

ISAC QUINTÃO PESSOA

TESE DE DOUTORADO APRESENTADA AO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Tese de Doutorado:

**AVALIAÇÃO DA MATRIZ E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA  
EMPRESA SIDERÚRGICA**

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa de Freitas Cunha Lins

Belo Horizonte,  
Escola de Engenharia da UFMG  
Dezembro de 2011

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

Tese de Doutorado:

**AVALIAÇÃO DA MATRIZ E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA  
EMPRESA SIDERÚRGICA**

Autor: Isac Quintão Pessoa

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Vanessa de Freitas Cunha Lins

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Química como parte dos  
requisitos exigidos para a obtenção do título de  
DOUTOR em ENGENHARIA QUÍMICA

Belo Horizonte  
Dezembro de 2011

## **AGRADECIMENTOS**

A professora Vanessa Lins, pela amizade e excelente orientação.

A todos os meus professores do DEQ/UFMG, pela boa convivência e constante aprendizado.

A todos os meus professores, pelos ensinamentos.

Aos amigos do DEQ/UFMG, pela boa convivência e constante aprendizado, sem citar nomes para não cometer injustiça.

Ao DEQ/UFMG, pela oportunidade.

Aos amigos e colegas de trabalho Benjamin Fullin, Luciano Lellis e David Fabri pelo suporte e contribuições ao longo de todo o trabalho.

Aos amigos Eber Augusto, Luiz Lage, Vagner Ferreira e Silvano Paganoto que não estão trabalhando mais na nossa equipe.

A todos os amigos do serviço e de todos os dias, que sempre me ajudaram e apoiaram, sem exceção para não cometer injustiças.

A Gerência e Diretoria anterior e atual da Empresa Siderúrgica pela oportunidade de poder executar este trabalho.

---

A minha esposa Cristina e meus filhos Rafael e Henrique pelo amor, compreensão, dedicação e peço desculpas pela minha ausência. Vocês foram a razão do sucesso e conclusão deste trabalho.

Ao meu pai José Pessoa<sup>†</sup>, que partilhou dos meus sonhos, das minhas conquistas, tristezas e alegrias. Ensinou-me de maneira simples e dolorosa como é bom viver. Admirado por toda a família e pessoas que tiveram o privilegio de conhecê-lo. A minha eterna gratidão. Também meus Avôs<sup>†</sup>, Tios<sup>†</sup>, Primos<sup>†</sup> e Amigos<sup>†</sup> juntos ao Pai.

A minha mãe Maria de Assis, meus irmãos Irma e seu esposo Antônio, Isaias e sua esposa Elaine e filhos Yuri e Yane, Ítalo e sua esposa Luciene e o filho Erick, Talles e sua namorada Aline; pelo carinho, apoio, compreensão e orações.

Ao meu sogro Wanderlino Vieira pelas madrugadas que me levou e buscou na rodoviária, sempre com grande satisfação. A minha sogra Suely, pela paz e serenidade nos momentos de dificuldade. Vocês me receberam como filho.

A todas as pessoas que estiveram sempre ao meu lado em suas orações, torcendo pelo meu sucesso e segurança nas viagens de todas as semanas, Maria e Raul bisavôs dos meus filhos, meu cunhado Marco Antônio e esposa Mônica e filha Dayna, meus tios Bené, e esposa Creuza e filhos Bruno e Luana, Jurandir e esposa Maria Pessoa, Soquim e esposa Laci, meus primos Wender e esposa Célia e filho Arthur (meu afilhado), Willian e sua esposa Aline e filha Cecília, Wesley e sua esposa Fernanda, Tia Fátima, Uajará e namorada Bete, Urandi e esposa Marines e filhos Sofia e Matheus, Ubiratan<sup>†</sup> e Jean.

---

“Para conquistar coisas importantes, devemos não apenas agir, mas também sonhar; não apenas planejar, mas também acreditar” (Anatole France).

“Quem quer fazer alguma coisa encontra um meio. Quem não quer fazer nada encontra uma desculpa” (Provérbio árabe).

“Nunca diga a Deus que você tem um grande problema, diga ao problema que você tem um grande Deus” (Márcia Assunção – 12/11/07).

---

## RESUMO

Esta tese apresenta a situação da matriz energética mundial e nacional e a mudança da matriz energética de uma Empresa Siderúrgica com a substituição do coque de carvão mineral por carvão vegetal, a substituição do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) pelo gás natural e as vantagens destas mudanças. Em termos de eficiência energética, este trabalho apresenta a implantação do projeto piloto desenvolvido utilizando o recurso da Lei de Eficiência Energética para economizar energia elétrica; a implantação de projetos para os vários energéticos utilizados na empresa; as alterações nos balanços de massa e energia com estas mudanças na matriz energética e o cálculo das reduções de emissões de CO<sub>2</sub>. Também foi equacionado todo o sistema de geração, distribuição e consumo do gás de alto-forno que é utilizado para substituir combustíveis derivados do petróleo. Foi utilizada a metodologia *World Steel Association* para definir a equivalência energética e as emissões de CO<sub>2</sub>. A implantação de todos estes projetos na Empresa Siderúrgica proporcionou: aumento da participação de fontes de energia renovável em 24%, passando de 64% em 2008 para 88% em 2011, contra 47% da matriz energética nacional e 13% da mundial; redução nas emissões de CO<sub>2</sub> em 52%, equivalente a 554 mil toneladas por ano; e o aumento da competitividade com a redução de custo com energéticos em 30%.

---

## **ABSTRACT**

This thesis presents the situation of global energy and national energy matrix and the change of a steel company energy matrix with the substitution of mineral coke by charcoal, the replacement of the Liquefied Petroleum Gas (LPG) to natural gas and the benefits of these changes. In terms of energy efficiency, this paper presents the implementation of a pilot project developed using the feature of the law of energy efficiency to save power, the implementation of various projects for energy, and changes in the mass and energy balance with the change of the matrix calculation of energy and CO<sub>2</sub> emissions; solved the whole system of generation, distribution and consumption of gas furnace that is used to replace petroleum fuels. The World Steel Association methodology to define equivalence of energy and CO<sub>2</sub> emissions was applied. The implementation of all these projects provided in the Steel Company increased participation of renewable energy sources by 24%, from 64% to 88%, against 47% of national energy and 13% of the world; provided reduction in CO<sub>2</sub> emissions by 52%, equivalent to 554 thousand tons per year and increased competitiveness by reducing energy cost by 30%.

---

---

## SUMÁRIO

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 1       | INTRODUÇÃO .....  | 21 |
| 2       | OBJETIVO .....  | 27 |
| 3       | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                      | 29 |
| 3.1     | Petróleo.....   | 29 |
| 3.1.1   | Reservas de Petróleo .....                                      | 31 |
| 3.1.2   | Gás Liquefeito de Petróleo .....                                | 35 |
| 3.2     | Gás Natural .....   | 36 |
| 3.2.1   | Histórico do Gás Natural .....                                  | 36 |
| 3.2.2   | Reservas de Gás Natural.....                                    | 39 |
| 3.2.3   | Consumo de Gás Natural .....                                    | 42 |
| 3.2.4   | Transporte do Gás Natural .....                                 | 46 |
| 3.3     | Carvão Mineral.....   | 53 |
| 3.3.1   | Reservas de Carvão Mineral .....                                | 55 |
| 3.3.2   | Produção e Consumo de Carvão Mineral .....                      | 57 |
| 3.4     | Carvão Vegetal .....  | 59 |
| 3.4.1   | Evolução Histórica do Uso do Carvão Vegetal na Siderurgia ..... | 60 |
| 3.4.2   | Consumo Potencial de Carvão Vegetal na Siderurgia .....         | 61 |
| 3.4.3   | Efeito das Florestas na Emissão de CO <sub>2</sub> .....        | 63 |
| 3.5     | Emissões de CO <sub>2</sub> pelo Carvão Mineral e Vegetal.....  | 66 |
| 3.5.1   | Redução de Emissões na Siderurgia Brasileira.....               | 67 |
| 3.6     | Alto-Forno .....  | 72 |
| 3.6.1   | Evolução da Tecnologia de Alto-forno .....                      | 79 |
| 3.6.2   | Gás de Alto-Forno.....  | 82 |
| 3.6.2.1 | Principais Características do Gás de Alto-Forno .....           | 86 |

---

---

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 3.7     | Energia Elétrica.....  | 92  |
| 3.7.1   | Resumo da História da Indústria de Energia Elétrica.....     | 95  |
| 3.7.2   | A Indústria de Energia Elétrica no Brasil.....               | 101 |
| 3.8     | Efeito Estufa.....   | 110 |
| 3.9     | Eficiência Energética.....                                   | 112 |
| 3.9.1   | Programa de Eficiência Energética nos Estados Unidos .....   | 114 |
| 3.9.1.1 | O Programa de Tecnologias Industriais.....                   | 114 |
| 3.9.1.2 | Os programas Estaduais de Energia .....                      | 116 |
| 3.9.1.3 | Programas de Energia Elétrica e de Gás Canalizado.....       | 119 |
| 3.9.2   | Programa de Eficiência Energética da França.....             | 120 |
| 3.9.2.1 | Agência do Meio Ambiente e de Gestão da Energia .....        | 121 |
| 3.9.2.2 | Diretoria Geral de Energia e de Matérias Primas .....        | 122 |
| 3.9.2.3 | Companhia de Eletricidade Francesa .....                     | 125 |
| 3.9.3   | Programa de Eficiência Energética do Japão .....             | 126 |
| 3.9.4   | Programa de Eficiência Energética da União Européia .....    | 127 |
| 3.9.5   | Programa de Eficiência Energética do Brasil.....             | 130 |
| 3.9.5.1 | Histórico da Eficiência Energética .....                     | 132 |
| 3.9.5.2 | Lei de Conservação de Energia.....                           | 140 |
| 3.9.5.3 | Lei de Eficiência Energética.....                            | 145 |
| 3.9.6   | Exemplos de Ações Implantadas na Indústria Siderúrgica ..... | 147 |
| 4       | METODOLOGIA .....  | 152 |
| 4.1     | Gerenciamento da Energia .....                               | 153 |
| 4.2     | Projeto Piloto de Eficiência Energética .....                | 156 |
| 4.2.1   | Nivelamento do Modelo .....                                  | 158 |
| 4.2.2   | Etapas do Projeto .....                                      | 160 |

---

---

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 4.2.2.1 | Pré-Diagnóstico .....  | 161 |
| 4.2.2.2 | Diagnóstico .....  | 161 |
| 4.2.2.3 | Execução do Projeto.....   | 162 |
| 4.2.2.4 | Verificação .....  | 162 |
| 4.2.2.5 | Demais Etapas .....  | 162 |
| 4.2.3   | Modelo do Negócio .....  | 163 |
| 4.2.4   | Implantação do Projeto Piloto .....                                | 166 |
| 4.2.4.1 | Situação Anterior ao Projeto .....                                 | 166 |
| 4.2.4.2 | Riscos do Projeto.....   | 168 |
| 4.3     | Desenvolvimento do Projeto Gás Natural .....                       | 169 |
| 4.3.1   | Situação do Fornecimento de GLP .....                              | 172 |
| 4.3.2   | Implementação da Rede de Distribuição Interna de Gás Natural ..... | 173 |
| 4.3.3   | Adaptação dos Equipamentos Térmicos para Utilizar Gás Natural ...  | 174 |
| 4.3.4   | Fluxo de Processo do Gás Natural na Empresa Siderúrgica .....      | 179 |
| 4.4     | Substituição de Coque por Carvão Vegetal .....                     | 180 |
| 4.4.1   | Emissão de CO <sub>2</sub> .....                                   | 180 |
| 4.5     | Otimização do Gás de Alto-Forno .....                              | 181 |
| 4.5.1   | Geração do Gás de Alto-Forno .....                                 | 181 |
| 4.5.2   | Distribuição do Gás de Alto-Forno .....                            | 183 |
| 4.5.2.1 | Análise do Sistema de Distribuição do Gás de Alto-Forno .....      | 190 |
| 4.5.3   | Consumo de Gás de Alto-Forno .....                                 | 193 |
| 4.6     | Otimização do Processo de Combustão .....                          | 194 |
| 4.6.1   | Combustão do Gás de Alto-Forno .....                               | 195 |
| 4.6.2   | Combustão do Gás Natural .....                                     | 196 |
| 4.6.3   | Combustão do GLP .....   | 198 |

---

---

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 4.6.4   | Poder Calorífico .....  | 199 |
| 4.6.5   | Equacionamento dos Balanços de Massa e Energia.....               | 200 |
| 5       | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                      | 207 |
| 5.1     | Projeto Piloto de Eficiência Energética .....                     | 210 |
| 5.1.1   | Solução Técnica .....   | 210 |
| 5.1.2   | Resultado do projeto Piloto .....                                 | 212 |
| 5.2     | Projeto Gás Natural.....  | 212 |
| 5.2.1   | Redução de Custo com Combustível.....                             | 213 |
| 5.2.2   | Melhoria no Aquecimento dos Produtos .....                        | 214 |
| 5.2.3   | Redução de Emissões de CO <sub>2</sub> .....                      | 216 |
| 5.2.4   | Melhoria na Segurança dos Processos .....                         | 216 |
| 5.2.5   | Outros Benefícios Não Mensuráveis ou Não Quantificados .....      | 217 |
| 5.2.6   | Índice de Wobbe .....   | 218 |
| 5.2.6.1 | Volume do Gás de Mistura .....                                    | 218 |
| 5.2.6.2 | Energia do Gás de Mistura .....                                   | 223 |
| 5.3     | Substituição do Coque pelo Carvão Vegetal.....                    | 228 |
| 5.4     | Otimização do Gás de Alto-Forno .....                             | 231 |
| 5.5     | Alteração da Matriz Energética e Balanço de CO <sub>2</sub> ..... | 236 |
| 5.6     | Aumento da Competitividade .....                                  | 239 |
| 6       | CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 242 |
| 7       | CONCLUSÕES .....  | 243 |
| 8       | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                            | 245 |
| 9       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                  | 247 |
| 10      | ANEXOS.....   | 264 |
| A.1     | – Pesquisa da ISO 50.001.....                                     | 264 |

---

---

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1.1 – Matriz energética mundial em 2008 (IEA, 2010).....  | 21 |
| Figura 1.2 - Matriz energética brasileira em 2008 (BEN, 2009).....   | 22 |
| Figura 1.3 – Resumo da matriz energética da Empresa Siderúrgica em 2008.....   | 23 |
| Figura 1.4 - Detalhe da matriz energética da Empresa Siderúrgica em 2008.....  | 24 |
| Figura 3.1 – Típicos produtos finais do petróleo bruto (BORMAN e RAGLAND,1998).....  | 31 |
| Figura 3.2 – Reservas provadas de petróleo, segundo regiões geográficas, em 31/12/2009 em bilhões de barris (BP, 2010). .....            | 32 |
| Figura 3.3 – Reservas provadas de petróleo, nos principais países, em 31/12/2009 (BP, 2010). .....                                       | 33 |
| Figura 3.4 - Reservas provadas de petróleo no Brasil (ANP, 2010). .....  | 34 |
| Figura 3.5 – Distribuição percentual das reservas provadas de petróleo, segundo Unidades da Federação, em 31/12/2009 (ANP, 2010). .....  | 34 |
| Figura 3.6 - Reservas provadas de gás natural (trilhões m <sup>3</sup> ), segundo regiões geográficas em 31/12/2009 (IEA, 2010).....     | 39 |
| Figura 3.7 - Participação de países selecionados na reserva mundial de gás natural - 2009 (ANP, 2010).....                               | 40 |
| Figura 3.8 - Reservas provadas de gás natural no Brasil (ANP, 2010). .....   | 41 |
| Figura 3.9 - Distribuição percentual das reservas provadas de gás natural, segundo Unidades da Federação, em 31/12/2009 (ANP, 2010)..... | 42 |
| Figura 3.10 - Consumo de gás natural (bilhões m <sup>3</sup> ), segundo regiões geográficas em 2009 (ANP, 2010).....                     | 43 |
| Figura 3.11 - Participação de países selecionados no consumo mundial de gás natural - 2009 (ANP, 2010).....                              | 44 |
| Figura 3.12 - Oferta de gás natural no Brasil – set/09 a set/10 (ANP, 2010). .....   | 45 |
| Figura 3.13 - Importação de gás natural pelo Brasil – set/08 a set/10 (ANP, 2010). .....   | 45 |
| Figura 3.14 - Crescimento do volume de gás natural comercializado no Brasil entre 2000 e 2010 (ABRACE, 2010).....                        | 46 |
| Figura 3.15 - Maiores fluxos comerciais de transporte de gás natural no mundo, em bilhões m <sup>3</sup> (BP, 2010). .....               | 48 |
| Figura 3.16 - Infra-estrutura de produção e movimentação de gás natural no Brasil em 2009 (ANP, 2010).....                               | 49 |
| Figura 3.17 - Gasoduto Vale do Aço (GASMIG, 2010).....   | 52 |
| Figura 3.18 - Composição das reservas mundiais totais e usos por tipo de carvão (MME/EPE v.6, 2007). .....                               | 54 |

---

---

|   |     |
|---|-----|
| Figura 3.19 – Reservas mundiais de carvão (EIA/DOE, 2005).....  | 55  |
| Figura 3.20 – Principais ocorrências de carvão mineral no Brasil (MME/EPE v.6, 2007). ....  | 56  |
| Figura 3.21 – Dependência externa de carvão mineral (MME/EPE v.6, 2007).....  | 59  |
| Figura 3.22 – Evolução da produção de ferro gusa a carvão vegetal no Brasil (CGEE, 2010).<br>.....  | 61  |
| Figura 3.23 – Esquema da fotossíntese, árvore absorve carbono na forma de biomassa<br>(CAMPOS, 2001).....   | 64  |
| Figura 3.24 – Efeito da fonte de redução sobre emissões atmosféricas (CGEE, 2010). ....   | 67  |
| Figura 3.25 - Ciclo do carbono nas rotas de produção do aço com coque e carvão vegetal<br>(MIRANDA, 2010).....  | 69  |
| Figura 3.26 - Balanço das emissões e remoções de CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> nas rotas coque e carvão<br>vegetal para produção de ferro gusa em alto-forno, em kg/tonelada de ferro<br>gusa (MIRANDA, 2010). ....                | 70  |
| Figura 3.27 – Representação esquemática da vista em corte do alto-forno da Empresa<br>Siderúrgica. ....   | 73  |
| Figura 3.28 – Esquema das zonas de preparação e elaboração de um alto-forno,<br>(JACOMINO et al., 2002).....  | 75  |
| Figura 3.29 – Reações e temperaturas que ocorrem em um processo de produção de ferro-<br>gusa em um alto-forno, cujo combustível e agente redutor é o coque (ERTEM<br>e GURGEN, 2005).....  | 76  |
| Figura 3.30 - A influência do enriquecimento de oxigênio no ar no valor da temperatura<br>teórica de chama em um alto-forno (temperatura de injeção do ar = 1.100°C,<br>umidade = 2%). HALIM (2006). ....                             | 89  |
| Figura 3.31 - A influência da temperatura de injeção de ar e da quantidade de gás natural<br>injetada no alto-forno no valor da temperatura teórica de chama<br>(enriquecimento com oxigênio = 26%, umidade = 2%). HALIM (2006). .... | 90  |
| Figura 3.32 - Componentes do alto-forno a oxigênio puro, com reciclo de gás, injeção de<br>carvão, geração de energia elétrica e vapor. (JIANWEI et al., 2001). ....  | 91  |
| Figura 3.33 - Fontes para geração de energia elétrica mundial em 2008 (IEA, 2010). ....   | 93  |
| Figura 3.34 – Evolução de geração de eletricidade por tecnologia (MME/EPE v.1, 2007). 107   |     |
| Figura 3.35 – Evolução da capacidade instalada de geração (MME/EPE v.1, 2007). ....   | 108 |
| Figura 3.36 – Evolução da produção de energia elétrica por fonte (MME/EPE v.1, 2007). 108   |     |
| Figura 3.37 – Evolução do consumo de combustíveis na geração de eletricidade (MME/EPE<br>v.1, 2007). ....   | 109 |
| Figura 3.38 - Fontes de energia elétrica no Brasil em 2010 (BEN, 2011).....   | 110 |
| Figura 3.39 – Emissão de CO <sub>2</sub> na China até 2009 (BP, 2010).....  | 111 |

---

---

|   |     |
|---|-----|
| Figura 3.40 – Programas federais e estaduais de eficiência energética industrial financiados pelo DOE (BAJAY et al., 2010).....   | 118 |
| Figura 3.41 – Oportunidades de conservação de energia em processos industriais (EIA/DOE, 2006).....   | 120 |
| Figura 3.42 - Consumo de energia elétrica por setor (BEN, 2008).....  | 131 |
| Figura 3.43 - Percentual de redução de combustível ( $R_a$ ) versus a temperatura dos gases de combustão (T) com percentual de oxigênio como parâmetro. (BISIO et al., 2006)..... | 151 |
| Figura 4.1 – Estrutura da equipe de eficiência energética da Empresa Siderúrgica.....   | 154 |
| Figura 4.2 - Eficiência energética de uma instalação (VIEIRA, 2011).....  | 155 |
| Figura 4.3 - Desembolso com o projeto de eficiência energética.....   | 157 |
| Figura 4.4 - Etapas de um projeto de eficiência energética (ANEEL, 2008).....   | 160 |
| Figura 4.5 - Modelo de negócio.....   | 163 |
| Figura 4.6 - Esquema anterior para alimentação das pontes rolantes dos FEAs.....  | 167 |
| Figura 4.7 - Motor síncrono e gerador de corrente contínua na subestação 02.....  | 168 |
| Figura 4.8 - Esquema dos escopos de atuação da Fornecedora de GLP e da Empresa Siderúrgica no fluxo do GLP.....   | 172 |
| Figura 4.9 - Rede de distribuição de GLP na planta da Empresa Siderúrgica.....  | 173 |
| Figura 4.10 - Rede geral de distribuição de GN na planta da Empresa Siderúrgica.....  | 174 |
| Figura 4.11 - Esquema das adequações dos equipamentos para consumo do GN.....   | 178 |
| Figura 4.12 - Esquema do escopo de atuação da Gasmig e Empresa Siderúrgica.....   | 179 |
| Figura 4.13- Fluxograma simplificado de distribuição do gás de alto-forno na Empresa Siderúrgica.....   | 184 |
| Figura 4.14 – Equipamentos da distribuição de GAF da Empresa Siderúrgica.....   | 189 |
| Figura 4.15 – Oxigênio estequiométrico para queimar 1 Nm <sup>3</sup> de gás natural de acordo com a variação do PCI.....   | 204 |
| Figura 4.16 – Oxigênio estequiométrico para queimar 1 Nm <sup>3</sup> de gás de alto-forno de acordo com a variação do PCI.....   | 205 |
| Figura 5.1 – Esquema da dinâmica de funcionamento do sistema de controle de combustão. (MIRANDA et Al., 2008).....  | 209 |
| Figura 5.2 – Influencia do PCI do gás misto nas vazões dos queimadores. (MIRANDA et Al., 2008).....   | 210 |
| Figura 5.3 - Esquema do retificador para alimentação das pontes rolantes dos FEAs.....  | 211 |
| Figura 5.4 - Retificador e transformador para alimentação das pontes rolantes.....  | 211 |
| Figura 5.5 – Situação anterior – proporção em volume de GLP e GAF para diversos Índices de Wobbe.....   | 219 |

