetidas pelo proponente, tornando-se públicas após sua aprovação.

Atualmente existem 49 metodologias aprovadas e 14 metodologias consolidadas para projetos de grande escala aprovadas pelo Conselho Executivo do MDL. Caso não haja, entre as metodologias aprovadas, uma que se aplique à atividade de projeto proposta, o proponente pode optar por elaborar e submeter uma nova metodologia.

Um projeto de grande escala também pode ter seu limite fragmentado entre inúmeras atividades, unidas em um único projeto de MDL. Não há limites para o número ou tamanho das atividades produtivas que se pretende unir em uma única atividade de projeto de MDL.

A validação e a verificação de projetos no âmbito do MDL de grande escala devem, necessariamente, ser realizadas por Entidades Operacionais Designadas distintas, sem exceção. O objetivo dessa norma é permitir que o trabalho de validação executado por uma EOD possa ser certificado por uma consultoria externa – outra EOD – que, em tese, poderia detectar falhas ou erros não observados pela primeira EOD, durante um ciclo de verificação.

Os projetos de MDL de pequena escala surgiram para viabilizar os projetos de MDL em empresas de menor porte. Assim, visando reduzir os custos transacionais, alguns procedimentos foram simplificados, criando os seguintes tipos de projetos:

- atividades de projetos do tipo I: projetos de energia renovável com uma capacidade máxima de produção de 15 MW (ou um equivalente adequado);
- atividades de projetos do tipo II: melhoria da eficiência energética que reduzam o consumo de energia, no lado da oferta e/ou da demanda, em até o máximo de 60 GWh por ano (ou um equivalente adequado);
- atividades de projetos do tipo III: outras atividades de projetos que resultem em reduções de emissão inferiores ou equivalentes a 60 kt de equivalentes de CO₂ anualmente.

Conceitualmente, um projeto de MDL de pequena escala assemelha-se a um de grande escala, porém com limitação de tamanho estabelecida em sua metodologia e restrição quanto à subdivisão de uma atividade em várias de pequena escala. Além de maior facilidade na aplicação, essas metodologias são mais simples e flexíveis do que as metodologias de grande escala .

As metodologias de pequena escala são desenvolvidas pelo Conselho Executivo e disponibilizadas ao público. Caso um desenvolvedor de projeto tenha necessidade de uma metodologia específica ou uma alteração em uma metodologia de pequena escala, ele deve encaminhar suas solicitações ao Conselho Executivo, sugerindo alteração na metodologia existente ou nova metodologia, conforme Anexo II da decisão 4/CMP.1 da CQNUMC.

A TABELA 2.42 mostra as diferenças entre os projetos de pequena e grande escala.

TABELA 2.42
Principais Diferenças entre os Projetos de MDL de Pequena e o de Grande Escala

| Item | Pequena escala | Grande escala |
|-------------------------|------------------------|----------------------------|
| tamanho | há limitação | não há limitação |
| metodologias | elaboradas pelo CQNUMC | elaboradas pelo proponente |
| desagrupamento | pode ser autorizado | não permitido |
| validação e verificação | pode ser uma única EOD | EOD diferentes |

FONTE: CGEE, 2008, p.77

Com autorização do Conselho Executivo, as atividades de projeto de MDL de pequena escala podem ser validadas e monitoradas pela mesma EOD.

Os países signatários do Protocolo de Quioto geraram mercados de créditos de carbono que representaram em 2006, negócios da ordem de US\$ 24,6 milhões, como exposto na TAB. 2.43.

TABELA 2.43
Mercados de Créditos de Carbono

| | 2005 | | 2006 | |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
| | Emissões (MtCO ₂) | Valor (MUS\$) | Emissões (MtCO ₂) | Valor (MUS\$) |
| Permissões | | | | |
| EU ETS | 321 | 7.908 | 1.101 | 24.357 |
| NSW | 6 | 59 | 20 | 225 |
| CCX | 1 | 3 | 10 | 38 |
| UK – ETS | 0 | 1 | na | na |
| Subtotal | 328 | 7.971 | 1.131 | 24.620 |
| Transações baseadas em projetos | | | | |
| MDL primário | 341 | 2.417 | 450 | 4.813 |
| MDL secundário | 10 | 221 | 25 | 444 |
| JI | 11 | 68 | 16 | 141 |
| Outros | 20 | 187 | 17 | 79 |
| Subtotal | 382 | 2.894 | 508 | 5.477 |
| TOTAL | 710 | 10.864 | 1.639 | 30.098 |

FONTE: CGEE, 2008, p.102

Foi observada a predominância de poucos países entres os principais ofertantes de projetos e RCE, sendo eles: China, Índia, Brasil, Coréia do Sul e México. Esses cinco países respondem por cerca de 80% das RCE a serem geradas até 2012.

A concentração dos projetos e das RCE em poucos países pode ser explicada pelos seguintes fatores:

- ambiente político-institucional adequado;
- características das matrizes energéticas dos países;
- possibilidade de geração de projetos que reduzem as emissões de GEE com elevado potencial de aquecimento global, como, por exemplo, HFC-23, que geram muito mais RCE que os que não usam esses gases.

O GRÁFICO 2.2 mostra que a variação nos preços pagos pelas RCE nos anos de 2005 e 2006. Os projetos que ainda não obtiveram a emissão das RCE (*pre-RCE*) são comercializados com preços inferiores aos projetos que já obtiveram as RCE, pois ainda existem riscos associados à validação, aprovação, registro, verificação e certificação.

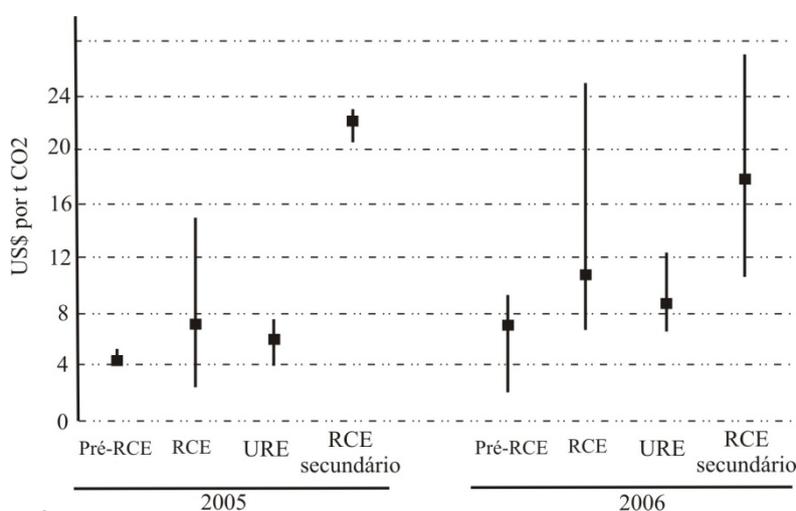


GRÁFICO 2.2 - Preços Observados no Mercado de Carbono
Fonte - CGEE, 2008, p.105

O mercado secundário de RCE consiste primordialmente de portfólios de RCE com entrega garantida, oferecidos por empresas com alta credibilidade no mercado. Uma vez que existe a garantia da entrega e o comprador está isento dos riscos de desempenho do projeto, os preços cobrados tendem a ser maiores.

O valor médio das RCE, em 2006, foi de US\$ 10,90, ou 52% de aumento em relação a 2005, enquanto que o preço das *Emission Reduction Units* - ERU, provenientes de projetos de Implementação Conjunta, foram de US\$ 8,70, representando um aumento de 45% em relação a 2005. Os aumentos podem ser explicados pelo aumento da demanda decorrente do aumento das emissões dos países desenvolvidos.

No mercado de carbono do âmbito do Protocolo de Quioto, a demanda por RCE depende do aumento das emissões de GEE em relação a 1990, nos países Anexo I; das metas de redução de cada país; do custo das reduções domésticas e das estratégias adotadas em cada país para o cumprimento das metas. Já no mercado voluntário, a demanda por projetos de mitigação das emissões de GEE depende das características do programa adotado.

O principal desafio para a correta elaboração e comercialização de atividades de projetos de MDL é a aplicação das metodologias de linha de base e de monitoramento. Nas metodologias ou nas ferramentas aprovadas pelo Comitê Executivo do MDL, existe a descrição de todos os passos necessários para a determinação do cenário de linha de base e a comprovação da adicionalidade. Deve ser registrado que não são todas as atividades de projeto que têm suas metodologias aprovadas.

As metodologias de linha de base e de monitoramento para projetos de larga escala, pequena escala e as consolidadas, aprovadas até 25 de agosto de 2009, apresentam a distribuição por atividade mostrada na TAB.2.44.

TABELA 2.44
Metodologias de Linhas de Base

| Escopo | Nº de metodologias |
|---|---------------------------|
| Energia na indústria (fontes renováveis e não renováveis) | 44 |
| Distribuição de energia | 2 |
| Demanda de energia | 3 |
| Indústrias de manufatura | 4 |
| Indústrias químicas | 5 |
| Construção | 6 |
| Transporte | 7 |
| Produção mineral e mineração | 8 |
| Produção de metais | 9 |
| Emissões fugitivas de combustíveis | 10 |
| Emissões fugitivas da produção e consumo de halocarbonos e hexafluoretos de enxofre | 11 |
| Uso de solventes | 12 |
| Disposição e tratamento de resíduos | 13 |
| Florestamento e reflorestamento | 14 |
| Agricultura | 15 |

Fonte: UNFCCC, 2009

No segmento de produção de metais, somente duas metodologias se referem especificamente a processos siderúrgicos: uma se destina à redução de emissões na produção de ferro esponja e a outra à utilização de carvão vegetal na redução de minério de ferro. No entanto, há diversas metodologias aprovadas que se aplicam a processos presentes na siderurgia integrada, como é o caso de cogeração de energia elétrica, melhoria de eficiência de bombeamento de água, uso de gás natural, entre outros. A grande maioria das metodologias aprovadas até final de 2009 tem alguma relação com o setor energético (UNFCCC, 2009), embora, poucos trabalhos tenham sido voltados à eficiência energética.

O estabelecimento do cenário de linha de base de um projeto de MDL e a comprovação da sua adicionalidade são etapas críticas para sua elaboração e registro no Comitê Executivo. As metodologias existentes levam em conta a Ferramenta de Adicionalidade (*Tool for demonstration and assessment of additionality – Version 05*). Essa ferramenta fornece a estrutura para demonstração de adicionalidade de um projeto e também possibilita a definição do cenário de linha de base.

Recentemente foi criada uma ferramenta unificada para definir o cenário de linha de base e demonstrar a adicionalidade. Ela segue a mesma linha da ferramenta mencionada acima, porém identifica mais claramente onde será estabelecido o cenário de linha de base e onde se demonstra a adicionalidade de um projeto. Ambas as ferramentas prescrevem os seguintes principais passos na demonstração da adicionalidade e na definição do cenário de linha de base:

Passo 1 – Identificação de cenários alternativos

Passo 2 – Análise de barreiras

Passo 3 – Análise de investimento (se aplicável)

Passo 4 – Análise de prática comum

No que se refere ao setor siderúrgico, o uso de energia foi responsável pela emissão de 28.744 milhões de toneladas de CO₂, em 1990, e de 37.787 em 1994. Essas emissões representaram, respectivamente, 2,9 e 3,7% do total do país.

O GRÁFICO 2.3 apresenta dados do inventário de emissões divulgado pela Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado de Minas Gerais, através da Fundação Estadual de Meio Ambiente – FEAM (2008). O setor siderúrgico, no ano de 2005, respondeu por

72,7% das emissões totais do setor energia, principalmente devido ao uso de coque nos processos. As participações dos diversos combustíveis nas emissões constam do GRA. 2.4.

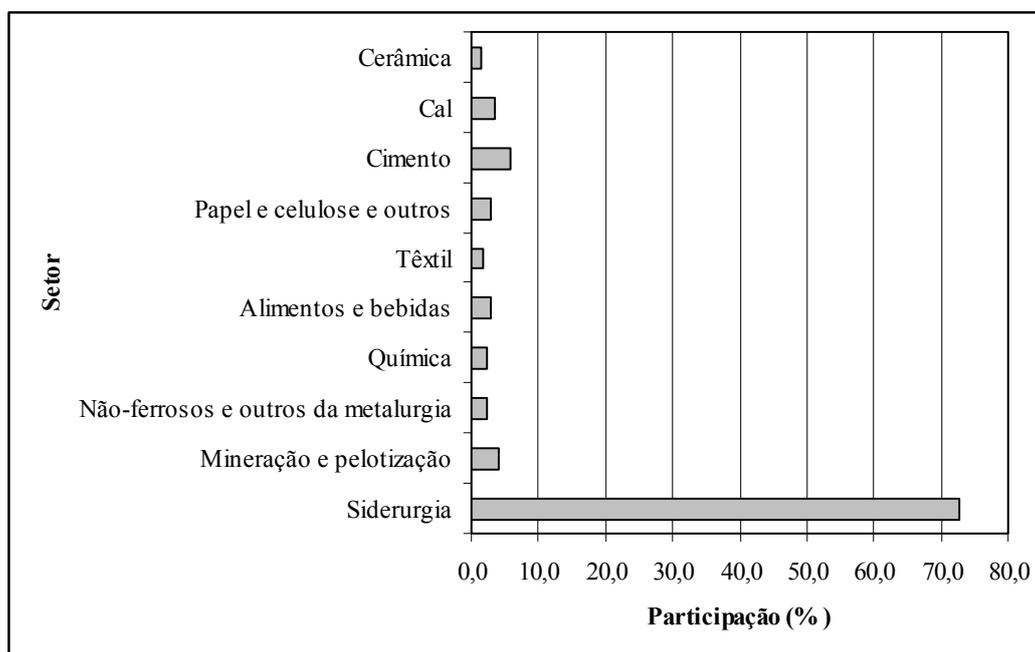


GRÁFICO 2.3 - Participação dos Setores Industriais nas Emissões Totais do Setor de Energia

FONTE - FEAM, 2008, p.3

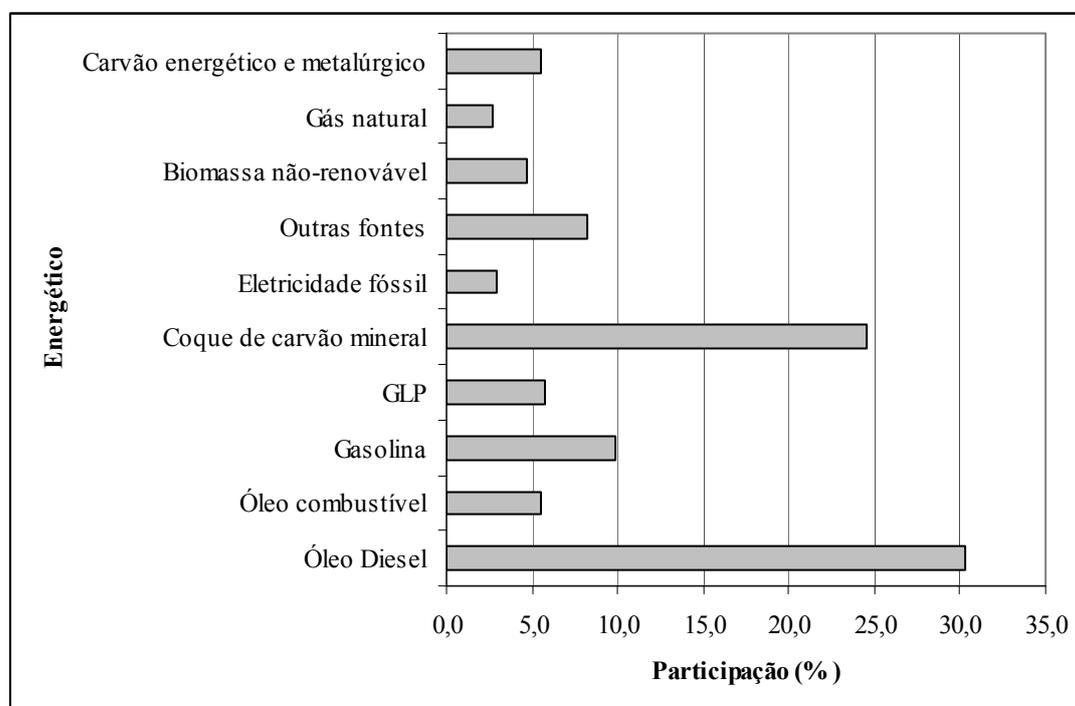


GRÁFICO 2.4 - Participação dos Energéticos nas Emissões Totais do Setor de Energia

FONTE - FEAM, 2008, p.3

Dentro dos escopos definidos para os projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, quatro são explicitamente ligados ao uso da energia, quais sejam: indústria energética, fontes renováveis e não-renováveis; distribuição de energia; demanda de energia; transportes. Um está relacionado à exploração de fontes de energia. Nesses escopos estão incluídos essencialmente a substituição de combustíveis de diferentes intensidades de emissão de gases de efeito estufa, o uso mais eficiente da energia e a redução de perdas. Como referência, a TAB.2.45 apresenta os fatores de emissão de CO₂ por litro de diferentes combustíveis utilizados na indústria, calculados pela SECRETARIA DE ENERGIA, RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO DO ESTADO DE SÃO PAULO (2005) em seu Balanço Energético do Estado de São Paulo – 2006.

Na geração de energia elétrica, os fatores de emissão dependem da eficiência termodinâmica do sistema. Na TABELA 2.46, são apresentados valores característicos de diferentes fontes primárias, para vários valores de eficiência.

TABELA 2.45
Fatores e Coeficientes para Combustíveis

| Energético | Fator de emissão (tCO₂/TJ) | Massa específica (kg/m³) | Poder calorífico inferior (kJ/kg) | Fator de emissão (kgCO₂/l) |
|-------------------------|--|--|--|--|
| Petróleo | 69,7 | 867 | 42.705 | 3,43 |
| Gás Natural | 53,3 | - | 35.818 | - |
| Óleo Diesel | 70,4 | 851 | 42.622 | 3,53 |
| Óleo combustível | 73,5 | 999 | 39.971 | 2,94 |
| Gasolina | 65,8 | 738 | 44.196 | 3,94 |
| GLP | 59,9 | 552 | 46.164 | - |
| Coque de carvão mineral | 102,8 | - | 28.889 | - |
| Carvão vegetal | 104,2 | 250 | 25.602 | - |
| Álcool etílico | 58,5 | 791 | 26.796 | 1,98 |

Fonte : SERHS – SP, 2006, p.126

A linha de base de uma atividade de projeto de MDL é o cenário que representa, de forma razoável, as emissões antrópicas de gases de efeito estufa relevantes (CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, CF₄, C₂F₆, HFC), que ocorreriam na ausência da atividade de projeto proposta, dentro dos limites do projeto. Serve de base tanto para verificação da adicionalidade quanto para a quantificação das Reduções Certificadas de Emissões (RCE) decorrentes das atividades de projeto do MDL. As RCE serão calculadas pela diferença entre as emissões da linha de base e as emissões verificadas em decorrência das atividades de projeto do MDL, incluindo as fugas.

Há que se considerar que o setor energético no Brasil é um dos pioneiros no mundo na utilização de MDL para viabilização de projetos, por exemplo, na geração de eletricidade a partir de bagaço de cana-de-açúcar, resíduos do processamento de madeira e de pequenas centrais hidrelétricas.

TABELA 2.46
Fatores de Emissão por Fonte

| Eficiência(%) | Fator de emissão | | Emissão | | | | | | |
|------------------|------------------|---------|------------------------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|
| | tC/TJ | kgC/MWh | kgC/MWh | | | | | | |
| | 100 | | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| Nafta | 20,0 | 72,0 | 356,4 | 285,1 | 237,6 | 203,7 | 178,2 | 158,4 | 142,6 |
| Gás Natural | 15,3 | 55,1 | 274,0 | 219,2 | 182,7 | 156,6 | 137,0 | 121,8 | 109,6 |
| Óleo Diesel | 20,2 | 72,7 | 360,0 | 288,0 | 240,0 | 205,7 | 180,0 | 160,0 | 144,0 |
| Óleo combustível | 21,1 | 76,0 | 376,0 | 300,8 | 250,7 | 214,9 | 188,0 | 167,1 | 150,4 |
| Carvão | 29,5 | 106,2 | 520,4 | 416,3 | 346,9 | 297,4 | 260,2 | 231,3 | 208,3 |
| | tC/TJ | kgC/MWh | kgCO ₂ /MWh | | | | | | |
| Nafta | 20,0 | 72,0 | 1.306,8 | 1.045,4 | 871,2 | 746,7 | 653,4 | 580,8 | 522,7 |
| Gás Natural | 15,3 | 55,1 | 1.004,8 | 803,8 | 669,8 | 574,1 | 502,4 | 446,6 | 401,9 |
| Óleo Diesel | 20,2 | 72,7 | 1.319,9 | 1.055,9 | 879,9 | 754,2 | 659,9 | 586,6 | 527,9 |
| Óleo combustível | 21,1 | 76,0 | 1.378,7 | 1.102,9 | 919,1 | 787,8 | 689,3 | 612,7 | 551,5 |
| Carvão | 29,5 | 106,2 | 1.908,1 | 1.526,4 | 1.272,0 | 1.090,3 | 954,0 | 848,0 | 763,2 |

FONTE: CGEE, 2008, p.147

A World Meteorological Organization – WMO e o United Nations Environment Programme – UNEP criaram uma organização científica, o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC (2008), com o propósito de fornecer informações sobre mudanças do clima aos tomadores de decisão e outros interessados.

O IPCC vem periodicamente divulgando relatórios com estudos e conclusões relativas à questão climática. O Grupo de Trabalho III em suas contribuições ao Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC,2008; BARKER et al., 2007) abordou, dentre outros, tópicos sobre tendências das emissões de gases de efeito estufa, mitigação em curto e médio prazos em diferentes setores econômicos, até 2030, e mitigação em longo prazo, após 2030.

Na análise do período de 1970 a 2004, a conclusão foi que o maior aumento das emissões globais de gases de efeito estufa, 145%, se deu no setor de oferta de energia. A tendência de longo prazo de redução da intensidade de carbono da oferta de energia se reverteu após 2000. As diferenças entre os países em termos de renda per capita, emissões per capita e intensidade de energia continuam sendo significativas. Em 2004, os países do Anexo I da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima representavam 20% da população mundial, produziram 57% do Produto Interno Bruto mundial, com base na Paridade do Poder de Compra (PIBppc) e responderam por 46% das emissões globais de gases de efeito estufa. Uma série de políticas, inclusive sobre mudança do clima, segurança energética e desenvolvimento sustentável, tem sido eficaz na redução das emissões de gases de efeito estufa em diferentes setores e em muitos países. A escala dessas medidas, contudo, ainda não foi grande o suficiente para fazer frente ao aumento das emissões globais.

A principal conclusão, que sugere ser o mercado de carbono crescente no futuro de curto, médio e longo prazos, é que, com as atuais políticas de mitigação da mudança do clima e práticas relacionadas de desenvolvimento sustentável, as emissões globais de gases de efeito estufa continuarão aumentando nas próximas décadas. Os cenários elaborados projetam um aumento das emissões globais de gases de efeito estufa na linha de base em uma faixa de 9,7 GtCO₂-eq a 36,7 GtCO₂-eq (25-90%) entre 2000 e 2030. Nesses cenários, as projeções indicam que os combustíveis fósseis manterão sua posição dominante na matriz energética global até 2030 e posteriormente; as emissões de CO₂ entre 2000 e 2030 provenientes do uso de energia aumentarão de 45 a 110%. Dois terços a três quartos desse aumento das emissões de CO₂ relacionadas com a energia serão provenientes das regiões não-Anexo I e que a média das emissões de CO₂ per capita relacionadas com a energia permanecerá substantivamente mais baixa (2,8 a 5,1 tCO₂/cap) do que nas regiões do Anexo I (9,6 a 15,1 tCO₂/cap) até 2030.

O relatório conceitua os potenciais de mitigação das emissões em dois níveis:

- potencial de mercado, que é o potencial de mitigação com base nos custos privados e nas taxas de desconto privadas, que poderão ocorrer no âmbito de condições de mercado;
- potencial econômico, que é o potencial de mitigação que leva em conta os custos e benefícios sociais e as taxas de desconto sociais, supondo-se que a eficiência do mercado melhore por meio de políticas e medidas e que as barreiras sejam removidas.

Estudos do potencial de mercado podem ser usados para informar os formuladores de políticas sobre o potencial de mitigação com as políticas e barreiras existentes, enquanto os estudos dos potenciais econômicos mostram o que se pode alcançar se políticas novas e adicionais adequadas forem estabelecidas para remover barreiras e inserir os custos e benefícios sociais. O potencial econômico, portanto, geralmente é maior do que o potencial de mercado.

As avaliações feitas indicam que há um potencial econômico substancial para a mitigação das emissões globais de gases de efeito estufa ao longo das próximas décadas, o qual poderia compensar o crescimento projetado das emissões globais ou reduzir as emissões para níveis inferiores aos atuais.

A realização desse potencial é inicialmente vinculada ao cumprimento das metas do Protocolo de Quioto. Em maio de 2008, o Brasil abrigava 9% dos 285 projetos em desenvolvimento nos diversos

países (MCT, 2009), como apontado na GRA.2.5. O país será ainda responsável por 7% da redução das emissões (4.358 milhões t CO₂eq) que irá ocorrer no primeiro período de obtenção de créditos.

Dos projetos brasileiros, 67% estão voltados à redução de CO₂ e 32% à redução de CH₄. Minas Gerais abriga 13% das atividades de projetos de MDL do Brasil.

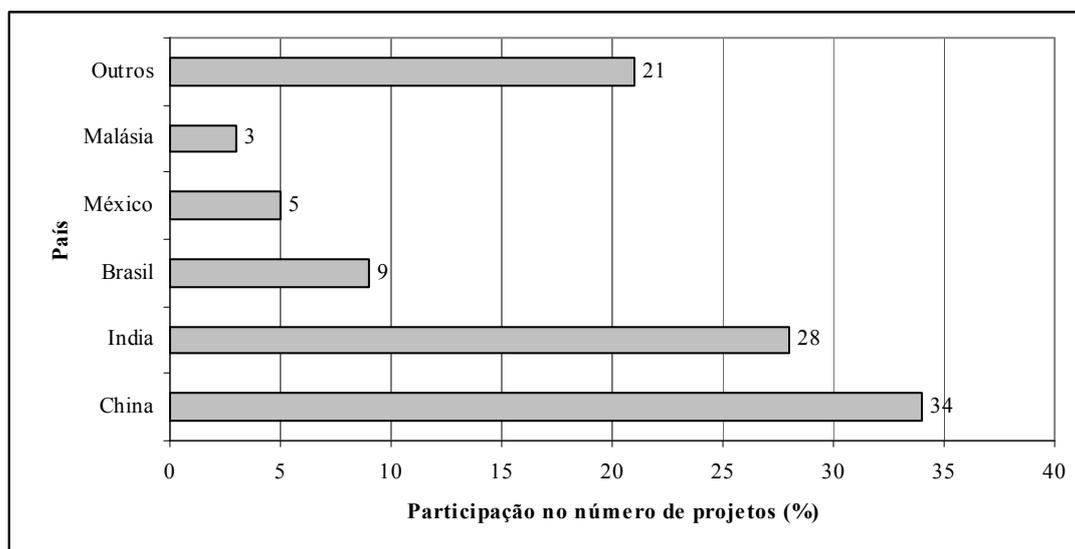


GRÁFICO 2.5 - Atividades de Projetos de MDL no Mundo

FONTE - MCT, 2007, p.4

2.6 Conclusões da revisão bibliográfica

A metodologia de análise do desempenho de empreendimentos industriais a partir da análise exérgica vem aumentando de intensidade nas duas últimas décadas. Constitui-se uma ferramenta importante para facilitar a busca de pontos críticos e desperdícios nos processos produtivos.

Apesar de existirem alguns trabalhos abordando a análise exérgica da siderurgia integrada a coque, não está disponível a descrição de procedimentos para análise completa ou mesmo setorial de uma usina. Além disto os resultados obtidos por diversos autores, apesar de apresentarem coerência numérica, são dependentes da tecnologia das plantas abordadas e dos seus procedimentos operacionais.