---

---

|   |     |
|---|-----|
| Figura 5.6 - Situação atual – proporção em volume de GN e GAF para diversos Índice de Wobbe.....  | 219 |
| Figura 5.7 – Comparação da proporção em volume de GAF na mistura com GLP e GN...  | 220 |
| Figura 5.8 – Proporção em volume de GN em relação ao GLP misturado ao GAF a Coque. ....   | 220 |
| Figura 5.9 - Proporção em volume de GN misturado com GAF a Carvão Vegetal em relação ao GLP misturado com GAF a Coque. ....                 | 222 |
| Figura 5.10 – Redução do consumo de GN misturado com GAF a Carvão Vegetal em comparação ao GAF a Coque .....                                | 223 |
| Figura 5.11 – Aumento do consumo de GAF a Carvão Vegetal misturado com GN em comparação a mistura com GAF a Coque .....                     | 223 |
| Figura 5.12 – Situação anterior - energia da mistura do GLP e GAF a Coque para diversos Índices de Wobbe.....                               | 223 |
| Figura 5.13 – Energia da mistura do GN e GAF a Coque para diversos Índices de Wobbe. ....   | 224 |
| Figura 5.14 - Energia do GAF a Coque na mistura com GLP e GN. ....  | 224 |
| Figura 5.15 – Energia total da mistura do GLP e GN com GAF a Coque.....   | 225 |
| Figura 5.16 – Energia do GN em relação ao GLP, misturados ao GAF a Coque, e a relação dos volumes de GAF nas misturas com GN e com GLP..... | 226 |
| Figura 5.17 – Energia fornecida pelo GAF a Coque nas misturas com GLP e com GN .....  | 226 |
| Figura 5.18 – Diferença da energia fornecida pelo GAF a Coque na mistura com GN e com GLP .....   | 226 |
| Figura 5.19 - Proporção em volume de GN misturado com GAF a Carvão Vegetal em relação ao GLP misturado com GAF a Coque.....                 | 227 |
| Figura 5.20 – Energia do GAF a Coque misturado com GLP em comparação com a energia do GAF a Carvão Vegetal misturado com GN. ....           | 228 |
| Figura 5.21 – Consumo de coque na Empresa Siderúrgica. ....   | 229 |
| Figura 5.22 – Emissão de CO <sub>2</sub> pelo consumo de coque na Empresa Siderúrgica entre 2004 e 2008. ....                               | 230 |
| Figura 5.23 – Balanços de massa, energia e CO <sub>2</sub> do GAF para uma condição com dois altos-fornos em operação .....                 | 233 |
| Figura 5.24 – Balanço de massa e energia do GAF com o alto-forno 1 parado. ....   | 234 |
| Figura 5.25 – Nível do gasômetro com parada do alto-forno 1 e alto-forno 2 com geração de gás reduzida.....                                 | 235 |
| Figura 5.26 – Geração e consumo de GAF com alto-forno 1 parado e alto-forno 2 com vazão reduzida.....                                       | 235 |
| Figura 5.27 – Matriz energética da Empresa Siderúrgica no ano de 2008. ....   | 236 |

---

---

|  |     |
|--|-----|
| Figura 5.28 - Matriz energética da Empresa Siderúrgica no ano de 2011.....                                   | 236 |
| Figura 5.29 – Detalhe da matriz energética da Empresa Siderúrgica no ano de 2008. ....                       | 237 |
| Figura 5.30 – Detalhe da matriz energética da Empresa Siderúrgica no ano de 2011. ....                       | 237 |
| Figura 5.31 - Emissão de CO <sub>2</sub> na Empresa Siderúrgica no ano de 2008. ....                         | 238 |
| Figura 5.32 - Emissão de CO <sub>2</sub> na Empresa Siderúrgica no ano de 2011. ....                         | 238 |
| Figura 5.33 – Redução da emissão de CO <sub>2</sub> na Empresa Siderúrgica. ....                             | 239 |
| Figura 5.34 - Distribuição de desembolso da matriz energética da Empresa Siderúrgica no<br>Ano de 2008. .... | 240 |
| Figura 5.35 – Redução do desembolso da matriz energética da Empresa Siderúrgica. ....                        | 241 |
| Figura 5.36 – Investimentos na matriz energética da Empresa Siderúrgica. ....                                | 241 |

---

---

## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 3.1 - Produção mundial de carvão betuminoso em milhões de tonelada (EIA/DOE, 2005).....   | 57  |
| Tabela 3.2 – Inventário do carbono em tonelada / tonelada de tronco abatido em base seca (FERREIRA, 2001). .....   | 71  |
| Tabela 3.3 – Seqüestro de carbono (t C/ha.ano) das espécies de madeiras (FERREIRA, 2001). .....  | 71  |
| Tabela 3.4 - Comparação entre alto-forno a carvão vegetal e alto-forno a coque, adaptado de JACOMINO et al. (2002).....  | 78  |
| Tabela 3.5 - Características do carvão vegetal e do coque (JACOMINO et al., 2002). .....   | 85  |
| Tabela 3.6 - Composição química média e poder calorífico inferior do gás de alto-forno de diversas procedências. ....  | 87  |
| Tabela 3.7 - Balanço de massa do alto-forno convencional e a oxigênio para a produção de 1 tonelada de ferro-gusa. (JIANWEI et al., 2001).....                                       | 92  |
| Tabela 3.8 – Potência instalada de energia elétrica em 2008 (EIA, 2010). .....   | 93  |
| Tabela 3.9 – Consumo final de energia elétrica (EIA, 2010). .....  | 93  |
| Tabela 3.10 – Potência instalada-energia elétrica por combustível fóssil em 2008 (EIA, 2010).....  | 94  |
| Tabela 3.11 – Potência instalada-energia elétrica hídrica em 2008 (EIA, 2010).....   | 94  |
| Tabela 3.12 – Potência instalada de energia elétrica nuclear em 2009 (EIA, 2010).....  | 95  |
| Tabela 3.13 – Potência instalada de energia elétrica eólica em 2010 (EIA, 2011). .....   | 95  |
| Tabela 3.14 – Emissão de CO <sub>2</sub> em 2008 (EIA, 2010) .....   | 111 |
| Tabela 3.15 – Eficiência mínima requeridas pela legislação francesa para caldeiras industriais com capacidade superior a 400 kW, por tipo de combustível (BAJAY et al., 2010). ..... | 124 |
| Tabela 4.1 – Equivalência energética e emissão de CO <sub>2</sub> (WSA, 2008).....   | 156 |
| Tabela 4.2 – Consumo de gás de alto-forno na Empresa Siderúrgica. ....   | 193 |
| Tabela 4.3 – Poder calorífico inferior (PERRY; CHILTON, 1973).....   | 199 |
| Tabela 4.4 – Composição química do GLP (SHV, 2008). .....  | 204 |
| Tabela 5.1 - Principais projetos de eficiência energética implantados.....   | 207 |
| Tabela 5.2 - Economia de energia elétrica no projeto piloto de eficiência energética.....  | 212 |
| Tabela 5.3 – Comparação dos custos com GN e GLP na Empresa Siderúrgica.....  | 213 |
| Tabela 5.4 - Comparação dos aspectos de segurança com GN e GLP na Empresa Siderúrgica. ....  | 216 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 5.5 - Comparação entre GN e GLP na Empresa Siderúrgica – manuseio e estocagem.....              | 217 |
| Tabela 5.6 - Comparação entre GN e GLP na Empresa Siderúrgica – controle e faturamento. ....           | 217 |
| Tabela 5.7 - Comparação do GAF produzido no alto-forno a coque em comparação com o carvão vegetal..... | 231 |

---

## NOMENCLATURAS

### Siglas:

|           |  |
|-----------|--|
| AF1       | Alto-forno número 1 da Empresa Siderúrgica   |
| AF2       | Alto-forno número 2 da Empresa Siderúrgica   |
| AODL      | Descarburação por lança de oxigênio e argônio  |
| BA        | Booster A  |
| BB        | Booster B  |
| GAF       | Gás de alto-forno  |
| GLP       | Gás liquefeito de petróleo   |
| LTQ       | Laminação de tiras a quente  |
| Mistura12 | Ponto de mistura do gás AF1+AF2  |
| MRPL      | Processo de refino do metal com lança  |
| R1        | Regeneradores ou Cowpers do alto-forno 1   |
| R1        | Regeneradores ou Cowpers do alto-forno 2   |
| RB1       | Linha de recozimento e decapagem final de bobina de aço inoxidável número 1 da Empresa Siderúrgica                               |
| RB2       | Linha de recozimento e decapagem de bobina de aços silicíferos de grão orientado e não orientado número 2 da Empresa Siderúrgica |
| RB3       | Linha de recozimento e decapagem inicial de bobina de aço inoxidável número 3 da Empresa Siderúrgica                             |
| RB4       | Linha de recozimento e decapagem final de bobina de aço inoxidável número 4 da Empresa Siderúrgica                               |
| S         | Sifão  |
| T1        | Torre de queima 1 do alto-forno 2  |

---

---

|      |  |
|------|--|
| T2   | Torre de queima 2 do alto-forno 2          |
| T3   | Torre de queima 3 do alto-forno 1          |
| T4   | Torre de queima 4 do alto-forno 1          |
| VOD  | Descarburação a vácuo com oxigênio         |
| CNTP | Condições normais de temperatura e pressão |
| IBS  | Instituto brasileiro de siderurgia         |
| ANP  | Agência nacional de petróleo               |
| CMRP | Conjunto de Medição e Regulagem de Pressão |
| GN   | Gás Natural                                |

**Variáveis:**

|              |  |  |
|--------------|--|--|
| $h^0$        | Entalpia de formação                                 | [kcal/Nm <sup>3</sup> ]                          |
| $\eta$       | Rendimento   | [%]  |
| $\rho$       | Massa específica                                     | [kg/Nm <sup>3</sup> ]                            |
| $m$          | Massa molar  | [kg]   |
| $E$          | Fração de cada elemento na mistura combustível ou ar | [%]  |
| $n$          | Número de moles                                      | [mol]  |
| $E_F$        | Fração de todos os elementos na fumaça               | [%]  |
| $Q_{AR}^M$   | Vazão de ar de mistura de GLP com GAF                | [Nm <sup>3</sup> de ar /<br>Nm <sup>3</sup> gás] |
| $\eta_{GAF}$ | Rendimento do gás de alto-forno                      | [%]  |
| $\eta_{GLP}$ | Rendimento do gás liquefeito de petróleo             | [%]  |

---

---

|             |  |  |
|-------------|--|--|
| $H_U^{GLP}$ | Energia útil do gás liquefeito de petróleo   | [kcal/Nm <sup>3</sup> ]                          |
| $H_U^{GAF}$ | Energia útil do gás de alto-forno  | [kcal/Nm <sup>3</sup> ]                          |
| $\eta_M$    | Rendimento da mistura (GAF + GLP)  | [%]  |
| $F_{GAF}$   | Fração Volumétrica de GAF na Mistura   | [%]  |
| $F_{GLP}$   | Fração Volumétrica de GLP na Mistura   | [%]  |
| $H_{AR}$    | Entalpia do ar   | [kcal/Nm <sup>3</sup> ]                          |
| $H_F$       | Entalpia da fumaça   | [kcal/Nm <sup>3</sup> ]                          |
| $H_{GAF}$   | Entalpia do gás de alto-forno  | [kcal/Nm <sup>3</sup> ]                          |
| $H_{GLP}$   | Entalpia do gás liquefeito de petróleo   | [kcal/Nm <sup>3</sup> ]                          |
| $PCI$       | Poder calorífico inferior  | [kcal/Nm <sup>3</sup> ]                          |
| $PCI_{GAF}$ | Poder Calorífico Inferior do gás de alto-forno   | [kcal/Nm <sup>3</sup> ]                          |
| $PCI_{GLP}$ | Poder Calorífico Inferior do gás liquefeito de petróleo  | [kcal/Nm <sup>3</sup> ]                          |
| $PCI_M$     | Poder Calorífico Inferior da mistura de gás liquefeito de petróleo com gás de alto-forno               | [kcal/Nm <sup>3</sup> ]                          |
| $R_{AR}$    | Relação da quantidade de ar que pode ser queimado com 1 Nm <sup>3</sup> de gás combustível             | [Nm <sup>3</sup> de ar / Nm <sup>3</sup> de gás] |
| $R_M$       | Relação da quantidade de gás combustível (GLP + GAF) que pode ser queimado com 1 Nm <sup>3</sup> de ar | [Nm <sup>3</sup> de gás / Nm <sup>3</sup> de ar] |
| $T^k$       | Temperatura em Kelvin  | [K]  |
| $V_{AR}$    | Volume de ar   | [Nm <sup>3</sup> ]                               |
| $V_F$       | Volume de fumaça   | [Nm <sup>3</sup> ]                               |
| $V_{GAF}$   | Volume de gás de alto-forno  | [Nm <sup>3</sup> ]                               |
| $W$         | Fração de água do gás de alto-forno ou ar  | [%]  |
| $X_{AR}$    | Fração molar de oxigênio do ar atmosférico   | [%]  |

---

---

|            |  |        |
|------------|--|--------|
| $X_{H_2}$  | Fração molar de hidrogênio no GAF em base volumétrica          | [%]    |
| $X_{CO}$   | Fração molar de monóxido de carbono no GAF em base volumétrica | [%]    |
| $X_{CH_4}$ | Fração molar de metano no GAF em base volumétrica              | [%]    |
| $X_F$      | Fração molar de oxigênio livre na fumaça                       | [%]    |
| $X_{GAF}$  | Fração molar de oxigênio do gás de alto-forno                  | [%]    |
| ENERGIA    | Taxa de energia do gás de alto-forno                           | kcal/h |

---

# 1 INTRODUÇÃO

A energia é essencial para o desenvolvimento de uma nação. O mundo atual depende, para seu funcionamento, do abastecimento de vetores energéticos modernos que são o carvão mineral, o petróleo, o gás natural, a energia nuclear e a hidráulica. Os quatro primeiros são as principais fontes energéticas primárias, porém não são renováveis e dispõem de reservas limitadas. A energia hidráulica é renovável, mas se concentra em alguns países (BARROS, 2007).

Na matriz energética mundial (IEA, 2010), em 2008, petróleo e seus derivados figuravam com 33% de participação no consumo de energia, o carvão mineral representava 27%, o gás natural contribuía com 21%, urânio e derivados com 6% e fontes renováveis de energia com 13%; dentre elas os combustíveis renováveis que são principalmente o etanol e biodiesel, e as fontes de energia hidráulica, eólica, solar e geotérmica, conforme mostra a Figura 1.1.

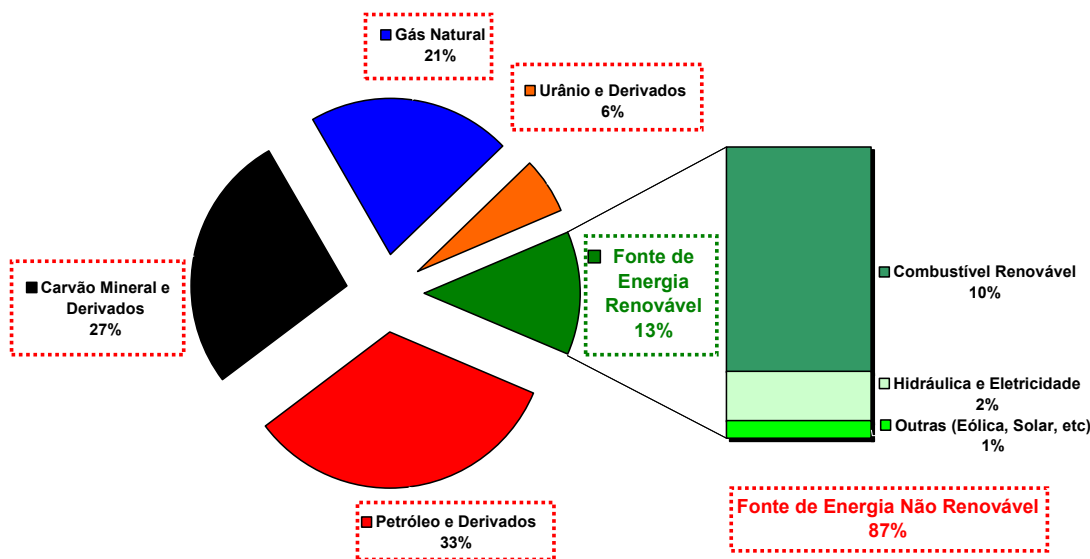


Figura 1.1 – Matriz energética mundial em 2008 (IEA, 2010).

Em 2008, na matriz energética brasileira (BEN, 2009), o petróleo e seus derivados representavam 38%, o gás natural 9%, carvão mineral e derivados contribuíam com 5%, urânio e derivados com 1% e fontes renováveis com 47%, com destaque para os derivados da cana de açúcar com 18%, ultrapassando a energia hidráulica com 15% e a lenha e carvão vegetal com 10%, conforme apresenta a Figura 1.2.

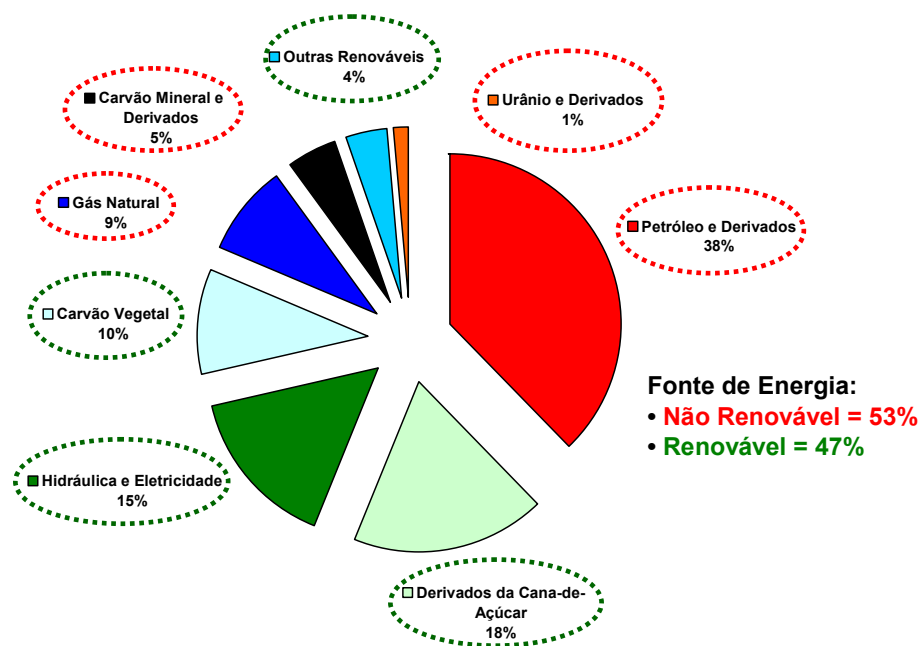


Figura 1.2 - Matriz energética brasileira em 2008 (BEN, 2009).

A Empresa Siderúrgica analisada neste trabalho é uma usina integrada a coque e a carvão vegetal. Em seu portfólio de produtos estão incluídos os aços planos inoxidáveis, os siliciosos para aplicações elétricas e aços ao carbono especiais (ligados). Todos estes processos consomem uma grande quantidade de várias formas de energia. A matriz energética da empresa em 2008 é mostrada na Figura 1.3, onde se observa em primeiro lugar a energia elétrica de fonte hidráulica com 43%, o carvão vegetal com 21%, sendo de floresta plantada, totalizando 64% de fonte de energia renovável.

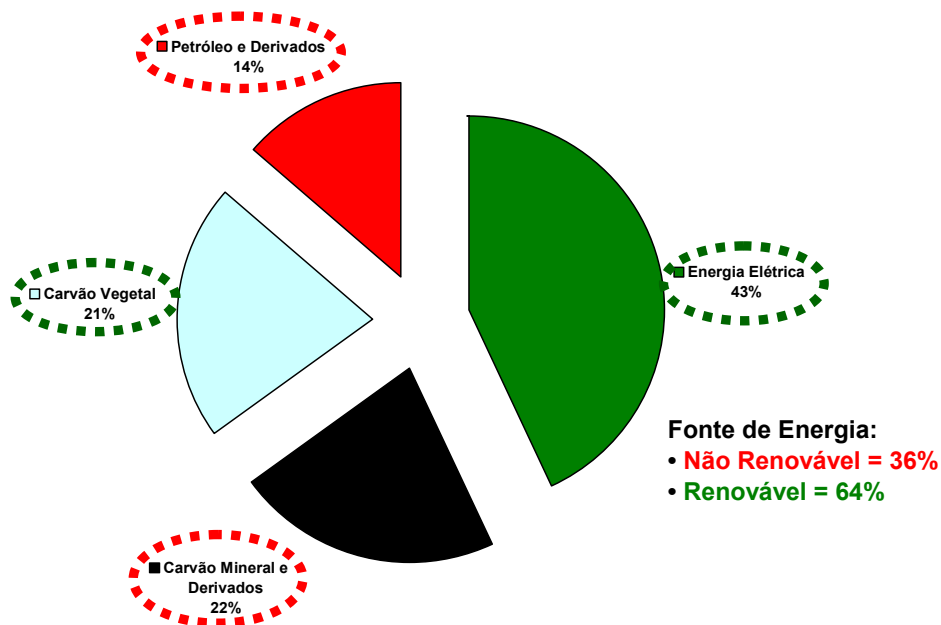


Figura 1.3 – Resumo da matriz energética da Empresa Siderúrgica em 2008

As fontes de energia que não são renováveis representaram 36%, sendo 22% do coque do carvão mineral e o petróleo e seus derivados participavam com 14% de toda energia consumida. Apenas o GLP representava 12% deste total, o que correspondia a cerca de 3% a 4% do mercado industrial brasileiro, fazendo da Empresa Siderúrgica a maior consumidora de GLP da América Latina (ANP, 2009). Completam o quadro dos derivados de petróleo o óleo Combustível 1A com 1,5% e o óleo diesel com 0,5%, conforme Figura 1.4.

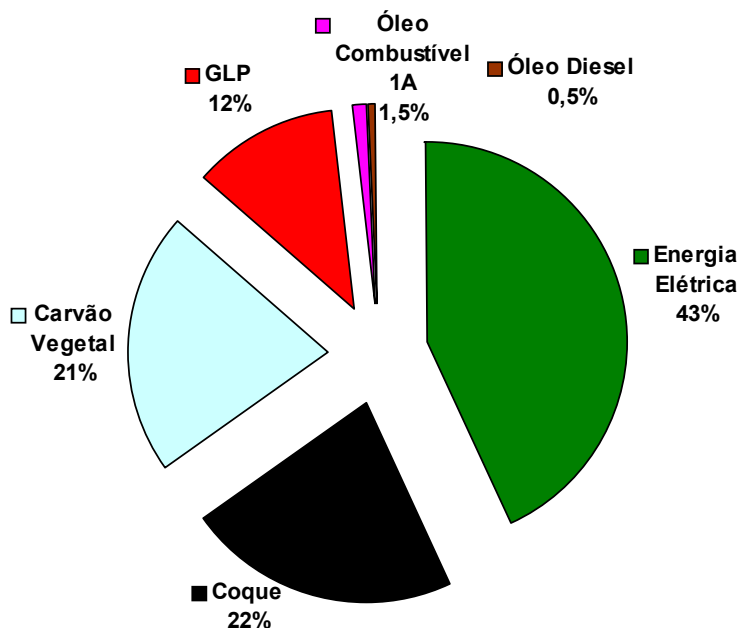


Figura 1.4 - Detalhe da matriz energética da Empresa Siderúrgica em 2008.

Para se alcançar um desenvolvimento econômico sustentável, deve se alterar a matriz energética atual paralelamente com uma política de eficiência energética.

Apesar de que políticas de busca de fontes alternativas de energia, redução do consumo de energia e da emissão de CO<sub>2</sub> já deviam ter sido implementadas; ainda há tempo para se tratar das questões da redução da emissão dos gases geradores do efeito estufa, principalmente o CO<sub>2</sub>, com ações concretas e eficazes, sob pena das gerações futuras sofrerem as consequências desastrosas do descaso com o meio ambiente e gerenciamento ineficaz dos recursos naturais.

Este trabalho visa contribuir para a disseminação do conhecimento sobre o tema de energia, e conscientização da importância de se trabalhar a favor da sustentabilidade.

Em 3 anos de trabalho da equipe de eficiência energética da empresa siderúrgica, foi possível a redução significativa de combustíveis fósseis na matriz energética: O consumo de óleo diesel foi reduzido em 60%, sendo atualmente utilizado somente para transporte rodoviário e ferroviário. O consumo de GLP foi reduzido em 10%, sendo este resultado importante pelo fato do consumo de GLP da empresa ser o maior da América Latina, representando uma economia de aproximadamente 5.000 toneladas por ano, o que equivale ao consumo anual de 32 mil famílias consumindo um botijão de 13 kg por mês. A redução de energia elétrica da empresa foi próxima de 2%. Foi desenvolvida uma metodologia para a utilização da lei de eficiência energética possibilitando a implantação futura de novos projetos na área elétrica.

É a primeira vez que ocorre uma divulgação científica da mudança da matriz energética de uma Empresa Siderúrgica com a substituição do coque pelo carvão vegetal e do gás liquefeito de petróleo pelo gás natural. Também é inédito o estudo da implementação de um projeto piloto utilizando o recurso da lei de eficiência energética ocorrendo em paralelo com o equacionamento do balanço de massa e energia do gás de alto-forno, que é utilizado para economizar combustíveis fósseis, e a implementação de vários projetos de eficiência energética.

A relevância do trabalho consiste no tema selecionado relativo à energia, sendo que soluções para sua melhor utilização e economia devem ser pesquisadas, desenvolvidas e implantadas com urgência. Portanto, esta tese tem uma grande importância para a Universidade que produz conhecimento num tema atual, de importância ambiental e econômica, inquestionável para a sociedade, que ganha com a redução das emissões de gases que provocam o aquecimento global, e para

---

a Empresa Siderúrgica que se utiliza da pesquisa e desenvolvimento na Universidade para obter resultados significativos para a sustentabilidade, competitividade e reduções das emissões de CO<sub>2</sub>.

---

## 2 OBJETIVO

Avaliar a substituição do coque de carvão mineral pelo carvão vegetal e do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) por Gás Natural (GN) em uma Empresa Siderúrgica, e analisar os efeitos da mudança da matriz energética.

Desenvolver projetos de eficiência energética, e suas conseqüências para a empresa, como a redução do consumo de energéticos.

Calcular o impacto da alteração da matriz energética da empresa na redução das emissões de CO<sub>2</sub>.

São objetivos gerais:

- Avaliar as possibilidades de alteração da matriz energética de uma Empresa Siderúrgica no sentido de substituir as fontes de energia não renovável para renovável ou que tenha uma menor emissão de CO<sub>2</sub>.
- Aumentar a eficiência energética de uma Empresa Siderúrgica, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis e implantar um projeto piloto para a redução do consumo de energia elétrica, utilizando o recurso da lei de eficiência energética.

São objetivos específicos:

---

- Desenvolver a metodologia para a utilização do recurso da lei de eficiência energética com a utilização de contratos de desempenhos para a redução do consumo de energia elétrica em empresas com fins lucrativos.
  - Construir uma base para viabilizar investimentos futuros de grande porte em projetos de redução do consumo de energia elétrica.
  - Estruturar e implantar projetos de eficiência energética.
  - Avaliar a viabilidade da substituição do gás liquefeito de petróleo pelo gás natural na Empresa Siderúrgica e os impactos.
  - Realizar o balanço de massa e energia da geração, distribuição e consumo de gás de alto-forno para amenizar a variação do seu poder calorífico inferior e substituir combustível fosseis.
  - Realizar o balanço de CO<sub>2</sub> com a alteração da matriz energética e com a implantação dos projetos de eficiência energética na Empresa Siderúrgica Estudada.
-

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica apresentada nesta tese busca apresentar uma visão geral da matriz e eficiência energética mundial, nacional e da empresa em que foi desenvolvido todo o trabalho.

A matriz energética foi dividida em petróleo, gás natural, energia elétrica, carvão mineral e carvão vegetal. Nesses temas, inclui-se a abordagem sobre o impacto da matriz energética na geração de CO<sub>2</sub> foi discutida, sendo o CO<sub>2</sub> um dos principais causadores do efeito estufa.

Foi relatada a geração de gás de alto-forno, que é distribuído e utilizado na planta para reduzir o consumo de combustíveis derivados do petróleo.

Por último, foi abordado o tema da eficiência energética, detalhando em termos de programas, leis, situação em alguns países e no Brasil.

#### **3.1 Petróleo**

O petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos que apresenta composição variável e dependente de fatores geológicos tais como a localização da jazida, a idade, a profundidade, etc. É uma substância líquida fóssil natural, de origem orgânica mista vegetal/mineral, formada no subsolo ao longo de milhares de anos pela ação da temperatura e pressão. Os principais constituintes orgânicos do petróleo são os alcanos (ou parafinas - C<sub>n</sub>H<sub>2n+2</sub>), ciclanos (ou naftênicos - C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>), aromáticos (anel benzênico), compostos sulfurados, nitrogenados, oxigenados e metálicos e

---

impurezas inorgânicas, de acordo com TEIXEIRA (2000). Até que o petróleo alcance os consumidores finais ele deve passar por, pelo menos, as atividades de exploração, perfuração, produção, refino e transporte.

A existência do petróleo já é citada no Antigo Testamento, quando da sua utilização na Arca de Noé e na Torre de Babel. Mais tarde, na Mesopotâmia, Egito e Pérsia, o betume era utilizado para calafetação das construções, pavimentação de estradas e embalsamamento dos falecidos. No século II os chineses retiravam petróleo e gás natural de poços a 1000 metros de profundidade e os transportavam em tubos de bambu para utilização em aquecimento e iluminação (LOURENÇO, 2003).

O químico holandês Van Helmont descobriu, em 1609, que um corpo invisível, denominado de *geist* (alma em alemão), entrava em combustão com grande desprendimento de energia (calor), mas o gás somente teve sua utilização industrial implementada em 1795, no auge da Revolução Industrial (PETROBRAS, 1986).

Somente em 1869 o petróleo começou a ser aproveitado em larga escala industrial. Nesta época, Eldwin Drake, da Pensilvânia - EUA descobriu uma jazida a 21 metros de profundidade. Neste ponto, instalou-se uma refinaria rudimentar para a produção de querosene e iniciou-se uma nova era na estrutura das relações econômicas e comerciais que provocaria profundas modificações no poder político e econômico do mundo (LOURENÇO, 2003).

Nesta época, o carvão era o melhor combustível disponível, mas rapidamente foi substituído pelo petróleo. A iluminação, que era feita através de óleos de rícino e

---

baleia, passou a ser feita com querosene, que se apresentava nessa época como o mais importante derivado do petróleo (PETROBRAS, 1986).

Segundo LEFFER (1985), o petróleo tal qual é extraído do subsolo é inadequado ao uso industrial, devendo ser submetido a um processo de destilação fracionada separando produtos de emprego distintos.

A qualidade e característica do petróleo determinam a faixa de extração de cada componente principal, embora existam processos, como o craqueamento, que permitem pequena variação no ajuste. A Figura 3.1 mostra típicos produtos finais a partir do petróleo bruto. As porcentagens referem-se à produção global de uma refinaria “total”.

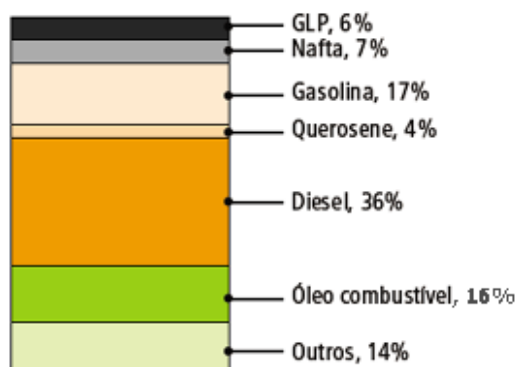


Figura 3.1 – Típicos produtos finais do petróleo bruto (BORMAN e RAGLAND, 1998)

### 3.1.1 Reservas de Petróleo

Em 1870, a primeira empresa petrolífera foi fundada por John Rockfeller e, no início do século XX, já existiam algumas companhias multinacionais petrolíferas que operam até o presente. O fato determinante na história do petróleo foi a descoberta

de extensas jazidas no Texas-EUA, em 1901, sendo, neste ano, a produção mundial de petróleo de 395.400 barris por dia (PETROBRAS, 1986).

O petróleo por ser um composto de ampla utilização tanto como combustível como também em indústrias químicas, onde se constitui matéria prima de vários produtos, tem sido na história mundial uma fonte de conflitos. Uma das principais razões desse problema reside na distribuição demográfica não homogênea das reservas mundiais; conforme pode ser verificado na Figura 3.2. As reservas provadas mundiais de petróleo atingiram a marca de 1,3 trilhões de barris no ano de 2009. As reservas do Oriente Médio, região que concentra a maior parte das reservas de petróleo do mundo, possuem um volume equivalente a 754,2 bilhões de barris ou 56,6% do total (ANP, 2010).



Figura 3.2 – Reservas provadas de petróleo, segundo regiões geográficas, em 31/12/2009 em bilhões de barris (BP, 2010).

Conforme a Figura 3.3, em 2009, 65% de toda a reserva de petróleo no Mundo se concentravam na Arábia Saudita, Venezuela, Irã, Iraque e Kuwait. As reservas provadas do Brasil correspondem apenas a 1,1% do mundo, estando em 16º lugar na lista dos detentores de reservas provadas de petróleo (BP, 2010).

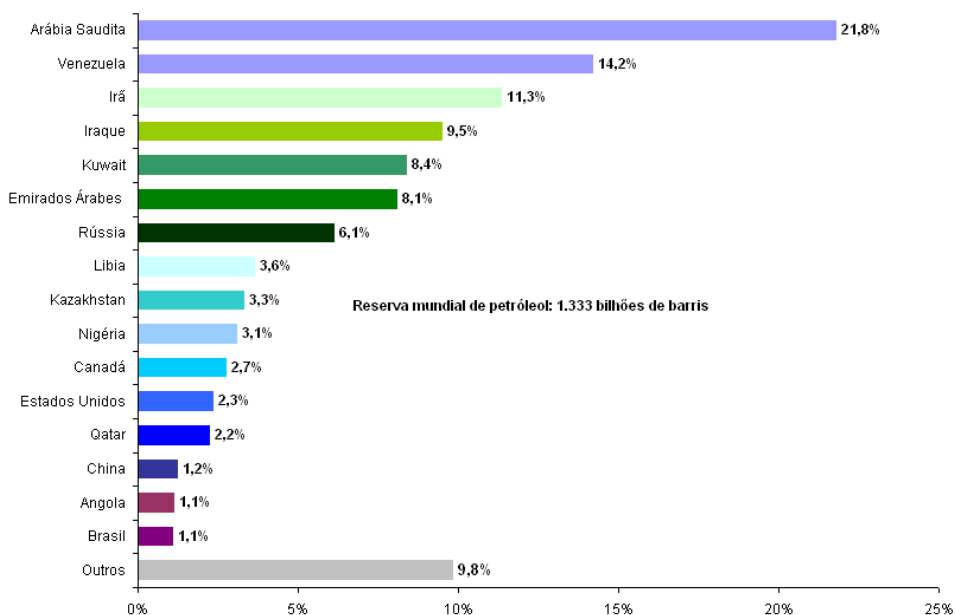


Figura 3.3 – Reservas provadas de petróleo, nos principais países, em 31/12/2009 (BP, 2010).

As reservas totais de petróleo do Brasil (ANP, 2010) foram contabilizadas em 21,1 bilhões de barris no fim de 2009. Já as reservas provadas atingiram a marca de 12,9 bilhões de barris, volume que representou 60,8% das reservas totais brasileiras. A Figura 3.4 mostra como se comportou a evolução das reservas brasileiras de petróleo no período de 1980 a 2009.

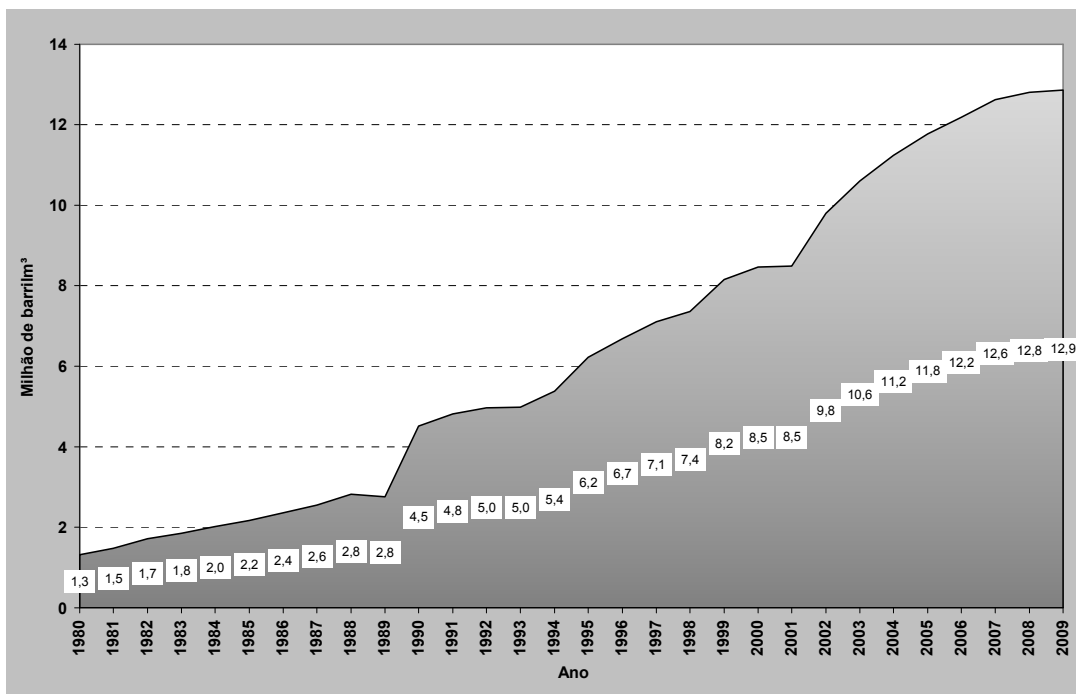


Figura 3.4 - Reservas provadas de petróleo no Brasil (ANP, 2010).

Das reservas provadas, 92,8% se localizavam em mar e 7,2% se situavam em terra, com destaque para o Rio de Janeiro, que deteve 80,7% do total, e o Espírito Santo com 10,1%, conforme Figura 3.5.

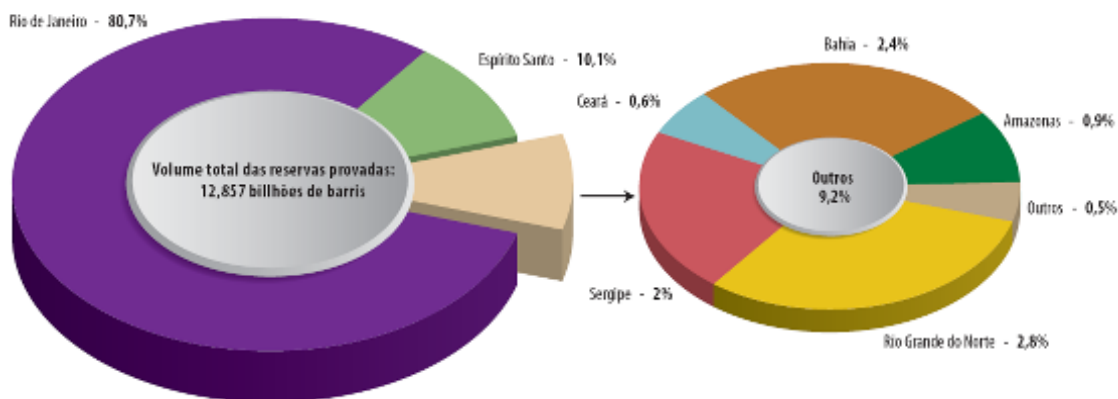


Figura 3.5 – Distribuição percentual das reservas provadas de petróleo, segundo Unidades da Federação, em 31/12/2009 (ANP, 2010).

### **3.1.2 Gás Liquefeito de Petróleo**

A produção de Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), no contexto mundial, começou em 1910, ocorrida nos Estados Unidos. A partir de 1927, grandes empresas de petróleo, como a Philips Petroleum, Standard Oil e Shell, entraram no mercado de GLP (ANP, 2004).

O Brasil começou a importação de GLP em 1937. São construídos em Santos e no Rio de Janeiro os primeiros terminais de GLP, num cenário em que os principais combustíveis para fogões e aquecedores domésticos daquela época ainda eram o querosene e o carvão vegetal.

A Agência Nacional de Petróleo (ANP) classifica o GLP como o conjunto de hidrocarbonetos com três ou quatro átomos de carbono (propano, propeno, butano e buteno), podendo apresentar-se isoladamente ou em mistura, com pequenas frações de outros hidrocarbonetos. Se houver uma proporção de propano maior do que a de butano, tem-se um GLP mais “rico”, com maior pressão e menor peso; caso contrário tem-se um GLP mais “pobre”, de maior peso e menor pressão.

Depois de produzido, o GLP é enviado para as companhias distribuidoras de gás por meio de caminhões e gasodutos. Nelas, o GLP é armazenado nas diversas embalagens, sendo a de 13 kg a mais usual, e em carretas para o setor industrial (ANP, 2004).

---

## **3.2 Gás Natural**

O gás natural pode ser definido como uma mistura de hidrocarbonetos que existe na fase gasosa ou em solução no petróleo, nas condições de reservatório, e que permanece no estado gasoso nas condições atmosféricas de pressão e temperatura (CARVALHO, 2001). É resultante da decomposição da matéria orgânica fóssil no interior da Terra. No seu estado bruto, como encontrado na natureza, o gás natural é composto principalmente por metano, além de apresentar proporções de etano, propano, butano, hidrocarbonetos mais pesados e também, porém em menores proporções, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, água, ácido clorídrico e outras impurezas. É extraído diretamente a partir de reservatórios petrolíferos ou gasíferos, incluindo gases úmidos, secos, residuais e gases raros. A proporção em que o petróleo e o gás natural se encontram misturados na natureza varia muito. Pode ocorrer petróleo com muito pouco gás associado, bem como jazidas em que há quase exclusivamente a presença do gás natural.

### **3.2.1 Histórico do Gás Natural**

O gás natural tem sido usado desde a antiguidade. Os antigos se referiam às “Chamas eternas” que eram a chama do gás natural queimando em áreas hoje conhecidas pela sua produção de petróleo e gás. O primeiro uso em larga escala do gás natural para propósitos energéticos, que se tem registro, ocorreu na China. Um dos mais antigos registros foi o reportado por Confúcius, que descreveu perfurações de poços de água, salmoura e gás que alcançavam 500 metros de profundidade, realizadas no ano 600 antes de Cristo. No século XIX, foram encontrados na China poços com profundidade superior a 4.000 metros, comparáveis à profundidade de

---

muitos dos atuais poços comerciais para prospecção de gás. O gás natural era freqüentemente encontrado associado à salmoura, e era usado para evaporar a água da mesma para a obtenção do sal. Em alguns poços, o gás natural era transportado por tubulações de bambu para outros centros de consumo (NAKICENOVIC et al, 2000).

Em 1872, o primeiro gasoduto dos Estados Unidos foi construído, com nove quilômetros de extensão e duas polegadas de diâmetro, visando atender à demanda da cidade da Pensilvânia. Em 1912, no Canadá, foi construído um gasoduto de dezesseis polegadas de diâmetro e 273 quilômetros de extensão, visando atender às necessidades da cidade de Calgary (LOURENÇO, 2003).

No Brasil, em 1895 foi instalada a Companhia de Iluminação a Gás, no Rio de Janeiro, e a São Paulo Gas Company Ltda., em São Paulo, ambas com a incumbência de produzir e distribuir o gás para uso doméstico e iluminação (PETROBRAS, 1986).

Segundo PARO (2005), a utilização industrial do GN no Brasil começou por volta de 1940, com as descobertas de petróleo e gás na Bahia, atendendo a indústrias localizadas no Recôncavo Baiano. Depois de alguns anos, as bacias do Recôncavo, Sergipe e Alagoas eram destinadas quase em sua totalidade para a fabricação de insumos industriais e combustíveis para a refinaria Landulfo Alves e o Pólo Petroquímico de Camaçari. No entanto, por muitos anos, o GN foi considerado um subproduto do petróleo, sendo utilizado para re-injeção nos poços para potencializar a produção deste, ou queimado em tochas nas plataformas de produção.

---

O governo federal elaborou, em 1980, o plano nacional do gás natural, cujo principal objetivo era aumentar de 1% para 12% a participação deste combustível na matriz energética brasileira até 2010 (CARVALHINHO FILHO, 2003). O grande marco inicial do consumo de GN no Brasil ocorreu com a exploração da Bacia de Campos, no Estado do Rio de Janeiro. Até 1985, a participação do gás natural na matriz energética brasileira era de 2,2% e subiu para 3,1% a partir de 1990. Em 2008, a participação do gás natural na matriz energética brasileira foi de 10,3% (BEN, 2010).

Segundo MATHIAS (2008), as discussões a respeito do aproveitamento das reservas da Bolívia, tanto para a Argentina quanto para o Brasil vêm desde a década de 1930 (BEHRENS, 1990), apesar de a integração entre as reservas e mercados gasíferos da região ter se iniciado apenas em 1972. Tanto a Argentina quanto o Brasil tinham interesse na compra do gás natural boliviano e apresentaram projetos distintos para a integração gasífera entre os países. A Bolívia, por sua vez, esperava que seus vizinhos financiassem não apenas os gasodutos, mas também investissem em projetos na exploração e produção de hidrocarbonetos no território boliviano (MARES, 2004).

As reservas de gás do Brasil não são capazes de suprir toda a demanda nacional, o que o tornou dependente do gás boliviano. Dessa forma foi assinado o acordo “take-or-pay” por ambos os países para o fornecimento do gás e inaugurado, em 1999, a primeira etapa da construção do gasoduto Bolívia-Brasil, chamado de GASBOL (CARVALHINHO FILHO, 2003). Com este gasoduto, o Brasil conseguiu aumentar significativamente a competitividade econômica deste energético (MONTES, 2000).

---

Sessenta por cento da demanda total brasileira de gás natural é proveniente da Bolívia (CARDOSO, 2004).

### 3.2.2 Reservas de Gás Natural

De acordo com dados da International Energy Agency (IEA, 2010), as reservas mundiais de gás natural, provadas em janeiro de 2010, chegam a 187 trilhões de metros cúbicos, distribuídas nos diversos continentes, conforme a Figura 3.6. O Oriente Médio e a Europa com a ex. União Soviética correspondem a 74% de toda a reserva do mundo, enquanto as Américas Central e do Sul representam 4%.

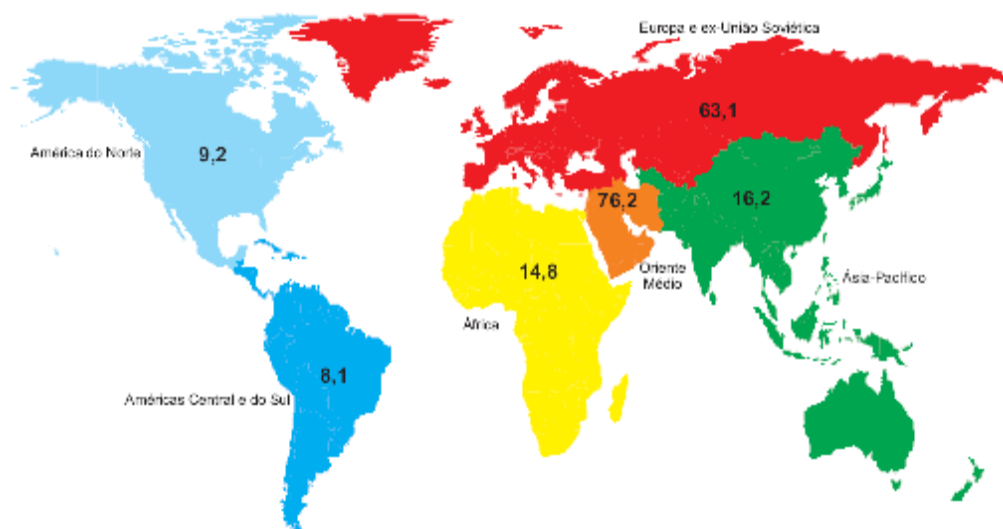


Figura 3.6 - Reservas provadas de gás natural (trilhões m<sup>3</sup>), segundo regiões geográficas em 31/12/2009 (IEA, 2010).

Conforme Figura 3.7, em 2009, com 53% de toda a reserva de gás natural no Mundo estão a Rússia, Irã e Catar. A Venezuela com 3% das reservas mundiais corresponde a 75% das reservas das Américas Central e do Sul. As reservas provadas do Brasil correspondem apenas a 0,2% do mundo e 5% das Américas Central e do Sul, estando em 39º lugar na lista dos detentores de reservas provadas de gás natural (ANP 2010).