A revisão da literatura técnica permite concluir que é importante a avaliação exérgica dos setores industriais, especialmente os energo-intensivos, como é o caso da siderurgia, e que as análises devem ser individuais, já que as oportunidades de melhoria variam caso a caso.

Associada à avaliação de consumo de energia, apresenta-se a questão das emissões de gases de efeito estufa, principalmente o gás carbônico, liberado em grandes quantidades por indústrias que queimam hidrocarbonetos. A minimização do uso de combustíveis é economicamente importante face à competitividade existente no mercado global, onde são comercializados os produtos de aço. É ainda importante sob o enfoque ambiental a redução dos gases de efeito estufa. Neste sentido, é também uma oportunidade de negócios a implementação de projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo.

Para a elaboração de tais projetos, é exigida a apresentação de sua linha de base, que representa o cenário de emissões no horizonte do projeto, correspondente à situação que irá existir caso o projeto não seja realizado. A identificação da linha de base exige uma profunda análise do processo, especialmente de suas emissões, tal como é feito ao longo da montagem de um balanço exergético.

Pelas observações acima, pode-se concluir que o trabalho em questão é relevante e oportuno.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

Na revisão bibliográfica foram descritos os processos industriais envolvidos na produção de aço em usina integrada a carvão mineral. Foram também analisados os balanços de energia e massa usualmente realizados pelas empresas, tendo sido coletados os principais indicadores do setor quanto ao uso de energia e de água.

Após o minério, o carvão é o principal insumo do processo, por isto, foram também pesquisados os carvões ofertados mundialmente, suas análises imediatas e elementares, além dos respectivos poderes caloríficos.

Na seqüência, foram estudados os fundamentos teóricos da análise exergética, que é uma aplicação da Segunda Lei da Termodinâmica, os modelos empíricos adotados por alguns autores, principalmente no cálculo de exergias de misturas e combustíveis, e aplicações práticas do conceito.

No que se refere aos consumos de energia e irreversibilidades de processos, foram pesquisados os valores referentes às melhores práticas, as ações sugeridas para que os menores consumos sejam obtidos, a tecnologia em desenvolvimento e as expectativas futuras de aumento de eficiência energética e exergética no setor siderúrgico.

Paralelamente, foram levantadas as melhores práticas quanto à redução de uso da água na siderurgia integrada e seus efeitos no consumo de água de reposição.

Fechando a revisão bibliográfica, foi analisado o estado-da-arte de elaboração de projetos de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo, sua regulamentação e formatação legal. Esta revisão forneceu os elementos necessários ao estabelecimento das linhas de base que irão permitir, futuramente, a elaboração de projetos de efficientização energética identificados no estudo.

Neste capítulo é apresentada a metodologia adotada para a elaboração das análises exergéticas de uma usina siderúrgica integrada típica. Este tipo de análise visa identificar os pontos críticos de destruição de exergia pela presença de irreversibilidades intrínsecas e evitáveis, com indicação de melhorias, dentro do estado-da-arte do processamento siderúrgico.

Teoricamente, o potencial de otimização de uso de insumos energéticos é definido pelos limites de destruição exergética devida às irreversibilidades intrínsecas, as quais, por sua vez, dependem não só das exigências energéticas associadas a cada reação ou transformação que ocorre no processo, mas também das perdas inerentes à tecnologia disponível para cada etapa do processamento industrial. À exceção do alto-forno, não existem informações bibliográficas dessas demandas exergéticas mínimas teóricas para diversas etapas do processo siderúrgico integrado. Assim, o presente trabalho se propõe, como um primeiro passo, identificar e quantificar as irreversibilidades exergéticas totais da usina e sua distribuição entre os principais conjuntos da etapa produtiva.

Para efetuar-la, os passos seguintes são pré-requisitos:

- elaboração do balanço de massa da unidade industrial;
- elaboração do balanço de energia de unidade industrial;
- elaboração do balanço exergético da unidade industrial;
- análise do balanço exergético das principais etapas de destruição exergética do processo industrial.

3.2 Metodologia de elaboração de balanços de massa, energia e exergia

3.2.1 Balanço de massa

A elaboração de balanços de massa em volumes de controle, com fluxos em regime permanente, é bastante convencional. VAN WYLEN e SONNTAG (1976) apresentam a equação da continuidade aplicada a um volume de controle em regime permanente, a partir das hipóteses:

- o volume de controle não se move em relação ao sistema de coordenadas;
- o estado da massa no volume permanece o mesmo em cada ponto do volume de controle, ao longo do tempo;
- o fluxo de massa e seu respectivo estado, em cada área discreta de escoamento na superfície de controle, não varia com o tempo;
- as taxas nas quais o calor e o trabalho cruzam a superfície de controle permanecem constantes.

A expressão matemática da equação da continuidade é:

$$\sum_{\text{entrada}} \dot{m}_e = \sum_{\text{saída}} \dot{m}_s \quad (3.1)$$

Os índices e e s referem-se, respectivamente, à entrada e à saída de cada volume de controle.

Para realizar o balanço de massa global da unidade industrial, o primeiro passo é levantar os dados quantitativos de todos os insumos, utilidades e matérias primas utilizados em cada um dos setores da indústria, bem como identificar e quantificar os produtos e efluentes sólidos, líquidos e gasosos gerados em cada uma. Os materiais envolvidos no processo estudado estão descritos e quantificados no item 4.

A ordem de grandeza das vazões de água e de efluentes gasosos envolvidos no processo é muito maior que a das massas que participam diretamente da linha de produção do aço, como o carvão, os minérios, fundentes e a cal. Em decorrência, incertezas nas medições de vazão de líquidos ou gases, em faixas usuais nas medições industriais, são equivalentes às massas dos materiais sólidos, podendo mascarar dados importantes ou induzir a conclusões errôneas. Sendo assim, optou-se por adotar os procedimentos:

- o balanço de massa das águas é elaborado a parte;
- é criado um sistema virtual de gases combustíveis, que tem também seu balanço de massa realizado à parte da planta industrial. Este sistema recebe os gases combustíveis gerados na coqueria, alto forno e aciaria, além de gás natural, e nele são realizadas as reações de combustão. É identificado neste trabalho como volume de controle 2, ou VC2.
- No sistema de gases, são determinados os efluentes atmosféricos decorrentes das reações de combustão que ocorrem nos diversos setores da unidade industrial. Para isto, em cada um, são consideradas as misturas de gases e valores de excesso de ar fornecidos pela empresa. A quantificação das massas dos efluentes é feita através de balanços de massa aplicados às reações de combustão completa.
- As diversas áreas de processamento industrial, agrupadas nos setores convencionais descritos anteriormente, constituem o volume de controle 1, ou VC1.

3.2.2 Balanço de energia

A metodologia de elaboração de balanços de energia em volumes de controle operando em regime permanente é também clássica e decorre diretamente da aplicação dos conceitos da Primeira Lei da Termodinâmica.

Para um volume em que há diversos fluxos de massa de entrada e diversos de saída, VAN WYLEN e SONNTAG (1976) apresentam a equação da seguinte forma:

$$\dot{Q} + \sum_{\text{entrada}} \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2g} + z_e \right) = \sum_s \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2g} + z_s \right) + \dot{W} \quad (3.2)$$

Pela natureza da abordagem deste trabalho, os termos de energia cinética e potencial são descartados da equação do balanço, que passa a ser:

$$\dot{Q} + \sum_{\text{entrada}} \dot{m}_e h_e = \sum_s \dot{m}_s h_s + \dot{W} \quad (3.3)$$

No balanço de energia, para que o somatório das entradas de energia seja igual ao de saída, os fluxos de água e vapor, tratados independentemente nos balanços de massa, devem ser considerados em conjunto com os demais fluxos.

3.2.3 Balanço de exergia

A EQUAÇÃO 2.17, apresentada no item 2.4, é utilizada para elaboração de balanço exergético em volumes de controle, com operação em regime permanente.

Esta grandeza, que é uma propriedade extensiva de um sistema, não pode decrescer, quando se trata de sistema isolado. Os acréscimos de entropia que ocorrem nos sistemas são devidos às irreversibilidades.

Os termos que compõem o balanço são determinados pelo conjunto de equações :

- exergia devida a fluxos de calor: EQ. 2.1 e EQ. 2.2;
- exergia física de materiais: EQ. 2.6;
- exergia física de mistura de gases: EQ.2.9 e EQ. 2.11;
- exergia química de mistura de gases: EQ. 2.15;
- exergia química de carvão e coque de petróleo: EQ. 2.34 e EQ. 2.35;
- exergia química do alcatrão: EQ. 2.36.

Na EQ. 2.11, os valores das capacidades exergéticas médias molares isobáricas, \tilde{c}_p^ε , necessárias para o cálculo das exergias físicas de mistura gasosas, foram tabulados por KOTAS (1995) para alguns gases. Para aqueles não disponíveis, os valores podem ser obtidos por meio da equação:

$$\tilde{c}_p^\varepsilon = \frac{1}{T - T_0} \left[\int_{T_0}^T \tilde{c}_p dT - T_0 \int_{T_0}^T \frac{\tilde{c}_p dT}{T} \right] \quad (3.4)$$

As exergias de saída dos volumes de controle são agrupadas em três diferentes categorias: exergias dos produtos e sub-produtos; irreversibilidades de fluxos; outras irreversibilidades, de forma semelhante à adotada por DINCER e ROSEN (2007):

$$\begin{aligned} [\text{exergia de entrada}] &= [\text{exergia de saída nos produtos e sub-produtos}] + \\ &+ [\text{irreversibilidades de fluxos}] + [\text{outras irreversibilidades}] \end{aligned} \quad (3.5)$$

O termo produto refere-se a fluxos de materiais produzidos, bem como a trabalhos mecânicos realizados, eletricidade e a alguns fluxos de calor. Os dois últimos termos da EQ. 3.5 combinados constituem as perdas de exergia. Sob o enfoque exergético, a eficiência do processo é dada por:

$$\eta = \frac{\text{exergia de saída nos produtos e subprodutos}}{\text{exergia de entrada}} \quad (3.6)$$

Este conceito difere da Eficiência Racional, conceituada por KOTAS (1995) como a razão de transferência de exergia associada à correspondente entrada de exergia. Ou seja, as saídas de exergia incluem as exergias de todos os fluxos que deixam o volume de controle e não só as de produtos e sub-produtos, como apresentado na equação (3.7) seguinte.

$$\psi = \frac{\dot{E}_s}{\dot{E}_e} \quad (3.7)$$

Onde s e e referem-se, respectivamente, a saída e entrada do volume de controle.

A eficiência racional não permite identificar o potencial total de melhoria do sistema, uma vez que as irreversibilidades em fluxos ficam incluídas na exergia de saída.

3.3 Desenvolvimento da análise

O objetivo da realização dos balanços de massa, energia da usina e exergia é estimar o potencial de redução do uso de insumos energéticos, através da identificação dos pontos onde existe possibilidade de melhoria do uso de energia seja através de aprimoramentos tecnológicos, seja através de aprimoramentos operacionais.

A metodologia utilizada é constituída por duas etapas, tendo por base os dados operacionais anuais. Na primeira etapa, é feita uma avaliação global da unidade industrial, através dos balanços de massa, de energia e de exergia. É também possível aferir o desempenho dos processos de queima dos gases combustíveis. Os dados permitem identificar e quantificar a exergia incorporada aos produtos e sub-produtos, as irreversibilidades em fluxos, constituídas pela exergia dispensada para o ambiente através dos efluentes e resíduos, e as outras irreversibilidades da planta. Na segunda etapa são identificados os processos críticos de destruição exérgica, o que facilita a proposição de estudos e ações futuras para melhorar o desempenho da empresa.

Através da análise desses resultados, o potencial máximo teórico global de aumento de eficiência exérgica pode ser estabelecido. No entanto, para definir os projetos de melhoria de uso de energia na planta, têm que ser consideradas as limitações impostas pela tecnologia comercialmente disponível e pelas análises econômicas dos investimentos necessários.

Como exposto no item 2.4.1, as irreversibilidades são classificadas em evitáveis e intrínsecas (KOTAS, 1995). As destruições evitáveis são aquelas que podem ser eliminadas e que representam o potencial de aumento de eficiência de um sistema. Quanto às intrínsecas, são as irreversibilidades mínimas necessárias a cada processo, dentro dos limites impostos pelas restrições físicas, tecnológicas, econômicas, etc.

A análise dos resultados considera, separadamente, as irreversibilidades de fluxos, decorrentes da exergia destruída através dos resíduos e efluentes, e as outras irreversibilidades, que não estão associadas a fluxos de massa, mas que ocorrem devido a processos tais como reações químicas e fluxos térmicos.

Na primeira etapa são realizados, complementarmente, balanços do carbono e da água empregada na usina. Ambos constituem as bases para a identificação de melhorias de caráter ambiental, através de redução de emissões de gases de efeito estufa e de uso da água industrial. A quantificação das

emissões de gases de efeito estufa, especialmente de gás carbônico, é fundamental para a identificação da linha de base a ser usada eventualmente para proposição de projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo.

O balanço de carbono também é necessário para acertos nas composições elementares do carvão, coques, alcatrão e óleo leve, presentes no processo, além do fechamento do balanço de massa da coqueria.

Para a elaboração dos balanços, as propriedades termodinâmicas dos materiais envolvidos podem ser obtidas através das bibliotecas disponíveis em INCROPERA e DEWITT (2003), ZARGUT et al. (1988), KOTAS (1995) e no programa Engineering Equation Solver - EES (BECKMAN e KLEIN, 2008). Para os insumos e produtos gasosos, as condições de pressão e de temperatura são fornecidas pela empresa. Os cálculos são realizados com recursos do programa EES (2008) e planilha eletrônica EXCEL do WINDOWS.

Os resultados são analisados e comparados com a literatura internacional, principalmente com os valores das perdas de exergia associadas às melhores práticas, para indicação de ações de melhoria do desempenho exergético da unidade industrial.

4 ESTUDO DE UMA USINA SIDERÚRGICA INTEGRADA

Neste item são relacionados, quantificados e caracterizados os insumos e produtos da usina siderúrgica analisada no trabalho.

4.1 Modelo industrial adotado

As usinas integradas a carvão mineral são usualmente constituídas pelos setores: coqueria, sinterização, calcinação, alto-forno, aciaria, lingotamento e laminação. Em algumas, como é o caso da unidade estudada, há também uma planta carboquímica para destilação do alcatrão gerado na coqueificação do carvão mineral. Por tratar-se de processo energo-intensivo e altamente consumidor de outras utilidades, como gases, há um setor específico para esses insumos, que é o de energia e utilidades.

No que se refere à energia elétrica utilizada pela indústria, além da parcela adquirida da concessionária, há geração em uma unidade termoelétrica a vapor e, em uma turbina de topo, instalada na saída do alto-forno, após o sistema de limpeza de gases.

Os diversos setores da planta industrial analisada estão esquematicamente apresentados na FIG.4.1. A unidade carboquímica foi excluída do estudo e considerada como uma planta industrial independente, desta forma, os subprodutos e utilidades direcionados para a unidade são saídas da usina. Além do alcatrão, são enviados para a carboquímica energia elétrica, gases combustíveis, vapor e água.

Em uma primeira etapa, os processos industriais foram agrupados em dois volumes de controle, chamados, respectivamente, de VC1 e VC2. No VC1 estão incluídos os processamentos de todos os sólidos, líquidos e gases utilizados como insumos e matérias primas por todas as áreas industriais, à exceção do Gás Natural. Os produtos de aço, bem como efluentes do processo são, por consequência, saídas do VC1, inclusive os gases siderúrgicos gerados internamente, a saber, o Gás de Alto-Forno – GAF, o Gás de Aciaria – GAC e o Gás de Coqueria – GCO. No VC2 são tratados todos os processos de queima de gases combustíveis, à exceção da parcela de GCO enviada à carboquímica. Em cada setor industrial, é queimada uma mistura diferente de gases combustíveis,

compostos por proporções distintas de GAF, GAC, GCO e GN, com valores diferentes de excesso de ar. Os gases produzidos nas reações de queima são também lançados a temperaturas diferentes.

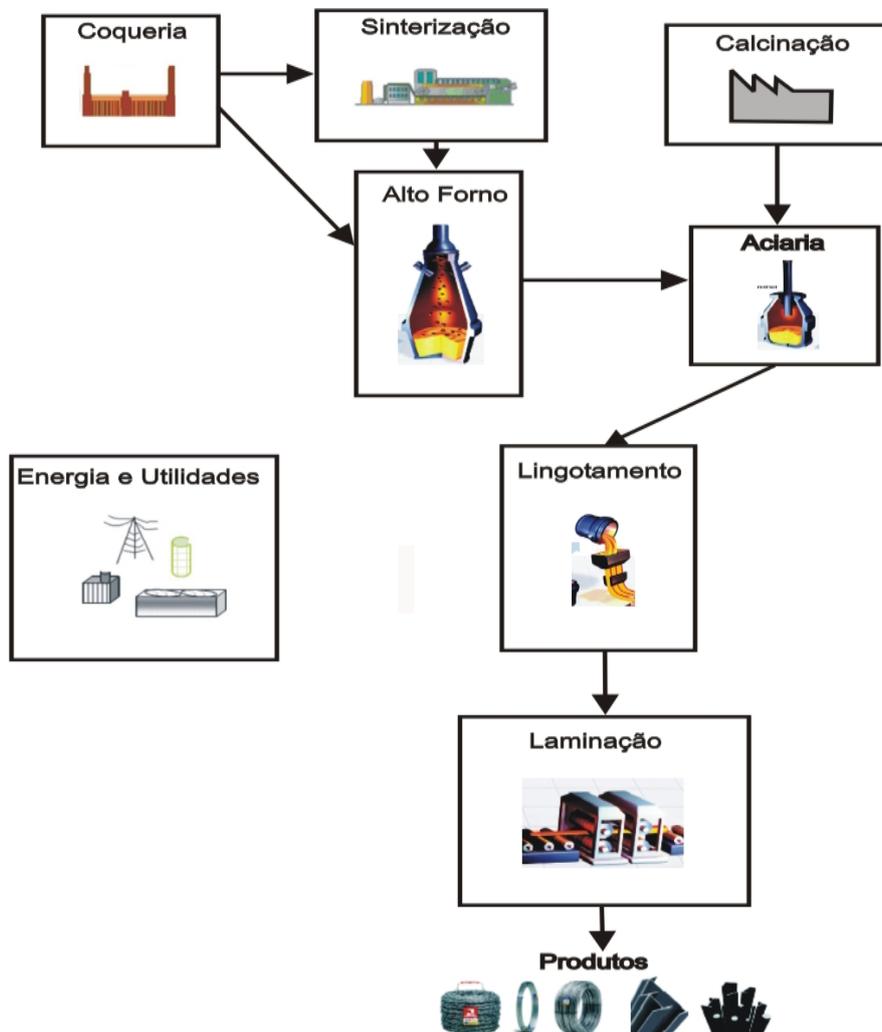


FIGURA 4.1 – Fluxograma do Processo Produtivo Analisado

FONTE: elaboração própria

A turbina de topo da usina tem potência de 11 MW e supre parte dos seus requerimentos de energia elétrica. É movida com o GAF produzido no alto-forno. Além de aproveitar parte da energia de pressão do gás antes que seja enviado ao gasômetro, controla a pressão no forno. A geração elétrica da turbina foi considerada no VC1, portanto, as condições termodinâmicas do GAF, para fins de cálculos nos balanços são aquelas apresentadas a jusante da turbina.

Na segunda etapa, foi efetuada uma análise específica dos diversos setores que compõem a linha de produção da aço.

4.2 Insumos e matérias-primas

A TABELA 4.1 apresenta, por setor da unidade industrial, os principais insumos, produtos, efluente, resíduos e insumos energéticos utilizados.

TABELA 4.1
Fluxos de Entrada e de Saídas dos Setores Industriais

| Setor | Entradas | Saídas |
|------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| sinterização | coque | sinter |
| | fundentes | gases de combustão |
| | aglomerantes | |
| | água industrial | |
| | elementos de ligas | |
| | N ₂ | |
| | ar de combustão | |
| | energia elétrica | |
| | GCO | |
| coqueria | carvão | coque |
| | vapor de baixa pressão | finos de carvão |
| | água industrial | alcatrão |
| | N ₂ | resíduos de alcatrão |
| | ar de combustão | GCO |
| | energia elétrica | |
| | GCO | óleo leve |
| | GAF | |
| alto-forno | carvão pulverizado | ferro gusa |
| | coque | lama |
| | sinter | energia elétrica |
| | ar de processo | GAF |
| | ar de combustão | escória |
| | vapor de baixa pressão | |
| | O ₂ | |
| | N ₂ | |
| | GCO | |
| | GAF | |
| | escória granulada | |
| | outros (calcário, lama, pó, etc.) | |
| | energia elétrica | |
| água industrial | | |
| aciaria | ferro gusa | aço líquido |
| | sucata de ferro | gases de combustão |
| | cal | GAC |
| | minérios | lama |
| | argônio | escória |
| | N ₂ | água recirculada |
| | O ₂ | |
| | ligas | |
| | GCO | |
| | ar de combustão | |
| | energia elétrica | |
| | água industrial | |
| | gás natural | |
| | água recirculada | |
| vapor de baixa pressão | | |

FONTE: comunicação pessoal, 2007

TABELA 4.1
Fluxos de Entrada e de Saídas dos Setores Industriais (continuação)

| Setor | Entradas | Saídas |
|--------------------|---------------------|------------------------|
| lingotamento | aço líquido | tarugos |
| | argônio | gases de combustão |
| | O ₂ | água recirculada |
| | água recirculada | |
| | energia elétrica | |
| | ar de combustão | |
| | GCO | |
| | gás natural | |
| laminação | lingotes | perfis |
| | gás natural | fio máquina |
| | GCO | placas |
| | GAF | blocos |
| | energia elétrica | tarugos |
| | O ₂ | gases de combustão |
| | N ₂ | água recirculada |
| | vapor | |
| | água industrial | |
| | água recirculada | |
| | ar de combustão | |
| | calcinação | calcário |
| água industrial | | CO ₂ |
| energia elétrica | | gases de combustão |
| ar de combustão | | |
| GCO | | |
| outros | | vapor |
| | | água |
| | | energia elétrica |
| | | N ₂ |
| | | argônio |
| | | GCO |
| sistema de energia | energia elétrica | energia elétrica |
| | GAC | vapor de alta pressão |
| | gás natural - GN | vapor de baixa pressão |
| | GAF | O ₂ |
| | argônio | N ₂ |
| | água industrial | argônio |
| | água tratada | ar soprado |
| | condensado de vapor | água industrial |
| | O ₂ | água potável |
| | N ₂ | argônio |
| | ar de combustão | |
| ar soprado | | |

FONTE: comunicação pessoal, 2007

Os insumos e matérias primas utilizados diretamente na fabricação de produtos de aço, apresentados nos subitens seguintes, foram fornecidos pela empresa estudada e correspondem aos valores de 2007, anualizados.

4.2.1 Gases de processo

Os gases utilizados nos processos industriais são apresentados na TAB. 4.2. Neste trabalho, foram tratados como gases ideais, inclusive o ar.

TABELA 4.2

Insumos Gasosos para os Processos Siderúrgicos

| Gás | Volume (Nm³/t gusa) | P (kPa) | T (K) | Densidade (kg/Nm³)(**) | Massa (t/t gusa) |
|----------------------|---|--------------------|------------------|--|-----------------------------|
| Argônio | 0,72 | 980,67 | 298 | 1,783 | 0,0128 |
| O ₂ | 107,80 | 686,47 | 298 | 1,428 | 1,5393 |
| N ₂ | 62,22 | 686,47 | 298 | 1,251 | 0,7783 |
| ar p/ alto-forno (*) | 880,00 | 101,325 | 498 | 1,288 | 11,3344 |
| Total | 1.050,73 | | | | 13,6649 |

(*) 880 Nm³/t de gusa

(**) calculada com o software EES (BECKMAN e KLEIN, 2008)

FONTE: comunicação pessoal, 2008

4.2.2 Líquidos

O consumo total de água na usina, em 2007, foi próximo a 9,4 toneladas por tonelada de ferro gusa produzido.

A água utilizada na empresa é totalmente procedente de nascentes próprias, situadas dentro do terreno industrial. Esta água é tratada em uma estação de tratamento de águas – ETA, sendo que a água usada nas caldeiras é ainda desmineralizada.

Os efluentes líquidos são lançados em curso d'água local, após correção da acidez em uma estação de tratamento de efluentes - ETE.

A água na usina, além da geração de vapor nas caldeiras, é destinada ao consumo humano, sistema de refrigeração direta e indireta, selagem de gás, condicionamento de ar, limpeza das instalações e ao processo de extinção da queima na coqueificação do carvão.

4.2.3 Sólidos

Os insumos e matérias primas sólidos usados em 2007 são constituídos, principalmente, por carvão mineral, minério de ferro, calcário e coque de petróleo. Além desses, são empregados fundentes, aglomerantes e elementos de liga que, em conjunto, respondem por 0,77 toneladas por tonelada de ferro gusa. São eles: dolomita, serpentinito, antracito, hematitinha, quartzo, FeSiMn, FeMn AC, Mn eletrolítico, FeMnMCN, FeSi75, FeCr AC, FeCr BC, Ni eletrolítico, sucata, FeB, FeSi 75 em fio, alumínio, grafite, cálcio silício em fio, dolomita crua, fluorita, nefelina (NaAlSiO₄), cal dolomítica, carbureto de silício, alumina, escória, carbureto de cálcio, fio carbono, outras ligas. Materiais como minério de ferro e carvão mineral possuem procedência e composição variada.

4.2.3.1 Minério de ferro

As composições médias do minério de ferro e do sinter são apresentadas na TAB. 4.3.

TABELA 4.3
Composição do Minério de Ferro e do Sinter

| Componente | Participação (%) |
|--------------------------------|------------------|
| Minério de ferro | |
| Fe ₂ O ₃ | 82,85 |
| FeO | 1,24 |
| SiO ₂ | 3,76 |
| MnO | 0,37 |
| H ₂ O | 9,00 |
| outros | 2,78 |
| Sinter | |
| minério de ferro | 90,76 |
| CaO | 7,26 |
| Carvão | 1,90 |
| outros | 0,08 |

FONTE: Comunicação pessoal, 2008

As 1,652 de toneladas de minério de ferro por tonelada de gusa utilizadas para a produção de aço em 2007 tiveram 58 diferentes procedências, todas nacionais, sendo que 30 tipos respondem por 95% do material usado, conforme TAB. 4.4.