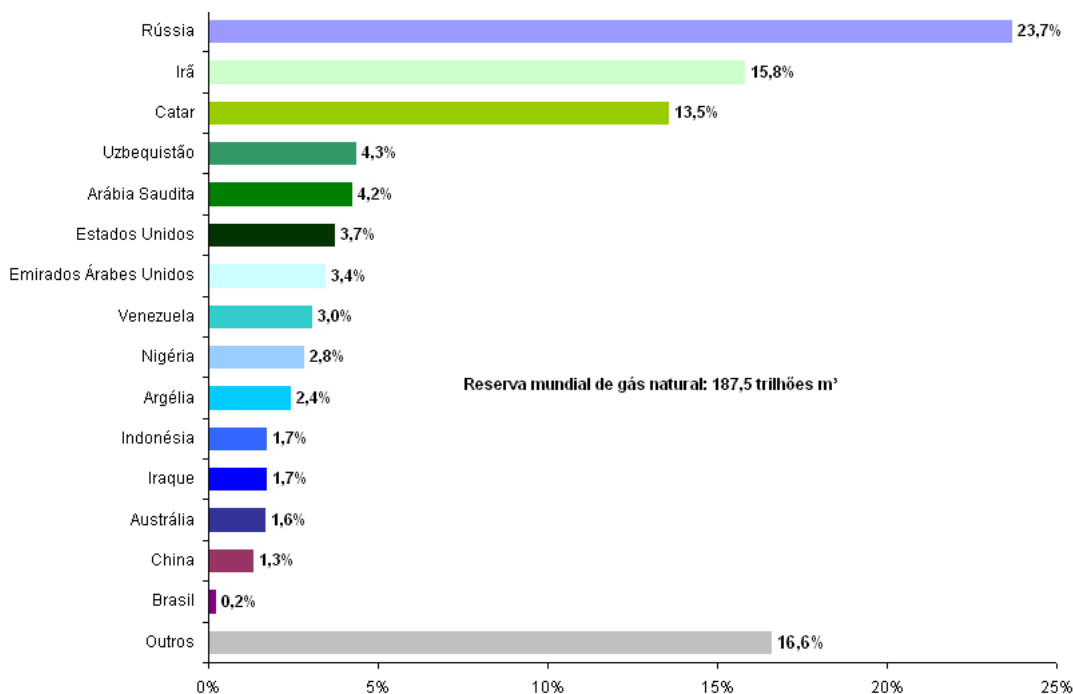


Figura 3.7 - Participação de países selecionados na reserva mundial de gás natural - 2009 (ANP, 2010).

Segundo o Programa Nacional de Energia (MME/EPE v.1, 2007), analisando o período compreendido entre os anos de 1964 e 2005, as reservas provadas de gás natural no Brasil cresceram a uma taxa média de 7,4% a.a. Este crescimento está relacionado principalmente às descobertas decorrentes do esforço contínuo do país para diminuir o grau de dependência do petróleo. A Figura 3.8 mostra como se comportou a evolução das reservas brasileiras de gás natural no período 1965-2009. As reservas são bastante modestas e cresceram significativamente entre 1995 e 1997, e a partir de 2002. As principais descobertas ocorreram na Bacia de Campos (onde se encontra a maior concentração de campos gigantes do país, tais como Albacora, Marlim e Roncador), bem como na Bacia do Solimões (onde se encontram o Pólo de Urucu e a jazida de Juruá). No período 2000-2009, as reservas provadas e as reservas totais apresentaram uma taxa média de crescimento de 5,8% ao ano (ANP 2010).

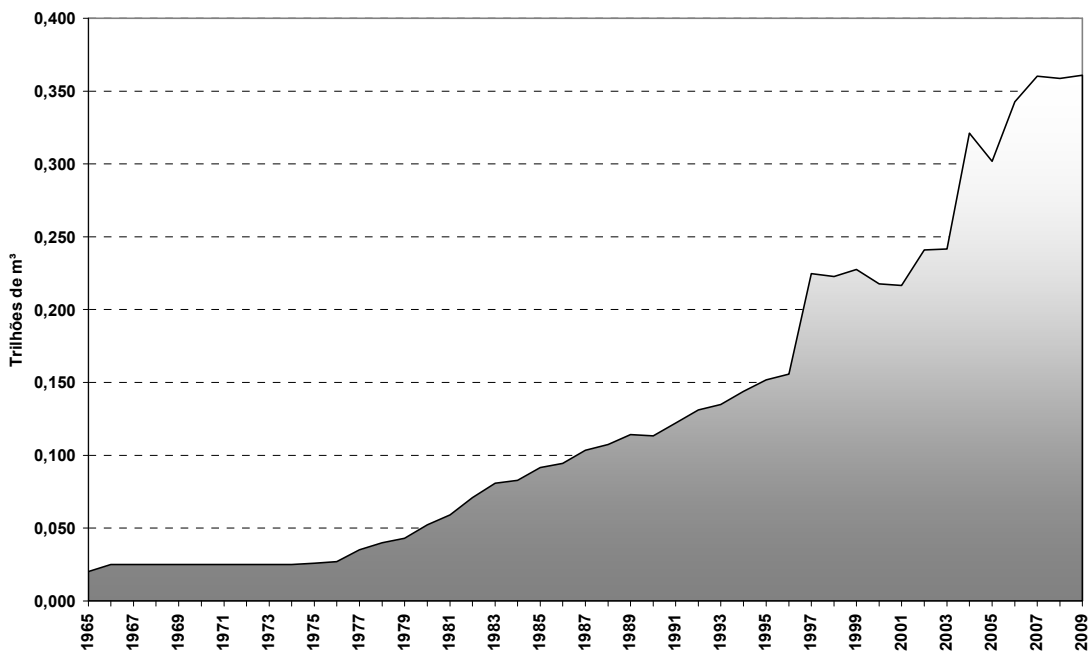


Figura 3.8 - Reservas provadas de gás natural no Brasil (ANP, 2010).

Conforme ANP (2010), as reservas provadas de gás natural no Brasil chegaram a 366 bilhões m<sup>3</sup> em 2009, as quais representaram 61% das reservas totais de gás natural no território brasileiro (600 bilhões m<sup>3</sup>). O Rio de Janeiro, estado com maior participação nestas reservas (166,2 bilhões m<sup>3</sup> em reservatórios no mar), concentrou 45,3% do volume nacional, seguido do Amazonas, cujas jazidas terrestres (52,4 bilhões m<sup>3</sup>) corresponderam a 14,3% das reservas provadas nacionais, conforme Figura 3.9.

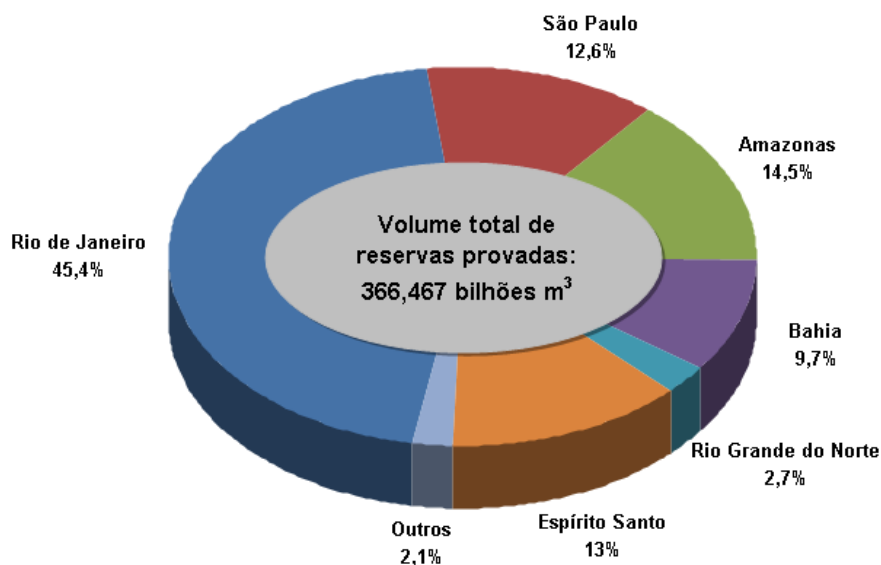


Figura 3.9 - Distribuição percentual das reservas provadas de gás natural, segundo Unidades da Federação, em 31/12/2009 (ANP, 2010).

O governo de Minas anunciou que se tornará produtor de gás natural até o ano de 2013. Em parceria com a iniciativa privada, o governo prevê a extração de 7 milhões a 8 milhões de m<sup>3</sup> diários de gás numa reserva de Morada Nova de Minas, no Vale do São Francisco - que tem, ao todo, entre 176,5 bilhões e 194,6 bilhões de m<sup>3</sup> (VELEDA, 2011).

### 3.2.3 Consumo de Gás Natural

Segundo a BP (2010), o consumo mundial de gás natural foi de 2,9 trilhões m<sup>3</sup> em 2009. Os consumos das diferentes regiões do mundo, de acordo com a ordem de importância, foram: Europa e ex-União Soviética (36%); América do Norte (27,6%), Ásia-Pacífico (16,9%); Oriente Médio (11,8%); Américas Central e do Sul (4,6%) e África (3,2%), a Figura 3.10 representa o mapa do consumo mundial de gás natural em 2009.

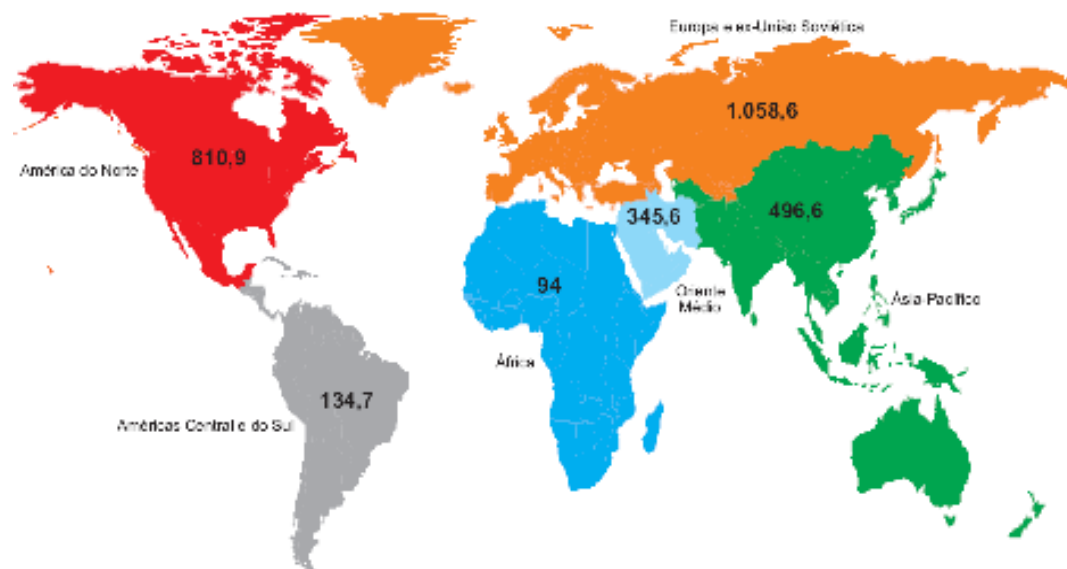


Figura 3.10 - Consumo de gás natural (bilhões m<sup>3</sup>), segundo regiões geográficas em 2009 (ANP, 2010).

O consumo de gás natural, assim como o consumo de petróleo, reflete as características econômicas estruturais e conjunturais das diferentes regiões do mundo, mas também é fortemente influenciado pela distribuição geográfica das reservas.

Conforme ANP (2010), em 2009, os Estados Unidos consumiram o maior volume de gás natural (22%), seguido da Rússia (13%), Irã (5%) e do Canadá (3%). Os principais países consumidores de gás natural em 2009 estão apresentados na Figura 3.11.

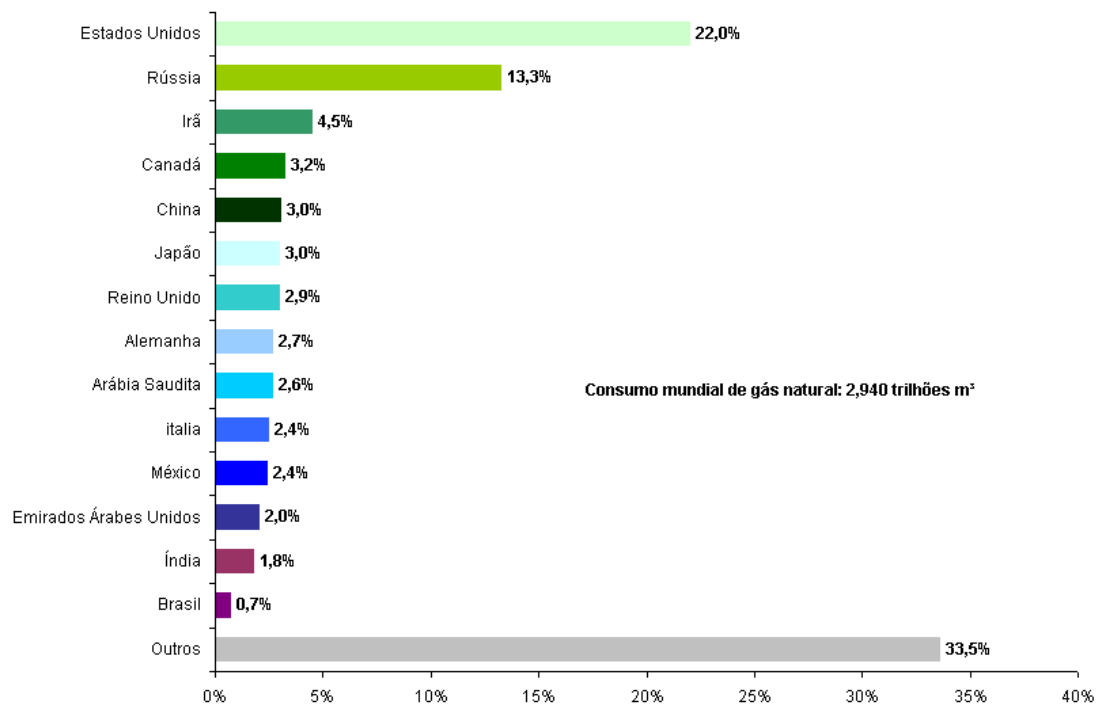


Figura 3.11 - Participação de países selecionados no consumo mundial de gás natural - 2009 (ANP, 2010).

Em 2009, o Brasil teve consumo de gás natural de 20,1 bilhões m<sup>3</sup>, 0,7% do total mundial. O País ocupou a 34<sup>a</sup> posição entre os consumidores de gás natural.

A produção bruta de gás natural nacional registrada em setembro/10 foi de 63,9 milhões de m<sup>3</sup>/dia, sendo a produção líquida de 36,7 milhões de m<sup>3</sup>/dia. Além desta, a oferta de gás natural no Brasil foi completada com gás natural importado, totalizando 84,9 milhões de m<sup>3</sup>/dia, conforme Figura 3.12.

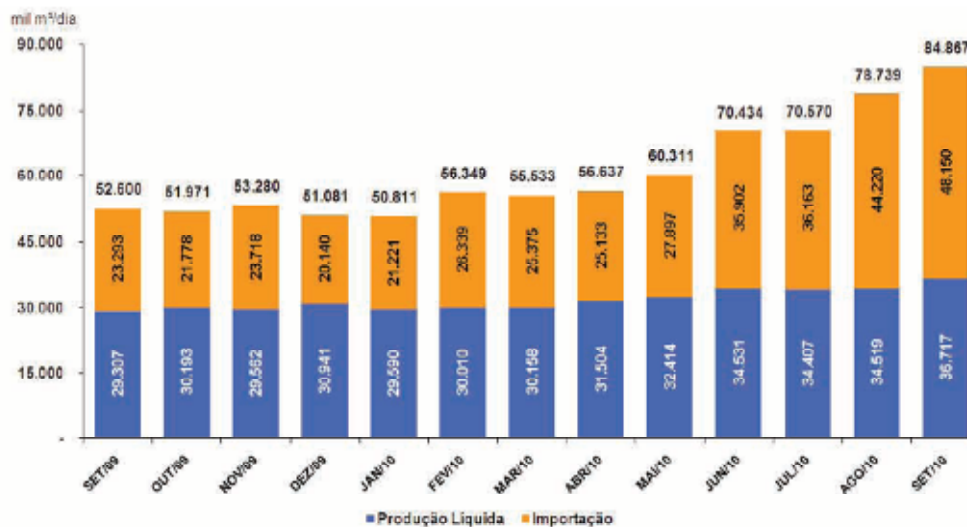


Figura 3.12 - Oferta de gás natural no Brasil – set/09 a set/10 (ANP, 2010).

Do total importado, 29,8 milhões de m<sup>3</sup>/dia foram provenientes da Bolívia e 18,4 milhões de m<sup>3</sup>/dia de Gás Natural Liquefeito (GNL), principalmente proveniente da Nigéria e Trinidad Tobago, mas que pode ser proveniente de qualquer região do mundo, conforme Figura 3.13.

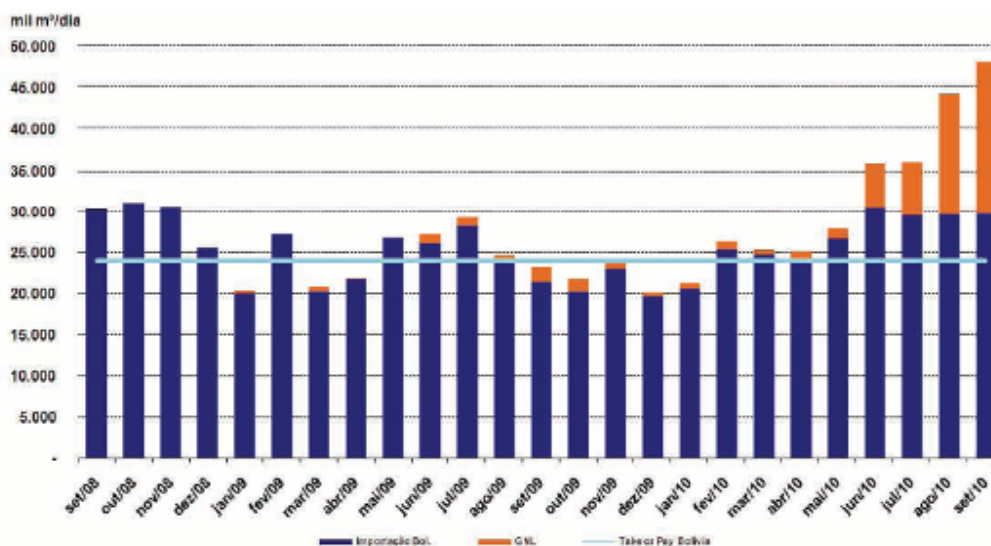


Figura 3.13 - Importação de gás natural pelo Brasil – set/08 a set/10 (ANP, 2010).

O volume comercializado pelas distribuidoras de gás natural no período compreendido entre abril/2000 e fevereiro/2010 apresentou uma média de

crescimento anual de 9,4%, sendo: 18,8% para os segmentos residencial / comercial / outros, 16,4% para o automotivo, 11,6% para o termelétrico e 7,2% para o industrial, conforme Figura 3.14 (ABRACE, 2010).

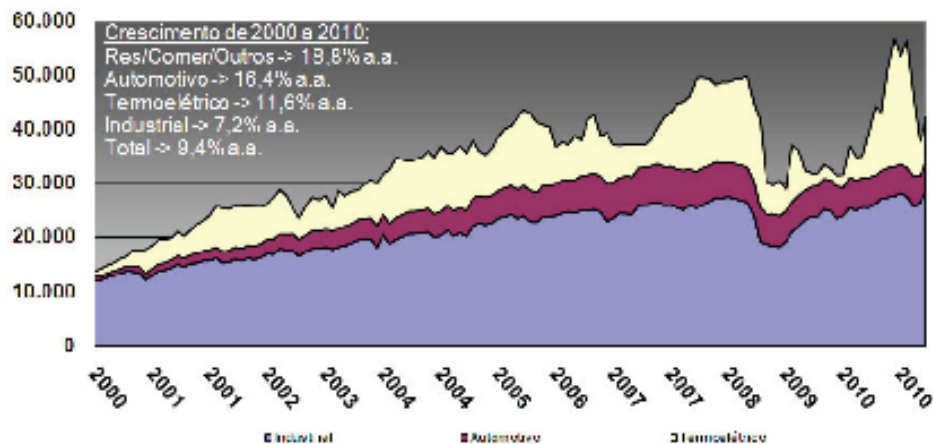


Figura 3.14 - Crescimento do volume de gás natural comercializado no Brasil entre 2000 e 2010 (ABRACE, 2010).

### 3.2.4 Transporte do Gás Natural

A principal forma de transporte do gás natural é através de gasodutos. Segundo LOURENÇO (2003), a Europa Ocidental é a região que mais utiliza o gás natural transportado por gasodutos em todo o mundo, consumindo 63% do total. A Rússia é o maior exportador, fornecendo 44% do gás transportado mundialmente por gasodutos, para os países da Europa Ocidental, e da Europa Oriental. Outros países que também abastecem a Europa Ocidental são a Noruega, os Países Baixos e a Argélia, restando uma pequena quantidade que é proveniente da Alemanha, Afeganistão, Romênia e Dinamarca.

Entre os países da América, os Estados Unidos são os maiores importadores de gás natural por gasoduto, recebendo do Canadá 93% do total transportado na América. Entre os países da América do Sul, somente a Argentina e a Bolívia têm alguma

tradição no transporte internacional por gasodutos. Até 1998, a Bolívia fornecia gás natural para a Argentina. Esta, por sua vez, fornece uma pequena quantidade para a Cidade de Santiago, no Chile, e para a Petroquímica Metanex, na região sul do Chile (ANP, 2004).

Segundo BP (2010), as trocas internacionais de gás natural vêm crescendo nos últimos anos, totalizando em torno de 877 bilhões de m<sup>3</sup> em 2009. As trocas por gasodutos em torno de 634 bilhões de m<sup>3</sup> (72%) são muito mais importantes que aquelas sob a forma de GNL em torno de 243 bilhões de m<sup>3</sup> (28%). Em termos de gasoduto, as exportações da Rússia para a Europa Central e Ocidental alcançaram 176 bilhões de m<sup>3</sup> em 2009 (28%), com destaque para a Alemanha e a Itália. A troca por meio de gasodutos entre Canadá e Estados Unidos também é relevante (em torno de 92 bilhões de m<sup>3</sup> em 2009), assim como as exportações da Holanda (em torno de 50 bilhões de m<sup>3</sup>). O volume total de GNL comercializado mundialmente tem o Japão responsável por 86 bilhões de m<sup>3</sup> em 2009 (35%), seguido da Coreia do Sul, com 14% e Espanha com 10%. A Figura 3.15 ilustra graficamente a intensidade dos fluxos internacionais deste produto.

---

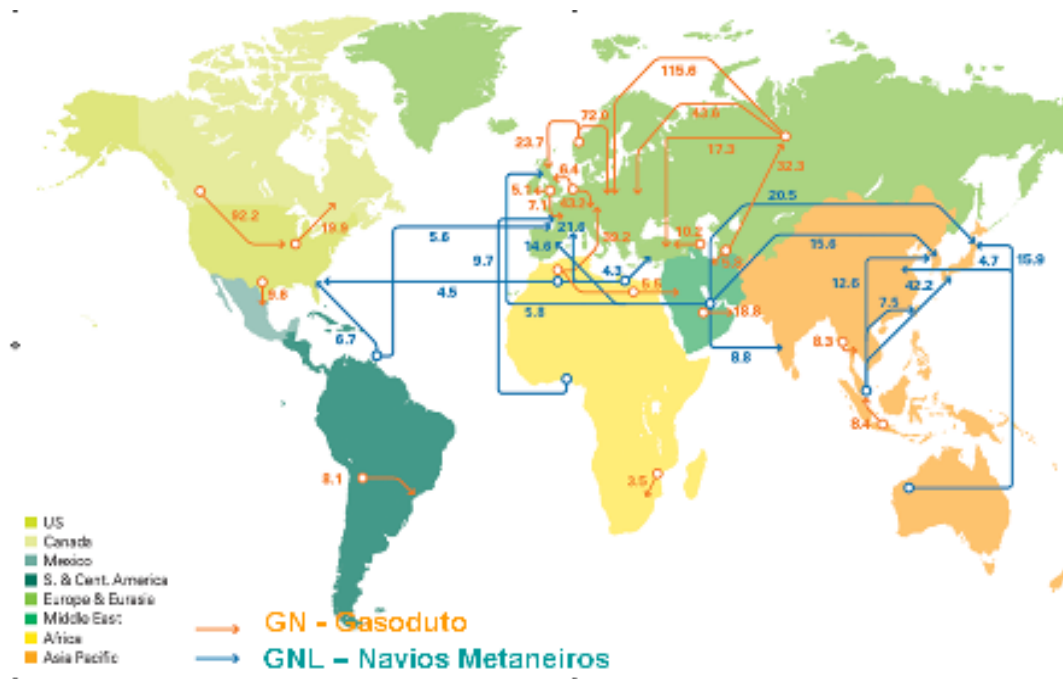


Figura 3.15 - Maiores fluxos comerciais de transporte de gás natural no mundo, em bilhões  $m^3$  (BP, 2010).

Conforme MME/EPE v.1 (2007), em termos de infra-estrutura de transporte de gás natural no país, merece destaque o trecho brasileiro do gasoduto Bolívia-Brasil. Atualmente, este é o maior projeto de importação de gás natural implantado no país, ligando as reservas de Rio Grande (Bolívia) a Porto Alegre (RS), passando em cinco estados brasileiros (Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul), num total de 2.593 km de extensão de tubos de transporte no território brasileiro. Em termos de projetos de importação, também no Sul do país, além do gasoduto de suprimento de gás natural à termelétrica na cidade de Uruguaiana (RS), deve-se destacar o projeto de extensão deste gasoduto até a cidade de Porto Alegre, totalizando 615 km de extensão, visando atender simultaneamente a dois objetivos: (1) fornecimento de insumo para geração de eletricidade no estado do Rio Grande do Sul, que importa quantidade substancial

deste energético; e (2) servir de elemento de interligação entre as bacias gasíferas da Argentina, Brasil e Bolívia.

A construção do Gasoduto Bolívia-Brasil (Gasbol) teve início em 1997 e o duto entrou em operação em 1999 (ANP, 2001). Durante a construção do Gasbol novas reservas foram descobertas na Bolívia por uma série de empresas privadas que haviam se inserido no país (IEA, 2003).

Conforme ANP (2009), nos últimos sete anos, a rede de gasodutos do país foi ampliada e integrada, através do Gasene, gasoduto da integração Sudeste-Nordeste, inaugurado em março/2009. Em dezembro/2002 eram 5.607 km. Em dezembro/2009 a extensão de gasodutos alcançou 9.626 km, conforme Figura 3.16.

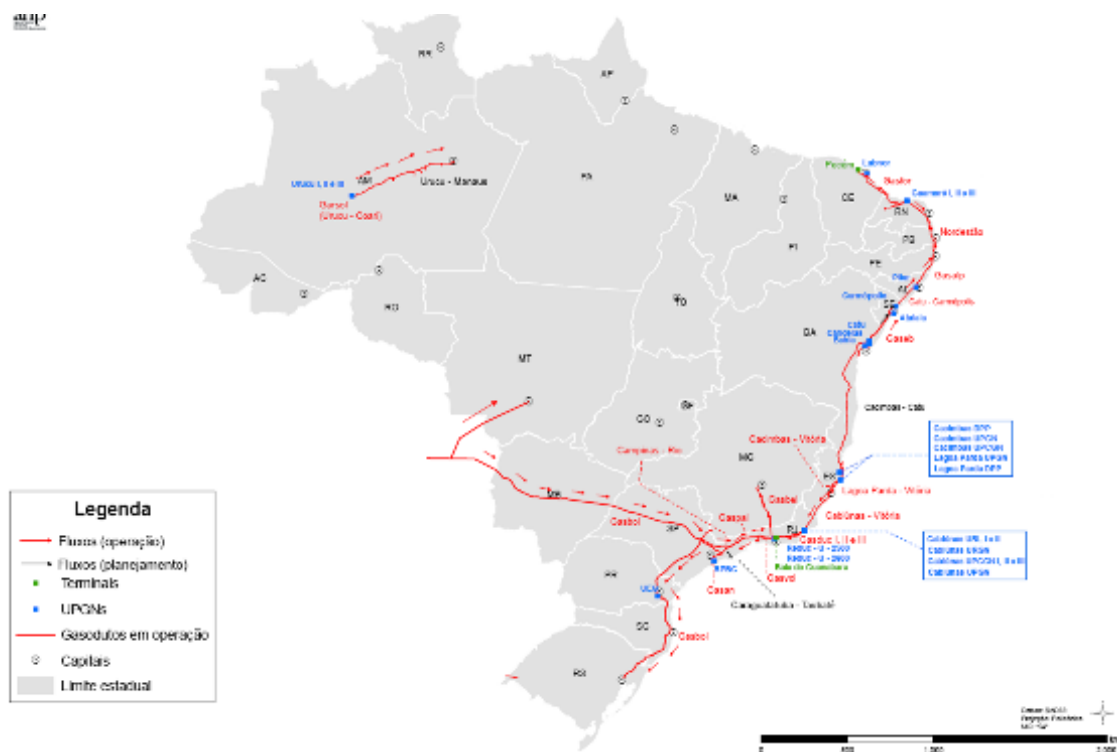


Figura 3.16 - Infra-estrutura de produção e movimentação de gás natural no Brasil em 2009 (ANP, 2010).

Segundo ANP (2010), no dia 20 de agosto de 2008, foi inaugurado o primeiro terminal brasileiro de regaseificação de Gás Natural Liquefeito (GNL). O empreendimento está instalado no Porto Pecém, no município de São Gonçalo do Amarante, no Ceará. O terminal de Pecém tem capacidade para regaseificar 7 milhões de metros cúbicos por dia.

Segundo ANP (2010), o terminal de regaseificação de gás natural liquefeito (GNL) da Baía de Guanabara foi concluído em março/09. O GNL é regaseificado para ser utilizado na geração de energia elétrica nas usinas termelétricas da região Sudeste. Este terminal tem capacidade de regaseificação de 14 milhões de m<sup>3</sup>/dia de gás natural. A inserção de GNL no Brasil permite maior flexibilidade na oferta de gás natural ao país, ao prover novas fontes de suprimento e, conseqüentemente, garante maior segurança energética. O GNL será utilizado para atender, prioritariamente, as usinas termelétricas.

A distribuição é a etapa final do sistema de fornecimento de gás natural ao consumidor para uso industrial, automotivo, comercial ou residencial. Nesta fase, o gás deve atender a padrões rígidos de especificação, sendo, praticamente, isento de contaminantes, para não ocasionar problemas aos equipamentos onde será utilizado como combustível ou matéria-prima. De acordo com o artigo 25 da Constituição Federal, compete aos estados, em regime de exclusividade, diretamente ou através de concessões, a atividade de distribuição de gás canalizado aos usuários finais (MME/EPE v.5, 2007).

---

Até 2008, o estado de Minas Gerais tinha apenas um gasoduto, o Gasbel I, que iniciou operação em 1994, com capacidade para transportar 3,15 milhões de m<sup>3</sup>/dia, com extensão de 357 km de Duque de Caxias (RJ) a Belo Horizonte (MG). Em janeiro/2009, entrou em operação o gasoduto Paulínia (SP) a Jacutinga (MG), com capacidade de transporte de 5 milhões de m<sup>3</sup>/dia e extensão de 93 km. Já no ano de 2010, entrou também em operação o Gasbel II, de Volta Redonda (RJ) a Belo Horizonte (MG), com capacidade de transporte de 5 milhões de m<sup>3</sup>/dia e extensão de 267 km. Com estes dois novos gasodutos a rede que atende o Estado foi duplicada, passando de 357 km para 717 km de extensão (ANP, 2010).

A ampliação na malha da região Sudeste permite que o gás natural a ser transportado pelo Gasbel II tenha várias fontes de suprimento. Da produção nacional, o gás natural para Minas Gerais pode ser advindo das bacias de Campos e do Espírito Santo, bem como da Bacia de Santos, quando da conclusão do gasoduto Caraguatatuba-Taubaté (Gastau). Também poderá abastecer o mercado de Minas Gerais o gás natural importado da Bolívia, transportado pelo GASBOL, ou de outros países, por meio do Terminal de Regaseificação de GNL da Baía de Guanabara (RJ) (ANP, 2010).

A Gasmig está entre as distribuidoras que têm contratos de suprimento de gás em longo prazo com a Petrobras. Esses contratos são capazes de garantir o abastecimento do mercado atual e de toda a expansão planejada para Minas Gerais até o ano de 2026 (GASMIG, 2010).

---

O Gasoduto do Vale do Aço é a principal obra do plano de expansão da Gasmig. A rede parte da derivação do gasoduto de transporte Rio-Belo Horizonte (Gasbel), no município de São Brás do Suaçuí. Na primeira etapa, concluída em 2006, foram construídos 53 km de duto entre São Brás do Suaçuí e Ouro Branco, atendendo também a Conselheiro Lafaiete, Congonhas, Ouro Branco e parte de Ouro Preto. Na segunda etapa, o gasoduto do Vale do Aço seguiu até o município de Belo Oriente, passando por Ouro Preto, Mariana, Alvinópolis, Rio Piracicaba, João Monlevade, Bela Vista de Minas, Nova Era, Antônio Dias, Jaguaraçu, Timóteo, Coronel Fabriciano, Ipatinga, Santana do Paraíso e Belo Oriente (GASMIG, 2010). Com a conclusão do projeto, no segundo semestre de 2010, a rede de distribuição de gás natural do Vale do Aço passa a ter 331 km de extensão e capacidade para transportar 2,4 milhão m<sup>3</sup>/dia de gás natural, conforme Figura 3.17.

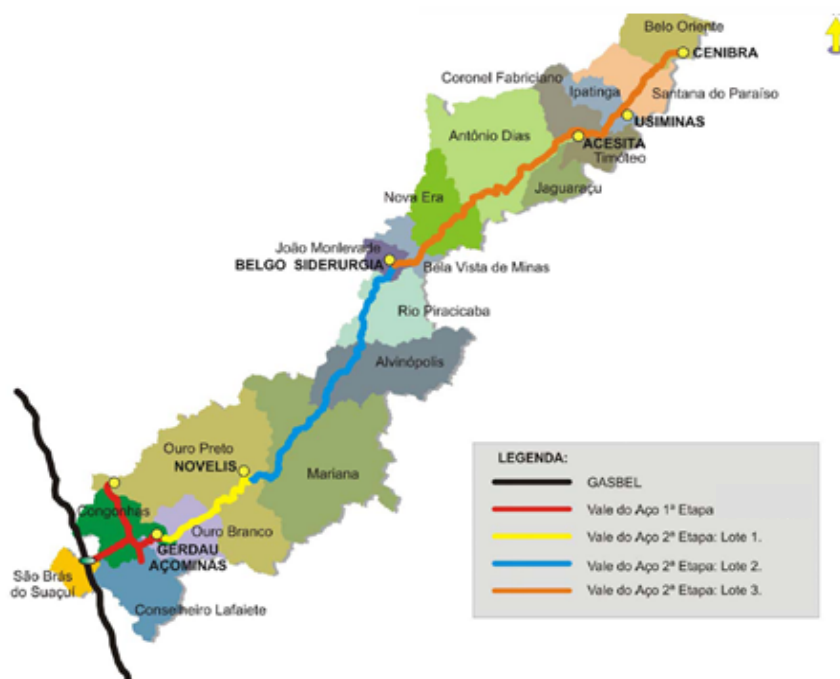


Figura 3.17 - Gasoduto Vale do Aço (GASMIG, 2010).

### 3.3 Carvão Mineral

O carvão mineral é uma mistura de hidrocarbonetos formada pela decomposição de matéria orgânica durante milhões de anos, sob determinadas condições de temperatura e pressão. De acordo com o Atlas da Energia Elétrica do Brasil (ANEEL, 2005), esse combustível fóssil é classificado, conforme sua qualidade, em:

- Turfa, de baixo conteúdo carbonífero, que constitui um dos primeiros estágios do carvão, com teor de carbono na ordem de 45%.
  - Linhito, que apresenta teor de carbono que varia de 60% a 75%. É empregado na siderurgia, como redutor, graças a sua capacidade de ceder oxigênio para a combustão como matéria-prima na carboquímica.
  - Carvão betuminoso (hulha), mais utilizado como combustível. Contém entre 75% e 85% de carbono. São compostos de carbono, restos vegetais parcialmente conservados, elementos voláteis, detritos minerais e água. É empregado tanto como combustível quanto como redutor de óxidos de ferro e, graças a suas impurezas, na síntese de inúmeras substâncias de uso industrial.
  - Antracito, o mais puro dos carvões, que apresenta um conteúdo carbonífero superior a 90%. Última variedade de carvão surgida no processo de carbonização caracteriza-se pelo alto teor de carbono fixo, baixo teor de compostos voláteis, cor negra brilhante, rigidez e dificuldade com que se queima dada sua pobreza de elementos inflamáveis. É usado como redutor em metalurgia, na fabricação de eletrodos e de grafita artificial. Uma de suas principais vantagens consiste em proporcionar chama pura, sem nenhuma fuligem.
-

A Figura 3.18 mostra a composição das reservas mundiais totais (provadas e inferidas) e usos por tipo de carvão.

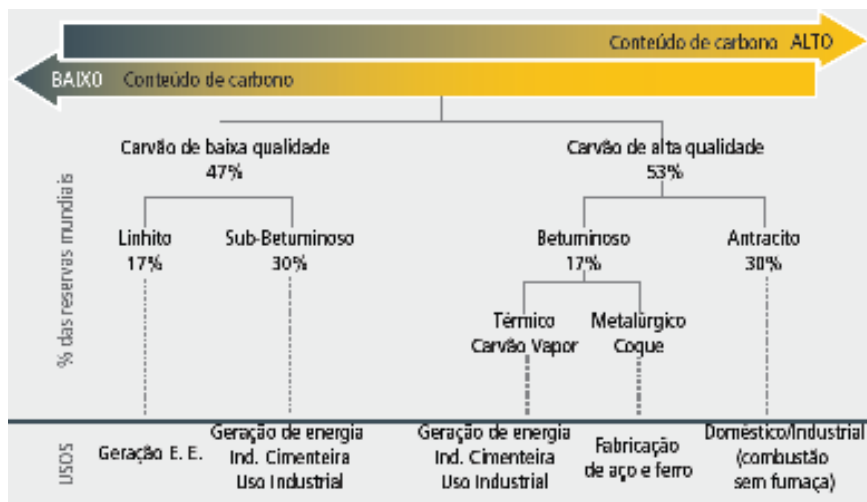


Figura 3.18 - Composição das reservas mundiais totais e usos por tipo de carvão (MME/EPE v.6, 2007).

Apesar de ser um combustível potencialmente poluente, o carvão deve continuar desempenhando um importante papel como fonte de energia no cenário mundial, devido à disponibilidade de enormes reservas que estão geograficamente espalhadas no mundo e ao desenvolvimento de tecnologias limpas de carvão (*clean coal technologies*). Tal característica livra o abastecimento energético das limitações geopolíticas ou de questões de segurança. Além disso, o carvão está disponível em uma grande variedade de formas e pode ser facilmente estocado nas proximidades dos centros consumidores. Mais do que, isso não depende de condições climáticas podendo ser utilizado como backup para geração eólica e hidrelétrica. O investimento para a extração do carvão é cerca de 5 vezes inferior ao investimento necessário à extração do gás natural e cerca de 4 vezes inferior ao investimento para extração do petróleo sendo o transporte de carvão também vantajoso por não necessitar de dutos de alta pressão ou rotas dedicadas (MME/EPE v.6, 2007).

### 3.3.1 Reservas de Carvão Mineral

Segundo o *International Energy Outlook 2005* (EIA/DOE, 2005), o carvão é o combustível fóssil com a maior disponibilidade no mundo. Suas reservas totalizam 1 trilhão de toneladas, quantidade suficiente para suprir o consumo nos níveis atuais por 190 anos. Além disso, ao contrário do que ocorre com o petróleo e com o gás natural, as reservas de carvão apresentam uma distribuição geográfica no mundo muito mais eqüitativa, sendo que 75 países possuem reservas expressivas. Ainda assim, 57% dessas reservas encontram-se em três países: Estados Unidos (27%), Rússia (17%) e China (13%). Outros seis países respondem por 33% das reservas mundiais de carvão mineral: Índia, Austrália, África do Sul, Ucrânia, Cazaquistão e Iugoslávia. Em 2002, esses nove países juntos representavam 90% das reservas recuperáveis mundiais e eram responsáveis por 78% da produção. A Figura 3.19 apresenta as nove maiores reservas de carvão do mundo.

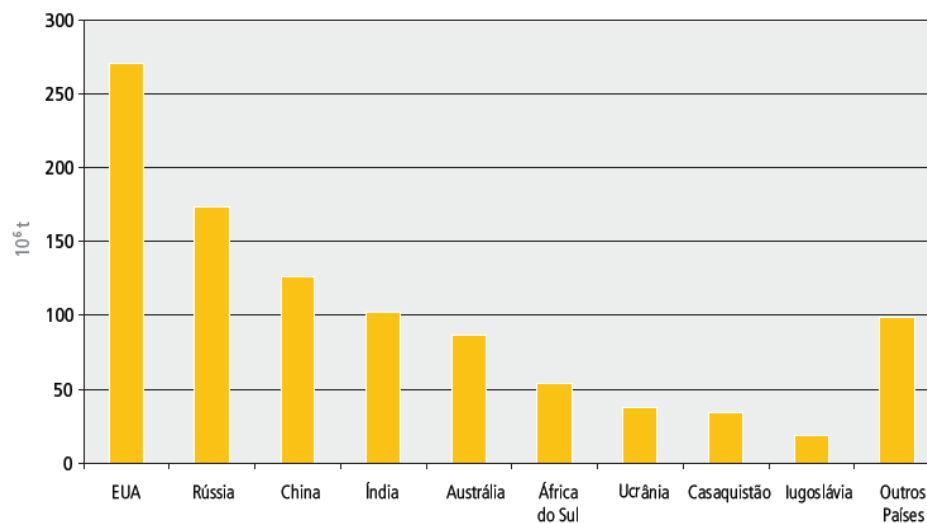


Figura 3.19 – Reservas mundiais de carvão (EIA/DOE, 2005).

No Brasil, os critérios de quantificação das reservas minerais são definidos pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Nos anuários estatísticos da

DNPM, são divulgados dados de reservas medidas, indicadas e inferidas. Esta classificação é feita de acordo com o grau de conhecimento da jazida. O Balanço Mineral Brasileiro (BORBA, 2001) mostra que linhito e carvão sub-betuminoso podem ser encontrados em vários estados brasileiros, tais como Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Pernambuco, Piauí, Maranhão, Pará, Amazonas e Acre. As principais reservas estão localizadas na região Sul, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná.

O Brasil possui importantes reservas de carvão mineral, localizadas em sua maior parte (90%) no Rio Grande do Sul, nas regiões de Candiota, Baixo Jacuí e litoral (MME/EPE v.6, 2007), conforme indicado na Figura 3.20.

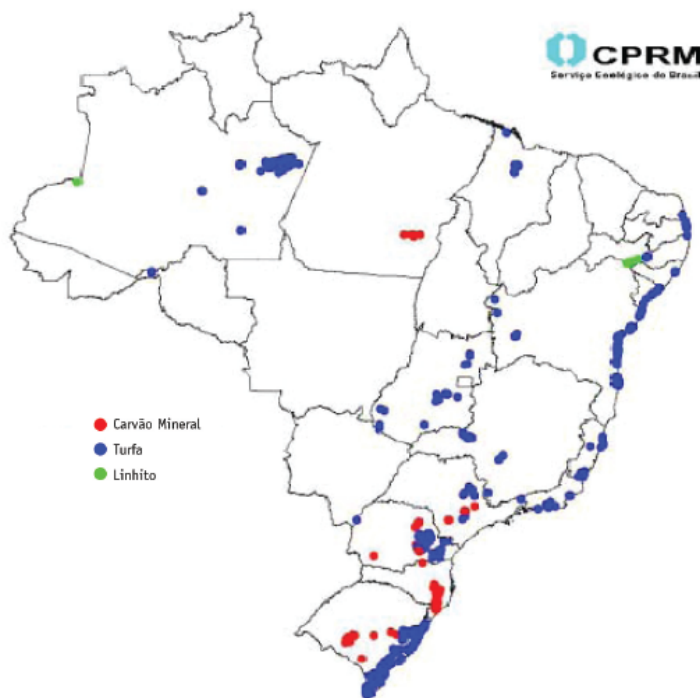


Figura 3.20 – Principais ocorrências de carvão mineral no Brasil (MME/EPE v.6, 2007).

O carvão brasileiro é classificado como um carvão de baixa qualidade por apresentar como características básicas o elevado teor de inertes (cinzas), enxofre e voláteis.

### 3.3.2 Produção e Consumo de Carvão Mineral

Dados da Agência Internacional de Energia (IEA, 2005) mostram que a produção e o consumo mundial de carvão concentram-se em dois tipos do mineral, o betuminoso/sub-betuminoso e o linhito. O primeiro, de maior valor térmico, é o mais comercializado internacionalmente. O valor térmico do linhito é bem menor e, por isso, é mais utilizado para geração termelétrica local.

Conforme pode ser observado na Tabela 1, a produção de carvão betuminoso alcançou a marca de 4.648 milhões de toneladas em 2004, representando um crescimento de 8,7% em relação a 2003, que já tinha sido significativo em relação a 2002, 8,8%. O principal responsável por este crescimento é a China, país que tem apresentado taxas de crescimento econômico surpreendentes nos últimos anos (MME/EPE v.6, 2007).

Tabela 3.1 - Produção mundial de carvão betuminoso em milhões de tonelada (EIA/DOE, 2005).

|               | 2002         | 2003         | 2004         |
|---------------|--------------|--------------|--------------|
| China         | 1.140        | 1.428        | 1.676        |
| EUA           | 1.010        | 984          | 1.026        |
| Índia         | 376          | 398          | 411          |
| Austrália     | 301          | 303          | 314          |
| África do Sul | 244          | 263          | 266          |
| Rússia        | 169          | 183          | 217          |
| Indonésia     | 114          | 127          | 142          |
| Polônia       | 114          | 113          | 110          |
| Cazaquistão   | 86           | 93           | 91           |
| Ucrânia       | 53           | 55           | 54           |
| Outros        | 325          | 330          | 341          |
| <b>Total</b>  | <b>3.932</b> | <b>4.277</b> | <b>4.629</b> |

Em comparação à produção mundial, o comércio internacional de carvão é relativamente pequeno. Cinco países exportadores dominam o mercado: Austrália, China, Indonésia, África do Sul e Colômbia (MME/EPE v.6, 2007).

De acordo com o *World Coal Institute* (WCI, 2005), durante os anos 80, a Austrália tornou-se líder na exportação de carvão, atendendo, principalmente, às necessidades de carvão da Ásia. Atualmente, 50% das exportações de carvão australiano são destinados ao Japão, o maior importador. Outros dois fornecedores de carvão para os mercados asiáticos são a China e a Indonésia. Em 2003, a China exportou 94 milhões de toneladas para outros países do continente, representando 24% do total das importações da Ásia. A Indonésia exportou 78 milhões de toneladas, o que representa 20% das importações totais de carvão no ano. No entanto, o aumento da demanda doméstica nesses países nos próximos anos deverá limitar a sua capacidade de exportação. Os EUA, que já foram um importante fornecedor de carvão para a Ásia, hoje contribuem com uma participação minoritária nesse mercado. As importações de carvão norte-americano na Ásia passaram de 28%, em 1980, para menos de 0,1% em 2003.