TABELA 4.4

Minérios de Ferro Utilizados na Produção de Aço

| Minérios | Particip. % | Acumul. % | Minérios | Particip. % | Acumul. % |
|--|----------------|--------------|--|----------------|--------------|
| Mistura de Minério Ferro Granulado - MGV/MGT | 10,19 | 10,19 | Mistura de Minérios de Ferro Fino - MHV/MHT | 0,59 | 95,06 |
| Minério Mphe Mf Pellet | 9,71 | 19,90 | Minério Degradado | 0,57 | 95,63 |
| Minério Fino Tratamento a Seco - Mfts | 7,10 | 27,01 | Minério Mfhe Ferro Fino Herculano. | 0,53 | 96,16 |
| Mfts: Minério Fino Tratamento a Seco | 6,20 | 33,20 | Mistura de Minérios | 0,43 | 96,59 |
| Minério Mfpb Ferro Fino Pau Branco | 5,74 | 38,94 | Minério Mfcf Ferro | 0,41 | 97,00 |
| Minério Mpj8 Fe Pellet | 5,01 | 43,95 | Minério Mfco Ferro Fino Contagem. | 0,39 | 97,40 |
| Minério Mffa Ferro Fino Fábrica | 4,73 | 48,68 | Minério Ferro Fino Miguel Burnier | 0,30 | 97,69 |
| Minério Mfpi Ferro Fino Pico | 4,09 | 52,76 | Minério Mhvg Hematítico Vargem Grande. | 0,24 | 97,93 |
| Minério Mgcfc Ferro Gran. C.Feijão | 3,48 | 56,24 | Mhhe Minério Ferro Hematitinha Herculano | 0,23 | 98,16 |
| Minério Mgpbc Ferro Gran. Pau Branco | 3,32 | 59,56 | Minério Mcjm Conce | 0,21 | 98,38 |
| Minério Mcjm Concentrado J. Mendes | 3,10 | 62,67 | Minério Mfpi Ferro | 0,21 | 98,58 |
| Minério Mfso Ferro Fino Somisa | 3,06 | 65,73 | Mhpr: Minério Hema | 0,19 | 98,78 |
| Mhpr: Minério Hematitinha Pires | 2,90 | 68,63 | Minério Mffa Ferro | 0,19 | 98,96 |
| Minério Mgpbc Ferro Granulado Pico | 2,90 | 71,54 | Minério Mfso Ferro | 0,14 | 99,11 |
| Minério Ferro Mpag Ferro Pellet Avg. | 2,88 | 74,41 | Minério Mgsz Ferro Granulado Sarzedo | 0,13 | 99,23 |
| Minério Mfcf Ferro Fino Córrego Feijão | 2,59 | 77,00 | Minério Mgrv Ferro Granulado Rio Verde. | 0,13 | 99,36 |
| Minério Gran. Tratamento a Seco - Mgts | 2,53 | 79,53 | Minério Granulado Várzea do Lopes:Mgvl. | 0,11 | 99,47 |
| Minério Granulado para Alto-Forno | 2,07 | 81,59 | Minério Mpj8 Fe Pe | 0,10 | 99,56 |
| Pelotas 8 A 16 Mm Ferroviário | 2,03 | 83,62 | Minério Ferro Mfbu | 0,09 | 99,66 |
| Minério Mfpr Ferro Fino Pires | 1,93 | 85,55 | Minério Mfag Fino | 0,07 | 99,73 |
| Mgts: Minério Granulado Tratamento a Seco | 1,61 | 87,17 | Minério Ferro Pell | 0,07 | 99,80 |
| Minério Mnnd Manganês Fino Nog. Duarte | 1,34 | 88,51 | Minério Mppbc Ferro | 0,07 | 99,86 |
| Minério Mppbc Ferro Pellet Pau Branco | 1,21 | 89,72 | Minério Ferro Pellet Pires. | 0,06 | 99,93 |
| Minério Mpsz Ferro Pellet Sarzedo | 1,00 | 90,72 | Minério Mnhe Manganês Fino Herculano | 0,06 | 99,98 |
| Minério Mfbc Ferro Fino Barão de Cocais | 0,91 | 91,64 | Minério Mfpr Ferro | 0,01 | 99,99 |
| Minério Mphe Mf Pe | 0,75 | 92,39 | Mistura de Minério Ferro Granulado - MGV/MGT | 0,00 | 99,99 |
| Minério Mfag Fino Agv/Sefar. | 0,73 | 93,11 | Minério Mpsz Ferro | 0,00 | 100,00 |
| Minério Mfdi Ferro Fino Divinópolis | 0,70 | 93,82 | Minério Mfhe Ferro | 0,00 | 100,00 |
| Minério Mgpr Ferro Granulado Pires | 0,65 | 94,47 | Minério Mpcp Ferro | 0,00 | 100,00 |

FONTE: comunicação pessoal, 2008

4.2.3.2 Carvão mineral

Para definir as características físico-químicas do carvão a ser considerado como insumo para a realização dos balanços de massa, energia e exergia, o primeiro passo foi a identificação das procedências dos carvões utilizados na planta industrial ao longo de todo o ano de 2007.

Segundo informações da empresa, foram empregados os carvões importados, relacionados na TABELA 4.5.

TABELA 4.5
Procedência dos Carvões Coqueificados

| Carvões | Participação (%) | Acumulado (%) |
|---|------------------|---------------|
| Carvão Scb Coppabella Ba Pci Coal | 18,88 | 18,88 |
| Carvão Mew Elkview Hard | 16,12 | 35,00 |
| Carvão Arh Robin Hood | 10,97 | 45,97 |
| Carvão Sew Soft Elkview Weak | 7,61 | 53,58 |
| Carvão Bjw Blue Creek Low Vol | 6,09 | 59,67 |
| Carvão Mmb Merlo Coking Coal | 5,38 | 65,05 |
| Carvão Mms Moss Coking Coal | 4,46 | 69,52 |
| Carvão Bbh Buchanan | 4,45 | 73,97 |
| Carvão Smm Metropolitan Semi Hard | 4,26 | 78,22 |
| Carvão Amf Marfork | 3,76 | 81,99 |
| Carvão Msc Shoal Creek Coking Coal | 3,33 | 85,31 |
| Carvão Meh Elkview High Ash Coking Coal | 2,76 | 88,07 |
| Carvão Mmm Metropolitan Hard | 2,73 | 90,80 |
| Carvão Atg #2 Gas Coking Coal | 2,50 | 93,30 |
| Carvão Mcd Cundinamarca Coking Coal | 1,14 | 94,43 |
| Carvão Awm Wellmore Coking Coal | 1,13 | 95,56 |
| Carvão Bpo Pocahontas Coking Coal | 1,12 | 96,69 |
| Carvão Mct Carter Roag Coking Coal | 1,02 | 97,71 |
| Carvão Mvr Varredura | 0,90 | 98,61 |
| Carvão Mbc Blue Creek Mid Vol. | 0,51 | 99,12 |
| Carvão Bog Oak Grove | 0,47 | 99,59 |
| Carvão Sjl Jellinbah East Semi Soft | 0,28 | 99,87 |
| Carvão Sbt Burton Sem Hard | 0,13 | 100,00 |
| Consumo total | 100,00 | |

FONTE: comunicação pessoal, 2008

As características dos carvões são obtidas através das análises imediata e elementar. A primeira fornece os teores de umidade, cinza, material volátil e de carbono fixo. Mas é através da análise elementar que são obtidos os percentuais de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio, necessários aos cálculos do poder calorífico inferior e da exergia química.

A análise imediata dos principais carvões usados no processo foi fornecida pela usina, bem como a composição das cinzas. Foi ainda informado que, em média, a umidade dos carvões é da ordem de 10%. No entanto, não há informações disponíveis sobre a análise elementar. Assim, os dados requeridos foram pesquisados nas páginas eletrônicas dos fornecedores. Na pesquisa, foram levantadas as características dos carvões de procedência da mesma formação geológica ou, pelo menos, da mesma região geográfica.

A TABELA 4.6 apresenta essas procedências e as análises imediatas dos carvões que representam 93,3% da massa total usada em 2007.

TABELA 4.6
Análise Imediata dos Carvões Minerais, por Procedência

| carvões | Percentual no total | análise imediata (base seca) | | | |
|--|---------------------|------------------------------|--------------|--------------|-------|
| | | cinza | mat. volátil | carbono fixo | total |
| Austrália - Brisbane | | | | | |
| Scb Coppabella Ba Pci Coal | 18,88 | 8,60 | 12,15 | 79,25 | 100 |
| Smm Metropolitan Semi Hard | 4,26 | 11,25 | 20,51 | 68,24 | 100 |
| Mmm Metropolitan Hard | 2,73 | 11,25 | 20,51 | 68,24 | 100 |
| Participação total | 25,87 | | | | |
| Canadá – British Columbia | | | | | |
| Mew Elkview Hard | 16,12 | 9,50 | 21,00 | 69,50 | 100 |
| Sew Soft Elkview Weak | 7,61 | 9,19 | 20,63 | 70,18 | 100 |
| Meh Elkview High Ash Coking Coal | 2,76 | 9,91 | 21,00 | 69,03 | 100 |
| Participação total | 26,49 | | | | |
| Estados Unidos –Alabama e West Virginia | | | | | |
| Bjw Blue Creek Low Vol. | 6,09 | 9,00 | 24,00 | 67,00 | 100 |
| Msc Shoal Creek Coking Coal | 3,33 | 10,38 | 26,43 | 63,19 | 100 |
| Bbh Buchanan | 4,45 | 5,20 | 19,72 | 75,08 | 100 |
| Amf Marfork | 3,76 | 5,81 | 35,36 | 58,83 | 100 |
| Participação total | 17,63 | | | | |
| Reino Unido | | | | | |
| Arh Robin Hood | 10,97 | 6,60 | 32,17 | 61,23 | 100 |
| Mms Moss Coking Coal | 4,46 | 8,06 | 29,26 | 62,68 | 100 |
| Participação total | 15,43 | | | | |
| Não identificado | | | | | |
| Mmb Merlo Coking Coal | 5,38 | 10,38 | 19,74 | 69,88 | 100 |
| Atg #2 Gas Coking Coal | 2,50 | 9,16 | 31,49 | 59,35 | 100 |
| Participação total | 7,88 | | | | |

FONTE: GRIEVE et al., 1996 ; comunicações pessoal, 2007

Para os cálculos do poder calorífico inferior e da exergia, o procedimento seguido para encontrar as propriedades do carvão foi:

- definir a participação percentual de cada país no fornecimento de carvão. Para isto, os percentuais das participações totais determinados na TAB.4.6 foram corrigidos de forma que o total geral fosse de 100%. Os dados recalculados são mostrados na TAB. 4.7.
- determinar, para cada país fornecedor, as características médias aritméticas simples dos carvões, a partir das propriedades apresentadas na TAB. 4.6.
- calcular as médias ponderadas dos valores acima, relativamente às participações dos respectivos países no fornecimento.

Procedimento análogo foi seguido para obtenção da composição elementar média do carvão considerado nos cálculos. Os dados primários dos fornecedores constam da TAB. 4.8.

TABELA 4.7
Participação Internacional no Fornecimento de Carvão

| Origem | Participação real (%) | Participação corrigida (%) |
|------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Austrália | 25,87 | 27,73 |
| Canadá | 26,49 | 28,39 |
| Estados Unidos | 17,63 | 18,90 |
| Reino Unido | 15,43 | 16,54 |
| Não identificado | 7,88 | 8,45 |
| total | 93,30 | 100,00 |

FONTE: elaboração própria, 2008

A análise imediata média, base seca e isenta de cinzas, usada nos cálculos posteriores, foi obtida através da ponderação das médias de cada país de origem em relação às respectivas participações percentuais no fornecimento para a usina analisada. A composição final adotada é apresentada na TAB. 4.9.

Finalmente, com a inclusão da umidade e das cinzas, foi obtida a composição final a ser considerada no trabalho, apresentada da TAB. 4.10.

Ocorrem variações significativas entre as composições dos carvões das diversas procedências. O menor teor de carbono, base seca, de acordo com a Tabela 4.8, é de 75,63% e o maior, é 91,21%. Dada a importância do carbono proveniente do carvão nos balanços de energia e exergia do processo, bem como nas emissões de gases de efeito estufa, no item 6, ANÁLISE DOS RESULTADOS, é feita uma avaliação das influências das variações do teor de carbono nos resultados encontrados.

Tabela 4.8
Composição Elementar dos Carvões

| Origem | Carvão | Carbono | Hidrogênio | Nitrogênio | Enxofre | Oxigênio | total | fonte |
|--------------------------------|---------------------------------|---------|------------|------------|---------|----------|--------|--|
| Austrália | Típico | 84,40 | 5,40 | 1,80 | 0,69 | 7,71 | 100,00 | Energy Today |
| | Newstan - semi soft coking coal | 83,10 | 5,50 | 2,10 | 0,60 | 8,70 | 100,00 | Centennial |
| | Tahmoor coking coal | 87,50 | 5,20 | 1,80 | 0,40 | 5,10 | 100,00 | Energy Today |
| | Newstan Semi Soft Coking Coal | 83,10 | 5,50 | 2,10 | 0,60 | 8,70 | 100,00 | Centennial |
| | Centennial Lithgow seam | 84,40 | 5,40 | 1,80 | 0,69 | 7,71 | 100,00 | Centennial |
| | Tahmoor Coking | 87,50 | 5,20 | 1,80 | 0,40 | 5,10 | 100,00 | Energy Today |
| | Coppabella | 90,50 | 4,12 | 1,64 | 0,55 | 3,20 | 100,01 | MacArthur |
| | média | 85,79 | 5,19 | 1,86 | 0,56 | 6,60 | | |
| Canadá | Kootenay Coalfields (Elkview) | 87,50 | 5,50 | 1,50 | 0,50 | 5,00 | 100,00 | Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources; Owsiacski |
| | Compliance | 75,63 | 5,79 | 1,57 | 0,60 | 16,41 | 100,00 | Compliance |
| | média | 81,57 | 5,65 | 1,53 | 0,55 | 10,70 | | |
| Estados Unidos / Alabama | Bibb. Co | 83,48 | 5,66 | 1,49 | 1,29 | 8,08 | 100,00 | Giardino |
| | Blue Creek Seam | 88,18 | 4,79 | 1,82 | 0,57 | 4,64 | 100,00 | Giardino |
| | Jagger Bed | 77,94 | 5,82 | 1,79 | 0,90 | 13,55 | 100,00 | Giardino |
| | Jefferson Co. | 85,84 | 4,98 | 1,58 | 0,74 | 6,87 | 100,00 | Giardino |
| | Mary Seam | 88,61 | 5,09 | 1,81 | 0,67 | 3,82 | 100,00 | Giardino |
| | Shelby Co. | 81,52 | 5,65 | 1,09 | 0,87 | 10,87 | 100,00 | Giardino |
| | média | 84,26 | 5,33 | 1,60 | 0,84 | 7,97 | | |
| Estados Unidos / West Virginia | Pocahontas | 91,21 | 5,68 | 1,12 | 0,88 | 1,11 | 100,00 | Penn State; Ultimate Analysis |
| | Hernshaw | 86,66 | 5,93 | 1,34 | 0,90 | 5,13 | 99,96 | USEPA |
| | Eagle | 87,97 | 5,28 | 1,63 | 0,44 | 4,68 | 100,00 | FICKINGER et al; Ultimate Analysis |
| | Jewell | 89,68 | 5,27 | 0,86 | 0,58 | 3,61 | 100,00 | USEPA |
| | média | 88,88 | 5,54 | 1,24 | 0,70 | 3,63 | | |
| Inglaterra | Princeton | 75,63 | 5,79 | 1,57 | 0,60 | 16,41 | 100,00 | Dong |
| | média | 75,63 | 5,79 | 1,57 | 0,60 | 16,41 | | |

FONTE: ENERGY TODAY, 2008; CENTENNIAL COAL COMPANY LTD., 2008; MACARTHUR COAL LTD, 2008; COMPLIANCE COAL CORPORATION ,2008; MINISTRY OF ENERGY, MINES AND PETROLEUM RESOURCES, 2008; OWSIACKI et al, 2000; GIARDINO, 1999; PENN STATE UNIVERSITY, 2009; DONG et al, 2007; USEPA, 2008; FICKINGER et al, 2009; ULTIMATE ANALYSIS, 2009

Tabela 4.9

Composição Elementar do Carvão Médio, Base Seca

| Componente | Participação (%) |
|-------------------|-------------------------|
| carbono | 82,81 |
| hidrogênio | 5,49 |
| nitrogênio | 1,61 |
| enxofre | 0,61 |
| oxigênio | 9,48 |
| | 100,00 |

FONTE: elaboração própria

Tabela 4.10

Composição Elementar do Carvão Médio, Base Úmida

| Componente | Participação (%) |
|-------------------|-------------------------|
| cinza | 7,75 |
| umidade | 10,00 |
| carbono | 68,11 |
| hidrogênio | 4,52 |
| nitrogênio | 1,33 |
| enxofre | 0,50 |
| oxigênio | 7,80 |
| | 100,00 |

FONTE: elaboração própria

Com composição adotada, os poderes caloríficos superior – PCS, e inferior – PCI, do carvão são, respectivamente, 29.440,3 kJ/kg e 28.446,9 kJ/kg.

Com relação à exergia química do carvão, deve ser ressaltado que a exergia química da cinza foi desprezada. Utilizando o valor padrão de 9.535,46 kJ/kg_s para o termo ($\varepsilon_{0,s} - PCI_s$) presente na EQ. 2.34, foi encontrada uma exergia química de 30.485 kJ/kg.

As composições das cinzas dos carvões considerados constam da TAB. 4.11.

A partir das composições do carvão e das cinzas foram determinadas as propriedades termodinâmicas do carvão: calor específico, entalpia e entropia. Também neste caso, cada propriedade foi calculada através da média ponderada da correspondente propriedade para cada tipo de carvão, segundo a mesma metodologia utilizada na obtenção dos poderes caloríficos, descrita anteriormente.

TABELA 4.11
Composição das Cinzas dos Carvões

| Carvões | Fe2O3 | SiO2 | Al2O3 | MNO | CaO | MgO | P2O5 | ZnO | Na2O | K2O | TiO2 |
|----------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Scb Coppabella Ba Pci Coal | | | | | | | | | | | |
| Mew Elkview Hard | 2,98 | 59,9 | 27,06 | 0,02 | 1,49 | 0,74 | 0,72 | NI | 0,14 | 1,68 | 1,39 |
| Arh Robin Hood | 8,01 | 49,8 | 29,56 | 0,06 | 2,03 | 1,04 | 0,3 | 0,04 | 0,53 | 1,99 | 1,56 |
| Sew Soft Elkview Weak | 3,9 | 58,4 | 29,06 | 0,04 | 2,65 | 0,54 | 1,37 | 0,01 | 0,14 | 0,72 | 1,92 |
| Bjw Blue Creek Low Vol. | 7,41 | 51,2 | 29,41 | 0,07 | 2,49 | 1,08 | 1,01 | 0,01 | 0,6 | 1,65 | 1,53 |
| Mmb Merlo Coking Coal | 6,63 | 57,1 | 28,86 | 0,05 | 1,13 | 0,6 | 0,82 | 0,01 | 0,41 | 0,75 | 1,39 |
| Petróleo | 12,76 | 34,6 | 19,49 | 0,11 | 4,33 | 0,74 | 0,87 | 0,01 | 0,1 | 0,46 | 1,12 |
| Mms Moss Coking Coal | 9,28 | 48,8 | 28,83 | 0,05 | 3,08 | 1,11 | 0,54 | 0,02 | 0,52 | 1,72 | 1,58 |
| Bbh Buchanan | 14,74 | 31,31 | 20,84 | 0,08 | 14,23 | 1,86 | 0,13 | 0,02 | 0,44 | 0,95 | 0,99 |
| Smm Metropolitan Semi Hard | 5,64 | 51,6 | 32,99 | 0,11 | 3,44 | 1,03 | 1,32 | 0,03 | 0,38 | 0,56 | 1,42 |
| Amf Marfork | 8,87 | 53,26 | 30,7 | 0,04 | 1,94 | 0,95 | 0,16 | 0,02 | 0,68 | 2 | 1,37 |
| Msc Shoal Creek Coking Coal | 6,55 | 48,44 | 30,53 | 0,03 | 2,64 | 1,09 | 1,04 | 0,01 | 0,75 | 1,71 | 1,52 |
| Meh Elkview High Ash Coking Coal | 5,52 | 51,1 | 27,54 | 0,05 | 3,86 | 0,7 | 1,46 | 0,01 | 0,18 | 0,4 | 1,7 |
| Mmm Metropolitan Hard. (soft) | 5,64 | 51,6 | 32,99 | 0,11 | 3,44 | 1,03 | 1,32 | 0,03 | 0,38 | 0,56 | 1,42 |
| Atg #2 Gas Coking Coal | 8,06 | 50,67 | 31,29 | 0,21 | 1,05 | 0,75 | 0,33 | 0,02 | 0,49 | 1,84 | 1,39 |

FONTE: ENERGY TODAY, 2008; CENTENNIAL COAL COMPANY LTD., 2008; MACARTHUR COAL LTD, 2008; COMPLIANCE COAL CORPORATION, 2008; MINISTRY OF ENERGY, MINES AND PETROLEUM RESOURCES, 2008; OWSIACKI et al, 2000; GIARDINO, 1999; PENN STATE UNIVERSITY, 2009; DONG et al, 2007; USEPA, 2008; FICKINGER et al, 2009; ULTIMATE ANALYSIS, 2009

4.2.3.3 Coque de petróleo

O coque de petróleo, fornecido pela PETROBRAS, é utilizado na sinterização. O consumo total no ano de 2007 foi de 0,027 toneladas por tonelada de gusa.

O poder calorífico inferior do coque foi fornecido pela usina e possui valor de 31.768,00 kJ/kg. A composição elementar do combustível é apresentada na TAB. 4.12.

Tabela 4.12
Composição Elementar do Coque de Petróleo

| Componente | teor (%) |
|------------|----------|
| carbono | 86,31 |
| hidrogênio | 3,60 |
| oxigênio | 1,60 |
| nitrogênio | 1,77 |
| enxofre | 5,50 |
| outros | 1,22 |

FONTE: PETROENERGIA, 2008

Com a composição considerada, foi encontrada uma exergia química de 33.996 kJ/kg, usando as equações (2.34) e (2.36) apresentadas no sub-item 2.4.1.

4.2.4 Suprimento de energia elétrica

A energia elétrica é parcialmente adquirida da concessionária e parcialmente gerada na usina. Nos balanços, a primeira é entrada para volume de controle 1, enquanto a segunda é produzida e consumida neste mesmo volume de controle.

Em 2007, a energia comprada correspondeu a 0,157 MWh/t de gusa. Na turbina de topo são gerados 0,034 MWh/t de gusa.

4.3 **Produtos e efluentes industriais**

Os produtos e efluentes do volume de controle 1, assim como as entradas, são constituídos por sólidos, líquidos e gases.

4.3.1 Produtos e efluentes sólidos

São fabricados três grupos de produtos de aço: perfis; fio máquina; placas, blocos e tarugos, que constituem as saídas de sólidos mais relevantes. Nas etapas de laminação, são geradas carepas, que são descartadas como resíduos sólidos ou reutilizadas, podendo ser consideradas subprodutos.

Segundo informações da empresa, o teor médio de carbono no aço produzido é de 3,05%. Nas carepas, portanto, tem-se igual teor. Sendo o teor de ferro, no aço final médio, de 97,995%, os restantes 1,7% são devidos a presença de outros elementos, tais como nióbio, nitrogênio, enxofre, fósforo, silício, manganês, alumínio, molibdênio e cromo.

Para a realização do balanço energético e do balanço exergético da usina, são necessários os valores de propriedades termodinâmicas do aço. Essas propriedades foram calculadas através das funções e bibliotecas disponíveis no programa Engineering Equation Solver – EES (BECKMAN e KLEIN, 2008).

São também gerados outros resíduos, escória e lama, no alto forno e na aciaria. O coque de carvão mineral produzido na coqueria é integralmente consumido internamente, não sendo, portanto, produto do VC1.

Não há presença de carbono na escória e na lama geradas nos processos.

Segundo informação da empresa, a produção de aço em 2007 foi distribuída entre:

- Placas, blocos e tarugos : 66,9 %
- Fio máquina: 17%
- Perfis : 16,1%

Quanto aos resíduos, as produções por tonelada de ferro gusa, em 2007, foram:

- Escória de alto forno: 0,253 t
- Lama de alto forno: 0,005 t
- Escória de aciaria: 0,264 t
- Lama de aciaria: 0,037 t
- Carepa da laminação de placas, blocos e tarugos: 0,146 t
- Carepa da laminação de fio máquina: 0,005 t
- Carepa da laminação de perfis: 0,012 t

4.3.2 Produtos e efluentes líquidos

O principal efluente líquido do VC1 é a água dos circuitos de refrigeração, que sai tanto na fase líquida como na de vapor, conforme o ponto de descarte.

Foram consumidos 9,78 kg de água por kg de ferro gusa produzido. A água é nascente no terreno industrial e sua utilização foi assim distribuída:

- água para o sistema de vapor: 0,223 kg/kg gusa
- água potável: 0,864 kg/kg gusa
- água para os setores da usina: 8,701 kg/kg gusa

No sistema de vapor, a distribuição para os setores foi:

- vapor de 12 kgf/cm² para a carboquímica: 0,031 kg/kg gusa
- vapor de 25 kgf/cm² para a carboquímica: 0,018 kg/kg gusa
- vapor de 12 kgf/cm² para as áreas industriais: 0,032 sendo:
 - 0,011 kg/kg gusa, para o alto-forno
 - 0,009 kg/kg gusa, para a aciaria
 - 0,005 kg/kg gusa, para a laminação
 - 0,007 kg/kg gusa, para o gasômetro
- água de reposição para o sistema de geração de energia elétrica: 0,142 kg/kg gusa

O restante da água foi usado na extinção do coque e em sistemas de refrigeração. Do total de água consumido, 80% foram gastos nas reposições das perdas nos circuitos fechados de refrigeração. Essas perdas correspondem a 5% do total de água recirculada anualmente.

O consumo dos circuitos abertos de refrigeração, selagem de gás, ar condicionado e limpeza industrial foi de 0,390 kg/kg gusa.

A distribuição do consumo de água industrial foi:

- vapor de extinção do coque: 0,517 kg/kg gusa
- perdas de água líquida na usina: 1,083 kg/kg gusa
- perdas de água nas torres de refrigeração: 6,711 kg/kg gusa
- água de refrigeração em circuito aberto : 0,390 kg/kg gusa

Além das águas efluentes dos circuitos de refrigeração e extinção do coque, os únicos efluentes líquidos existentes são o alcatrão e o óleo leve, que são integralmente enviados à carboquímica.

A composição química do alcatrão considerada neste trabalho foi obtida a partir nas composições disponíveis na bibliografia e do balanço de carbono realizado na coqueria. Para a realização do balanço considerou-se:

- massa de entrada: composta somente por carvão, na composição média da usina;
- massas de saída: moinha, coque, alcatrão, óleo leve, GCO e cinzas;
- as cinzas não possuem carbono;
- os teores de hidrogênio e de oxigênio do alcatrão são iguais;
- o teor de nitrogênio é de 2%;
- o teor de enxofre do carvão, que é de 0,5%.
- o teor de enxofre foi calculado a partir dos percentuais de massa de alcatrão e moinha nos produtos, tendo sido encontrado um valor de 0,686%

A TABELA 4.13 mostra a composição final do produto.

TABELA 4.13
Composição Elementar do Alcatrão

| Componente | Participação (%) |
|------------|------------------|
| C | 80,275 |
| H | 8,5190 |
| O | 8,519 |
| N | 2,000 |
| S | 0,686 |

FONTE: elaboração própria, 2008

Segundo dados da empresa, o poder calorífico inferior – PCI, do alcatrão é de 37.620 kJ/kg.

A equação 2.34, para determinação da exergia química de combustíveis líquidos, foi desenvolvida para combustíveis líquidos, com baixo teor de cinzas. Como o teor de água é nulo, a equação se reduz ao produto de CI por β . O valor encontrado foi de 40.150 kJ/kg.

Como a composição do óleo leve, que também é gerado na coqueria, não é disponível, foi assumido que possui teor de carbono semelhante ao do alcatrão.

4.3.3 Produtos e efluentes gasosos

Na coqueria, é gerado um gás combustível, conhecido por gás de coqueria – GCO. No alto forno e na aciaria, são igualmente gerados gases combustíveis, respectivamente, o gás de alto forno – GAF e o gás de aciaria – GAC.

Esses gases, apesar de consumidos nos diversos setores da usina, foram tratados em separado como um sistema de gases. Assim, são considerados como produtos da usina, ou saídas do VC1 e como insumos do sistema de gases combustíveis, ou VC2. As saídas deste último são os produtos das queimas dos gases mistos, lançados na atmosfera. Dos 0,067 kg de GCO / kg de gusa, 0,003 são enviados para a carboquímica e não são incluídos neste estudo como parte do VC2.

Quanto ao nitrogênio e argônio, não participam de reações químicas e, portanto, tem vazões de saída iguais às de entrada no sistema. Já fora dos limites da usina, parte do nitrogênio é enviada à carboquímica, que também recebe gás de coqueria para aquecimento. As quantidades de argônio e nitrogênio que deixam a usina são as mesmas apresentadas no sub-item 4.3.1.

Finalmente, outro subproduto da usina, é o gás carbônico liberado na calcinação do calcário. Esse gás corresponde a aproximadamente 40% em peso do material calcinado e é liberado para a atmosfera juntamente com os produtos da queima do combustível do forno. Neste caso, o CO₂ foi apresentado no balanço separadamente, pois não participa do sistema de gases combustíveis. Segundo dados da empresa, foram lançados na atmosfera 0,138 kg de CO₂ por tonelada de gusa produzido em 2007. Esse gás é liberado à temperatura média de 493 K.

Aos gases combustíveis efluentes do volume de controle 1, VC1, e que constituem entradas do volume do controle 2, VC2, são adicionados, ainda como entradas no VC2, o gás natural e o ar de combustão usado nos processos de queima.

Em cada setor industrial foram levantadas as quantidades de gás queimado, a demanda de ar de combustão e os efluentes gerados. Estes últimos foram determinados a partir da suposição de que ocorre combustão completa, com os valores de excesso de ar de cada ponto de queima informados pela empresa. Os sistemas de balanços de massa das equações de queima foram resolvidos com o emprego do programa EES (BECKMAN e KLEIN, 2008).

Os gases foram tratados como gases ideais, incluindo o ar, para o qual foi adotada a composição de 21% de O₂ e 79% de N₂.

As densidades do gás natural e do ar foram obtidas por meio da média ponderada das densidades de seus componentes em relação aos respectivos teores, calculadas também pelo programa EES (BECKMAN e KLEIN, 2008).

As composições dos gases combustíveis gerados na indústria, os quais são completamente utilizados no processo, bem como a composição do gás natural, segundo dados da empresa, são apresentadas na TAB.4.14.

TABELA 4.14
Composição dos Gases Combustíveis

| Componente | Participação volumétrica (%) | | | |
|---|------------------------------|--------|--------|--------|
| | GAF | GAC | GCO | GN |
| Acetileno - C ₂ H ₂ | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 0,00 |
| Dióxido de carbono - CO ₂ | 24,50 | 18,69 | 1,90 | 0,47 |
| Etano - C ₂ H ₆ | 0,00 | 0,00 | 0,69 | 5,64 |
| Etileno - C ₂ H ₄ | 0,00 | 0,00 | 2,08 | 0,00 |
| Hidrogênio - H ₂ | 3,83 | 0,85 | 60,20 | 0,00 |
| Metano - CH ₄ | 0,00 | 0,00 | 26,02 | 92,10 |
| Monóxido de carbono - CO | 24,10 | 56,63 | 6,13 | 0,00 |
| Nitrogênio - N ₂ | 46,70 | 23,37 | 2,00 | 0,78 |
| Oxigênio - O ₂ | 0,87 | 0,46 | 0,87 | 0,01 |
| Propano - C ₃ H ₈ | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| TOTAL | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

Fonte: comunicação pessoal, 2008

Os poderes caloríficos inferiores desses gases, também fornecidos pela empresa, constam da TAB.4.15.

TABELA 4.15
Poderes Caloríficos dos Gases Combustíveis

| Unidade | GAF | GAC | GCO | GN |
|----------------------|----------|----------|-------------|-----------|
| kcal/Nm ³ | 825,98 | 1.730,76 | 4.376,23 | 8.956,07 |
| kJ/Nm ³ | 3.452,60 | 7.234,59 | 18.292,6235 | 37.436,37 |

Fonte: comunicação pessoal, 2008

A TABELA 4.16 contém as temperaturas e pressões dos gases na saída do VC1.

Em cada um dos nove setores da unidade industrial é usada uma determinada mistura dos gases combustíveis. As participações de cada gás nas diversas misturas são mostradas na TAB.4.17.

TABELA 4.16
Condições de Saída dos Gases Combustíveis

| Gás | Pressão manométrica (kPa) | Temperatura (K) |
|--------------------|---------------------------|-----------------|
| GAF (antes da TRT) | 196,134 | - |
| GAF (após a TRT) | 166,714 | 393 |
| GAC | 0,005 | 1773 |
| GCO | 0,190 | 1273 |
| GN | 2.451,675 | 298 |

Fonte: comunicação pessoal, 2008

TABELA 4.17
Mistura de Gases Combustíveis Queimada nos Setores da Usina

| Setor | GAF | GAC | GCO | GN |
|-----------------------|---------------|-------|--------|------|
| | (% em volume) | | | |
| Laminação PBT | 69,00 | 0,00 | 31,00 | 0,00 |
| Laminação perfis | 61,08 | 0,00 | 32,29 | 6,63 |
| Laminação fio máquina | 68,00 | 0,00 | 32,00 | 0,00 |
| Coqueria | 93,00 | 0,00 | 7,00 | 0,00 |
| Alto Forno | 93,60 | 0,00 | 6,40 | 0,00 |
| Sinterização | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 |
| Caldeiras | 85,42 | 11,46 | 3,12 | 0,00 |
| Aciação | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 |
| Calcinação | 0,00 | 0,00 | 100,00 | 0,00 |

Fonte: comunicação pessoal, 2008

As vazões, fornecidas pela empresa e os poderes caloríficos inferiores – PCI das misturas gasosas usadas em cada setor, o excesso de ar de combustão, bem como as respectivas densidades à CNTP, calculadas pelo EES (BECKMAN e KLEIN, 2008) a partir das composições acima, constam da TABELA 4.18.

TABELA 4.18
Vazão dos Gases Combustíveis por Setor da Usina

| Setor | Vazão volumétrica (Nm ³ /t de gusa) | PCI (kJ/Nm ³) | Excesso de ar (%) | Densidade da mistura (kg/Nm ³) | Vazão de massa (t/t de gusa) |
|-----------------------|--|---------------------------|-------------------|--|------------------------------|
| Laminação PBT | 0,123 | 8.053,00 | 3,0 | 1,087 | 0,133 |
| Laminação perfis | 0,028 | 10.497,56 | 2,5 | 1,034 | 0,029 |
| Laminação fio máquina | 0,023 | 8.201,40 | 3,0 | 1,077 | 0,043 |
| Coqueria | 0,310 | 4.491,40 | 1,5 | 1,316 | 0,408 |
| Alto Forno | 0,353 | 4.402,36 | 2,5 | 1,321 | 0,467 |
| Sinterização | 0,004 | 18.292,62 | 5,0 | 0,428 | 0,002 |
| Caldeiras | 0,743 | 4.349,02 | 5,0 | 1,352 | 1,004 |
| Aciação | 0,011 | 18.292,62 | 6,0 | 0,428 | 0,005 |
| Calcinação | 0,013 | 18.292,62 | 5,0 | 0,428 | 0,006 |
| totais | 1,608 | | | | 2,097 |

Fonte: comunicação pessoal, 2008

Os efluentes do volume de controle 2 são constituídos, unicamente, pelos produtos de combustão. A partir dos resultados dos cálculos de balanço de massa das reações de combustão realizados com o EES (BECKMAN e KLEIN, 2008) e dos quantitativos dos produtos de combustão, foram encontradas também as relações entre as massas de ar de combustão e de gás misto em cada setor, conforme TAB. 4.19, e, conseqüentemente, as vazões de massa de ar utilizadas.

TABELA 4.19
Vazão dos Gases de Combustão Efluentes do Volume de Controle 2

| Setor | Razão massa de ar/massa de gás | Massa de ar (t/t de gusa) | Massa de gases efluentes (t/t de gusa) |
|-----------------------|--------------------------------|---------------------------|--|
| Laminação PBT | 2,205 | 0,294 | 0,427 |
| Laminação perfis | 3,167 | 0,091 | 0,121 |
| Laminação fio máquina | 2,206 | 0,054 | 0,079 |
| Coqueria | 0,885 | 0,361 | 0,770 |
| Alto Forno | 0,867 | 0,405 | 0,872 |
| Sinterização | 14,127 | 0,026 | 0,028 |
| Caldeiras | 0,840 | 0,843 | 1,833 |
| Aciaria | 14,176 | 0,070 | 0,074 |
| Calcinação | 14,127 | 0,080 | 0,085 |
| Totais | | 2,224 | 4,289 |

FONTE: elaboração própria, 2008

Os gases efluentes, produtos de combustão, são constituídos por oxigênio, gás carbônico, vapor de água e nitrogênio. Os constituintes dos efluentes em cada setor da usina são detalhados na TAB.4.20.

TABELA 4.20
Composição dos Gases de Combustão por Setor da Usina

| Setor | massa de combustível (t/t de gusa) | gás | massa de efluente / massa de combustível | massa de efluente (t/t de gusa) | P (kPa) | Temperatura média (K) |
|---------------------------------------|------------------------------------|------------------|--|---------------------------------|---------|-----------------------|
| Laminação de placas, blocos e tarugos | 0,13328 | H ₂ O | 0,2915 | 0,03885 | 101,33 | 773 |
| | | CO ₂ | 0,8296 | 0,11057 | 101,33 | 773 |
| | | N ₂ | 2,0692 | 0,27578 | 101,33 | 773 |
| | | O ₂ | 0,015 | 0,00200 | 101,33 | 773 |
| | | sub-total | | 0,4272 | | |
| Laminação de perfis | 0,02861 | H ₂ O | 0,4217 | 0,01206 | 101,33 | 523 |
| | | CO ₂ | 0,9431 | 0,02698 | 101,33 | 523 |
| | | N ₂ | 2,7758 | 0,07941 | 101,33 | 523 |
| | | O ₂ | 0,0180 | 0,00051 | 101,33 | 523 |
| | | sub-total | | 0,11896 | | |

FONTE: elaboração própria, 2008

TABELA 4.20(continuação)
Composição dos Gases de Combustão por Setor da Usina

| Setor | massa de combustível (t/t de gusa) | gás | massa de efluente / massa de combustível | massa de efluente (t/t de gusa) | P (kPa) | Temperatura média (K) |
|--------------------------|------------------------------------|------------------|--|---------------------------------|---------|-----------------------|
| Laminação de Fio Máquina | 0,02429 | H ₂ O | 0,3027 | 0,00735 | 101,33 | 653 |
| | | CO ₂ | 0,8354 | 0,02029 | 101,33 | 653 |
| | | N ₂ | 2,1189 | 0,05147 | 101,33 | 653 |
| | | O ₂ | 0,0154 | 0,00037 | 101,33 | 653 |
| | | sub-total | | 0,07948 | | |
| Coqueria | 0,40843 | H ₂ O | 0,0725 | 0,02959 | 101,33 | 1073 |
| | | CO ₂ | 0,7166 | 0,29266 | 101,33 | 1073 |
| | | N ₂ | 1,0929 | 0,44638 | 101,33 | 1073 |
| | | O ₂ | 0,0030 | 0,00124 | 101,33 | 1073 |
| | | sub-total | | 0,76987 | | |
| Alto forno | 0,46699 | H ₂ O | 0,0679 | 0,03173 | 101,33 | 376 |
| | | CO ₂ | 0,7143 | 0,33359 | 101,33 | 376 |
| | | N ₂ | 1,0797 | 0,50419 | 101,33 | 376 |
| | | O ₂ | 0,0049 | 0,00230 | 101,33 | 376 |
| | | sub-total | | 0,87181 | | |
| Sinterização | 0,00187 | H ₂ O | 2,2293 | 0,00418 | 101,33 | 399 |
| | | CO ₂ | 1,8292 | 0,00343 | 101,33 | 399 |
| | | N ₂ | 10,8246 | 0,02028 | 101,33 | 399 |
| | | O ₂ | 0,1558 | 0,00029 | 101,33 | 399 |
| | | sub-total | | 0,02818 | | |
| Caldeiras | 1,00421 | H ₂ O | 0,0421 | 0,04224 | 101,33 | 573 |
| | | CO ₂ | 0,7469 | 0,75009 | 101,33 | 573 |
| | | N ₂ | 1,0276 | 1,03194 | 101,33 | 573 |
| | | O ₂ | 0,0092 | 0,00920 | 101,33 | 573 |
| | | sub-total | | 1,83347 | | |
| Aciaria LD | 0,00491 | H ₂ O | 2,2293 | 0,01095 | 101,33 | 1373 |
| | | CO ₂ | 1,8292 | 0,00899 | 101,33 | 1373 |
| | | N ₂ | 10,8246 | 0,05319 | 101,33 | 1373 |
| | | O ₂ | 0,1558 | 0,00077 | 101,33 | 1373 |
| | | sub-total | | 0,0739 | | |
| Calcinação | 0,00566 | H ₂ O | 2,2293 | 0,01261 | 101,33 | 493 |
| | | CO ₂ | 1,8292 | 0,01035 | 101,33 | 493 |
| | | N ₂ | 10,8246 | 0,06125 | 101,33 | 493 |
| | | O ₂ | 0,1558 | 0,00088 | 101,33 | 493 |
| | | sub-total | | 0,08509 | | |

FONTE: elaboração própria, 2008

4.4 Insumos e produtos na fabricação de gusa

O alto-forno, apesar de ser um equipamento bastante monitorado e no qual vêm sendo investidos grandes esforços de economia de energia, é também o maior consumidor de insumos energéticos de todo o processo. A identificação desses insumos e a dos diversos fluxos de produtos intermediários gerados na etapa produtiva são o ponto de partida para a realização da segunda etapa da análise, na qual é feito um refinamento da análise exergetica.

Para isto, foram, primeiramente, qualificados e quantificados os fluxos de massa de entrada e de saída do alto-forno e seus respectivos estados termodinâmicos, bem como a utilização de fontes energéticas. Neste aspecto, o equipamento demanda energia elétrica, mas é também produtor, através da sua turbina de topo, que gera energia elétrica a partir da utilização da elevada temperatura do gás gerado no processo e da sua pressão relativamente alta. A turbina cumpre também o papel de regular a pressão interna do forno. O consumo de energia elétrica corresponde a 0,10 GJ/t de gusa e a geração a 0,12 GJ/t de gusa, ocorrendo uma produção líquida desse insumo.

O volume de controle foi definido de forma tal que os produtos e subprodutos saiam à temperatura ambiente, ou seja, as perdas térmicas devidas a não aproveitamento de calores sensíveis estão incluídas nas perdas da etapa. A TABELA 4.21 discrimina os fluxos de materiais do equipamento.

TABELA 4.21
Fluxos de Massa no Alto-Forno

| item | quantidade (t/t de gusa) | T (K) | P _{abs} (kPa) |
|-----------------|-----------------------------|----------|---------------------------|
| Entradas | | | |
| sinter | 1,604 | 298 | |
| coque | 0,408 | 298 | |
| finos | 0,125 | 298 | |
| quartzo | 0,001 | 298 | |
| calcário | não significativo | 298 | |
| lama AF | 0,003 | 298 | |
| pó | 0,004 | 298 | |
| escória dry pit | 0,148 | 298 | |
| sucata | 0,002 | 298 | |
| O ₂ | 0,051 | 298 | |
| ar de combustão | 0,405 | 298 | 101,235 |
| ar de processo | 1,133 | 298 | 101,235 |
| gás | 0,467 | 393,15 | 268,039 |
| vapor | 0,011 | 543 | 120 |
| água | 0,217 | 298 | |
| massa total | 4,577 | | |

FONTE: comunicação pessoal, 2009

TABELA 4.21(continuação)
Fluxos de Massa no Alto-Forno

| item | quantidade (t/t de gusa) | T (K) | P_{abs} (kPa) |
|-----------------|-------------------------------------|------------------|----------------------------------|
| Saídas | | | |
| Gusa | 1,000 | 298 | |
| GAF | 1,893 | 393,15 | 268,039 |
| escória | 0,253 | 298 | |
| lama | 0,005 | 298 | |
| água | 0,217 | 333 | |
| prod. combustão | 0,871 | 376 | |
| Pó coletado | 0,004 | 298 | |
| outras perdas | 0,334 | 298 | |
| massa total | 4,577 | | |

FONTE: comunicação pessoal, 2009

5 RESULTADOS

5.1 Balanços de massa da unidade industrial

Os balanços de massa realizados na unidade industrial, a partir dos insumos, produtos, efluentes, resíduos e produtos intermediários identificados no item 3, são apresentados a seguir.

Todos os valores estão apresentados na forma do índice tonelada/tonelada de ferro gusa produzido no alto-forno.

Embora a divisão da usina em volume de controle 1 – VC1, e volume de controle 2 – VC2 tenha sido adotada na elaboração dos balanços de massa, dada a importância da água consumida em grandes quantidades como refrigerante dos processos, foi feito um balanço de massa em separado para esse material, com o propósito de facilitar o diagnóstico dos pontos críticos e a proposição de medidas de redução de consumo.

Foi feito também um balanço do fluxo de carbono na usina, já que, além de redutor no processo é também a principal fonte de energia utilizada e o responsável pela emissão de gases de efeito estufa.

Os índices apresentados foram calculados com base nos valores anuais de produção e consumo.

5.1.1 Balanço de massa do VC1

As TABELAS 5.1 e 5.2 mostram, respectivamente, os fluxos de entrada e de saída do VC1.

Os dados destas tabelas estão sintetizados na TAB.5.3, onde pode ser visto que, com os valores utilizados, a diferença entre as entradas e saídas é da ordem de 2%, menor que os desvios e erros esperados para os dados. Assim o balanço foi considerado como adequado para o estudo.

TABELA 5.1
Entradas de Massa do VC1

| fase | material | índices (t/t gusa) |
|---|---------------------------------|-------------------------------|
| gás | argônio | 0,00128 |
| | O ₂ | 0,15393 |
| | N ₂ | 0,07783 |
| | ar p/ alto-forno | 1,13344 |
| sólido | carvão | 0,58963 |
| | moinha de carvão (estoque) | 0,01162 |
| | coque de petróleo | 0,02682 |
| | minério de ferro | 1,46696 |
| | minério de ferro estoque | 0,00175 |
| | calcário | 0,32994 |
| | dolomita | 0,01629 |
| | serpentinito | 0,03278 |
| | antracito | 0,02643 |
| | hematitinha | 0,00022 |
| | quartzo | 0,00127 |
| | FeSiMn | 0,00949 |
| | FeMn AC | 0,00130 |
| | Mn Eletrolítico | 0,00042 |
| | FeMnMCN | 0,00016 |
| | FeMnMC | 0,00001 |
| | FeSi75 | 0,00163 |
| | FeCr AC | 0,00141 |
| | FeCr BC | 0,00002 |
| | FeTi | 0,00004 |
| | FeV | 0,00002 |
| | FeNb | 0,00009 |
| | FeMoBC | 0,00008 |
| | Ni Eletrolítico | 0,00004 |
| | sucata | 0,00003 |
| | FeB | 0,00001 |
| | FeSi 75 em fio | 0,00003 |
| | alumínio | 0,00076 |
| | grafite | 0,00068 |
| | cálcio silício em fio | 0,00009 |
| | dolomita crua | 0,02569 |
| | fluorita | 0,00010 |
| | nefelina - NaAlSiO ₄ | 0,00222 |
| cal dolomítica | 0,02850 | |
| carbureto de silício | 0,00189 | |
| outras ligas | 0,00005 | |
| alumina, escória, carbureto de cálcio e fio carbono | 0,00102 | |

FONTE: comunicação pessoal, 2008

Tabela 5.2
Saídas de Massa do VC1

| fase | material | índices (t/t gusa) |
|---------|-----------------------------|-----------------------|
| gás | CO ₂ do calcário | 0,13849 |
| | Argônio | 0,00128 |
| | N ₂ | 0,07783 |
| | GCO | 0,00259 |
| | GAF | 1,89310 |
| | GAC | 0,11704 |
| | GCO | 0,06444 |
| líquido | Alcatrão | 0,01630 |
| | Óleo leve | 0,04596 |
| sólido | Escória AF | 0,25309 |
| | Escória AC | 0,26392 |
| | Lama AC | 0,03748 |
| | Lama AF | 0,00459 |
| | Perfis | 0,03748 |
| | Fio-máquina | 0,15025 |
| | PBT | 0,58950 |
| | carepa + perdas PBT | 0,14563 |
| | carepa + perdas Perfil | 0,01156 |
| | Carepa FM | 0,00460 |

FONTE: comunicação pessoal, 2008

Tabela 5.3
Balanço de Massa do VC1 Consolidado

| entradas | t/t gusa |
|----------|----------|
| gases | 1,37 |
| sólidos | 2,68 |
| total | 4,05 |
| saídas | t/t gusa |
| gases | 2,29 |
| líquidos | 0,62 |
| sólidos | 1,60 |
| Total | 3,96 |

FONTE: elaboração própria, 2008

5.1.2 Balanço de massa do VC2

O volume de controle virtual VC2 recebe todos os gases combustíveis produzidos na usina, além do gás natural comprado da concessionária. É constituído por todos os processos de queima gases combustíveis de todos os setores da indústria. Na empresa estudada, não há liberação de gás combustível não queimado para a atmosfera. Todo o volume produzido é utilizado nos aquecimentos requeridos pelas etapas produtivas, à exceção de pequena parcela do gás de coqueria,

que é enviado, sem queimar, à unidade carboquímica externa. Os fluxos deste volume constam da TAB. 5.4.

Na FIGURA 5.1 estão representados os fluxos de massa dos dois volumes de controle, em termos de quantidades por tonelada de gusa produzido.

TABELA 5.4
Balanço de Massa do VC2

| entradas | t/t gusa |
|------------------|-----------------|
| GCO | 0,06444 |
| GAF | 1,89310 |
| GAC | 0,11704 |
| GN | 0,00142 |
| ar de combustão | 2,22134 |
| total | 4,29734 |
| saídas | t/t gusa |
| CO ₂ | 1,55511 |
| H ₂ O | 0,18907 |
| N ₂ | 2,51981 |
| O ₂ | 0,01753 |
| total | 4,28153 |

FONTE: elaboração própria

5.2 Balanço de carbono e emissões de gases de efeito estufa

O fluxo de massa de carbono foi analisado somente no VC1, já que no VC2 ocorre somente combustão de gases, e, por isto, todo o carbono presente na entrada sai nos gases de exaustão na forma de CO₂.

As participações dos materiais no fluxo de carbono são apresentadas na TAB. 5.5. Referem-se a percentagens do total de carbono inserido através do carvão, outros insumos e matérias primas.

BALANÇO DE MASSA DO PROCESSO INDUSTRIAL

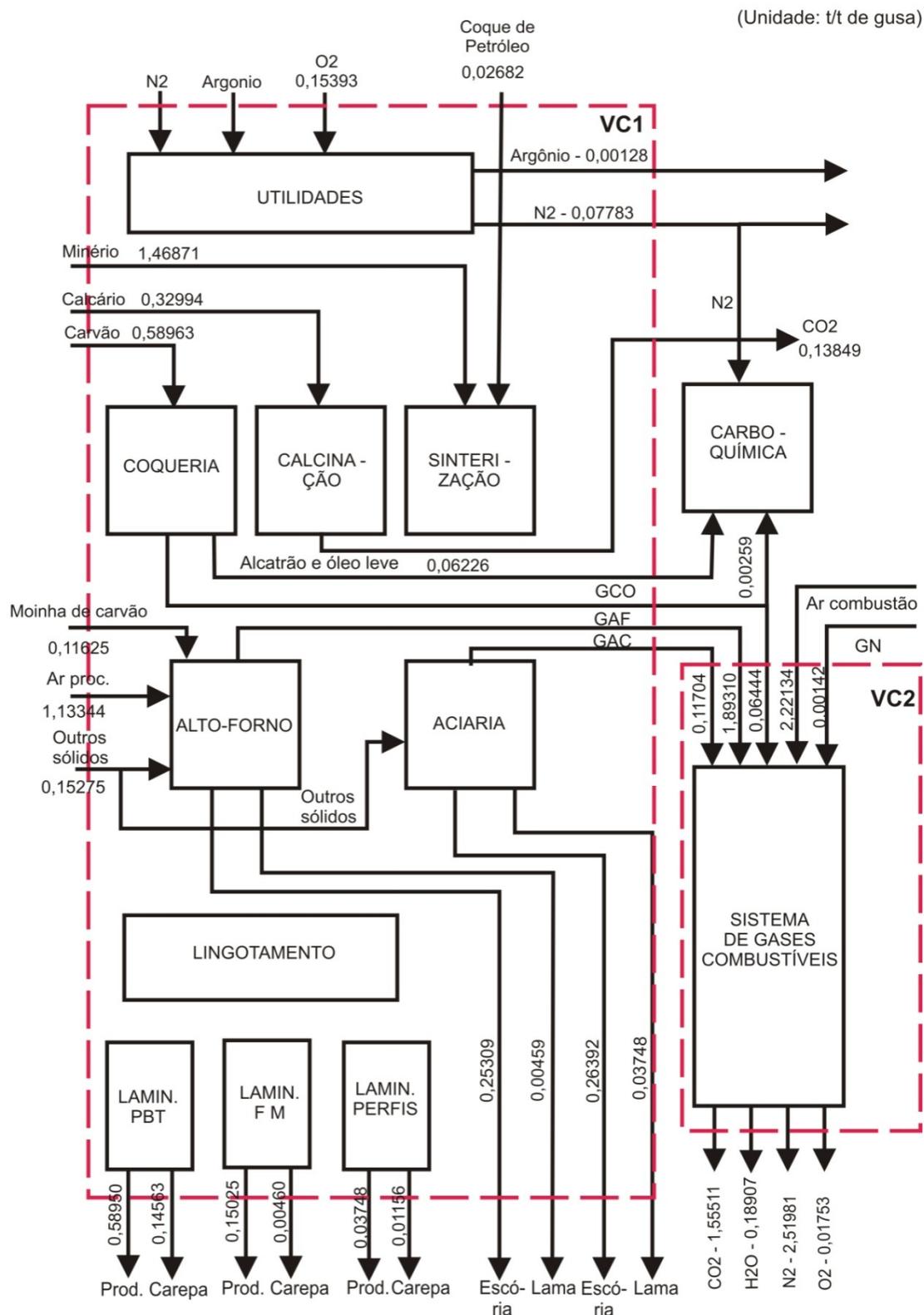


FIGURA 5.1 – Balanço Global de Massa
 FONTE : elaboração própria, 2008

TABELA 5.5
Balanço de Carbono

| entradas no VC1 | participação (%) | saídas do VC1 | participação (%) |
|------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|
| carvão e moinha | 86,23 | GAF | 73,04 |
| coque de petróleo | 4,74 | GAC | 7,03 |
| calcário | 8,10 | GCO | 6,84 |
| FeSiMn | 0,04 | alcatrão | 2,68 |
| Mn eletrolítico | 0,00 | óleo leve | 7,55 |
| FeSi75 | 0,00 | aço e carepa | 0,07 |
| FeCr AC | 0,02 | escória alto-forno | - |
| FeCr BC | 0,00 | escória aciaria | - |
| FeTi | 0,00 | CO2 | 7,73 |
| FeV | 0,00 | | |
| FeNb | 0,00 | | |
| FeMo BC | 0,00 | | |
| sucata | 0,00 | | |
| FeB | 0,00 | | |
| FeMn MC | 0,00 | | |
| FeSi em fio | 0,01 | | |
| grafite | 0,15 | | |
| dolomita crua | 0,69 | | |
| carbureto de silício | 0,00 | | |
| total | 100,00 | total | 104,93 |

FONTE: elaboração própria, 2009

Em termos de massa de carbono, em toneladas por tonelada de ferro gusa, o fluxo está apresentado na FIG.5.2.

Para a elaboração deste balanço, foram consideradas as composições dos gases de saída fornecidas pela empresa. Também foram dadas as composições do aço típico e as das ligas inseridas nos fornos. Para o carvão, em uma primeira aproximação, havia sido considerada a composição apresentada no item 4.3.3.2, na qual o teor de carbono era de 68,11%. Posteriormente, o teor de carbono adotado para o carvão passou 70,49% para o fechamento do balanço na coqueria. Naquele setor da indústria, são produzidos, além do gás e do coque, o óleo leve, o alcatrão e outros resíduos químicos. São todos produtos complexos e de composição variável, por isto, para seus respectivos teores de carbono foram considerados valores típicos, já tratados nos itens 4.4.2. e 2.2.4.1.