No Brasil, a composição de produção de carvão mineral era bem diferente entre os dias atuais e a década de 1970. Na época, ainda vigorava um decreto do presidente Getúlio Vargas, da década de 30, que determinava a compulsoriedade de compra do carvão metalúrgico nacional pela indústria siderúrgica (a recém construída Companhia Siderúrgica Nacional - CSN). A partir da década de 90, com a desregulamentação do setor, o carvão metalúrgico nacional utilizado na siderurgia,

---

que não era economicamente competitivo, foi sendo substituído pelo importado (MME/EPE v.6, 2007). A Figura 3.21 mostra a dependência externa do carvão mineral em termos de quantidade física.

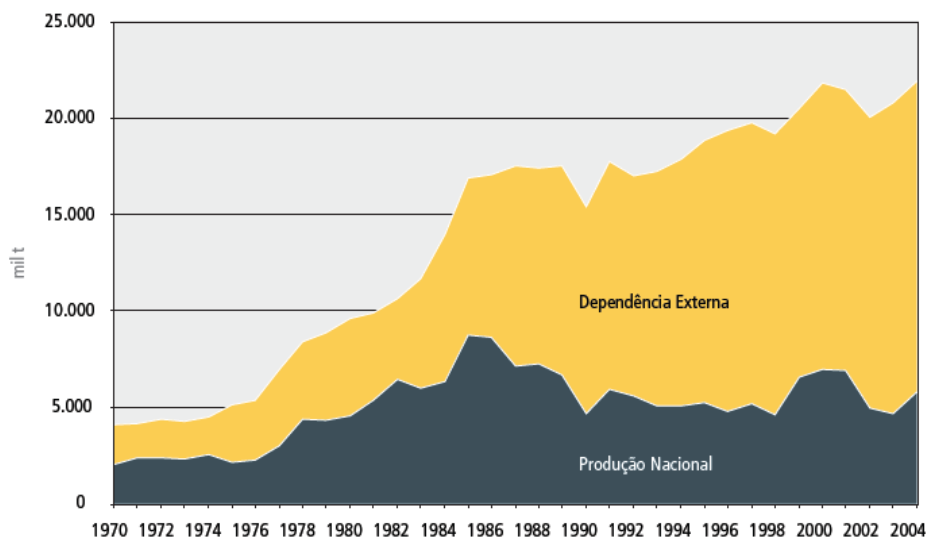


Figura 3.21 – Dependência externa de carvão mineral (MME/EPE v.6, 2007).

### 3.4 Carvão Vegetal

Segundo o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2010) a utilização de carvão vegetal é conhecida pela humanidade desde as mais remotas eras e vem sendo ampliada, no espectro que varia desde a sua propriedade comburentes até medicamentosa, dia a dia. Historicamente, o carvão vegetal foi usado na metalurgia, na fusão do cobre, entre os anos 6000 a 5500 AC, período ao qual se atribui o início do seu emprego como fonte de energia. Na siderurgia, depois da invenção do alto-forno, aproximadamente em 1400 da era atual, o carvão vegetal foi usado intensivamente em todas as regiões da atual União Européia. No século 18, a exaustão das florestas, resultante do seu uso desordenado, impôs a busca por combustível alternativo, o que levou ao desenvolvimento do coque, produzido a

partir de carvões minerais. Observa-se, nesse fato, que existe uma razão inquestionável para se considerar o modelo de produção do carvão vegetal além da utilização dos potenciais madeireiros naturais. Mais do que tudo, serve como um alerta, haja vista que se trata de um potencial renovável e que, por isto, deve ser tratado de forma própria quando submetido ao conceito de utilização.

### **3.4.1 Evolução Histórica do Uso do Carvão Vegetal na Siderurgia**

A siderurgia brasileira, seguindo, à época, uma tendência mundial, começou usando o carvão vegetal como termo-redutor, sendo as usinas implantadas em regiões com grande disponibilidade de florestas e minério de ferro. Esses dois fatores levaram para Minas Gerais, no final do século 19, os primeiros grandes empreendimentos. Embora, também seguindo uma tendência mundial, o modelo siderúrgico brasileiro atual tenha sido desenvolvido para usinas integradas que usam coque como termo-redutor, restaram ainda às usinas não-integradas que produzem somente ferro gusa, usando, para tanto, o carvão vegetal (CGEE, 2010).

A produção de gusa pelo setor independente, a partir de minério de ferro e carvão vegetal, representa, hoje, uma parcela importante da produção siderúrgica nacional, aproximadamente 30% e a sua evolução ocorreu conforme representado na Figura 3.22. A análise da figura mostra que os aumentos de produção, ao longo dos últimos 25 anos, podem ser atribuídos, do ponto de vista prático, ao notável aumento da participação do gusa de aciaria, que atende tanto ao mercado interno quanto ao externo. O gusa de fundição, por seu turno, permanece, em média, nos mesmos valores de 1983 (CGEE, 2010).

---

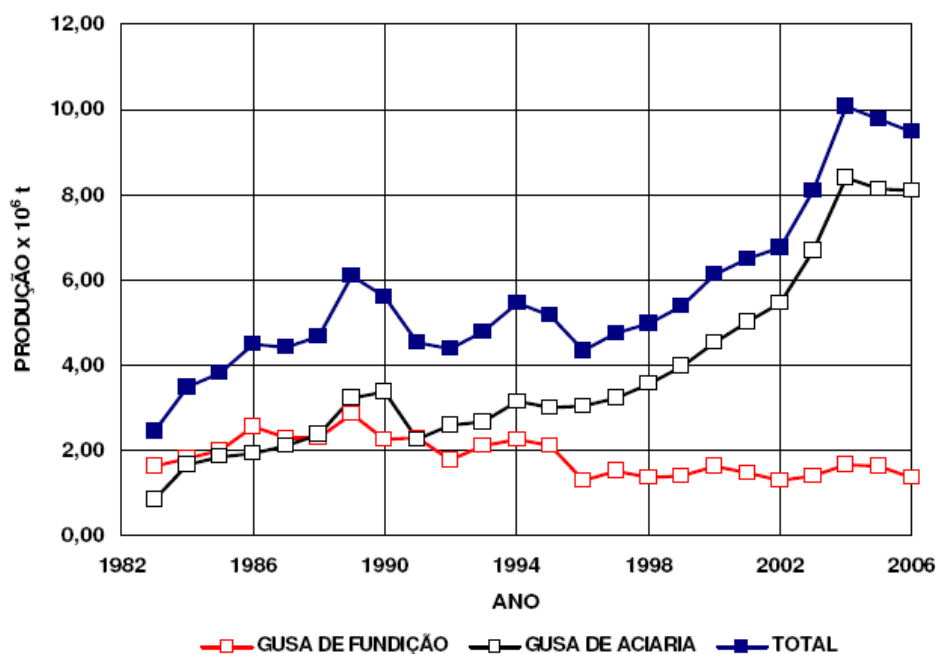


Figura 3.22 – Evolução da produção de ferro-gusa a carvão vegetal no Brasil (CGEE, 2010).

### 3.4.2 Consumo Potencial de Carvão Vegetal na Siderurgia

O histórico florestal das regiões brasileiras com vocação siderúrgica aponta para um esforço crescente, visando ao suprimento da cadeia produtiva do ferro-gusa e do aço com o carvão vegetal. Além do aumento da área ocupada com a silvicultura do eucalipto, constata-se um aumento contínuo da produtividade, em virtude do melhoramento genético combinado com as técnicas de silvicultura (LEITE, 2007).

Segundo BRITO (2008), atualmente, as plantações florestais ocupam cerca de 5,7 milhões de hectares do território nacional, destinando-se aos diversos usos da madeira (lenha, carvão vegetal, celulose, madeira serrada etc.). Nos próximos 10 anos, prevê-se uma expansão desse parque florestal, que deverá atingir 15 milhões de hectares, o equivalente a 1,5% do território do Brasil. Embora, bastante representativa, esta área de cultivo seria ainda consideravelmente inferior àquela de

outros usos atuais da terra, como a cultura de grãos (50 milhões de hectares) e a pecuária (150 milhões de hectares).

O objetivo é garantir 100% de suprimento renovável do carvão vegetal, tomando-se por base, por exemplo, a quantidade que deveria ser consumida para a produção do setor siderúrgico independente (10 Mt), em 2007, seriam necessários 1,5 milhões de hectares plantados de eucalipto. Tendo em vista que, em 2007, aproximadamente 50% do carvão vegetal utilizado na siderurgia já proveio de florestas plantadas, seria demandada uma disponibilidade adicional de 750 mil hectares para cumprimento de 100% de suprimento renovável. Essa meta de sustentabilidade é bastante factível, tendo em vista a capacidade e competência do setor florestal brasileiro (CGEE, 2010).

Dependendo da espécie de eucalipto, características do manejo, localização e condições de logística, pode haver um deslocamento da produção inicialmente destinada ao setor carvoeiro para as indústrias de celulose e papel, principalmente em períodos de crise do setor siderúrgico. O setor de celulose e papel responde por 33% da área total de florestas plantadas no país, representando uma importante parcela do consumo total nacional de madeira de origem renovável (CGEE, 2010). As duas principais espécies utilizadas como matéria-prima pela indústria brasileira de celulose e papel são o eucalipto e o pinus, ocupando, respectivamente, 78% e 22% da área florestada (TAKANO, 2007). Devido a esse fator, o desafio do suprimento de madeira de origem renovável para todo o setor siderúrgico torna-se mais complexo.

---

### 3.4.3 Efeito das Florestas na Emissão de CO<sub>2</sub>

Este texto foi adaptado de CAMPOS (2001). Estudou a conservação das florestas no Brasil, mudança do clima e o mecanismo de desenvolvimento limpo do protocolo de Quioto.

As florestas oferecem grande potencial, em curto prazo, para remoção de CO<sub>2</sub> da atmosfera. Ao contrário de plantas de ciclo de vida curto que morre e se decompõem rapidamente, as árvores são indivíduos de ciclo de vida longo que acumulam carbono em sua biomassa (SEDJO, 2001).

A Figura 3.23 ilustra a fotossíntese numa árvore, onde o carbono é acumulado na biomassa (fluxo 1), desassimilando o O<sub>2</sub> (fluxo B) provenientes do CO<sub>2</sub> (fluxo A). Parte do carbono retido na biomassa é transferida para o solo pela decomposição da matéria orgânica, como a raízes mortas (fluxos 2, 3 e 4). Assim o carbono é armazenado (seqüestrado) em dois reservatórios principais, a biomassa viva (acima e abaixo do solo) e o solo. O processo oposto à absorção é a liberação do carbono dos solos e da biomassa através da mudança no uso da terra, queimadas, respiração e decomposição (CAMPOS, 2001).

---

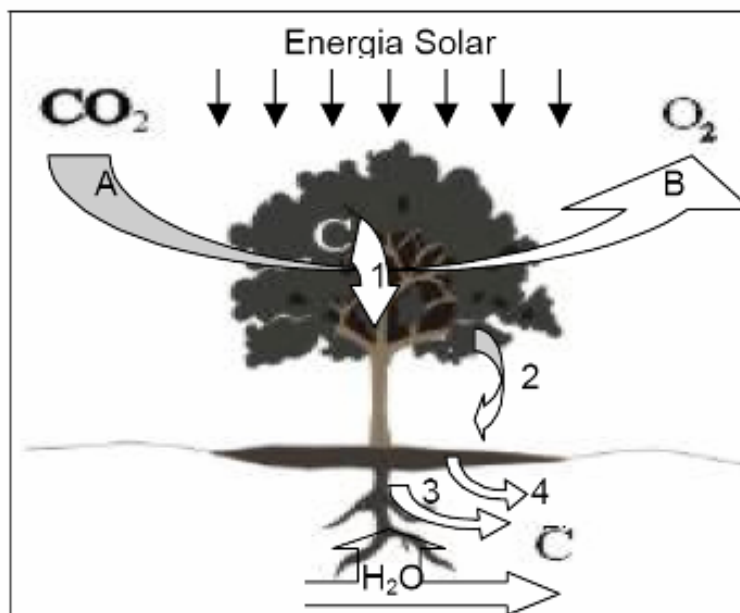


Figura 3.23 – Esquema da fotossíntese, árvore absorve carbono na forma de biomassa (CAMPOS, 2001).

No caso das florestas, as árvores acumulam a energia solar e o carbono da atmosfera, combinando-os com água e outros nutrientes na forma de madeira, folha e raízes. A água e a maioria dos nutrientes são absorvidas pelas raízes e transportadas às folhas. Mas com o carbono é diferente, ele é absorvido diretamente da atmosfera como dióxido de carbono através dos estômatos das folhas e caules. Assim a planta acumula massa de cima para baixo, liberando oxigênio. Durante a ausência da luz solar, as plantas não realizam mais a fotossíntese e passam a realizar a respiração com liberação de  $\text{CO}_2$  (CAMPOS, 2001).

O estoque de carbono da vegetação é afetado pela conversão de florestas para plantações e outros usos do solo, pois contêm muito menos carbono do que florestas maduras, porém o carbono do solo não é muito afetado pela mudança da vegetação (KOSKELA et al., 2000). A reabilitação de florestas secundárias pode ser um dos meios mais efetivos de absorver carbono atmosférico, enquanto preservar

florestas naturais é um dos meios de reduzir emissões de gases de efeito estufa (CAMPOS, 2001).

Os ecossistemas terrestres que compreendem a floresta e o solo são considerados atualmente como um grande sumidouro de carbono, especialmente os solos. Há evidências de que o solo possa resultar em significativa redução no aumento dos gases do efeito estufa (MACHADO, 2005). O solo possui o maior estoque de carbono do ecossistema terrestre; ele estoca duas vezes mais carbono que a vegetação e cerca de três vezes o valor da atmosfera BATJES & SOMBROEK (1997). Abaixo do solo, o armazenamento orgânico é duas vezes maior que acima do solo (CAMPOS, 2001).

No solo, o acúmulo gradual e lento da deterioração do material orgânico continuará a acumular o carbono, agindo desse modo como sequestrador. Os resíduos de plantas (ex. folhas, galhos, frutos) que caem sobre o solo são gradualmente alterados por interações entre a fauna do solo e microorganismos formando húmus (MACHADO, 2005).

Segundo o *AMERICAN LANDS ALLIANCE* (1999), o seqüestro de carbono não é substitutivo para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mas as florestas são meios eficientes de reduzir as concentrações atmosféricas dos níveis de CO<sub>2</sub>.

A floresta madura atua como um reservatório, estocando carbono, mesmo que não esteja passando por um crescimento líquido. Uma floresta jovem estoca menos carbono quando comparada a uma floresta madura, mas seqüestra mais carbono da

---

atmosfera ao longo do tempo. Já uma floresta madura, apesar de não capturar “novo carbono”, continua a estocar grandes volumes de carbono em sua biomassa ao longo do tempo, apesar de, em alguns casos, poder vir a se tornar uma fonte de emissão de carbono, como quando ocorrem mortes ou outros eventos naturais (SEDJO, 2001).

### **3.5 Emissões de CO<sub>2</sub> pelo Carvão Mineral e Vegetal**

Segundo PAIXÃO et al. (2006), em um mercado globalizado e cada vez mais competitivo, a possibilidade de agregar valores às florestas plantadas, com o emergente “mercado de créditos de carbono”, e de contribuir para redução nas emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera cria perspectivas otimistas de expansão para o setor florestal brasileiro. Embora o setor florestal possa se beneficiar, existem poucos trabalhos evidenciando o potencial real das florestas nesse mercado. Inúmeras estimativas têm sido feitas baseando-se em estimativas volumétricas dos fustes das árvores, as quais são convertidas em biomassa e em carbono. Trabalhos incluindo estimativas precisas dos diversos compartimentos da floresta (solo, raízes, copa das árvores, manta orgânica etc.) ainda são escassos, porém começam a ser executados (SCHUMACHER, 2002; WALTZLAWICK. 2002; REZENDE, 2002; CALDEIRA, 2002), conclui PAIXÃO et al. (2006).

Quando se fala em produção auto-sustentada, deve-se lembrar do impacto do uso de carvão mineral no balanço de CO<sub>2</sub> e o correspondente efeito estufa, além de outro fator que é a geração de SO<sub>3</sub> que, no caso do carvão vegetal, é praticamente inexistente (CGEE, 2010). Na Figura 3.24, observa-se que enquanto na siderurgia a coque existe uma emissão total de 1,.900 kg por tonelada de gusa produzida, na

---

unidade correspondente a carvão vegetal, partindo-se de um reflorestamento planejado, remove-se cerca de 1.100 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de gusa. Ou seja, existe um ganho líquido de emissão de CO<sub>2</sub> de 3.000 kg por tonelada de gusa quando se muda a produção de metal primário (ferro gusa) do carvão mineral para o carvão vegetal de origem em reflorestamentos.

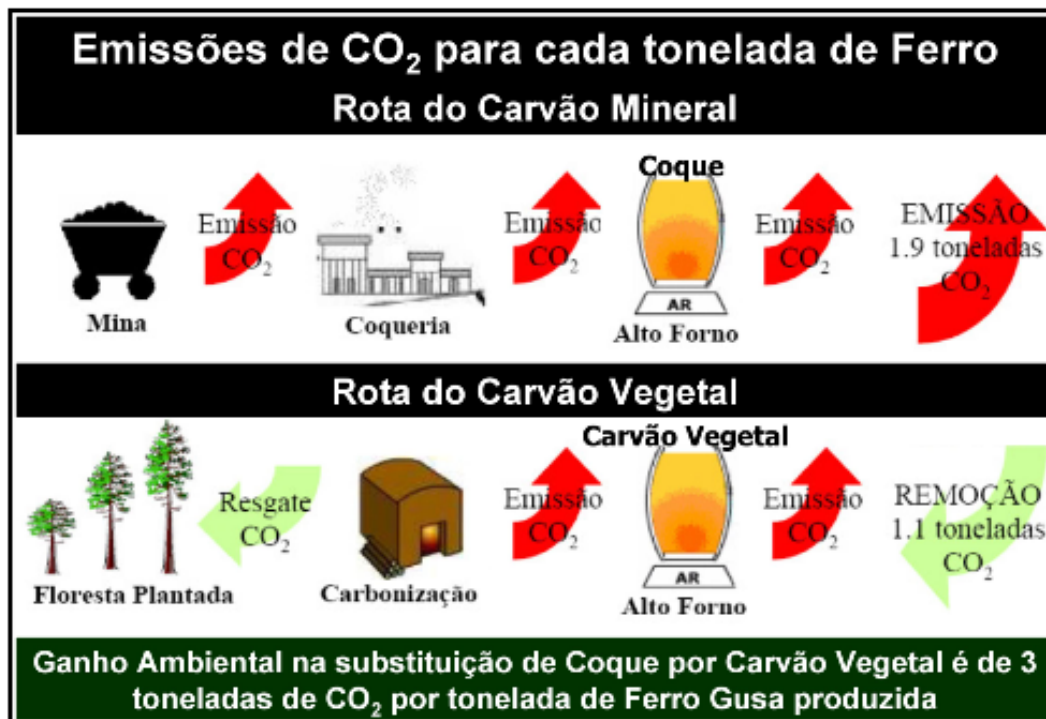


Figura 3.24 – Efeito da fonte de redução sobre emissões atmosféricas (CGEE, 2010).

### 3.5.1 Redução de Emissões na Siderurgia Brasileira

Para que se entenda a dimensão do potencial de redução de emissões na siderurgia brasileira é preciso discutir as diferenças entre a siderurgia a coque e a carvão vegetal. Coque e carvão vegetal são definidos na siderurgia como termoredutores, ou seja, desempenham, quando é usada a tecnologia do alto-forno, o papel químico, que permite transformar o minério de ferro em ferro gusa, e, ao mesmo tempo, geram a energia necessária para sustentar parte da demanda térmica do processo.

Nos dois casos, redução e geração de energia, o produto gasoso dos processos é uma mistura que contém, predominantemente, CO, CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>. Como essa mistura, devido à presença de CO, é comburente, ela é usada na co-geração de energia, o que traz benefícios ambientais e econômicos para a empresa. Aqui, o produto final é o CO<sub>2</sub>, finalmente descartado. Embora o produto final seja o CO<sub>2</sub>, um crédito é dado à cogeração, uma vez que ela evita a queima de combustível fóssil na geração de energia (CGEE, 2010).

O coque e carvão vegetal são provenientes do carvão mineral e da madeira respectivamente. Sendo resultantes de tratamento térmico, com características, propriedades e estruturas específicas. A produção de coque exige temperaturas elevadas, da ordem de 1.300°C, para que se obtenha o produto, enquanto que na carbonização da madeira para produção de carvão vegetal a temperatura situa-se na faixa de 250 a 300°C. Essa grande diferença de temperatura para produção de um e outro já é um ponto a ser considerado no contexto das vantagens apresentadas pelo carvão vegetal. Em contra partida, a resistência mecânica do carvão vegetal é menor do que aquela do coque e, isso, limita a sua utilização nos dias de hoje nos altos-fornos de volumes internos menores do que 700 metros cúbicos (CGEE, 2010).

Para os casos da utilização do coque ou carvão vegetal na siderurgia, o entendimento do potencial de redução do impacto ambiental pode ser melhor entendido por meio da análise da Figura 3.25 que mostra, de forma esquemática, o ciclo do carbono nos casos dos usos de carvão vegetal e coque (MIRANDA, 2010). A diferença fundamental é que quando se usa o carvão vegetal, o CO<sub>2</sub> produzido

---

pela indústria siderúrgica é absorvido pela floresta plantada, fixando o carbono e gerando, por meio da fotossíntese, oxigênio. Nas siderúrgicas operando com coque, o  $\text{CO}_2$  final é lançado na atmosfera, contribuindo, desse modo, para o aumento do efeito estufa.

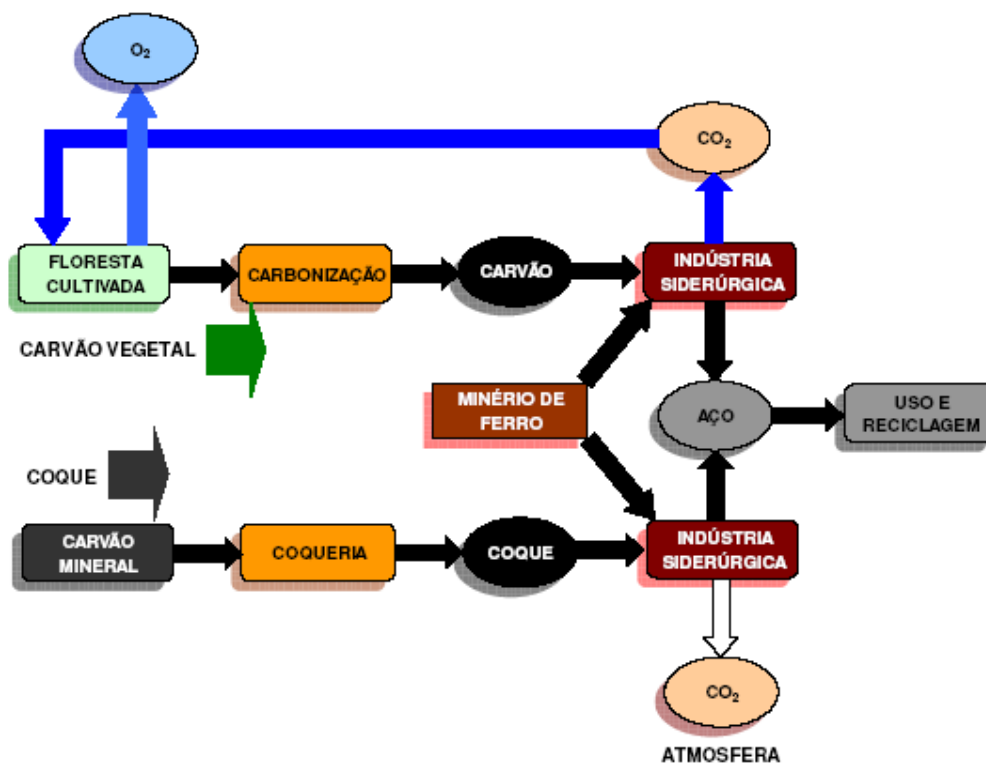


Figura 3.25 - Ciclo do carbono nas rotas de produção do aço com coque e carvão vegetal (MIRANDA, 2010).