(Unidade: t carbono/t gusa)

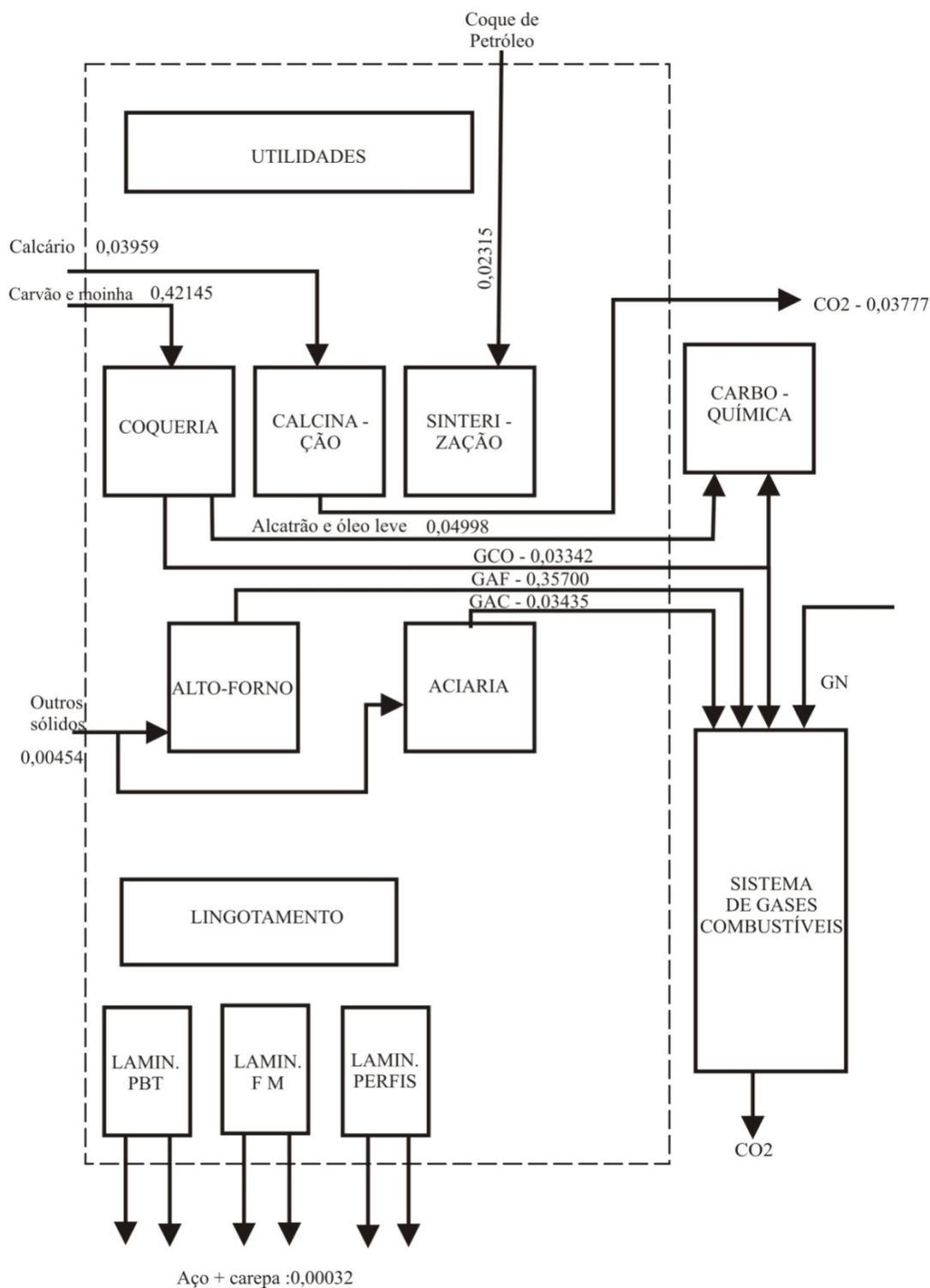


FIGURA 5.2 - Balanço de Carbono

FONTE: elaboração própria, 2009

Com o ajuste efetuado, os dados apresentados na TAB. 4.10 foram alterados e a nova composição do carvão mineral, finalmente adotada neste trabalho, passou a ser a apresentada na TAB. 5.6.

TABELA 5.6
Composição Final Adotada para o Carvão Mineral, Base Úmida

| Componente | Participação (%) |
|-------------------|-------------------------|
| cinza | 5,36 |
| umidade | 10,00 |
| carbono | 70,49 |
| hidrogênio | 4,52 |
| nitrogênio | 1,33 |
| enxofre | 0,50 |
| oxigênio | 7,80 |
| | 100,00 |

FONTE: elaboração própria

Com esta composição, os poderes caloríficos superior e inferior do carvão, são, respectivamente, 30.242 kJ/kg e 29.249 kJ/kg.

A diferença entre os valores totais de massa de carbono, calculados para as entradas e saídas, foi de 4,93%. Um melhor ajuste requer uma verificação das vazões de massa e das composições dos insumos e produtos, principalmente as dos gases gerados no processo, bem como as composições do carvão, coque, alcatrão e óleo leve da coqueria. No entanto, como as análises elementares desses materiais e produtos, utilizados no ano de 2007, não podem mais ser verificadas e como a diferença encontrada está dentro dos desvios da composição do carvão, principal fonte de carbono do processo, o balanço pode ser considerado adequado ao presente trabalho.

5.3 Balanços de energia

Os balanços de energia foram realizados para os volumes de controles VC1 e VC2 considerando os fluxos de todos os materiais, sólidos, líquidos e gasosos, de entrada e de saída, inclusive a água, e suas respectivas propriedades termodinâmicas nas temperaturas e pressões, correspondentes, também, aos estados em que entram ou deixam os volumes de controle.

Assim como no balanço de massa, os valores são apresentados por tonelada de ferro gusa produzida.

5.3.1 Balço de energia do VC1

O balanço de energia do VC1 está apresentado na TAB.5.7.

TABELA 5.7
Balço de Energia do VC1

| entradas/saídas | item | consumo específico (GJ/t gusa) |
|---|---|---|
| Insumos | energia elétrica | 0,56 |
| | carvão | 17,25 |
| | moinha | 3,40 |
| | coque de petróleo | 0,85 |
| | energia dos produtos das combustões de gases | 7,49 |
| | total | 29,55 |
| Produtos/efluentes/rejeitos | sólidos | |
| | PBT: produtos+carepa | 1,31 |
| | FM: produtos+carepa | 0,24 |
| | Perfis: produtos+carepa | 0,26 |
| | escória AF | 0,35 |
| | escória aciaria | 0,21 |
| | calor sensível do coque | 0,53 |
| | calor sensível da cal | 0,01 |
| | calor sensível do gusa | 0,87 |
| | calor sensível do aço líquido | 3,01 |
| | subtotal | 6,79 |
| | líquidos | |
| | alcatrão e óleo leve: PCI | 2,34 |
| | perdas nas torres de refrigeração | 6,52 |
| | perdas nos circuitos fechados de refrigeração | 0,09 |
| | água dos circuitos de refrigeração direta | 0,04 |
| | subtotal | 8,99 |
| | gases | |
| | ar do sinter | 0,00 |
| | CO2 produzido na calcinação | 0,02 |
| | GCO | 3,32 |
| | GAF | 5,14 |
| | GAC | 0,83 |
| | vapor 25 kgf/cm2 para a carboquímica | 0,01 |
| | vapor 12 kgf/cm2 para a carboquímica | 0,02 |
| | vapor 12 kgf/cm2 para as áreas | 0,03 |
| | vapor gerado na extinção de coque | 0,16 |
| | subtotal | 9,53 |
| | energia térmica/mecânica/elétrica | |
| | energia elétrica para a coqueria | 0,02 |
| diversos(aquec. de equipamentos e força motriz) | 4,23 | |
| subtotal | 4,25 | |
| total | 29,56 | |

FONTE: elaboração própria, 2008

A parcela da energia liberada pela combustão de gases, que é utilizada nos processos ou que corresponde a perdas internas, é gerada no VC2, sendo recebida como entrada pelo VC1. Esta parcela está designada nesta tabela como energia dos produtos das combustões de gases.

5.3.2 Balço de energia do VC2

Na TABELA 5.8 são apresentados, como entradas, os valores de energia aportados pelos gases combustíveis nos sistemas de queima que constituem o VC2. As saídas deste volume de controle são a energia liberada para a atmosfera através dos gases de exaustão, a energia utilizada no processo produtivo e as perdas internas da usina.

TABELA 5.8
Balço de Energia do VC2

| entradas/saídas | item | consumo específico (GJ/t gusa) |
|------------------------|--|---|
| entradas | GCO | 3,21 |
| | GAF | 5,14 |
| | GAC | 0,83 |
| | GN | 0,07 |
| | total | 9,25 |
| efluentes | calor sensível dos gases exaustos | 1,76 |
| | energia dos produtos das combustões de gases | 7,49 |
| | total | 9,25 |

FONTE: elaboração própria, 2008

Os fluxos de energia são representados esquematicamente na FIG.5.3.

(Unidade: GJ/t de gusa)

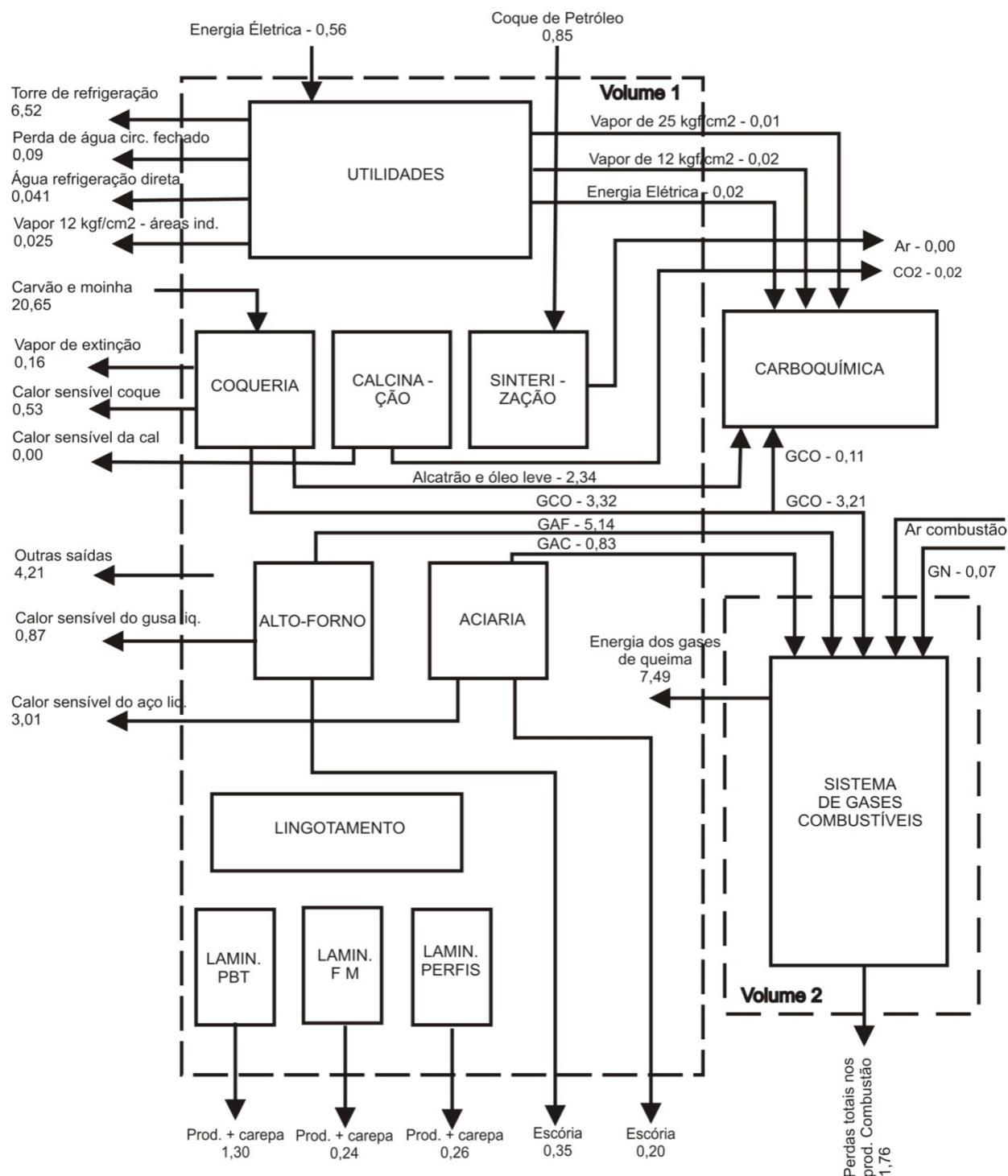


FIGURA 5.3 – Balanço Global de Energia

FONTE: elaboração própria, 2008

5.4 Balanços de exergia

O estudo exergético foi realizado em etapas. Inicialmente foram analisados os mesmos volumes de controle adotados nos balanços energéticos e de massa, chamados de VC1 e VC2. A partir dos

resultados foi elaborado um balanço global da usina, com o propósito de identificar a eficiência exergética e as perdas globais de exergia do processo, comparando-as com os dados disponíveis na literatura.

A análise foi refinada, tendo sido abordadas, seqüencialmente, as diversas etapas do processo produtivo, quais sejam: calcinação, coqueria, sinterização, alto-forno, aciaria, lingotamento e laminação. É no alto-forno que ocorre o maior consumo de energéticos, por isto, sua análise foi complementada com o balanço dos regeneradores, onde é pré-aquecido o ar de processo.

5.4.1 Balanço de exergia do VC1

De maneira análoga ao balanço de energia, no balanço de exergia, as quantidades de calor liberadas na combustão de gases, nos diversos setores industriais, foram consideradas como procedentes de reservatórios térmicos às respectivas temperaturas adiabáticas de chama, constituindo-se, portanto, em entradas para o VC1. Os fluxos obtidos são apresentados na TAB.5.9.

A diferença entre a exergia total de entrada e a de saída corresponde às outras irreversibilidades dos processos, ou seja, 10,40 GJ por tonelada de gusa fabricada.

Na exergia dos fluxos de saída do VC1, 18,78 GJ por tonelada de gusa estão incorporados aos produtos e subprodutos do VC1, quais sejam: aço, carepa, escória de alto-forno, gases combustíveis, alcatrão, vapor e energia elétrica. Destes, 8,66 GJ por tonelada de gusa são direcionados ao VC2 através dos gases combustíveis produzidos no processo. Uma quantidade exergética de 1,53 GJ por tonelada de gusa é perdida para o ambiente por meio de escórias, lamas, vapores, gases e água.

Dos processos de combustão que ocorrem no VC2, parte da exergia é utilizada nas etapas de aquecimento que acontecem nos diversos setores industriais englobados pelo VC1. Esta exergia térmica, calculada pelo calor liberado reduzido por uma parcela devida às irreversibilidades, corresponde a 5,23 GJ por tonelada de gusa. As irreversibilidades foram calculadas supondo que os produtos da combustão são liberados à temperatura adiabática de chama da mistura gasosa queimada em cada ponto.

TABELA 5.9
Fluxos de Exergia no VC1

| entradas/saídas | item | consumo específico (GJ/t gusa) |
|---|-------------------------------|--------------------------------|
| insumos e matérias-primas | minério de Ferro | 0,25 |
| | calcário | 0,41 |
| | carvão | 18,53 |
| | moinha de estoque | 3,65 |
| | outros sólidos | 0,67 |
| | coque de petróleo | 0,91 |
| | ar de processo | 0,01 |
| | água industrial | 0,45 |
| | energia elétrica | 0,56 |
| | gases | 0,04 |
| | exergia térmica do VC2 | 5,23 |
| | total | 30,71 |
| | produtos e subprodutos | alcatrão |
| óleo leve | | 1,85 |
| aço e carepa | | 7,22 |
| escória granulada de alto-forno | | 0,21 |
| vapor 12 kgf/cm ² carboquímica | | 0,02 |
| vapor 25 kgf/cm ² carboq. | | 0,01 |
| energia elétrica para carboquímica. | | 0,02 |
| gases (Ar, N ₂) | | 0,02 |
| GCO para carboquímica | | 0,12 |
| gases combustíveis para o VC2 | | 8,66 |
| subtotal | | 18,78 |
| resíduos ou irreversibilidades em fluxos | escória aciaria | 0,42 |
| | lama aciaria | 0,13 |
| | escória comum de alto-forno | 0,15 |
| | lama AF | 0,02 |
| | perdas nas torres | 0,34 |
| | perda circ. fechado | 0,06 |
| | perda circ. aberto | 0,02 |
| | vapor p/áreas industriais | 0,05 |
| | vapor de extinção do coque | 0,28 |
| | CO ₂ da calcinação | 0,06 |
| | subtotal | 1,53 |
| total | 20,31 | |
| outras irreversibilidades | | 10,40 |

FONTE: elaboração própria, 2009

5.4.2 Balço de exergia do VC2

Como descrito no item 4.3.3, o VC2 recebe somente os gases combustíveis e libera os produtos de suas respectivas queimas. Em cada área industrial é realizada a queima de uma mistura de gases diferente, com percentual próprio de excesso de ar, sendo que, em cada uma delas, também a temperatura com que os gases são lançados na atmosfera é diferente. Assim, as exergias físicas dos gases variam em cada área da usina. Para a elaboração do balanço, foram calculadas as exergias químicas e físicas dos gases de entrada e de saída, conforme a metodologia exposta no item 3.

As TABELAS 5.10 e 5.11 apresentam os resultados específicos, em GJ por tonelada de gusa. A temperatura ambiente foi adotada como a de referência nos cálculos, tendo sido considerada igual a 298,15 K.

TABELA 5.10
Exergia dos Gases de Entrada do VC2

| Gás | Exergia química: ϵ_0 (GJ/t de gusa) | Exergia física: ϵ_{ph} (GJ/t de gusa) | Exergia total (GJ/t de gusa) |
|-------|---|---|---------------------------------|
| GAF | 4,75 | 0,17 | 4,92 |
| GAC | 0,60 | 0,13 | 0,74 |
| GCO | 2,77 | 0,15 | 2,92 |
| GN | 0,07 | 0,00 | 0,07 |
| ar | 0,01 | 0,00 | 0,01 |
| total | 8,20 | 0,46 | 8,66 |

FONTE: elaboração própria, 2009

TABELA 5.11
Exergia dos Gases de Saída do VC2

| Setor | Exergia química: ϵ_0 (GJ/t de gusa) | Exergia física: ϵ_{ph} (GJ/t de gusa) | Exergia total (GJ/t de gusa) |
|--------------|---|---|---------------------------------|
| PBT | 0,05 | 0,10 | 0,15 |
| Perfis | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| Fio Máquina | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| Coqueria | 0,11 | 0,35 | 0,46 |
| Alto Forno | 0,12 | 0,01 | 0,13 |
| Sinterização | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| Caldeiras | 0,20 | 0,16 | 0,36 |
| Aciaria | 0,01 | 0,06 | 0,07 |
| Calcinação | 0,00 | 0,01 | 0,01 |
| total | 0,51 | 0,70 | 1,21 |

FONTE: elaboração própria, 2009

Da exergia total dos gases de 8,66 GJ/t de gusa, 5,23 GJ/t de gusa são transferidos aos processos produtivos. Os restantes 3,43 GJ/t de gusa correspondem às irreversibilidades dos processos de queima. Destes últimos, como mostrado, 1,21 GJ/t representam as irreversibilidades em fluxos dos gases de exaustão e 2,22 GJ/t de gusa correspondem às irreversibilidades nos processos de combustão, classificadas neste trabalho como outras irreversibilidades.

O aproveitamento exergetico dos poderes caloríficos dos gases combustíveis, representado pela relação entre a exergia térmica utilizada no VC1 e o total de entrada de exergia no VC2, é da ordem de 60%. Esta é a eficiência exergetica conjunta dos processos de combustão da usina.

Para cálculo das exergias das misturas dos gases de combustão gerados em cada área, foram determinadas as participações volumétricas de cada tipo de gás presente nas emissões, a partir das equações das reações de queima. Os valores obtidos constam da TAB.5.12.

TABELA 5.12
Participações Molares dos Produtos de Combustão nas Emissões, por Setor

| Componente | Participação molar (%) | | | | | | | | |
|------------------|------------------------|--------|-------------|----------|------------|--------|-----------|---------|------------|
| | Laminações | | | Coqueria | Alto forno | Sinter | Caldeiras | Aciaria | Calcinação |
| | PBT | Perfis | Fio Máquina | | | | | | |
| CO ₂ | 17,23 | 14,83 | 16,96 | 27,40 | 27,65 | 7,47 | 21,49 | 7,47 | 7,40 |
| H ₂ O | 14,80 | 16,20 | 15,02 | 6,77 | 6,43 | 22,24 | 2,96 | 22,24 | 22,05 |
| N ₂ | 67,54 | 68,58 | 67,59 | 65,67 | 65,66 | 69,42 | 75,19 | 69,42 | 68,82 |
| O ₂ | 0,43 | 0,39 | 0,43 | 0,16 | 0,26 | 0,87 | 0,36 | 0,87 | 1,73 |
| totais | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

FONTE: elaboração própria, 2009

5.4.3 Balço de exergia global

Para determinação da eficiência exergetica do processo produtivo, é necessário identificar as exergias associadas aos produtos e subprodutos da usina. Por outro lado, a separação dos demais componentes exergeticos em irreversibilidades associadas a descartes de resíduos e efluentes e em irreversibilidades associadas a outras irreversibilidades exergeticas internas é útil para orientar uma análise mais fina do processo industrial. Desta forma, os dados das TAB. 5.9 a 5.11 foram rearranjados para representarem os fluxos da usina como um todo. Seus valores constam da TAB. 5.13 e TAB. 5.14.

TABELA 5.13
Entradas de Exergia da Usina

| Insumos e matérias primas | GJ/t gusa |
|---|------------------|
| minério de ferro | 0,25 |
| calcário | 0,41 |
| carvão | 18,53 |
| moinha de coque | 3,65 |
| outros sólidos | 0,68 |
| coque de petróleo | 0,91 |
| água industrial | 0,45 |
| energia elétrica | 0,57 |
| gases (argônio, O ₂ , N ₂) | 0,04 |
| ar de combustão | 0,01 |
| gás natural | 0,07 |
| total | 25,57 |

FONTE: elaboração própria, 2009

TABELA 5.14
Saídas de Exergia da Usina

| Classificação | Descrição | GJ/t gusa |
|--|---|------------------|
| produtos e subprodutos | alcatrão | 0,65 |
| | óleo leve | 1,85 |
| | aço e carepa | 7,22 |
| | gases (Ar, N ₂) | 0,02 |
| | escória do alto-forno granulada | 0,21 |
| | outros (e. elétrica e GCO p/ terceiros) | 0,17 |
| | subtotal | 10,12 |
| irreversibilidades de fluxos (resíduos e efluentes líquidos e gasosos) | lama da aciaria | 0,13 |
| | escória da aciaria | 0,42 |
| | lama do alto-forno | 0,02 |
| | escória de alto-forno | 0,15 |
| | perdas de água nas torres | 0,34 |
| | perda de água no circuito fechado | 0,06 |
| | perda de água no circuito aberto | 0,02 |
| | vapor p/ áreas industriais | 0,05 |
| | vapor de extinção do coque | 0,28 |
| | produtos da combustão | 1,21 |
| | CO ₂ da calcinação | 0,06 |
| subtotal | 2,74 | |
| outras irreversibilidades | | 12,71 |
| saídas | total | 25,57 |

FONTE: elaboração própria, 2009

A FIGURA 5.4 apresenta o diagrama de Grassmann que ilustra o desempenho exergético global da usina. Pode ser visto que a eficiência exergética total, correspondente à relação entre a exergia dos produtos e subprodutos e a exergia total suprida à indústria, é de 39,58%.

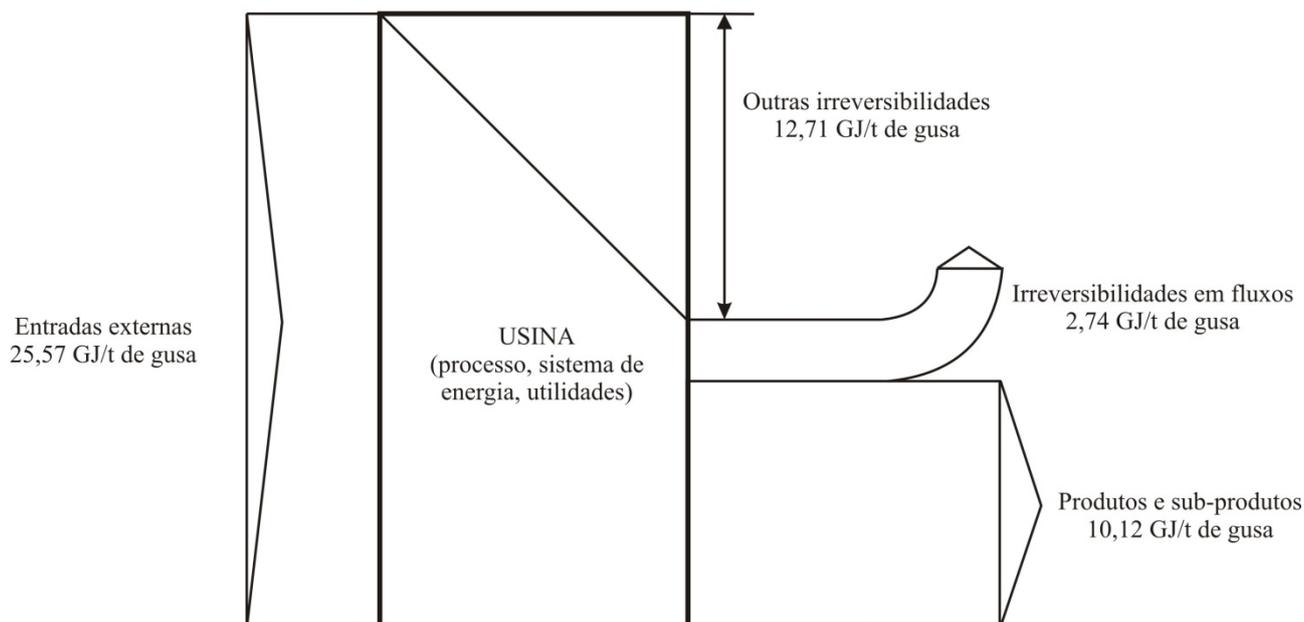


FIGURA 5.4 – Diagrama de Grassmann da Usina Siderúrgica

FONTE: Elaboração própria, 2009

5.4.4 Análise exergética dos setores industriais

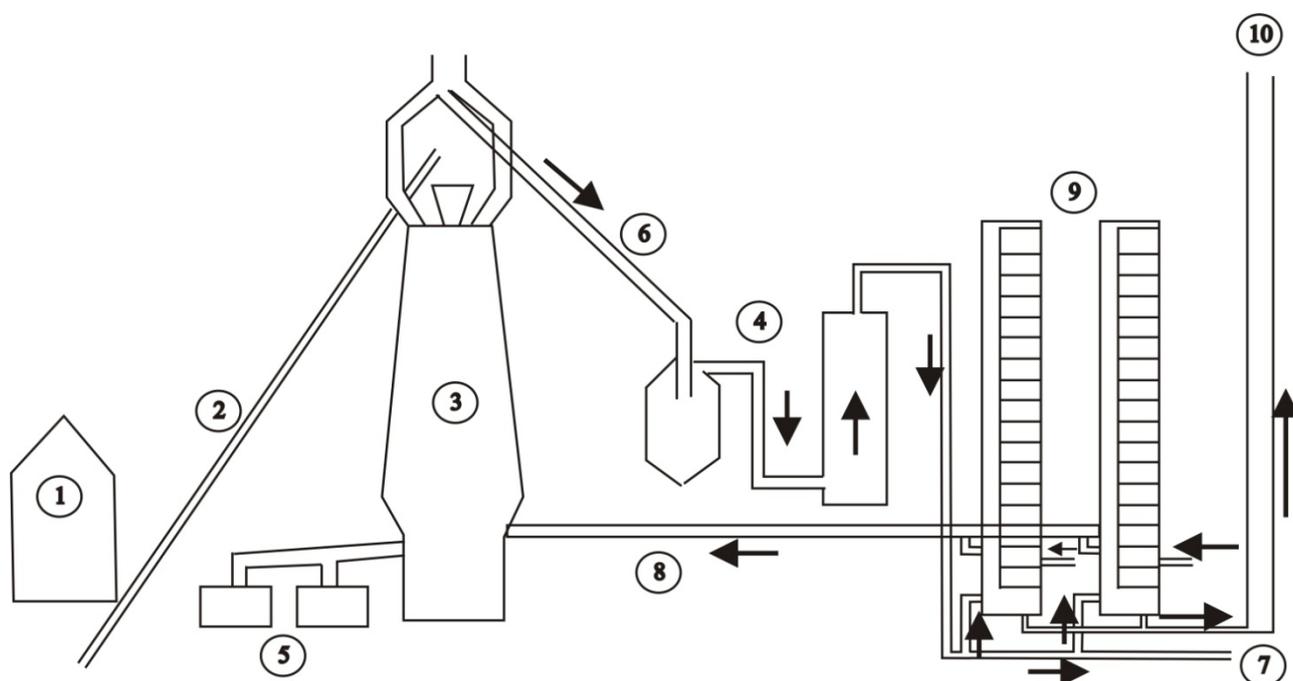
As etapas do processo industrial tiveram seus desempenhos exergéticos analisados individualmente. Foram estudadas a preparação de matérias primas (coqueria, calcinação e sinterização), o alto-forno, a aciaria e o sistema lingotamento - laminação. O desempenho exergético do sistema de energia e utilidades foi também avaliado. Compõem este sistema as caldeiras, sistemas de vapor e de geração termelétrica, o abastecimento, recirculação e tratamento de água e efluentes líquidos.

Na usina siderúrgica, existe muita circulação interna de gases combustíveis uma vez que os gases gerados na coqueria, na aciaria e no alto-forno são integralmente aproveitados como fontes energéticas. Anteriormente à composição das diversas misturas usadas nos setores da usina, são armazenados em gasômetros.

Na análise de cada etapa, são identificados não só os produtos de mercado da empresa, mas também aqueles que são insumos para outras etapas do processo.

5.4.4.1 Alto-forno

Os principais componentes e fluxos de massa do alto-forno estão indicados no esquema da FIG. 5.5.

**Legenda:**

- 1 - silos
- 2 - alimentação de carga
- 3 - alto-forno
- 4 - lavadores de gás: 2 estágios
- 5 - saídas de gusa e escória
- 6 - gás sujo
- 7 - gás limpo
- 8 - ar quente
- 9 - regeneradores
- 10 - chaminé

FIGURA 5.5 – Esquema de Fluxos no Alto-Forno

FONTE: MOURÃO et al., 2009, p. 58

A perda exergética deste processo de produção de gusa foi calculada considerando todos os insumos para o processo entrando no volume de controle nas condições ambientes. De forma semelhante, à exceção do gás enviado para o gasômetro e das emissões dos produtos da combustão, os demais produtos e subprodutos foram considerados nas condições ambientes. Este tratamento significa que todas as perdas térmicas e aquecimentos na etapa ocorrem dentro do volume do controle.

Os fluxos de entrada e de saída de exergia e massa estão apresentados na TAB. 5.15.

TABELA 5.15
Balanço Exergético do Alto-Forno

| item | ε (GJ/t gusa) |
|-------------------------------------|---------------------------|
| entradas | 19,572 |
| sinter | 1,107 |
| coque | 12,169 |
| finos | 3,795 |
| quartzo | n.s. |
| calcário | n.s. |
| lama AF | 0,016 |
| pó | n.s. |
| sucata | 0,011 |
| O ₂ | 0,008 |
| ar de combustão | 0,002 |
| ar de processo | 0,005 |
| gás misto | 2,354 |
| energia elétrica | 0,105 |
| saídas | 13,612 |
| produtos e subprodutos | 13,309 |
| Gusa | 7,997 |
| GAF | 4,914 |
| energia elétrica | 0,121 |
| escória granulada | 0,210 |
| pó coletado | 0,067 |
| irreversibilidades em fluxos | 0,303 |
| lama | 0,023 |
| escória | 0,148 |
| produtos de combustão | 0,132 |
| outros | n.s. |
| outras irreversibilidades | 5,960 |

FONTE: elaboração própria, 2009

A energia elétrica de saída do forno é gerada na turbina de topo, com potência de 11 MW. Esta energia é empregada dentro da própria instalação industrial.

A eficiência exergética do alto-forno é de 68 %. As irreversibilidades que ocorrem na produção de gusa correspondem a 30,45% das irreversibilidades totais da planta. Como auxiliar na identificação dos subsistemas responsáveis por esta destruição, foi feita uma avaliação nos regeneradores usados para pré-aquecimento do ar injetado no alto-forno.

Os balanços de massa, energia e exergia nesses equipamentos, constam da TAB. 5.16. Segundo os resultados encontrados, estes equipamentos operam com eficiência exergética da ordem de 85%.

TABELA 5.16
Balanços de Massa, Energia e Exergia nos Regeneradores do Alto-Forno

| entradas e saídas | T (K) | P_abs (kPa) | massa (t/t de gusa) | energia (GJ/t de gusa) | exergia (GJ/t de gusa) |
|-------------------------|-------|-------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| entradas | | | | | |
| ar de processo frio | 463 | 405,325 | 1,13 | 0,19 | 0,05 |
| ar de combustão | 463 | 101,325 | 0,40 | 0,07 | 0,00 |
| gás misto | 298 | 101,325 | 0,47 | 1,56 | 1,21 |
| total | | | 2,00 | 1,81 | 1,26 |
| saídas | | | | | |
| ar de processo aquecido | 1.523 | 405,325 | 1,13 | 1,56 | 1,07 |
| produtos da combustão | 376 | 101,325 | 0,87 | 0,07 | 0,13 |
| outros/perdas | | | | 0,18 | 0,06 |
| total | | | 2,00 | 1,81 | 1,26 |

FONTE: elaboração própria, 2009

5.4.4.2 Preparação de matérias-primas

As TABELAS 5.17 a 5.19 apresentam, respectivamente, os balanços exergéticos da calcinação, da sinterização e da coqueria.

Sozinha, a coqueria apresenta irreversibilidades correspondentes a 80% do valor total das etapas de preparação de matérias primas. No entanto, a eficiência exergética desse setor é de 87,3%, ao passo que a eficiência da calcinação é de 57,6% e a da sinterização é de 78,2%.

TABELA 5.17
Balanço Exergético da Calcinação

| entradas e saídas | | item | ϵ (GJ/t gusa) |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|
| entradas de insumos e matérias-primas | | calcário | 0,41 |
| | | GCO | 0,24 |
| | | ar de combustão | 0,00 |
| | | energia elétrica | 0,01 |
| | | total | 0,66 |
| fluxos de saída | produtos e subprodutos | cal | 0,38 |
| | irreversibilidades em fluxos | produtos de combustão | 0,06 |
| | | CO ₂ | 0,06 |
| | total de fluxos | 0,50 | |
| outras irreversibilidades | | | 0,16 |

FONTE: elaboração própria, 2009

Deve ser notado que, na coqueria, os subprodutos, alcatrão e óleo leve, foram considerados como produtos de mercado. Se fossem considerados resíduos, a eficiência do processo cairia para 78,8%,

continuando alta. No entanto, o acréscimo em valor absoluto é significativo no desempenho global da indústria.

TABELA 5.18
Balança Exergética da Sinterização

| entradas e saídas | | item | ϵ (GJ/t gusa) |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|
| entradas de insumos e matérias-primas | | minério + finos | 0,25 |
| | | coque de petróleo | 0,91 |
| | | ar de combustão | 0,00 |
| | | GCO | 0,07 |
| | | energia elétrica | 0,19 |
| | | total | 1,42 |
| fluxos de saída | produtos e subprodutos | sinter | 1,11 |
| | irreversibilidades em fluxos | produtos de combustão | 0,00 |
| | total de fluxos | | 1,11 |
| outras irreversibilidades | | | 0,31 |

FONTE: elaboração própria, 2009

TABELA 5.19
Balança Exergética da Coqueria

| entradas e saídas | | item | ϵ (GJ/t gusa) |
|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------|
| entradas de insumos e matérias-primas | | carvão | 18,53 |
| | | gás misto | 2,06 |
| | | água | 0,00 |
| | | ar de combustão | 0,00 |
| | | energia elétrica | 0,03 |
| | | total | 20,62 |
| fluxos de saída | produtos e subprodutos | moinha | 0,25 |
| | | coque | 12,17 |
| | | alcatrão | 0,65 |
| | | óleo leve | 1,85 |
| | | GCO | 3,08 |
| | irreversibilidades em fluxos | cinzas | 0,00 |
| | | vapor | 0,28 |
| | | produtos de combustão | 0,46 |
| total de fluxos | | | 18,74 |
| outras irreversibilidades | | | 1,88 |

FONTE: elaboração própria, 2009

5.4.4.3 Aciaria

A aciaria é praticamente auto-suficiente em energia, apresentando irreversibilidades em fluxos de 13,0 % e internas (outras irreversibilidades) de somente 0,2%. Sua eficiência exergética é de 86,8%, considerando o aço e o gás gerado como produtos.

Os fluxos de exergia na aciaria são apresentados na TAB. 5.20.

TABELA 5.20
Balço Exergético da Aciaria

| entradas e saídas | | item | ϵ (GJ/t gusa) |
|---------------------------------------|------------------------------|--|------------------------|
| entradas de insumos e matérias-primas | | gusa | 8,00 |
| | | sucata | 0,00 |
| | | cal | 0,38 |
| | | ligas, diversos | 0,70 |
| | | O ₂ (148.226,10 NDam ³) | 0,09 |
| | | GCO | 0,02 |
| | | ar de combustão | 0,00 |
| | | energia elétrica | 0,14 |
| | | total | 9,33 |
| fluxos de saída | produtos e subprodutos | aço líquido | 7,22 |
| | | GAC | 0,87 |
| | irreversibilidades em fluxos | produtos de combustão | 0,66 |
| | | lama | 0,13 |
| | | escória | 0,42 |
| total de fluxos | 9,30 | | |
| outras irreversibilidades | | | 0,03 |

FONTE: elaboração própria, 2009

5.4.4.4 Lingotamento e laminação

Os fluxos de exergia em todos os processos de lingotamento e de laminação de todos os tipos de produto são apresentados em conjunto na TAB.5.21.

TABELA 5.21
Balço Exergético dos Lingotamentos e Laminações

| entradas e saídas | | item | ϵ (GJ/t gusa) |
|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------|
| entradas de insumos e matérias-primas | | aço | 7,21 |
| | | gás misto PBT | 0,64 |
| | | gás misto perfis | 0,13 |
| | | gás misto fio maquina | 0,12 |
| | | ar de combustão - PBT | 0,01 |
| | | ar de combustão - perfis | 0,00 |
| | | ar de combustão - fio maquina | 0,00 |
| | | energia elétrica | 0,09 |
| | | total | 8,22 |
| fluxos de saída | produtos e subprodutos | produto final | 6,10 |
| | | carepa | 1,12 |
| | irreversibilidades em fluxos | produtos da combustão - PBT | 0,14 |
| | | produtos da combustão - perfis | 0,02 |
| | | produtos da combustão - fio maq. | 0,02 |
| total de fluxos | 7,40 | | |
| outras irreversibilidades | | | 0,82 |

FONTE: elaboração própria, 2009

Como entradas foram consideradas as quantidades totais de aço, de gás misto, de ar de combustão e de energia elétrica consumida em todos os processos dos sistemas de lingotamento e laminação, responsáveis pela conformação final de todos os tipos de produtos da empresa.

A eficiência exergética total das etapas é de 87,8%, assumindo que a carepa pode ser reaproveitada.

5.4.4.5 Sistema de energia e utilidades

O sistema de energia e utilidades possui uma estrutura muito complexa. Estão apresentados na TAB.5.22 os fluxos mais significativos.

TABELA 5.22
Balanço de Exergia do Sistema de Energia e Utilidades

| entradas e saídas | | item | ϵ (GJ/t gusa) |
|---------------------------|------------------------------|--|------------------------|
| fluxos de entrada | | GAF | 2,35 |
| | | GAC | 0,62 |
| | | GCO | 0,43 |
| | | ar de combustão | 0,00 |
| | | energia elétrica adquirida | 0,56 |
| | | energia eletr. TRT | 0,12 |
| | | água | 0,12 |
| | | total | 4,20 |
| fluxos de saída | produtos e subprodutos | vapor a 12 kg/cm ² -usina | 0,02 |
| | | vapor a 25 kg/cm ² -carboq. | 0,01 |
| | | vapor a 12 kg/cm ² -carboq. | 0,02 |
| | | energia elétrica gerada | 0,69 |
| | | energia elétrica adquirida | 0,56 |
| | irreversibilidades em fluxos | produtos de combustão | 0,36 |
| | total de fluxos | 1,67 | |
| outras irreversibilidades | | | 2,53 |

FONTE: elaboração própria, 2009

As irreversibilidades no sistema de energia e utilidades só são inferiores, em valor absoluto, às do alto-forno. Quanto à eficiência exergética, considerando o vapor e a energia elétrica como produtos, é de 31,2%.

5.4.4.6 Diagrama de Grassmann do processo industrial

A partir dos balanços setoriais apresentados anteriormente, foi elaborado um diagrama de Grassmann da linha de produção englobando todas as etapas de fabricação dos produtos de aço.

Esse diagrama é apresentado na FIG. 5.6. Deve ser registrado que tanto o sistema de energia e utilidades, como o gasômetro não estão incluídos.

A diferença entre a destruição exergética total da planta e a soma das destruições parciais das etapas é devida a fatores tais como a não inclusão de fluxos de pouco significado e todo o sistema de distribuição interna de água. No entanto, a identificação dos pontos de destruição de 11,68 GJ/t de gusa em um total de 12,71 JG/t de gusa, representando em torno de 92%, possibilita uma análise de boa qualidade dos fluxos de exergia da indústria.

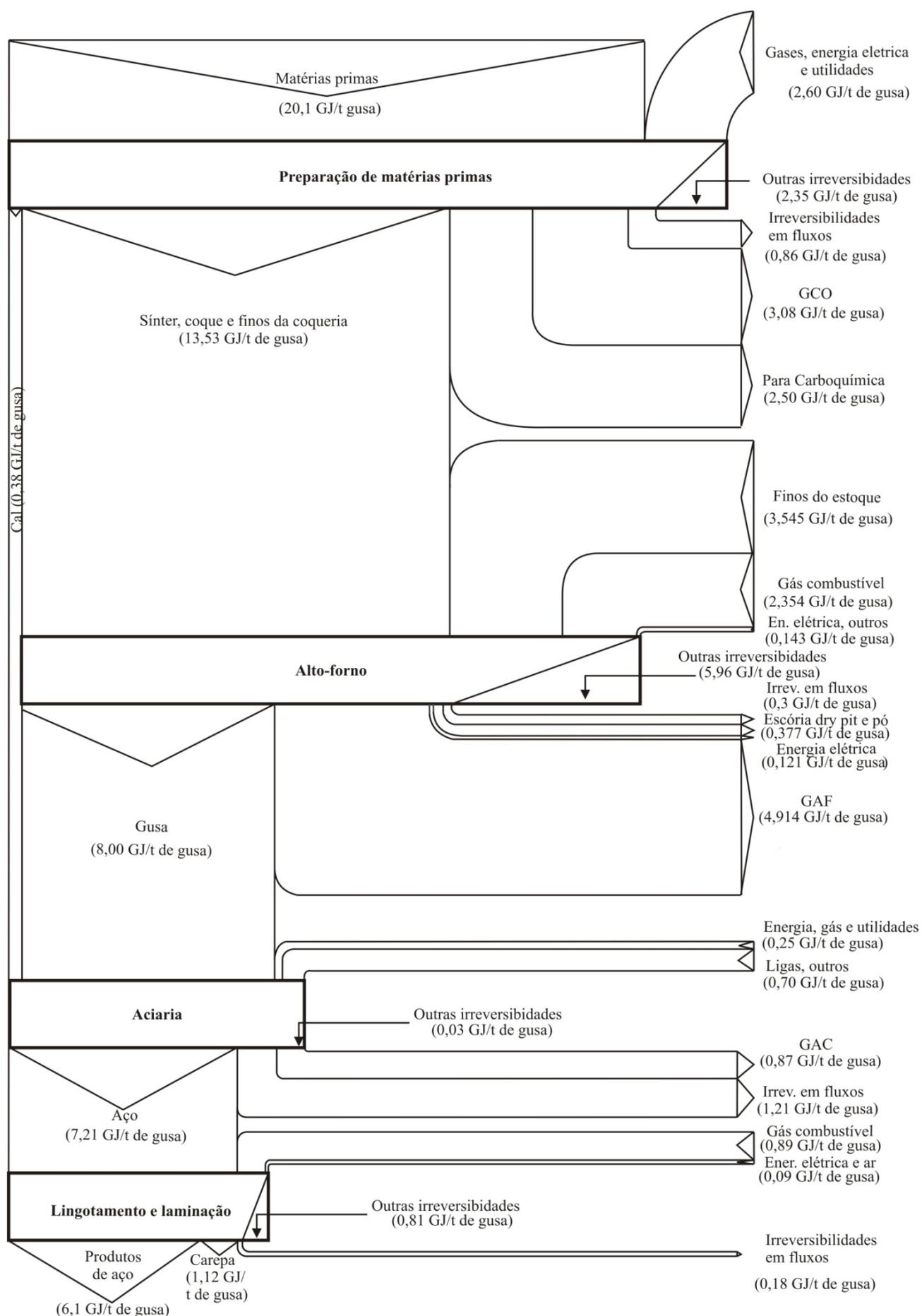


FIGURA 5.6 – Diagrama de Grassmann dos Processos Siderúrgicos

5.5 Usos da água

Os fluxos de água são detalhados na TAB. 5.23 e na FIG. 5.7.

TABELA 5.23
FLUXOS DE ÁGUA NA USINA

| entrada | | t/ t de gusa |
|---------------------|--|---------------------|
| captação no lago | | 9,789 |
| destino | | t/ t de gusa |
| caldeiras | | 0,223 |
| consumo humano | | 0,864 |
| processo industrial | coqueria | 0,517 |
| | circuitos abertos de refrigeração | 0,390 |
| | água de reposição nos circuitos fechados | 7,794 |
| | total do processo industrial | 8,701 |

FONTE: comunicação pessoal, 2009

O vapor gerado nas caldeiras é utilizado para geração de energia elétrica e para usos nas áreas industriais, incluindo limpeza das instalações.

Na coqueria, a água é empregada no processo para resfriamento rápido do coque formado por destilação do carvão na ausência de ar, segundo o procedimento relatado no item 2.2.3.

Os outros usos industriais referem-se a etapas de resfriamento. São realizados resfriamentos em circuitos abertos e fechados. Dentre os primeiros, existem resfriamentos diretos e indiretos. Nos diretos, há contato da água com o material a ser resfriado, o que provoca contaminação do efluente líquido produzido.

Nos circuitos fechados de refrigeração a água, o calor é dissipado para o ambiente nas torres de refrigeração. As perdas por evaporação representam 77,1% da água captada para o processo. Nesses circuitos são também registradas perdas líquidas substanciais, correspondendo a 12,4% da água enviada para o processo.

De toda a água captada, somente 0,5% não são utilizados nos volumes de controle considerados, sendo enviados para a unidade carboquímica externa.

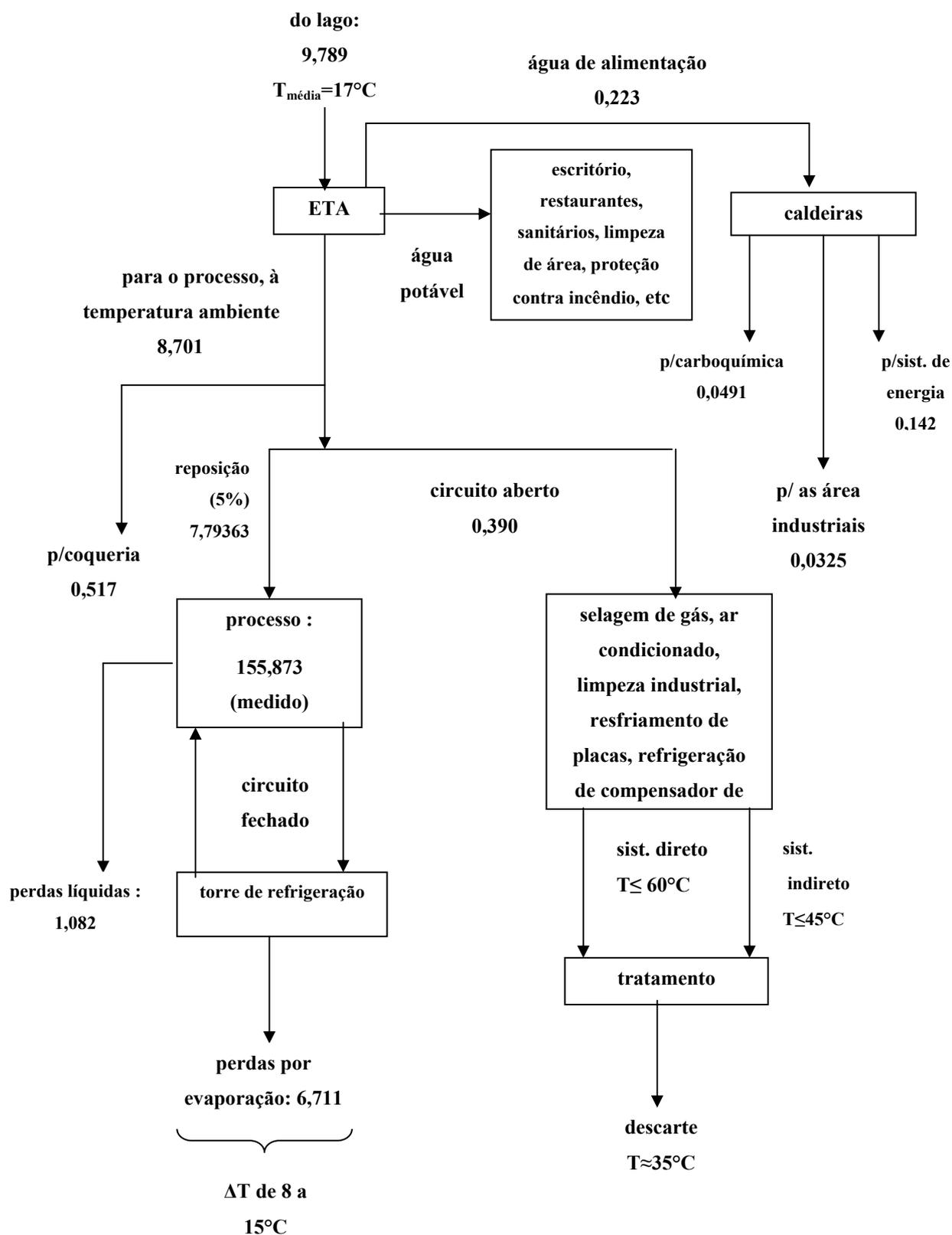


FIGURA 5.7 – Fluxos de Água na Usina
 FONTE : comunicação pessoal, 2008

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Análise do balanço energético global

A partir dos dados apresentados no item 5.1.2, foi elaborada a TAB. 6.1, onde é resumido o balanço global de energia da unidade industrial.

TABELA 6.1
Balanço Global de Energia

| Entradas e Saídas | | Total (GJ/t gusa) |
|-------------------|--|-------------------------|
| entradas | energia elétrica | 0,56 |
| | energia de combustíveis (carvão, moinha, coque e GN) | 21,57 |
| | total | 22,14 |
| saídas | sólidos - calor sensível | 6,79 |
| | líquidos – alcatrão e óleo leve | 2,34 |
| | perdas no circuito de água | 6,65 |
| | entalpia de gases | 1,76 |
| | energia elétrica | 0,02 |
| | GCO para terceiros | 0,11 |
| | outras perdas | 4,21 |
| | total | 22,14 |

FONTE: elaboração própria, 2009

A primeira observação a ser feita a partir do balanço global de energia é que o consumo específico de 22,14 GJ/t de gusa, nesta usina estudada, corresponde a 21,37 GJ/t de aço bruto. A média de consumo em seis das grandes unidades siderúrgicas brasileiras, conforme a TAB. 2.34, foi de 20,25 GJ/t de aço bruto, em 2006. Assim, a indústria estudada apresentou, em 2007, um consumo energético 5,5% superior ao do setor siderúrgico nacional.

Comparando o consumo energético da empresa estudada, em GJ/t de aço bruto, com os dados disponíveis da literatura consultada e expostos no item 2.3.2, observa-se as variações apresentadas na TAB. 6.2.

Além do aporte externo de energia elétrica, de 0,56 GJ/t gusa ou 0,54 GJ/t de aço bruto, há geração interna, tanto na turbina de topo quanto na central termelétrica. Considerando eficiência de geração de energia elétrica de 33% adotada pelos diversos autores consultados, a entrada total de energia primária é de 23 GJ/t de aço bruto.

TABELA 6.2
Análise Comparativa entre Consumos Energéticos na Siderurgia

| Referência | Consumo específico (GJ/t de aço bruto) | Variação relativa ao da usina estudada (%) | Observações |
|----------------------|--|--|--|
| PRICE et al (2001) | 15,8 a 25,3 | -26,1 a 18,4 | Valor referente à energia primária, com eficiência de conversão de energia térmica em eletricidade é de 33% |
| WORRELL et al (1999) | 15,3 | -28,4 | Valor referente ao consumo de energia primária, com as melhores práticas e 10% de sucata na carga da aciaria |
| STUBBLES (2000) | 19,4 | -9,2 | Valor referente às boas práticas, somente produção de aço. Não inclui lingotamento e laminação |
| DE BEER et al (1998) | 19,1 | -10,6 | Cálculo do consumo energético específico teórico |
| DE BEER et al (1998) | 15,5 | -27,5 | Demanda futura, unidade de referência do IISI |

FONTE: elaboração própria, 2009

Pode ser observado que há indicações de potencial para redução de consumo de energia na faixa entre 2 e 6 GJ/t de aço bruto, aproximadamente, mesmo sem introdução de alterações tecnológicas. A identificação do potencial real de melhoria de eficiência somente pode ser feito através da avaliação do desempenho exergético da indústria.

WORRELL e GALITSKY (2006) apresentaram sugestões detalhadas dos pontos onde usualmente são encontrados potenciais de melhoria de eficiência energética no processo siderúrgico. Essas sugestões estão listadas na TAB. 2.37 e se encontram resumidas na TAB. 6.3.

TABELA 6.3
Potencial Sugerido de Economia de Energia no Parque Siderúrgico Mundial

| Opção | Economia Total de Energia Primária (GJ/tcs) |
|--|---|
| Sinterização | 0,20 |
| Coqueria | 0,51 |
| Alto-Forno | 5,89 |
| Lingotamento | 5,62 |
| Laminação a quente | 2,58 |
| Laminação a frio e acabamento | 0,68 |
| Manutenção, cogeração, controle de velocidade variável | 1,79 |

FONTE: WORRELL e GALITSKY, 2006, p.3

Vê-se que os maiores potenciais indicados estão concentrados no alto-forno e no lingotamento, embora tenha sido considerada a redução de consumo decorrente de substituição do alto-forno por

processo de fusão-redução, ainda não completamente aceito pelas empresas. Os equipamentos e procedimentos que compõem o lingotamento são bastante diversificados, já que dependem do tipo de produto final e rota tecnológica da planta – lingotamento contínuo ou convencional. Assim, há indicação de que devem ser concentrados esforços, primeiramente, no estudo de otimização dos altos-fornos. Esta observação é corroborada pela análise dos valores dos fluxos de energia envolvidos em cada etapa do processo. Considerando só os setores mais exigentes em termos de energia na usina estudada, os fluxos de entrada, devidos ao carvão e gases combustíveis, são maiores no conjunto coqueria e alto-forno, com 21,34 GJ/t de aço e no sistema de geração de vapor, com 3,12 GJ/t de aço.

Ainda com relação às possíveis otimizações de uso de energia em altos-fornos, como apresentado na TAB.2.38, além da utilização da energia do gás para geração de energia elétrica em turbinas de topo – TRT e a limpeza a seco do gás em substituição ao lavador tipo Venturi usual, DE BEER et al. (1998) sugeriram também o reaproveitamento do calor sensível da escória em caldeira de radiação. Com estas providências, a economia de energia foi estimada em 1,21 GJ/t de aço laminado.

A divisão inicial da usina em dois volumes de controle permitiu o acompanhamento dos processos de queima de gases combustíveis. As temperaturas de exaustão dos gases gerados nas queimas realizadas em dois dos processos de laminação, na coqueria e na aciaria são, respectivamente, 773K, 653K, 1073K e 1373K. O potencial de reaproveitamento dos calores sensíveis desses gases, considerando que a temperatura de exaustão pode ser de 573K, é de 0,67 GJ/t de gusa, correspondente a 38% do total lançado no meio ambiente.