Na Figura 3.26, são apresentadas as quantidades de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ , emitidas e consumidas, quando são usadas as diferentes rotas para produção de ferro gusa em alto-forno (MIRANDA, 2010). O que se observa é que enquanto na rota que usa carvão vegetal há um balanço positivo com absorção de 1.111 kg de  $\text{CO}_2$ / t de ferro gusa e emissão de 164 kg de  $\text{O}_2$ , situação inversa ocorre quando se usa o coque. Neste caso, são emitidos 1.883 kg de  $\text{CO}_2$ /t de ferro gusa e consumidos 1.274 kg de  $\text{O}_2$  da atmosfera. Como resultado global, o uso do carvão vegetal representa, em

relação ao cenário que considera a produção de gusa com coque, uma redução de aproximadamente 3.000 kg de CO<sub>2</sub>/ tonelada de gusa produzida.

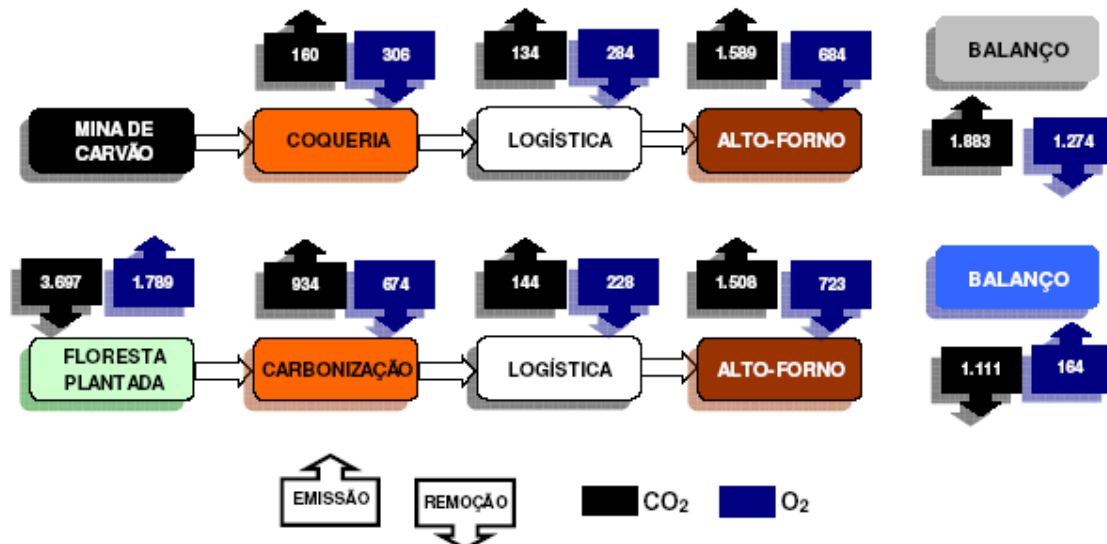


Figura 3.26 - Balanço das emissões e remoções de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> nas rotas coque e carvão vegetal para produção de ferro gusa em alto-forno, em kg/tonelada de ferro gusa (MIRANDA, 2010).

Um tratamento mais técnico do balanço de emissões e consumos de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> nas diferentes rotas para produção de ferro gusa em alto-forno, usando-se ferramentas mais sofisticadas é apresentado por NOGAMI et al. (2004).

Segundo FERREIRA (2001), o potencial de remoção de CO<sub>2</sub> da atmosfera por florestas plantadas pode ser medido. Uma das fontes usadas nessa determinação considera a capacidade de acumulação de uma árvore (eucalipto) depois de seis anos, tempo em que geralmente ocorre o seu primeiro corte para produção de carvão vegetal. Os valores medidos são aqueles constantes da Tabela 3.2. Os resultados mostram que, para cada período de 6 anos, a plantação armazena 6,8 t de carbono nos troncos desenvolvidos e nas partes não processadas. Para diferentes espécies, sem, contudo, apresentar a idade das árvores, tem sido

observado os valores mostrados na Tabela 3.3. Apesar dessas informações que não possuem uma base padronizada para comparação, fica evidente quando se analisam as informações da Tabela 3.3 que há uma grande diferença de absorção quando se considera as espécies nativas e as comerciais.

Tabela 3.2 – Inventário do carbono em tonelada / tonelada de tronco abatido em base seca (FERREIRA, 2001).

| DISCRIMINAÇÃO    | BIOMASSA | CARBONO | CO2   | O2   |
|------------------|----------|---------|-------|------|
| Tronco abatido   | 1,00     | 0,47    | 1,73  | 1,26 |
| Troncos - 6 anos | 3,00     | 1,41    | 5,19  | 3,77 |
| Raízes - 7º ano  | 2,99     | 1,40    | 5,13  | 3,73 |
| Galhos - 6 anos  | 0,48     | 0,23    | 0,83  | 0,60 |
| Folhas - 6 anos  | 0,33     | 0,17    | 0,62  | 0,45 |
| Estoque Total    | 6,80     | 3,21    | 11,76 | 8,56 |

Tabela 3.3 – Seqüestro de carbono (t C/ha.ano) das espécies de madeiras (FERREIRA, 2001).

| ESPÉCIE        | SEQUESTRO |
|----------------|-----------|
| Nativa (média) | 2,59      |
| Eucalipto      | 10,00     |
| Pinus          | 7,00      |
| Pinus Taeda    | 24,60     |
| Araucária      | 18,59     |
| Seringueira    | 9,15      |

PAIXÃO (2004) quantificou o estoque de carbono nos diferentes compartimentos da floresta. Para isso, realizou um inventário florestal em uma plantação de *Eucalyptus grandis*, com 6 anos de idade, no Município de Viçosa, Minas Gerais. Verificaram-se as seguintes estimativas médias de carbono estocado de 71,1 toneladas por hectare, dos quais 47,7 toneladas de carbono por hectare estocado na parte aérea das árvores, representando em média 67%, 14,7 toneladas (21%) estão estocadas

nas raízes e 8,7 toneladas (12%), de matéria orgânica no solo. Considerando que a floresta de eucalipto possui seis anos de idade, representa um incremento médio anual de 11,85 toneladas de carbono por hectare, por ano até essa idade (PAIXÃO, 2004). Pelo estudo, pode-se concluir que a produção do carvão vegetal de floresta plantada estoca 33% de todo o CO<sub>2</sub> que é seqüestrado da atmosfera.

### **3.6 Alto-Forno**

O Brasil e o Paraguai são os únicos países no mundo a possuir alto-forno a carvão vegetal, sendo que a tecnologia para alto-forno a coque não é aplicada a carvão vegetal. Portanto, o Brasil é referência mundial em tecnologia de alto-forno a carvão vegetal. A Empresa Siderúrgica objeto deste trabalho é a única empresa integrada no mundo, com um alto-forno a carvão vegetal e outro a coque de carvão mineral. Em 1949, foi instalado o primeiro alto-forno a carvão vegetal na Empresa Siderúrgica, com capacidade inicial de produção de 200 t/dia, e, em 1979, foi instalado o segundo alto-forno a carvão vegetal, com capacidade instalada de 900 t/dia. Em março de 1996, o segundo alto-forno foi convertido para coque. Os altos-fornos 1 e 2 da Empresa Siderúrgica possuem uma capacidade instalada de ferro-gusa de 700 t/dia e 1.400 t/dia, respectivamente.

O alto-forno é uma estrutura alta feita com tijolos refratários. Coque ou carvão vegetal, fundentes e minério de ferro (óxido de ferro) são inseridos no topo. O ar é alimentado pela base. Este fornecimento de ar permite a queima do combustível no seu interior. O óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) é reduzido a metal (Fe) que, sendo mais denso, se concentra na parte inferior do forno. A Figura 3.27 apresenta uma

---

representação esquemática do alto-forno 2 da Empresa Siderúrgica, com a redução do minério de ferro em ferro-gusa.

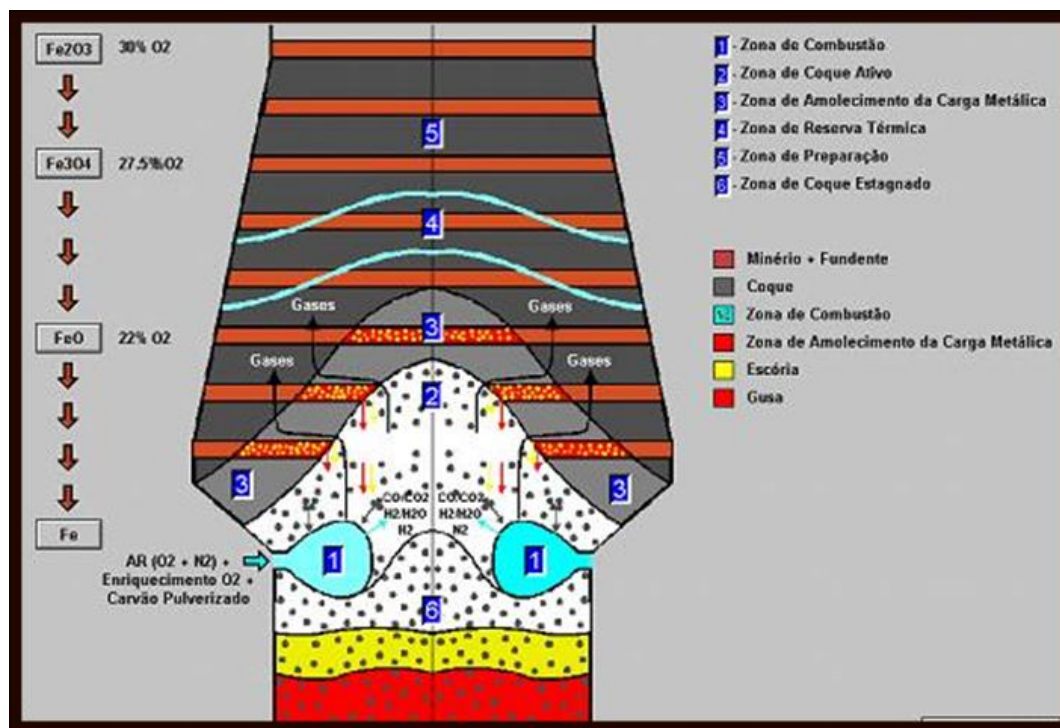


Figura 3.27 – Representação esquemática da vista em corte do alto-forno da Empresa Siderúrgica.

A estrutura interna da carga dos altos-fornos só ficou bem conhecida com as experiências de dissecação, conduzidas inicialmente pelos russos e depois pelos japoneses na década de 70. Estas experiências constaram do resfriamento de altos-fornos comerciais em condições normais de operação. Os fornos foram resfriados e dissecados. A partir desta experiência dividiu-se o alto-forno em três zonas distintas (JACOMINO et al., 2002):

#### a) Zona granular:

Zona onde a carga metálica (sinter e/ou pelota e/ou minério) e o termoreductor (carvão vegetal e/ou coque) e mais os fundentes descem sólidos em contra corrente com os gases;

**b) Zona de amolecimento e fusão:**

Zona onde a carga metálica fica no estado de amolecimento, até a fusão completa;

**c) Zona de gotejamento:**

Zona onde o metal e a escória, já líquidos, escoam.

O regime de trocas térmicas no alto-forno, aliado às condições físico-químicas imposta pela reação de *solution loss* (reação de gaseificação do carbono), permite a divisão do alto-forno em duas zonas. Essas zonas possuem características tão distintas que é possível tratá-las praticamente como reatores diferentes, a saber, (JACOMINO et al., 2002):

**d) Zona de preparação:**

Onde o carbono não reage, constituindo-se um material inerte. Se localiza em temperaturas inferiores àquela mínima para que a reação de gaseificação do carbono (*solution loss*) ocorra. Dessa maneira, na zona de preparação não existe reação dos gases com o carbono da carga. Se o carbono da carga não reage nesta zona, ela pode ser tratada como um reator na qual a carga é secada, pré-aquecida e pré-reduzida pelos gases ascendentes;

**e) Zona de elaboração:**

Onde o carbono reage com o CO<sub>2</sub>, restituindo o poder redutor do gás, incorpora no gusa e reage com o oxigênio do ar na saída das ventaneiras. Está situada abaixo da zona de preparação, englobando a parte granular, a de amolecimento e fusão e a

---

de gotejamento. A principal característica da zona de elaboração é que o carbono da carga reage nesta zona, e, portanto, todo o encargo técnico para aí transferido é traduzido num aumento de consumo de carbono.

A Figura 3.28 mostra um esquema de divisão do alto-forno nas duas zonas. O volume e a forma das duas zonas podem mudar substancialmente em poucas horas, em função do posicionamento dos níveis térmicos do forno. Pela figura, observa-se que a zona de preparação está toda contida na granular e que a de elaboração é composta por uma parte da granular, toda a zona de amolecimento e fusão e toda a zona de gotejamento.



Figura 3.28 – Esquema das zonas de preparação e elaboração de um alto-forno, (JACOMINO et al., 2002).

Na zona de elaboração os gases entram na temperatura de chama, através da zona de combustão, e saem na temperatura em que a reação de gaseificação do carbono

cessa (950°C para alto-forno a coque, e 800°C para alto-forno a carvão vegetal), afirma JACOMINO et al. (2002).

As principais reações e temperaturas que ocorrem nas diversas zonas de um alto-forno, que utiliza como combustível e agente redutor o coque, são encontradas na Figura 3.29.

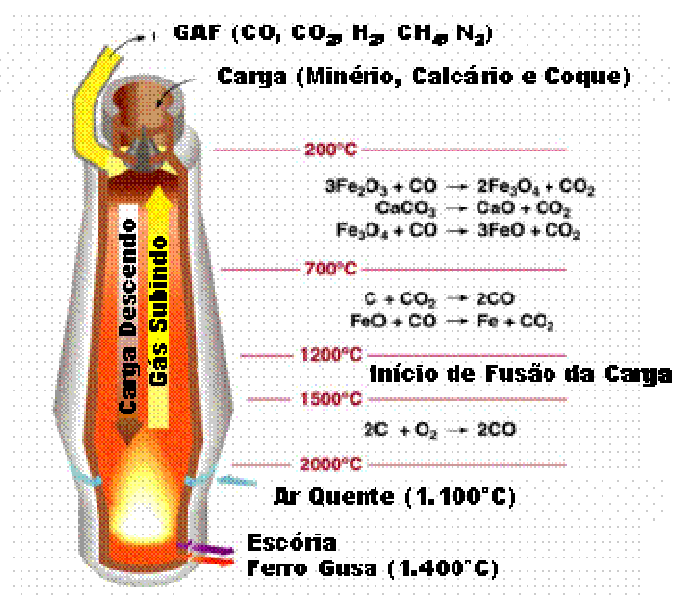


Figura 3.29 – Reações e temperaturas que ocorrem em um processo de produção de ferro-gusa em um alto-forno, cujo combustível e agente redutor é o coque (ERTEM e GURGEN, 2005).

Um fator que influencia nas reações e temperaturas que ocorrem nas diversas zonas de um alto-forno é a permeabilidade do mesmo. Este parâmetro representa a facilidade com que o ar, que é injetado na ventaneira do alto-forno, passa pela carga de minério, fundentes, carvão ou coque, que são injetados pelo topo.

Segundo JACOMINO et al. (2002) são vários os fatores que afetam a permeabilidade, sendo que os principais são:

- a distribuição da carga;
- a granulometria da carga;
- a qualidade da carga;
- a drenagem da escória.

O cuidado com a permeabilidade em altos-fornos, além de proporcionar uma maior produção no processo, evita irregularidades operacionais. Problemas como má distribuição de carga, entrada de materiais finos, geração de finos dentro do forno e acúmulo de líquidos no cadinho, podem levar a uma retenção de toda a carga, ou mesmo parte dela, o que se chama de “gaiola”. A “gaiola” pode ceder sozinha ou é forçada pelo operador com o abaixamento da pressão do ar soprado. Nesse momento ocorre o “arriamento” da carga (JACOMINO et al. 2002).

Conforme JACOMINO et al. (2002), as diferenças entre as propriedades do carvão vegetal e do coque fazem com que o próprio projeto do alto-forno tenha diferenças: o alto-forno a coque, quando comparado ao alto-forno a carvão vegetal, consegue maior produção, possui maiores dimensões, gera maior volume de escória, maior teor de enxofre e cinza: A carga deve ter presença de sinter e/ou pelota e possuir baixo teor de silício. A Tabela 3.4 resume as comparações entre os altos-fornos a carvão vegetal e a coque.

---

Tabela 3.4 - Comparação entre alto-forno a carvão vegetal e alto-forno a coque, adaptado de JACOMINO et al. (2002).

|                                 | <b>Coque</b>                      | <b>Carvão Vegetal</b>                 |
|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Produção                        | 2.000 a 12.000 t/d                | 40 a 1.200 t/d                        |
| Diâmetro do cadinho             | 8 a 14 m                          | 1,5 a 6 m                             |
| Altura do alto-forno            | ~32m                              | ~16 m (Guseiro)                       |
| Regeneradores                   | Cowpers                           | Cowpers ou Glendons                   |
| Produtividade                   | 2 t/dm <sup>3</sup>               | 1,6 a 2 t/dm <sup>3</sup>             |
| Gusa                            | %Si<1<br>Enxofre alto             | %Si variável<br>Fósforo alto          |
| (CaO/SiO <sub>2</sub> ) Escória | >1                                | <1                                    |
| Carga metálica                  | Presença de Sínter e/ou<br>pelota | Pode ser 100% de<br>minério granulado |

Em média, a carga do alto-forno para a produção de 1 tonelada de ferro-gusa, segundo EDGAR e HIMMELBLAU (2001), corresponde a:

- 1,7 toneladas de minério (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)
- 0,25 toneladas de calcário (CaCO<sub>3</sub>)
- 0,5 toneladas de carvão (carvão vegetal ou coque)
- 2 toneladas de ar (H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, etc.)

Para uma geração de:

- 0,2 a 0,4 toneladas de escória
- 2,5 a 3,5 toneladas de Gás de Alto-Forno (GAF).

### **3.6.1 Evolução da Tecnologia de Alto-forno**

Considera-se que os altos-fornos surgiram na fase mais tardia da Idade Média, na Alemanha, embora esses operassem em bateladas. Eram fornos de cuba, carregados pelo topo, com ventaneiras laterais próximas do fundo. Foram eles os primeiros a produzir industrialmente ferro no estado líquido, ou ferro-gusa, diferente do produto anteriormente obtido nas forjas de redução - as “forjas catalãs” – em que era pastoso e mais puro. Como resultado do aumento do tamanho desses fornos e do uso de foles movidos a água, o processo passou a ser contínuo. A necessidade de se purificar o ferro e ajustar o seu teor de carbono resultou no aparecimento dos processos de refino, estabelecendo o padrão de processo em duas etapas, redução e refino, adotado até hoje na siderurgia (BOUMAN, 1978).

Durante o século XVII, um alto-forno produzia menos de duas toneladas de ferro-gusa por dia, a partir de minério bitolado e carvão vegetal. A preocupação com as florestas resultou na conversão dos fornos para carvão mineral e depois para coque. O primeiro alto-forno no mundo utilizando 100% de coque surgiu em 1735. No Brasil, o primeiro alto-forno a carvão vegetal surgiu no ano de 1813 e, a coque, em 1941, na Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), afirma MEDEIROS et al. (1987).

Durante a Revolução Industrial, ocorreu significativa evolução dos componentes mecânicos do sistema, mas os princípios do processo não mudaram. No começo do século XIX, a escala de produção dos maiores altos-fornos era da ordem de 30 toneladas ao dia. No ano de 1920, os Estados Unidos deixaram de operar com alto-forno a carvão vegetal, e a Inglaterra em 1945. A idéia de pré-aquecer o ar soprado foi outro passo significativo no desenvolvimento do processo, permitindo cerca de

---

30% a mais de produção nos mesmos equipamentos. Ao mesmo tempo, a campanha do revestimento refratário sofria considerável prolongamento, através do uso de novos materiais que, até 1890, não ultrapassavam dois anos (HOLLOWATY, 1969).

Só no século XX é que os materiais, minério e coque passaram a ser classificados antes do carregamento, marcando as primeiras práticas de preparação e controle da qualidade da carga (BELL, 1984).

Nas décadas de 50 e 60, experimentos e o tratamento de dados de operação dos altos-fornos se tornaram freqüentes e sistemáticos. Foram desenvolvidos sistemas mecânicos para minimizar a heterogeneidade na permeabilidade da carga, em decorrência da segregação dos materiais durante a operação de carga no topo dos fornos.

A década de 70 marcou o início da injeção de finos de carvão nos altos-fornos. Taxas de injeção de 200 kg por tonelada de gusa passaram a ser praticadas nas décadas de 80 e 90, mudando significativamente o desempenho e as características do processo. O método de injeção de finos foi aplicado na Europa por Gudenau (1986) e Giuli et al. (1986), no Japão por Matsumoto et al. (1986), e Shuhan e Qinghua (1991), e nos Estados Unidos por Campbell et al. (1991); porém, a taxa de carvão injetada ainda é assunto de estudo em todo mundo.

No mesmo período, os fornos passaram a trabalhar com pressão cada vez mais alta no topo. Na União Soviética, altas taxas de injeção de gás natural também foram

---

praticadas. Esta prática chegou ao Brasil por volta de 1985, através da Companhia Siderúrgica Nacional (Medeiros et al., 1987).

O desenvolvimento de sistemas de distribuição de carga nos altos-fornos foi decorrência dos estudos de dissecação. Os estudos levaram a uma melhor definição da estrutura interna do reator, caracterizando as interações-chave em cada uma das zonas, sob os aspectos térmicos e químicos, lançando as bases para técnicas de ajuste da distribuição do fluxo gasoso através do leito. Este tema deu margem a uma série de modelos matemáticos que visavam prever a geometria das camadas de materiais no interior do forno (Heynert et al., 1978).

Os fatos descritos nesta seção caracterizam a evolução de uma arte, que avançou por muito tempo, através de uma sucessão de tentativas com erros e acertos. Nos últimos 50 anos é que a engenharia tomou o controle do desenvolvimento do processo, transformando arte em tecnologia. Os operadores sabiam razoavelmente o que entrava e o que saía dos fornos, porém muito pouco do que acontecia dentro deles. Até hoje, muitos fenômenos que ocorrem nos altos-fornos, ainda esperam ser explorados, embora existam altos-fornos capazes de produzir quase 13 mil toneladas de gusa por dia.

O Brasil, em 2006 (IBS, 2007), produziu 32 milhões de toneladas de ferro-gusa, sendo 67% produzidos em altos-fornos a coque, 28% em altos-fornos a carvão vegetal (produtores independentes) e 5% produzidos em altos-fornos a carvão vegetal (usinas integradas). A produção de ferro-gusa da Empresa Siderúrgica representa 2% do mercado nacional.

---

Segundo dados do IBS (2006), a geração de gás de alto-forno (GAF) mundial em 2005 foi de 185 milhões de  $\text{Nm}^3/\text{h}$ , sendo que, no Brasil, foi de 6 milhões de  $\text{Nm}^3/\text{h}$ , representando aproximadamente 3,0% da produção mundial. Na Empresa Siderúrgica, segundo BEG (2006), a geração de GAF representou 116 mil  $\text{Nm}^3/\text{h}$ , equivalendo a aproximadamente 2,0% da geração nacional.

### **3.6.2 Gás de Alto-Forno**

Em 1832, na Alemanha, Fabre du Faur obteve a patente do processo de aplicação do gás de alto-forno para pré-aquecer o ar soprado. Em 1857, Alfred Cowper utilizou, pela primeira vez, regeneradores cheios de tijolos refratários, queimando o gás do próprio alto-forno para elevar a temperatura de sopro (JACOMINO, 2002).

Bell, em 1884, descobriu que havia relação entre a proporção de CO e de  $\text{CO}_2$  no gás e a produtividade do forno. Antes, em 1838, Von Bunsen havia coletado amostras de gases através de um tubo introduzido a partir do topo do forno. O objetivo, no entanto, era o de tentar aproveitá-lo como combustível em caldeiras. Os primeiros dados, criteriosamente catalogados, aplicáveis ao processo, apareceram com Darken e Gurry em 1946 (MEDEIROS et al., 2006).