O estudo das diversas etapas do processo irá fornecer dados mais objetivos para a condução futura de decisões de projetos de melhoria do uso de energia.

6.2 Análise das perdas e destruições globais de exergia

A eficiência exérgica adotada neste trabalho corresponde à razão entre a exergia de todos os produtos e subprodutos e a exergia total de entrada, como exposto no item 3.

Considera-se produtos e sub-produtos do processo aqueles que possuem valor de mercado. Assim, na siderurgia, além do aço e da carepa, são considerados também os gases combustíveis e gases

industriais enviados para terceiros, o alcatrão, o óleo leve, a escória granulada e a energia elétrica que sai da usina.

A partir das TAB. 5.13 e 5.14, foi montada a TAB 6.4, que resume o desempenho exergético da unidade industrial. Com estes dados e em conformidade com o item 5.4.3, a eficiência exergética do processo é de 39,58%. Pode ser constatado que as perdas de exergia através de fluxos lançados no ambiente e às irreversibilidades internas totalizam 15,54 GJ / t de gusa. Deste total, parte representa as irreversibilidades evitáveis e parte representa as irreversibilidades intrínsecas.

TABELA 6.4
Desempenho Exergético da Unidade Industrial

| | GJ/t de gusa | GJ/ t de aço bruto | GJ/t de aço laminado |
|---------------------------------------|--------------|--------------------|----------------------|
| Entrada de exergia | 25,57 | 24,68 | 29,00 |
| Saídas de exergia | | | |
| Exergia dos produtos | 10,12 | 9,77 | 11,48 |
| Irreversibilidades em fluxos de massa | 2,74 | 2,64 | 3,11 |
| Outras irreversibilidades | 12,71 | 12,27 | 14,41 |

FONTE: elaboração própria, 2009

O total de irreversibilidades evitáveis representa o potencial de otimização do processo, enquanto que as irreversibilidades intrínsecas correspondem aos requerimentos exergéticos teóricos mínimos para que o processo ocorra. Nestas últimas se incluem as perdas inevitáveis, como, por exemplo, o fluxo de calor de efluentes gasosos que possuem temperatura mínima de lançamento superior à atmosférica, além de alterações entrópicas inerentes aos processos, como, por exemplo, as que ocorrem na combustão. Em relação à produção de aço bruto, as irreversibilidades totalizam de 14,91 GJ/t de aço bruto e, em relação ao produto final, equivalem a 17,52 GJ/t de aço laminado.

No caso da siderurgia, não há referência na literatura sobre as destruições intrínsecas associadas a cada etapa do processo produtivo, à exceção de estudo aplicado ao alto-forno e que será abordado no item 6.3. A determinação destas perdas demandará minuciosa avaliação de cada processo de transformação, considerando não só as demandas teóricas, mas também as perdas práticas decorrentes do estado-da-arte. Estas últimas irão se modificar à medida que ocorra evolução tecnológica ou mesmo a disponibilização comercial de tecnologias novas.

Assim, a análise dos resultados encontrados foi feita por comparação com os indicadores dos autores analisados e discutidos na revisão bibliográfica.

No estudo realizado por COSTA et al. (2001), comentado no item 2.4.2, as perdas e destruições exergéticas totais dos processos siderúrgicos estudados, foram, em média, de 12,92 GJ/t de aço líquido, incluídas as perdas na mineração de calcário e em processo de pelotização e excluídos os processos de lingotamento, laminação e acabamento. No entanto, a autor enfatiza que os valores não são valores médios, mas sim indicativos obtidos de bases de dados internacionais da comunidade europeia, das Nações Unidas, de empresas e entidades privadas e de órgãos públicos.

Para comparação entre o resultado dos autores com o do presente trabalho, às perdas acima deveria ser agregada a destruição exergética das etapas de lingotamento e laminação e retirada aquela correspondente à mineração de calcário, no montante de 0,97 GJ/t de aço líquido. Se forem adotados os mesmos valores encontrados por DE BEER et al. (1998), as perdas totais passam a 13,75 GJ/t de aço líquido, que é 7,8% inferior aos 14,91 GJ/t de aço bruto da usina objeto desta análise.

COSTA et al. (2001) concluíram ainda, com base em análise de sensibilidade, que usinas que possuem sinterização, coqueria e aciaria pouco eficientes podem apresentar perdas exergéticas da ordem de 17 GJ/t de aço líquido. Este valor é 14% superior ao encontrado na usina estudada.

Deve ser considerado, também, que os resultados são sensíveis a variações na composição do carvão, que é a grande fonte exergética do processo. A variação de composição nos demais insumos é pouco significativa.

Apesar de não ser possível uma análise comparativa rigorosa, não só pelos autores não terem abordado o processo integrado completo, mas também por não terem apresentado a composição química do carvão médio, os resultados do presente balanço exergético são indicativos de que a unidade industrial possui tecnologia e condições operacionais típicas do setor.

A planta siderúrgica integrada hipotética, modelo IISI, analisada por DE BEER et al. (1998), cujos resultados foram apresentados na TAB.2.42, possui estrutura e porte comparáveis aos da usina abordada no presente trabalho. As principais diferenças são devidas aos fatos de que na planta hipotética, diferentemente da estudada, não é feita injeção de finos no alto-forno e não há lingotamento convencional. O segundo fator é oneroso sob o aspecto de eficiência energética pois exige uma etapa de reaquecimento a mais do que no lingotamento contínuo. O primeiro leva a menor consumo, pois, como os finos substituem parcialmente o coque, há menor necessidade de gastos com a preparação da matéria prima.

Os dados utilizados pelos autores foram compilados por especialistas a partir de valores operacionais de unidades de diversos países. Apesar de os equipamentos e processos escolhidos terem sido considerados os energeticamente mais eficientes à época dentre os comercialmente disponíveis, as demandas exergéticas, também neste caso, não representam as mínimas teóricas, mas sim as menores dentro do estado-da-arte.

A usina de referência, modelo IISI, possui as características:

- coqueria: 4 baterias de 100 fornos.; uso de GAF enriquecido; extinção a água.
- sinterização: 2 leitos de 400 m².
- pré-aquecedores de ar ; aquecimento a 1.100 °C e pressurização a 4,0 bar; 37% de GCO e 63% de GAF (com base na entalpia); compressor movido a turbina de condensação do vapor; ar frio pré-aquecido por troca de calor com gases de exaustão até 200 °C.
- alto-forno: 2 fornos de 4.400 m³; razão de coque de 470 kg/t de gusa; equipados com turbina de topo; sem injeção de finos de carvão.
- aciaria (BOF) : 3 conversores de 360 t; razão de metal quente/sucata de 75% / 25%; recuperação do GAC.
- lingotamento contínuo: 2 conjuntos paralelos de rolos.
- forno de reaquecimento: 3 fornos tipo *walking beam* com multi-zonas; usa 87% de GCO e 13% de GAF; ar pré-aquecido a 500°C.
- laminação de produtos longos a quente (*hot strip mill*): 5 desbastadores e 7 conjuntos de acabamento; uso de caldeiras de recuperação de calor residual
- geração de energia: caldeira a vapor; turbinas com liberação de vapor de média e baixa pressão e turbinas com condensação de vapor; uso de GCO, GAF e GAC; atende à demanda total de energia elétrica; produz vapor de média e alta pressão.
- a planta é alimentada com 70% de sinter e 30% de pelotas, não produzidas na unidade.
- foi considerado que o lingotamento contínuo produz somente placas.
- as operações de acabamento não estão incluídas na análise.

Como mostrado na TAB. 2.42, em conjunto, as chamadas perdas externas e internas, montam a 11,62 GJ/t de aço laminado e a exergia total dos produtos úteis foi estimada em 10,9 GJ/t de aço laminado. Perdas externas são associadas a fluxos não recuperados, ou irreversibilidades em fluxos,

e as internas ocorrem dentro da fronteira do sistema, correspondendo às outras irreversibilidades. O detalhamento dessas perdas é mostrado na TAB. 6.5.

TABELA 6.5
Perdas de Exergia na Usina de Referência IISI

| etapa | perdas externas (GJ/t de aço laminado) | | | | perdas internas (GJ/t de aço laminado) | Total (GJ/t de aço laminado) |
|--------------------|--|-----------------------------|--------------------|-------|--|------------------------------|
| | radiação e convecção | exergia dos fluxos perdidos | perdas de material | total | | |
| coqueria | 0,28 | 0,47 | 0,24 | 0,99 | 0,87 | 1,86 |
| sinterização | 0,29 | 0,39 | | 0,68 | 0,98 | 1,66 |
| pré-aquecimentos | 0,25 | 0,11 | | 0,36 | 0,41 | 0,77 |
| alto-forno | 0,44 | 0,18 | 0,04 | 0,66 | 1,35 | 2,01 |
| aciaria | 0,12 | 0,06 | | 0,18 | 0,34 | 0,52 |
| lingotamento | 1,05 | | | 1,05 | 0,06 | 1,11 |
| reaquecimento | 0,04 | 0,20 | | 0,24 | 0,50 | 0,74 |
| laminação a quente | 0,62 | | | 0,62 | 0,12 | 0,74 |
| geração energia | 0,20 | 0,21 | | 0,41 | 1,51 | 1,92 |
| outros | 0,28 | | | 0,28 | 0,03 | 0,31 |
| total | 3,57 | 1,62 | 0,28 | 5,47 | 6,15 | 11,62 |

FONTE: DE BEER et al., 1998, p.148

Comparações entre os desempenhos dos diferentes setores é apresentada no item 6.3. O desempenho global, em relação ao da usina estudada, apresenta as seguintes diferenças:

- exergia dos produtos: a exergia associada aos produtos úteis da usina do IISI foi calculada em 10,9 GJ/trs. A exergia dos produtos da usina estudada é de 10,12 GJ/t de gusa, ou 11,48 GJ/trs, portanto, 5,3% maior que o modelo IISI. No entanto, considerando-se somente a exergia do aço e carepa da usina estudada, que monta a 7,22 GJ/t de gusa ou 8,19 GJ/trs, o valor do IISI é superior em 33%. Conclui-se que a principal diferença entre as duas plantas deve-se, principalmente, aos materiais que são considerados como produtos e subprodutos comercializáveis, nos dois casos.
- outras irreversibilidades ou perdas internas: este foi o tópico onde surgiu a maior divergência de resultados. A usina IISI apresenta perdas correspondentes a 42,7% às da usina estudada. A diferença é um fator indicativo de que há aprimoramentos elevados a serem realizados no desempenho exergético da usina estudada, no que se refere a redução de etapas de resfriamento seguidas por aquecimentos, aproveitamento de calores sensíveis, reduções de perdas térmicas e aumento de eficiência de equipamentos elétricos.
- perdas externas: a usina estudada apresenta perdas correspondentes a 56,8% das calculadas para a planta do IISI. Este resultado, favorável ao caso estudado, significa que há um melhor aproveitamento das exergias dos fluxos efluentes da usina.

A maior perda externa identificada por DE BEER et al. (1998) é decorrente de radiação e convecção, sendo a maior parte consequência de resfriamento de materiais. Nas perdas de exergia física e química, os gases de combustão merecem registro.

A maior fonte de perdas internas são as reações de combustão. Outras são reações químicas, transferência de calor, compressão e expansão. Na ausência de preaquecimento dos reagentes, as perdas exergéticas na combustão são da ordem de 30% da exergia do combustível. Combustão ocorre na coqueria, sinterização, fornos de pré-aquecimento, reaquecimento e sistema de potência. A exergia de todos os combustíveis é da ordem de 7 GJ/t de aço laminado, sendo que as perdas na combustão são da ordem de 2,0 a 2,5 GJ/t de aço laminado.

Com o melhor aproveitamento dos calores sensíveis dos gases de exaustão na coqueria, laminações PBT e de perfis e na aciaria, sugerido no item 6.1, o aumento do aproveitamento exergético da unidade industrial será de 0,4 GJ/t de gusa. A medida representaria uma redução de 9,5% nas perdas exergéticas da usina em fluxos.

Um segundo tipo de perda interna é devido às irreversibilidades de outras reações (p.ex. conversão de carbono em CO_2), atritos, misturas e quedas de pressão. Ocorrem principalmente na coqueria, alto-forno e aciaria. São estimadas na faixa de 1,5 a 2,0 GJ/t de aço laminado.

Um terceiro tipo ocorre por transferência de calor nos trocadores. São geralmente minimizadas com o uso de operação em contracorrente, pois há menor diferença de temperatura. Nas operações do sistema de potência, fornalhas de preaquecimento de ar, aquecimento do minério no alto-forno e na sinterização e na coqueria, a perda é estimada entre 0,5 e 1,0 GJ/t de aço laminado.

Os autores concluíram que as perdas de exergias ocorrem principalmente devido às altas temperaturas e aos processos com vários passos de resfriamento e aquecimento. Para reduzi-las, é necessário diminuir temperaturas ou o número de mudanças na temperatura.

6.3 Análise das perdas e destruições de exergia nos setores industriais

Os balanços exergéticos apresentados na TAB.5.15 à TAB.5.22 mostraram que as irreversibilidades mais significativas da usina ocorrem, por ordem, no alto-forno (5,96 GJ/t de gusa), sistema de energia e utilidades (2,53 GJ/t de gusa) e na coqueria (1,88 GJ/t de gusa).

Em relação aos dados apresentados na TAB.6.5, pode ser constatado que, as coqueiras das usinas teórica, modelo IISI, e a da usina estudada apresentam desempenhos relativamente próximos: a eficiência da primeira é 14,6% maior. No entanto, o alto-forno da usina IISI apresenta um perda exergética de 2,01 GJ/t de aço laminado, contra 6,76 GJ/t de aço laminado na usina analisada. O segundo maior destruidor de exergia é o sistema de energia. Não podem ser comparados diretamente, pois na usina analisada o setor engloba também o sistema de água e vapor. Maior detalhamento das perdas do alto-forno é apresentado no item 6.3.1, seguinte.

Considerando que o sistema de energia e utilidades não é parte da linha produtiva do aço, tratando-se de processos convencionais de geração termoelétrica e de geração de vapor, as medidas de otimização são convencionais e não serão abordadas neste trabalho. Deve, no entanto, ser registrado que a eficiência total do sistema é próxima a 31%, valor este típico da atividade. DE BEER et al. (1995) apontam 35% como eficiência exergética típica do setor, indicando valores de perdas exergéticas nas caldeiras de 1,8 GJ/t de aço laminado. Registra-se também que melhorias no sistema de utilização de vapor e água da usina poderão se refletir em melhoria da eficiência do sistema de energia e utilidades, já que devem ser evitados descartes e perdas de vapor, condensados e de água.

Os resultados dos balanços do alto-forno e da coquearia são analisados a seguir.

6.3.1 Análise do balanço exergético do alto-forno

A partir dos dados da TAB.5.15, foi montada a TAB. 6.6, com o resumo dos fluxos de exergia no alto-forno.

As irreversibilidades totais na etapa podem ser comparadas aos resultados disponíveis na bibliografia, apresentados no item 2.4.2:

- COSTA et al. (2001): 3,43 GJ/t de aço líquido;
- NOGAMI et al. (2004): 1,842 GJ/t de metal quente, em fornos de pequeno porte.
- DE BEER et al. (1998): 2,78 GJ/t de aço laminado, sendo que 0,77 GJ/t de aço bruto ocorrem no regenerador.
- AKYIAMA e YAGI (1998): 1,458 GJ/t de metal quente, como valor mínimo teórico, para fornos com suprimento de carvão de 383 kg/t de metal quente e produção de escória de 250 kg/ t de metal quente.

TABELA 6.6
Desempenho Exergético do Alto-Forno

| item | ϵ (GJ/t gusa) | ϵ (GJ/t aço bruto) | ϵ (GJ/t aço laminado) |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| entradas | 19,572 | 18,892 | 22,197 |
| saídas | 13,612 | 13,139 | 15,438 |
| produtos e subprodutos | 13,309 | 12,846 | 15,094 |
| irreversibilidades de fluxos | 0,303 | 0,293 | 0,344 |
| outras irreversibilidades | 5,960 | 5,753 | 6,759 |

FONTE: elaboração própria, 2009

Mesmo considerando como referência, conservadoramente, o valor de COSTA et al. (2001), há indicação de que há um potencial de melhoria de desempenho exergético do alto-forno da ordem de 2,3 GJ/t de aço bruto.

No presente estudo, a perda de calor sensível do gusa, da temperatura de saída do forno até a temperatura ambiente, foi incorporada às perdas do alto-forno. No entanto, a temperatura de entrada do gusa na aciaria é de 1.000°C, assim, a redução da temperatura até a de saída da usina, que é a ambiente, pode, somente para efeito comparativo com outros autores, ser considerada na área de lingotamento e laminação. A perda de exergia devida ao fluxo de calor, considerando o gusa como reservatório térmico, corresponde a 0,51 GJ/t de gusa. Mesmo com expurgo deste valor, há ainda potencial de economia no alto-forno da ordem de 1,9 GJ/t de gusa.

A eficiência exergética global do alto-forno em estudo é de 68%. De acordo com WORRELL e GALITSKY (2006), melhorias dos sistemas de controle e automação podem levar a uma economia de consumo de combustível correspondente a 0,69 GJ/tab.

O estudo específico dos regeneradores, detalhado na TAB. 4.16, apontou para irreversibilidades de 0,19 GJ/t de gusa, ou 0,18 GJ/t de aço bruto, valor que é igual a 23,8% dos 0,77 GJ/t de aço bruto calculado por DE BEER et al. (1998). Este valor é indicativo de que os regeneradores estão operando com ótimo desempenho energético e que não devem ser objeto de maiores estudos.

A eficiência dos regeneradores é da ordem de 83%.

6.3.2 Análise do balanço exergético da coqueria

Considerando que, além do coque, são ainda produtos da coqueria o alcatrão, o óleo leve, a moinha de carvão e o gás de coqueria, as irreversibilidades de fluxos de materiais ficam restritas ao vapor gerado na extinção do coque, as perdas através das cinzas e dos produtos da combustão de gás ocorrida na unidade. Conforme o detalhamento apresentado no TAB.5.19, estas perdas totalizam somente 0,74 GJ/t de gusa. A exergia incorporada aos produtos é de 18 GJ/t de gusa, o que leva a um valor de eficiência exergética do processo de 84,9%.

Para comparação com dados dos diversos autores consultados, a TAB. 6.7 apresenta irreversibilidades na usina em termos de tonelada de aço bruto ou líquido e em termos de tonelada de aço laminado.

TABELA 6.7
Desempenho Exergético da Coqueria

| Item | GJ/t de gusa | GJ/t de aço bruto | GJ/t de aço laminado |
|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------|
| irreversibilidades em fluxo | 0,74 | 0,71 | 0,84 |
| outras irreversibilidades | 1,88 | 1,82 | 2,13 |
| total | 2,62 | 2,53 | 2,97 |

FONTE: elaboração própria, 2009

COSTA et al. (2000), a partir do inventário do ciclo de vida do aço fundamentado em ampla base de dados de usinas internacionais, calculou uma eficiência exergética média para a coqueria de 85%. Comparativamente a este valor, pode ser considerado que a coqueria analisada no presente trabalho apresenta eficiência dentro dos padrões mundiais. As irreversibilidades na coqueria, calculadas pela autor, conforme dados da TAB.2.39, são de 2,64 GJ/t de aço líquido, valor superior ao encontrado neste trabalho em 24%.

Já DE BEER et al. (1998), apresentaram para uma usina com tecnologia típica da década de oitenta, cálculo das irreversibilidades de fluxo na coqueificação de 0,99 GJ/t de aço laminado e outras irreversibilidades de 0,87 GJ/t de aço laminado, totalizando 1,86 GJ/t de aço laminado. Comparativamente aos resultados do presente trabalho, pode ser concluído que a usina estudada apresenta teores de perdas através de emissões inferiores em 15%, mas as outras irreversibilidades são superiores em 145%.

Finalizando a análise comparativa, foi mostrado na TAB.2.40 que NOGAMI et al. (2004) apresentam uma eficiência exergética para coqueria de pequeno porte da ordem de 96%, valor muito diferente dos demais encontrados na literatura e que, portanto, será desconsiderado.

Pelo exposto, os resultados das comparações são sugestivos de possibilidade de melhoria do desempenho exergético da coqueria através da redução das perdas internas. No entanto, uma avaliação conclusiva depende da realização de uma análise mais profunda.

WORRELL e GALITSKY (2006) sugerem como medidas de melhoria da eficiência de coquerias a realização de controle da umidade do carvão, aquecimento programado, controles de velocidade variável nos compressores e extinção a seco do coque, como consta da TAB.2.37. As economias decorrentes da adoção destas medidas, segundo estimativas dos autores, totalizam 0,51 GJ/t de aço bruto em energia primária, decorrente da redução do uso de combustíveis. Não é presumida diminuição do uso de energia elétrica.

6.4 Análise do uso da água

O volume total de água, excluída a que é destinada a consumo humano, monta a 157,0 t/t de gusa produzido. Deste total, parte é recirculada e parte é consumida nas caldeiras do sistema de energia, na extinção de coque, na refrigeração em circuito aberto e na reposição de perdas e evaporação. A razão entre a água recirculada e o total utilizado é de 94,3%. Este valor é ligeiramente superior à média nacional de 94%, no entanto, há unidades que operam com índice de recirculação de água da ordem de 99%. Este nível de recirculação levaria a uma economia de água de reposição de 6,23 m³/t de gusa.

A análise dos sistemas mostra que a maior perda de água ocorre nas torres de refrigeração, onde a evaporação corresponde a 68,5% da água total de entrada.

Teoricamente, para reduzir em 15°C a temperatura da água por meio de vaporização em torres, seriam suficientes 61% da evaporação atual. O restante ocorre por arraste mecânico e, se eliminado, levaria a uma redução de 5,63 m³/t de gusa.

Os circuitos abertos de refrigeração, as perdas nos circuitos fechados e o consumo na extinção do coque respondem, em conjunto, por 31,4% da demanda de água. A extinção a seco do coque, ou a

recuperação parcial do vapor gerado no processo seriam alternativas ao método convencional (WORRELL AND GALITSKY, 2006).

A extinção a seco reduz a emissão de pó, melhora as condições de trabalho e permite a recuperação do calor sensível do coque. O processo, como registrado pelos autores, é tipicamente implementado como uma tecnologia de controle ambiental. O sistema recupera calor em um vaso onde o coque é extinto com gás inerte, como o nitrogênio, o qual é usado para gerar vapor, que, por sua vez, pode ser usado em termelétricas. A geração de vapor é em torno de 400 a 500 kg/t de coque. Em plantas novas, os custos são estimados em US\$50,00/t de coque.

A conservação de água em uma indústria começa com a substituição de circuitos abertos de refrigeração por circuitos fechados. Por exemplo, a água de refrigeração empregada para o resfriamento de lingotes, pode ser usada para remover pó e outros materiais não combustíveis no processamento do carvão. Há também, em algumas indústrias, lavadores em contracorrente, que apresentam menores consumos. O uso de tanques múltiplos na fabricação de chapas faz com que somente seja eliminada como efluente a água mais exaurida. Complementarmente, é recomendado o uso de automação nos equipamentos de medição e controle de água.

A introdução de práticas de conservação requer completa engenharia de monitoramento da água e um inventário de todas as operações que utilizam água e que produzem efluentes.

Em um estudo detalhado da indústria do ferro e do aço, NEMEROW (2007) sugeriu três grandes mudanças de processo que resultaram em menor carga de poluentes:

- extinção a seco de coque;
- decapagem com ácido clorídrico em vez de ácido sulfúrico;
- redução direta de minério de ferro, em vez de uso de coqueria e alto-forno.

Esta última medida requer alteração completa do processo, devendo ser considerada somente para novas indústrias.

6.5 Emissões de gases de efeito estufa e projeto de mecanismo de desenvolvimento limpo

O balanço de massa do VC2, apresentado na TAB.5.4 e FIG.5.1, mostrou que as emissões de CO₂ para a atmosfera ocorrem na proporção de 1,55 t/t de gusa. O maior volume de gás queimado na

empresa é o de gás de alto-forno, ao qual são incorporados 73,04% de todo o carbono do processo, como detalhado na TAB.5.5. Em decorrência, redução do consumo específico do forno, pela melhoria de sua eficiência energética, é um dos caminhos para redução de emissões. Melhor eficiência, paralelamente aos ganhos econômicos decorrentes de redução de custos de produção, pode ser objeto de projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo e conseqüentes créditos de carbono.

Por outro lado, a substituição de combustíveis fósseis por outro de fonte renovável, pode não levar à redução direta das emissões de CO₂, mas pode também ser objeto de créditos de carbono, uma vez que as emissões são nulas, ao ser considerado o ciclo completo de produção e uso do material.

A atual tecnologia de produção de gusa limita a substituição integral de coque de carvão mineral por carvão vegetal a fornos de pequeno porte, pois sua resistência à compressão é de 8 a 13 vezes inferior à do coque, como destaca SANTOS (2008). No entanto, DE BEER et al. (1998) relatam que a demanda total de carbono (coque, carvão e óleo combustível), segundo a World Steel Association, varia entre 350 e 400 kg C/t de gusa, sendo que até 40% do coque podem ser substituídos por carvão vegetal pulverizado. Esta medida reduz a demanda energética na coqueria, mas aumenta a do alto-forno, já que a razão de substituição do carvão vegetal pelo coque é de 1,04 a 1,25 em massa, havendo também maior demanda de oxigênio.

Como o percentual de carbono no carvão utilizado é semelhante ao do carvão vegetal médio citado por SANTOS (2008), pode-se supor uma razão de substituição de 1 kg de carvão mineral por 1,04 kg de carvão vegetal. Sendo assim, para proceder ao aumento máximo de injeção, poderiam ser injetados 0,416 t de finos/t de gusa.

A indústria analisada injeta finos de carvão mineral no alto-forno, pelas ventaneiras, na taxa de 0,125 t/t de gusa, das quais, 70,5% correspondem ao teor de carbono. Considerando o limite máximo de injeção de finos, há um potencial de aumento de injeção de 0,291 t/t de gusa, com correspondente redução da carga de coque de 0,28 t/t de gusa.

As emissões de CO₂ pela queima dos finos de carvão mineral, na situação atual, correspondem a 0,312 t/t de gusa. Este valor pode ser utilizado como uma referência inicial para determinação do total de emissões a ser considerado em um projeto de MDL, com horizonte de 10 a 15 anos.

Para avaliação técnico-econômica do projeto de MDL, são requeridas informações sobre a produtividade das florestas plantadas e das carvoarias, preços de mercado de carvão vegetal e de coque metalúrgico.

A ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE SILVICULTURA informou, por meio de comunicação pessoal, que a produtividade média das florestas de eucalipto de variedades diversas, em Minas Gerais, é de 30 m³/ha/ano ou 45 st/ha/ano. A produtividade das carvoarias é de 2 st/m³ de carvão. Este dado é confirmado por FERREIRA (2000), que informa também que a densidade aparente do carvão a granel é de 0,25 t/m³.

Seguindo estes dados, a injeção adicional de 0,29 t de finos/t de gusa, ou 1,16 m³/t de gusa, significa uma necessidade de madeira de 2,32 st/t de gusa.

Em um projeto de plantio de florestas destinado exclusivamente à produção de finos, no qual os ciclos de plantio são de 7 anos, com 3 cortes entre os replantios, e a produtividade de 45 st/ha/ano, seria necessária uma área florestada de 0,36 ha/t de gusa, ou uma área total de florestas da ordem de 1.000.000 de ha.

Como a área necessária ao projeto é muito grande, pode ser considerado um valor menor de injeção de finos, como solução de compromisso. A partir de uma área de reflorestamento da ordem de 350.000 ha, a injeção de finos poderá se ampliada em, aproximadamente, 0,1 t/t de gusa, com redução da carga de coque de 96 kg/t de gusa.

É importante enfatizar que os cálculos deste trabalho foram realizados com base em dados de um ano no qual o regime de produção foi elevado. Posteriormente, houve quedas devido à crise econômica mundial. Estes fatores exógenos deverão ser também ponderados.

DE BEER et al. (1998) apontam ainda como vantagens da substituição, a menor geração de escória, pois o carvão vegetal possui menor teor de cinzas, e a redução demanda de energia, pois a planta passa a prescindir da coqueria. Em conseqüência, há redução total do consumo específico energético entre 0,2 e 0,5 GJ/t de aço bruto.

Qualquer projeto de substituição depende do valor de mercado do carvão vegetal ou de custo de produção própria. Para ser passível de créditos de carbono, o projeto de MDL deve contemplar plantios de florestas e não o uso impróprio de florestas nativas.

Na elaboração de um projeto de mecanismo de desenvolvimento limpo florestal, devem ser consideradas as condições específicas da atividade (CGEE, 2008):

- O plantio da floresta deve ser realizado em terras desflorestadas, para que todo o carbono seqüestrado possa ser elegível para o recebimento de créditos.
- O carbono seqüestrado é um percentual do total de CO₂ seqüestrado da atmosfera, através da fotossíntese, pela floresta em crescimento, sendo muito variável com a localização e tipo da floresta. Como exemplo, na região tropical, o teor de carbono seqüestrado pelo reservatório de biomassa viva (acima e abaixo do solo, exclusive árvores mortas, cama de folhas e teor de carbono no solo) varia de 70 a 95% do total de CO₂ seqüestrado.
- Os projetos podem ser de pequena ou grande escala, sendo que, nos primeiros, as remoções líquidas anuais de gases de efeito estufa não podem ser superiores a 16.000 t de carbono. Para isto, um bom reflorestamento de eucalipto demandaria 440 ha.
- Os projetos de MDL florestal podem, opcionalmente, ser fixos ou renováveis. No fixo, o período de creditação não pode superar 30 anos; no renovável, a duração máxima é de 20 anos e a renovação pode ocorrer duas vezes. Em cada uma, a Entidade Operacional Designada deve informar sobre a validade da linha de base adotada.

No Brasil, foram aprovadas duas metodologias de grande escala, sendo uma delas de empresa siderúrgica mineira, envolvendo reflorestamento de 9.759 ha, com geração de créditos por período fixo de 30 anos.

6.6 Considerações sobre a confiabilidade dos dados e resultados

Os principais insumos do processo são o minério de ferro e o carvão vegetal. Ambos têm composições elementares variáveis de acordo com a procedência.

No que se refere aos fluxos de exergia e à emissão de gases de efeito estufa, o componente mais importante é o carbono, introduzido no processo, em sua maior parte, através do carvão mineral. Como apresentado na TAB.5.5, esta parcela corresponde a 86,23%. As outras fontes de entrada de carbono significativas são o coque de petróleo, com 4,74% e o calcário, com 8,1%.

Enquanto a presença de carbono no calcário é bem conhecida, a participação do elemento no carvão é bastante variável. Seu valor é, portanto, uma fonte de erro.

Como descrito no item 4.3, a composição elementar do carvão usada neste trabalho, foi obtida a partir das composições de diversos carvões de diferentes procedências, ponderadas em relação à participação de cada um no consumo total anual da usina. Em princípio, há incertezas de difícil quantificação no método adotado.

Como as composições adotadas para os fluxos nas diversas etapas do processo produtivo independem dos valores adotados para o carvão, não há propagação de erros. Por outro lado, variações de 10% para mais ou para menos no teor de carbono do carvão, conforme a metodologia de cálculo de exergia química adotada, levam, respectivamente, a aumento e redução na exergia total de entrada, de 7,3% e, em consequência, a uma variação da eficiência exérgica entre 37,6% e 42,8% , mantidos fixos todos os outros valores, exceto os teores de cinza e de umidade do carvão, que foram ajustadas para acomodar as alterações de carbono.

Para minimizar o erro no fluxo de carbono, foi feito o balanço de massa do elemento e os ajustes necessários para que, na coqueria, onde o carvão é inicialmente processado, os fluxos de entrada e de saída sejam iguais. No entanto, o desconhecimento da composição do alcatrão e do óleo leve levou à consideração de teores de carbono e de poderes caloríficos encontrados na bibliografia, os quais não precisam, necessariamente, ser os mesmos dos existentes nos materiais processados na usina. A consequência das imprecisões é a diferença de 4,93% entre os quantitativos totais de entradas e saídas de carbono, mostrados na TAB.5.5.

Finalmente, outras possíveis fontes de erros que afetariam os resultados de eficiência exérgica da usina, são as composições de vazões dos gases combustíveis gerados no alto-forno, coqueria e aciaria. Além disto, os valores de excesso de ar, em cada ponto de queima, foram também fornecidos pelos respectivos setores industriais. Todas estas grandezas afetam diretamente os cálculos de exergias das misturas de produtos de combustão lançados na atmosfera.

A exergia química do ar de 4,45 kJ/kg, contra 2.505,03 kJ/kg do GAF, 5.166,34 kJ/kg do GAC, 43.023,56 do GCO e 50.234,62 kJ/kg do GN.

A partir das quantidades nas quais estão presentes no processo, a exergia química média dos gases de entrada no VC2, foi de 8,20 GJ/t de gusa. Um aumento de 10% no excesso de ar não é significativo no valor da exergia média.

7 CONCLUSÕES

O trabalho tem como objetivo geral analisar o uso de energia através de balanços exergéticos em uma usina siderúrgica integrada a coque, estabelecida em Minas Gerais, visando sua otimização.

A metodologia adotada para avaliar a usina siderúrgica integrada a coque mostrou-se adequada aos objetivos pretendidos, pois permitiu identificar e quantificar os fluxos de massa, energia e exergia. Como resultado, foram atendidos os objetivos específicos de estimar o potencial de otimização em relação às melhores práticas descritas na bibliografia, bem como identificar as etapas onde ocorrem as maiores destruições exergéticas, a saber: o alto-forno, sistema de energia e utilidades e coqueria.

Foi também possível identificar os fluxos de água industrial e, comparativamente com usinas de referência mundial, sugerir procedimentos e medidas de redução do uso desse insumo.

Finalmente, foi avaliado o cenário de emissões de gás carbônico, tendo sido proposta uma linha de avaliação de captura de carbono por substituição de combustível fóssil por renovável, com vistas à proposição de projeto de MDL.

As principais conclusões foram:

- Nos balanços energéticos, as análises consideram que todos os produtos deixam a unidade industrial na condição ambiente, ou seja, os produtos não são condutores de energia térmica para fora da planta. Sendo assim, a eficiência energética, definida pela razão entre a energia térmica incorporada aos produtos e sub-produtos e a energia térmica total fornecida ao processo, será sempre nula. Essa eficiência não se presta, portanto, à identificação do potencial de melhoria do processo.
- O que os balanços energéticos permitem é a obtenção de um valor de consumo específico de energia por unidade de produto, o qual possibilita comparações de desempenho de plantas de mesma natureza, porte e tecnologia. No caso estudado, o consumo específico de energia é de 22,14 GJ/t de gusa, ou 21,37 GJ/t de aço bruto.
- O consumo energético total, de 21,37 GJ/t de aço bruto, é superior em 5,5% ao consumo energético médio de seis grandes empresas brasileiras do setor. Com relação a dados da

bibliografia consultada, os resultados são sugestivos de um potencial de melhoria de uso de energia na faixa entre 3,6 e 7,7 GJ/t de aço bruto, superior em quantidade semelhante a valores disponíveis na literatura, calculados a partir de dados referentes às melhores práticas. O resultado é indicativo da existência de um potencial de economia energética, mesmo sem a aplicação de novas tecnologias.

- Como medidas de conservação de energia, estimadas em 1,21 GJ/t de aço laminado, são sugeridas a limpeza a seco do gás, em substituição ao lavador Venturi, e o reaproveitamento do calor sensível da escória.
- O potencial de reaproveitamento dos calores sensíveis dos gases de exaustão foi estimado em de 0,67 GJ/t de gusa, correspondente a 38% do total lançado no meio ambiente. Em termos de eficiência exergética, a redução da perda foi calculada em 0,4 GJ/t de gusa, ou 9,5% das perdas totais da usina em fluxos.
- A eficiência exergética total foi de 39,58%. Para se avaliar o potencial de aumento dessa eficiência necessita-se conhecer as destruições intrínsecas e evitáveis de exergia em cada etapa do processo. Isto não foi levantado neste trabalho, e não foram encontrados, na bibliografia consultada, valores de referência dessas destruições. No entanto, sabe-se que uma das maiores causas de destruição de exergia na siderurgia, apesar de conservar a energia, é o processo de combustão com excesso de ar. Na maioria dos casos ela é intrínseca porque promove a redução da temperatura dos gases a níveis adequados ao processo de aquecimento ou tratamento do aço. No entanto, processos em cascata de temperatura podem ser pensados para reduzir essa destruição. Um aprofundamento nessa análise pode ser objeto de estudos futuros.
- As perdas exergéticas para o ambiente em fluxos de massa foram calculadas como 2,75 GJ/t de gusa, ou 2,64 GJ/t de aço bruto, ou 3,11 GJ/t de aço laminado.
- As outras irreversibilidades foram estimadas em 12,71 GJ/t de gusa, ou 12,27 GJ/t de aço bruto, ou 14,41 GJ/t de aço laminado.
- O total de irreversibilidades encontrado na usina é de 14,91 GJ/t de aço bruto, superior em 8,4% aos 13,75 GJ/t de aço calculados a partir dos estudos de COSTA et al. (2001). Comparativamente à usina deste trabalho, a planta teórica do IISI, descrita por DE BEER et al. (1998) apresentou perdas internas maiores em 145% e perdas externas inferiores em 15%.

- As maiores perdas exergéticas ocorrem no alto-forno, 5,96 GJ/t de gusa, sistema de energia e utilidades, 2,53 GJ/t de gusa e na coqueria, 1,88 GJ/t de gusa.
- A análise da etapa onde ocorre a maior utilização de exergia, o alto-forno, sugere a existência de um potencial de melhoria de desempenho exergético da ordem de 2,3 GJ/t de aço bruto, mesmo tendo sido registrada uma eficiência de 68%. De acordo com WORRELL e GALITSKY (2006), melhorias dos sistemas de controle e automação podem levar a uma economia de consumo de combustível correspondente a 0,69 GJ/tab.
- Nos regeneradores do alto-forno, as perdas exergéticas são de 0,19 GJ/t de gusa, ou 0,18 GJ/t de aço bruto, valor que é igual a 23,8% aos 0,77 GJ/t de aço bruto calculado por DE BEER et al. (1998). Este valor é indicativo de que os regeneradores estão operando com ótimo desempenho energético e que não devem ser objeto de maiores estudos. A eficiência dos regeneradores é da ordem de 83%.
- Os valores das perdas exergéticas encontradas nos diversos setores industriais da usina estão sumarizadas na TAB. 7.1.

TABELA 7.1

Perdas Exergéticas nos Setores Produtivos da Usina Siderúrgica Estudada

| Setor | Irreversibilidades em fluxos (GJ/t de gusa) | Outras irreversibilidades (GJ/t de gusa) | Irreversibilidade setorial (GJ/t de gusa) |
|-------------------------------|---|--|---|
| preparação de matérias primas | 0,86 | 2,35 | 3,21 |
| alto-forno | 0,30 | 5,96 | 6,26 |
| aciaria | 1,21 | 0,03 | 1,24 |
| lingotamento e laminação | 0,18 | 0,81 | 0,99 |
| total da linha de produção | 2,55 | 9,15 | 11,7 |

FONTE: elaboração própria, 2010

- Como indicadores para dar prosseguimento ao presente estudo, a partir das conclusões de COSTA et al. (2001), que sinterização, coqueria e aciaria pouco eficientes podem apresentar perdas exergéticas da ordem de 17 GJ/ t de aço líquido, é sugerida análise detalhadas dessa etapas, com cálculo das destruições intrínsecas de exergia.
- Com relação à água industrial, os cálculos apontaram para um grande arraste mecânico nas torres de resfriamento, o que aumenta a evaporação desnecessariamente. Há, portanto, indicações de que o projeto e manutenção dessas torres devem ser revistos.

- Para reduzir a demanda de água de reposição, é sugerida a avaliação de tratamento e reutilização de água dos circuitos abertos de refrigeração e a alternativa de extinção a seco do coque ou, pelo menos, do fechamento do processo para recuperação parcial do vapor.
- No que se refere a realização de projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo, foi analisada injeção complementar de finos de carvão vegetal pelas ventaneiras, em substituição parcial do coque da carga. Além dos 0,125 t/t de gusa atuais, podem ser injetados adicionalmente até 0,29 t de finos/t de gusa, com redução da carga de coque de 0,28t/t de gusa, aproximadamente. A necessidade de uma extensão florestal da ordem de 1.000.000 ha leva à consideração de um projeto de menor porte. É sugerida a avaliação de injeção de finos de carvão vegetal de 0,1 t/t de gusa, que representaria a produção de carvão de uma floresta de aproximadamente 350.000 ha. O projeto permitiria uma redução de 23,5% na carga de coque. A exequibilidade da troca depende muito mais de fatores econômicos do que técnicos. Deve ser considerada a possibilidade de melhoria da atual produtividade das florestas. Segundo informações verbais transmitidas pelo INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS – IEF, há experimentos apresentando produtividade de até 60 st/ha/ano, contra os 45 st/ha/ano, médios atuais.

Há também a possibilidade de realização de projeto de mecanismo de desenvolvimento limpo baseado em redução de emissões de gases de efeito estufa como decorrência de aumento de eficiência do processo. Sendo o carvão o principal responsável pelas emissões, o projeto deve contemplar a melhoria do desempenho de uso de energia no alto-forno. Pelo balanço exergético, as perdas através de fluxos de materiais são de 0,577 GJ/t de gusa e a destruição exergética é de 5,963 GJ/t de gusa. Naturalmente, há uma destruição exergética intrínseca que não pode ser eliminada. O potencial real de economia deve ser identificado através de um refinamento da análise. Foi visto que os regeneradores trabalham com boa eficiência exergética, próxima a 83%, o que sugere que seja avaliada a possibilidade medidas de economia com medidas tais como aumento da potência da turbina de topo e de reduções de perdas térmicas de resfriamentos de materiais. No que se refere a aumento de potência da turbina de topo, há referências na bibliografia (CAMPOS e SOUZA, 2003) de aumento de potência de 45% em turbina semelhante à instalada na empresa estudada, através de substituição do soprador do alto-forno. Houve aumento de volume de gás turbinado de 15%, aumento da temperatura de entrada de 43% e aumento da pressão do gás de entrada de 45%.

Foi mostrado que há ainda muito estudo a ser feito no setor siderúrgico em geral e na usina analisada em particular, para que possam ser propostos projetos específicos de otimização exergética, de redução de uso de água e de proposição de projetos de MDL. Com base no exposto, a seqüência do trabalho envolve:

- Levantamento das destruições intrínsecas de exergia, em cada etapa do processo, para cada tipo de produto. Sugere-se ênfase especial no alto-forno e na coqueria.
- Análise de viabilidade de emprego da extinção a seco do coque.
- Análise da viabilidade do emprego de novas tecnologias, em substituição às usadas, principalmente através da modernização dos processos de lingotamento e laminação, com eliminação de etapas de reaquecimento.
- Estudo de viabilidade de aumento do nível de recirculação de água, com tratamento de efluentes industriais dos sistemas abertos.
- Proposição de programas de manutenção e melhoria das instalações para eliminar perdas evitáveis.
- Análise do potencial de redução de uso de energia elétrica, através do uso de controles de velocidade variável.
- Estudo de viabilidade técnica e econômica da proposição de projetos de MDL com foco no aumento de eficiência energética e de injeção suplementar de finos de carvão vegetal, com decorrente redução da carga de coque.

novembro de 2003,

http://www.energiacemig.com.br/seminarios/EFICIeNCIA_ENERGeTICA.asp , acesso em 19 de maio de 2009

13. Carbonífera Catarinense Ltda., “*Carvão Mineral*”, em <http://www.carboniferacatarinense.com.br/carvaomineralphp> , acesso em 28/07/2009
14. “*Carvão Mineral Energia e Carboquímicos*”, <http://www.webinbox.com.br/upload/deprctufesbr/MMPQI%20Aula%205%20-%20Carvao%20e%20carboquimicos.ppt>, acesso em 4/8/2008
15. CEMIG, “*22º Balanço Energético do Estado de Minas Gerais – BEEMG – 2007*”, www.cemig.com.br em 13-02-2009
16. Centennial Coal Company Limited, Mining, Coal production , “ *Centennial Port Kembla Thermal, Coal Specifications*”, NSW, Australia <http://www.centennialcoal.com.au/ssl/axs/1/10.asp?recID=592>, acesso em 09/07/2008
17. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos – CGEE, “*Manual de Capacitação sobre Mudança do Clima e Projetos de Mecanismo de /desenvolvimento Limpo (MDL)*”, Brasília- DF, 2008
18. Ciminelli, V.S.T, “*Água na Indústria Metalúrgica*”, Caderno Técnico, Metalurgia e Materiais, pp. 452, agosto de 2005
19. Compliance Coal Corporation , “*Typical Coal Quality*”, Vancouver – Canadá , http://www.complianceenergy.com/projects/coal_sales/Compliance_CoalPDF , acesso em 09/07/2008
20. Costa, M.M.; Schaeffer, R.; Worrell, E., *Exergy accounting of energy and materials flows in steel production systems*”, Energy n. 26, pp 363 – 384, 2001
21. DE BEER, J.; Worrell, E.; Blok, K., “*Future Technologies for Energy-Efficient Iron and Steel Making*”, Annual Review of Energy Environment and Resources, n.23, pp 123 – 205, 1998
22. DE BEER, J.; Blok, K.; Worrell, E.; “*Long term efficiency improvements in the iron and steel industry*”, European Council for an Energy Efficient Economy, 1995, www.eceee.org/conference_proceedings/oceee/1995 , acesso em 02/10/2009
23. Dincer, I., Rosen, M.A., “*Energy, Environment and Sustainable Development*, University of Ontario Institute of Technology, Oshawa, Canadá, junho de 2007
24. Dong,S.; Paterson,N.; Kazarian,S.G.; Dugwell,D.R.; Kandiyoti,R., “*Characterization of Tuyere-Level Core-Drill Coke Samples from Blast Furnace Operation*”, American Chemical Society, Energy & Fuels, 2007, vol 21, n.6, pp 3446–3454
25. Energy Today – Typical Coal Analysis, <http://www.energytoday.com.au/contentid67.html>, acesso em 09/07/2008

26. Ferreira, O.C., “*O Futuro do Carvão Vegetal na Siderurgia*”, Economia & Energia, nº 21, julho – agosto, 2000.
27. Figueira, R.M., “*EMT 053 – Processos Metalúrgicos - Assunto: Aciaria LD (BOF – Basic Oxygen Furnace)*”,
www.geca.eng.ufmg.br/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=3&Itemid=40, acesso em 22/01/2009
28. Fundação Estadual de Meio Ambiente – FEAM, “*Inventário de emissões de gases de efeito Estufa do estado de Minas Gerais - ano base 2005*”,
<http://www.feam.br/images/stories/arquivos/INVENTARIO/inventariogee.pdf>, Belo Horizonte, 25 de novembro de 2008
29. Giardino, D.A., “*Estimating the rate of coal combustion in a mine fire*”, Informational Report Number 1249, Pittsburgh Safety and Health Technology Center, Mine Safety and Health Administration, U.S. Department of Labor, novembro de 1999
30. Godoi, J. M. A.; Oliveira Júnior S., “*Gestão da Eficiência Energética*”, 2th International Workshop Advances in Cleaner Production, São Paulo – Brasil – 20 a 22 de maio de 2009
31. Grieve, D.A.; Holuszko, M.E.; Goodani, F. - *British Columbia Coal Quality Survey – Bulletin 96*, Victoria, British Columbia, Canadá, maio de 1996
32. Hird, W., “*Recycled Water – Case Study: BlueScope Steel, Port Kembla Steelworks*”, Desalination, n.188, pp 97 -103, Australia, 2006 Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.,
Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003, Rio de Janeiro, Brasil
33. Incropera, F.P.; DeWitt, D.P., “*Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*”, LTC Editora, Quinta Edição, Rio de Janeiro, 2002
34. Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS, <http://www.ibs.org.br/index.asp> , acesso em 01/06/2009
35. Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS, “*Siderurgia Brasileira: Relatório de Sustentabilidade 2008 - Concepção AMCE Negócios Sustentáveis*”,
<http://www.ibs.org.br/publicacoes.asp> acesso em 14/02/2009
36. Instituto Brasileiro de Siderurgia – IBS,
http://www.ibs.org.br/siderurgia_historia_brasil3.asp acesso em 13/02/09
37. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC - Fourth Assessment Report – Working Group III Report, “*Mitigation of Climate Changes*”, <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg3.htm> acesso em 10 de dezembro de 2008
38. Kotas, T.J., “*The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*”, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, USA , 1995

39. Macarthur Coal Limited
<http://www.macarthurcoal.com.au/Operations/Products/tabid/81/Default.aspx>, acesso em 02/12/2008
40. Matthesius G.A.; Morris R.M.; Desai M.J., “*Prediction of the Volatile Matter in Coal from Ultimate and Proximate Analyses*”, Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 87, no. 6. June 1987, pp. 157-161.
41. Ministério de Ciência e Tecnologia, Programa das Nações Unidas Para o Desenvolvimento, Sindicato Nacional da Indústria da Extração do Carvão, “*Avaliação das Emissões de Gases de Efeito Estufa Gerados na Indústria de Extração do Carvão Mineral*”, Caracterização Tecnológica de Carvões Minerais, Anexo 3– Brasília,
http://200.130.9.7/Clima/comunic_old/energi41.htm#Index acessado em 23 de junho de 2008
42. Ministério de Ciência e Tecnologia , “ *Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no mundo*”, 25 de outubro de 2007,
http://www.mct.gov.br/upd_blob/0019/19545.pdf acesso em 25 de agosto de 2009
43. Ministério de Minas e Energia, “ *Balanco Energético Nacional – BEN – 2008*”,
www.mme.gov.br, acesso em 13-02-2009
44. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources , “*MINFILE Record Summary , MINFILE No 082GNE017*”, British Columbia – Canadá ,
<http://minfile.gov.bc.ca/Summary.aspx?minfilno=082GNE017>, em 07/07/2008
45. Moreira, M.F., “*Siderurgia*”, em
<http://www.dalmolim.com.br/EDUCACAO/MATERIAIS/Bibliomat/siderurgia2.pdf>, acesso em 22/01/2009
46. Mourão, M.B., Yokoji, A., Malynowskyj, A., Leandro, C.A.S., Takano, C., Quites, E.M.C., Gentile, E.F., Silva, G.F.B.L., Bolota, J.R., Gonçalves, M., Faco, R.J., “*Introdução à Siderurgia*”, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 2007
47. Neumann, G., “*Advanced Water Management to Meet Plant and Environment Requirements – Water is Life*”, metals&mining, pp 38 – 39, janeiro de 2009
48. Nogami, H.; Yagi, J.; Sampaio, R.S., “*Exergy Analysis of Charcoal Charging Operation of Blast Furnace*”, ISIJ International, vol 44, n.10. pp 1646 – 1652, 2004
49. Sato, N.,” *Chemical Energy and Exergy: An Introduction to Chemical Thermodynamics for Engineers*”, Elsevier Science & Technology Books, abril de 2004
50. O Estado de São Paulo, Economia e Negócios, 4 de dezembro de 2007, “*Conheça os projetos de expansão da siderurgia brasileira*”

<http://www.estadao.com.br/noticias/economia,conheca-os-projetos-de-expansao-da-siderurgia-brasileira,90431,0.htm> acesso em 04/06/2009

51. Outokumpu, “*Sintering technologies for fine-grained iron ores*”, 3013EN, Libris, Helsinki, Finlândia, setembro de 2005
52. Penido, M.F.- “*Apresentação Fabricação do Aço*” em <http://www.slideshare.net/mfpenido/apresentao-fabricao-do-ao-presentation>, acesso em 27/07/2009
53. Petroenergia “*Produtos – coque verde de petróleo e carvão mineral*”, <http://www.petroenergia.com.br/coque.html>, acesso em 04/12/2008
54. Price L.; Phylipsen D. e Worrell E., “*Energy Use and Carbon Dioxide Emissions in the Steel Sector in Key Developing Countries*”, Energy Analysis Department, Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of Califórnia, Berkeley, CA 94720, April 2001
55. Ribeiro, E.D.L., Castro, L.F.A., Tavares, R.P., “*A Água na Siderurgia*” Caderno Técnico, Metalurgia e Materiais, pp. 453 a 455, agosto de 2005
56. Riley, J. T., “*Routine Coal and Coke Analysis: Collection, Interpretation and Use of Analytical Data*”, ASTM International, MNL57-EB, USA, Janeiro de 2007
57. Romeiro, S.B.B., “*Química na siderurgia*”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Porto Alegre, 1997
58. Sá, D.C.C., “*Combustão de Gases Siderúrgicos – CGS*”, Gerdau Açominas, 2002, comunicação pessoal em 21/12/2008
59. Sampaio, J. A.; Julianelli, K. M.; Penna, M. T. M., “*FERRO – MINA N5 – CARAJÁS / CVRD*”, CT2002-159-00, Comunicação Técnica elaborada para o Livro Usina de Beneficiamento de Minérios do Brasil, Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia, Coordenação de Inovação Tecnológica – CTEC, Rio de Janeiro, Dezembro / 2002
60. Santos, Marco Aurélio, S., “*Uso de Carvão Vegetal em Alto-Forno*”, Forum Nacional sobre Carvão Vegetal, Belo Horizonte, Outubro/2008, em <http://www.painelflorestal.com.br>, acesso em outubro 2009
61. Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento do Estado de São Paulo , “*Balço Energético do Estado de São Paulo – 2006, Ano Base : 2005*” , São Paulo, 2006
62. Silva, C. L., “*Inovação e Modernização na Indústria Siderúrgica Brasileira: as armas para competir internacionalmente*”, revista FAE BUSINESS, n.3, set 2002, pp.52 e 53

63. Stubbles, J., “*Energy Use in the U.S. Steel Industry: an Historical Perspective and Future Opportunities*”, U.S. Department of Energy Office of Industrial Technologies, Washington, DC, September 2000
64. Susaki, K., “*NT Fundentes e escorificantes – situação atual com tendências 2025*”, Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico, Centro de Gestão de Estudos Estratégicos - CGEE, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Brasília, 2008
65. Szargut, J., Morris, D. R.; Steward F. R. , “*Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*”, Hemisphere Publishing Corporation, 1988
66. Tambe, G.N., “*Sourcebook of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Some Countries in Asia*”, Journal of Indian Water Works Association, Jan-March, pp. 33-36, 1990
67. United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC, “*Approved Baseline and Monitoring Methodologies*”, <http://cdm.unfccc.int/methodologies/index.html>, 09 de dezembro de 2008
68. United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC, “*Approved Baseline and Monitoring Methodologies*”, <http://cdm.unfccc.int/methodologies/index.html>, 24 de agosto de 2009
69. United States Environmental Protection Agency – USEPA, “*Preliminary Characterization Study - Traditional Fuels and Key Derivatives*” Prepared in Support of the Advanced Notice of Proposed Rulemaking – Identification of Nonhazardous Materials That Are Solid Waste, 11 de dezembro de 2008, <http://www.epa.gov/epawaste/nonhaz/pdfs/fuel.pdf> , acesso em janeiro de 2009
70. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, “*Steel Best Practices Plant -Wide Assessment Case Study*”, DOE/GO-102004-1730, janeiro de 2004. <http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/weirtonsteel.pdf> , acesso em 31 de julho de 2009
71. Van Wylen, G.J. e Sonntag, R.E., “*Fundamentos da Termodinâmica Clássica*”, Editora Edgard Blücher Ltda. 2ª edição, 1976, São Paulo, Brasil
72. World Steel Association - WSA, <http://www.worldsteel.org/> acesso em 01/06/2009
73. Worrell, E.; Galitsky, C. , “*Energy Efficiency Improvement Opportunities for the Iron and Steel Industry*”, Environmental Energy Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, May 2006
74. Worrell, E.; Martin, N. e Price, L., “*Energy Efficiency and Carbon Dioxide Emissions Reduction Opportunities in the U.S. Iron and Steel Sector*”, Environmental Energy

Technologies Division, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL-41724, July 1999

75. WWF – Brasil, “*Entenda o Mercado de emissões, MDL e IC*”, <http://www.wwf.org.br/index.cfm> acesso em 20/06/2008

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](#)