As propriedades físico-químicas do GAF, principalmente poder calorífico e temperatura adiabática de chama, são função da sua composição química e são estas propriedades que determinam a combustão do GAF nos fornos de laminação e nas caldeiras do processo industrial.

---

O gás de alto-forno, um subproduto da fabricação do gusa, é composto dos seguintes componentes:

- monóxido de carbono (CO) => oriundo de reações incompletas do carbono proveniente do combustível (coque ou carvão vegetal) com o oxigênio do ar que é injetado nas ventaneiras;
- dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) => oriundo de reações completas do carbono proveniente do combustível com o oxigênio do ar ou do minério de ferro;
- hidrogênio (H<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>) => proveniente do combustível (coque ou carvão vegetal), carga metálica (minério e fundentes) e do ar;
- nitrogênio (N<sub>2</sub>) => gás inerte, presente no ar, injetado na ventaneira do alto-forno.
- Água (H<sub>2</sub>O) => Sai no topo do alto-forno na forma de vapor; é proveniente da reação do CH<sub>4</sub> ou do H<sub>2</sub>.

Destaca-se que somente o CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> são combustíveis.

O gás de topo de um alto-forno sempre terá CO em sua composição. Isso porque o carbono, além de redutor, é o combustível do processo e uma quantidade maior de carbono é necessária para gerar calor do que a quantidade necessária para reduzir todos os óxidos de ferro. Portanto, na zona de elaboração, são gerados gases suficientes (tanto em termos térmicos, quanto em poder de redução) para o aquecimento e redução da carga na zona de preparação. Se isso não acontece, é porque o processo pode ser melhorado. O sensor principal para detectar a eficiência de um alto-forno é a composição e a temperatura do próprio gás de topo (JACOMINO et al., 2002).

---

As propriedades físico-químicas do GAF dependem do tipo de combustível e do agente redutor utilizado no alto-forno. O combustível utilizado no alto-forno pode ser o carvão vegetal, que tem sua origem na carbonização da madeira, ou o coque, que é proveniente do carvão mineral. Segundo JACOMINO et al. (2002), o carvão vegetal tem um teor de carbono fixo na faixa de 65 a 75%, enquanto no coque é mais alto, em torno de 88%. Outra diferença na análise química é que o carvão vegetal tem um alto teor de material volátil (25 a 35%) e um baixo teor de cinza (2 a 5%). O coque praticamente não tem materiais voláteis (1%) e possui um alto teor de cinza (de 10 a 12%). A cinza do carvão vegetal tem uma concentração grande de álcalis e fósforo, enquanto a cinza de coque possui um alto teor de enxofre.

Além disso, as propriedades físicas e metalúrgicas do carvão vegetal são bem diferentes das propriedades do coque, conseqüentemente, os gases gerados também são diferentes. A Tabela 3.5 resume todas essas comparações das características dos dois combustíveis redutores.

---

Tabela 3.5 - Características do carvão vegetal e do coque (JACOMINO et al., 2002).

| <b>Item</b>                    | <b>Unidade</b>     | <b>Carvão Vegetal</b> | <b>Coque</b> |
|--------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------|
| Carbono fixo                   | %                  | 65-75                 | ~88          |
| Materiais voláteis             | %                  | 25-35                 | ~1           |
| Cinza                          | %                  | 2-5                   | 10-12        |
| Enxofre                        | %                  | 0,03-0,10             | 0,45-0,70    |
| <b>Composição da cinza</b>     |                    |                       |              |
| SiO <sub>2</sub>               | %                  | 5-10                  | 50-55        |
| CaO                            | %                  | 37-56                 | 4-5          |
| MgO                            | %                  | 5-7                   | 4-5          |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %                  | 2-12                  | 25-30        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | %                  | 6-13                  | 5-7          |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | %                  | 8-12                  | 0,4-0,8      |
| K <sub>2</sub> O               | %                  | 15-25                 | 2-4          |
| Na <sub>2</sub> O              | %                  | 2-3                   | 1-3          |
| Resistência à Compressão       | kg/cm <sup>2</sup> | 10-80                 | 130-160      |
| Faixa Granulométrica           | mm                 | 9-100                 | 25-75        |
| Densidade                      | kg/m <sup>3</sup>  | 180-350               | 550          |
| Reatividade                    |                    | Maior                 | Menor        |

A análise química percentual dos componentes presentes no GAF fornece resultados importantes para a predição, determinação e análise das principais propriedades físico-químicas do mesmo, como o poder calorífico e a temperatura adiabática de chama.

### 3.6.2.1 Principais Características do Gás de Alto-Forno

A Tabela 3.6 apresenta a composição média do Gás de Alto-Forno (GAF) e seu respectivo Poder Calorífico Inferior (PCI) para diversas empresas siderúrgicas que utilizam coque ou carvão vegetal no alto-forno. Pode-se concluir, a partir de sua composição, que um alto-forno a carvão vegetal, trabalhando em condições operacionais similares às de um alto-forno a coque, irá gerar um GAF com um PCI mais elevado.

Comparando-se os dados de composição química dos gases de altos-fornos provenientes do coque, com os gases provenientes de altos-fornos à carvão vegetal (sem injeção de gás natural e oxigênio), observa-se que a primeira apresenta valores inferiores para monóxido de carbono (19,4 a 25% para o coque e 26,0 a 28,0% para o carvão vegetal), hidrogênio (2,2 a 3,5% para o coque – 4,0 a 5,0% para o carvão vegetal) e metano (0,4 a 1,0% para o coque – 2,0 a 2,3% para o carvão vegetal) e uma elevada concentração de dióxido de carbono (16,0 a 22,2% para o coque – 17,0 a 19,0% para o carvão vegetal) e nitrogênio (50,1 a 55,7% para o coque – 47,0 a 51,0% para o carvão vegetal). Esta composição química do GAF afeta o poder calorífico do gás, sendo mais elevado no caso de carvão vegetal devido aos valores mais elevados de CO, H<sub>2</sub>, e CH<sub>4</sub>. É importante ressaltar que a composição química do GAF é alterada de acordo com o agente redutor e, também, com o combustível utilizado (coque ou carvão vegetal), e com as condições operacionais dos altos-fornos. Daí a diferença das composições dos gases mesmo quando estes utilizam a mesma fonte energética. Quanto à adição de oxigênio e gás natural nos altos-fornos, esta tende a diminuir a proporção de N<sub>2</sub> no gás e, conseqüentemente, a aumentar o PCI.

Tabela 3.6 - Composição química média e poder calorífico inferior do gás de alto-forno de diversas procedências.

| Procedência  | Fonte                 | CO   | CO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> | PCI                     |
|--|-----------------------|------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------------|
|  |                       | (%)  | (%)             | (%)            | (%)             | (%)            | (kcal/Nm <sup>3</sup> ) |
| Alto-forno a carvão vegetal da Empresa Siderúrgica (Brasil)                              | ÁRAUJO (2007)         | 28,0 | 19,0            | 4,0            | 2,3             | 47,0           | <b>1.150</b>            |
| Alto-forno a carvão vegetal da Vallourec e Mannesmann Tubes (Brasil)                     | SOUZA (2004)          | 26,0 | 17,0            | 5,0            | 2,0             | 51,0           | <b>1.087</b>            |
| Mistura de GAF a carvão vegetal e coque na Empresa Siderúrgica (Brasil)                  | ÁRAUJO (2007)         | 22,0 | 20,0            | 4,0            | 2,1             | 52,0           | <b>950</b>              |
| Alto-forno a coque da Empresa Siderúrgica (Brasil)                                       | ÁRAUJO (2007)         | 19,4 | 22,0            | 3,0            | 1,0             | 55,0           | <b>750</b>              |
| Alto forno a coque da Companhia Siderúrgica Nacional com injeção de gás natural (Brasil) | MEDEIROS (2006)       | 24,3 | 23,5            | 3,6            | 1,0             | 47,6           | <b>913</b>              |
| Alto forno a coque (França)  | HEILIGENSTAEDT (1971) | 25,0 | 16,0            | 3,0            | 0,3             | 55,7           | <b>859</b>              |
| Alto forno a coque (França)  | GICQUEL et al (2002)  | 22,2 | 22,2            | 2,2            | 0,4             | 53,4           | <b>762</b>              |
| Alto forno a coque (Turquia)   | ERTEM et al (2005)    | 23,8 | 21,8            | 3,5            | 0,8             | 50,1           | <b>878</b>              |
| Alto forno a coque, com injeção de gás natural e oxigênio (Egito)                        | HALIM (2006)          | 29,0 | 13,0            | 5,0            | 0,5             | 52,5           | <b>1.049</b>            |
| Alto forno a coque, com injeção de gás natural sem oxigênio (Egito)                      | HALIM (2006)          | 27,0 | 13,0            | 3,0            | 0,5             | 56,5           | <b>936</b>              |
| Alto forno a coque (China)   | JIANWEI et al (2001)  | 22,8 | 19,0            | 2,0            | 0,1             | 56,2           | <b>748</b>              |
| Alto forno a coque utilizando 95% de oxigênio puro (China)                               | JIANWEI et al (2001)  | 50,6 | 22,4            | 23,4           | -               | 3,6            | <b>2.136</b>            |

Um PCI elevado é consequência de uma relação mais alta de carvão ou coque / minério de ferro, e poderá estar ligado às seguintes condições operacionais do alto-forno: permeabilidade da carga, taxa de finos de carvão injetada nas ventaneiras e qualidade da carga (DONG *et al.*, 2006). Estes autores desenvolveram um modelo

para o desempenho físico de altos-fornos de diversas dimensões, com alta taxa de injeção de finos e do gás dentro do forno.

Outra informação importante é que as características e composições do carvão vegetal tendem a ser muito mais heterogêneas que os do coque (ver Tabela 3.5), gerando, assim, um gás de alto forno com mais variações em sua composição e, conseqüentemente, no PCI.

De acordo com HALIM (2006), a tecnologia de injeção de oxigênio no alto-forno para enriquecimento do ar de combustão, e a inserção de gás natural para economizar carvão ou coque na produção de ferro-gusa, deve ser utilizada até um determinado limite. A técnica depende da proporção de oxigênio e gás natural que determinará a temperatura teórica de chama (índice operacional para o alto-forno). O autor avalia os dados reais de dois altos-fornos e analisa a tecnologia de injeção de gás natural com e sem enriquecimento de oxigênio no ar. É importante ressaltar que o ar injetado na ventaneira estava entre 1.000°C e 1.300°C. O modelo desenvolvido no trabalho calcula a temperatura teórica de chama e o volume de gás natural que pode ser injetado com ou sem enriquecimento com oxigênio até atingir a temperatura mínima. O procedimento tem objetivo da redução do consumo de coque, com aumento do poder calorífico inferior do gás de alto-forno, em função da menor taxa de injeção de nitrogênio e, conseqüentemente, com redução do custo de produção do ferro-gusa.

A Figura 3.30 e Figura 3.31 mostram o resultado desta pesquisa. É importante ressaltar que a temperatura teórica de chama do gás é função das quantidades de

---

gás natural (GN) e de oxigênio alimentados no alto-forno. O aumento do percentual de oxigênio ou da temperatura de injeção do ar aumenta a temperatura teórica de chama. Entretanto, ao aumentar a taxa de injeção de gás natural, diminui-se a temperatura teórica de chama, mas o consumo de coque ou carvão vegetal é reduzido. No caso de utilização de gás natural com ar enriquecido com oxigênio, obteve-se uma economia de 0,8 kg de coque, que deixou de ser carregado para injeção de  $1\text{m}^3$  de gás natural na ventaneira. O máximo de enriquecimento do ar com oxigênio é de 8%.

Sendo assim, HALIM (2006) concluiu que a adição de oxigênio nos altos-fornos influencia significativamente o PCI e a temperatura de chama do gás de alto-forno.

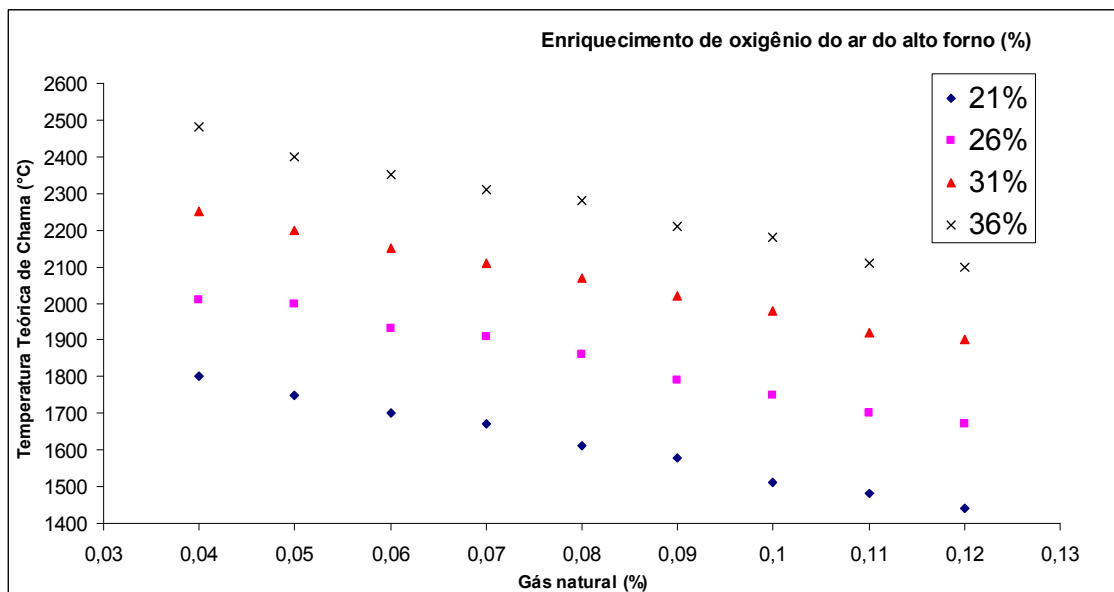


Figura 3.30 - A influência do enriquecimento de oxigênio no ar no valor da temperatura teórica de chama em um alto-forno (temperatura de injeção do ar =  $1.100^{\circ}\text{C}$ , umidade = 2%). HALIM (2006).

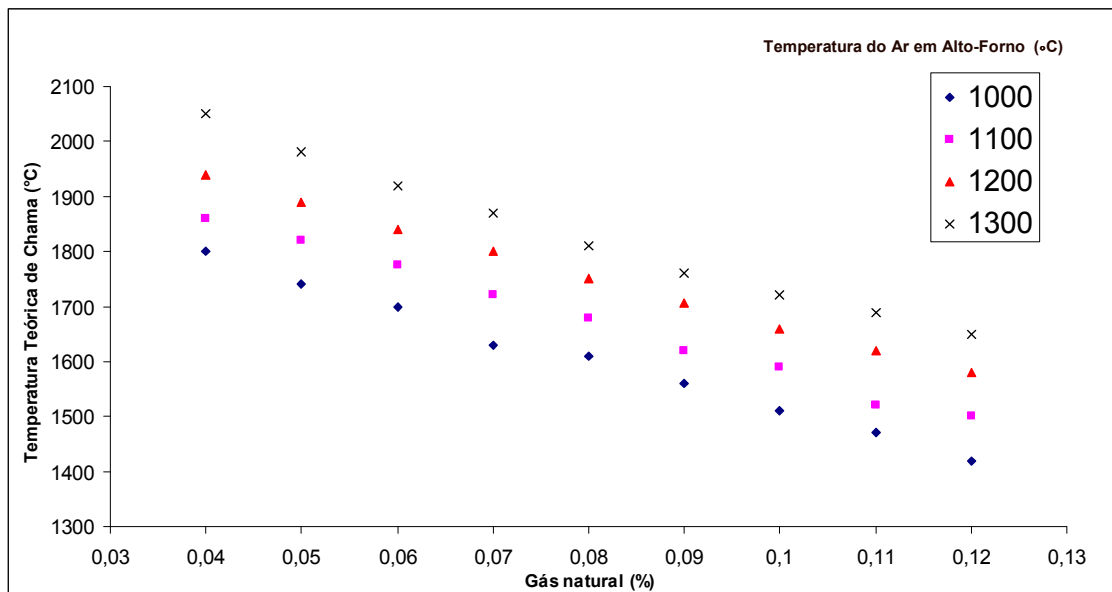


Figura 3.31 - A influência da temperatura de injeção de ar e da quantidade de gás natural injetada no alto-forno no valor da temperatura teórica de chama (enriquecimento com oxigênio = 26%, umidade = 2%). HALIM (2006).

Em 1978, o processo de alto-forno a oxigênio foi proposto por Fink e foi estudado e modificado por outros pesquisadores (QIN et al., 1987; LU e KUMAR, 1984; MA e EDSTROM, 1992). Em 1986, uma empresa Japonesa (NKK) construiu um forno piloto de alto-forno a oxigênio de 3,9 m<sup>3</sup> e passou por várias campanhas operacionais com sucesso (OHNO et al., 1992). A meta do alto-forno a oxigênio é de aumentar a produtividade de metal e reduzir o consumo de coque por meio da injeção de carvão pulverizado na ventaneira. A Figura 3.32 apresenta os componentes do alto-forno a oxigênio.

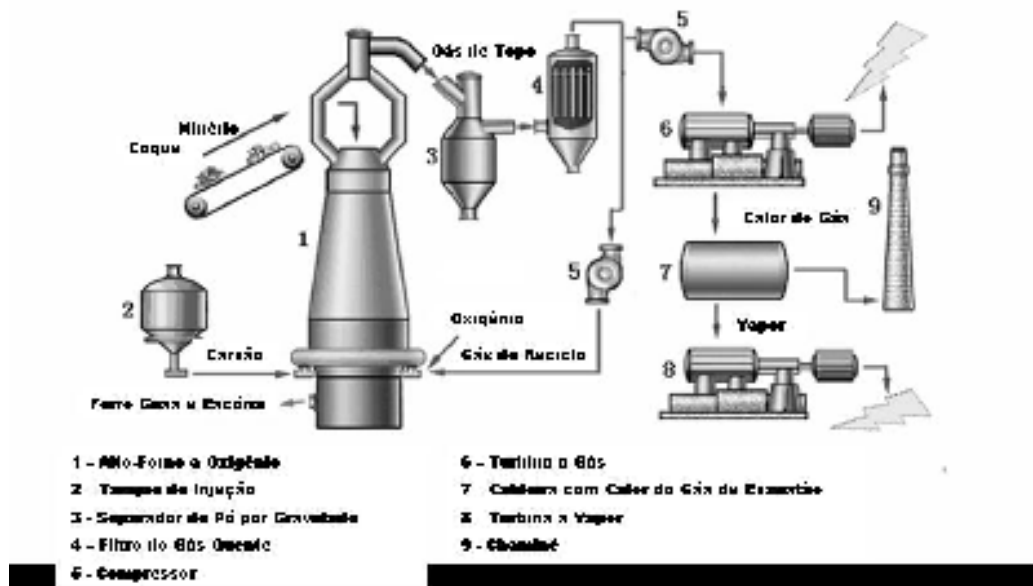


Figura 3.32 - Componentes do alto-forno a oxigênio puro, com reciclo de gás, injeção de carvão, geração de energia elétrica e vapor. (JIANWEI et al., 2001).

O gás de alto-forno convencional tem um PCI baixo por causa da composição do ar injetado no alto-forno ter 79% de nitrogênio e 21% de oxigênio. Injetando 95% de oxigênio e 5% de nitrogênio em um alto-forno, observou-se um aumento na produção de ferro gusa, e um aumento no PCI do GAF em até 3 vezes quando comparado a um alto-forno convencional, conforme pode ser observado na Tabela 3.7. É importante ressaltar que o GAF produzido neste sistema poderá ser reutilizado, por meio de injeção na própria ventaneira, reduzindo o consumo de coque, e a sobra será utilizada para geração de energia elétrica e vapor.

Embora o alto-forno a oxigênio aumente a produção de gusa, a taxa de injeção de finos diminui o consumo de coque ou carvão vegetal, e gera energia elétrica e vapor, conforme a Tabela 3.7. Este alto-forno dificilmente poderá competir com o alto-forno convencional devido ao elevado custo para obtenção do oxigênio a partir do ar atmosférico.

Tabela 3.7 - Balanço de massa do alto-forno convencional e a oxigênio para a produção de 1 tonelada de ferro-gusa. (JIANWEI et al., 2001)

| Tipo de Alto-Forno                               | Consumo de Minério (kg) | Consumo de Coque ou carvão vegetal (kg) | Consumo da Injeção de Carvão (kg) | Temperatura de Injeção do Ar (°C) | Reciclo de Gás (Nm <sup>3</sup> ) | Geração de Gás (Nm <sup>3</sup> ) | PCI do GAF (kcal/Nm <sup>3</sup> ) |
|--|-------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Alto-Forno Convencional (21% de O <sub>2</sub> ) | 1.559                   | 389                                     | 124                               | 1.121                             | 0                                 | 1.380                             | 741                                |
| Alto-Forno a Oxigênio (95% de O <sub>2</sub> )   | 1.638                   | 200                                     | 556                               | 423                               | 312                               | 822                               | 2.136                              |

A otimização da operação dos altos-fornos tem sempre como objetivo principal a diminuição do consumo de carvão vegetal ou coque, principal componente do custo do gusa, representando 50% do consumo de energia de uma empresa siderúrgica integrada.

### 3.7 Energia Elétrica

Segundo EIA (2010), a potência instalada de energia elétrica no mundo no ano de 2008 foi de 4.521 GW, sendo que dois países, Estados Unidos e China contribuíram com 39,5% do total e o Brasil 2,3% da capacidade instalada mundial, conforme Tabela 3.8. O consumo final de eletricidade no mundo foi de 18.603 TWh e no Brasil foi de 429 TWh, conforme Tabela 3.9, sendo que o percentual de consumo ficou muito próximo da capacidade instalada

Tabela 3.8 – Potência instalada de energia elétrica em 2008 (EIA, 2010).

| Países           | GW           | %            |
|------------------|--------------|--------------|
| 1 Estados Unidos | 988          | 21,9         |
| 2 China          | 797          | 17,6         |
| 3 Japão          | 255          | 5,6          |
| 4 Rússia         | 223          | 4,9          |
| 5 Índia          | 177          | 3,9          |
| 6 Alemanha       | 133          | 2,9          |
| 7 Canadá         | 127          | 2,8          |
| 8 França         | 114          | 2,5          |
| 9 Brasil         | 104          | 2,3          |
| 10 Itália        | 91           | 2,0          |
| 11 Espanha       | 88           | 2,0          |
| 12 Reino Unido   | 83           | 1,8          |
| 13 Coreia do Sul | 76           | 1,7          |
| 14 México        | 57           | 1,3          |
| 15 Ucrânia       | 54           | 1,2          |
| Outros           | 1.153        | 25,5         |
| <b>Mundo</b>     | <b>4.521</b> | <b>100,0</b> |

Tabela 3.9 – Consumo final de energia elétrica (EIA, 2010).

| Países           | TWh           | %            |
|------------------|---------------|--------------|
| 1 Estados Unidos | 4.156         | 22,3         |
| 2 China          | 3.293         | 17,7         |
| 3 Japão          | 1.031         | 5,5          |
| 4 Rússia         | 914           | 4,9          |
| 5 Índia          | 645           | 3,5          |
| 6 Alemanha       | 587           | 3,2          |
| 7 Canadá         | 568           | 3,1          |
| 8 França         | 494           | 2,7          |
| 9 Coreia do Sul  | 430           | 2,3          |
| 10 Brasil        | 429           | 2,3          |
| 11 Reino Unido   | 372           | 2,0          |
| 12 Itália        | 339           | 1,8          |
| 13 Espanha       | 288           | 1,5          |
| 14 Austrália     | 240           | 1,3          |
| 15 África do Sul | 232           | 1,2          |
| Outros           | 4.585         | 24,6         |
| <b>Mundo</b>     | <b>18.603</b> | <b>100,0</b> |

As fontes não renováveis para geração de energia elétrica mundial corresponderam no ano de 2008 à 81%, sendo o carvão mineral com 40%, gás natural com 21%, nuclear com 14% e petróleo com 6%. As fontes renováveis corresponderam a 19% com destaque para a geração hidráulica com 16% (ver Figura 3.33).

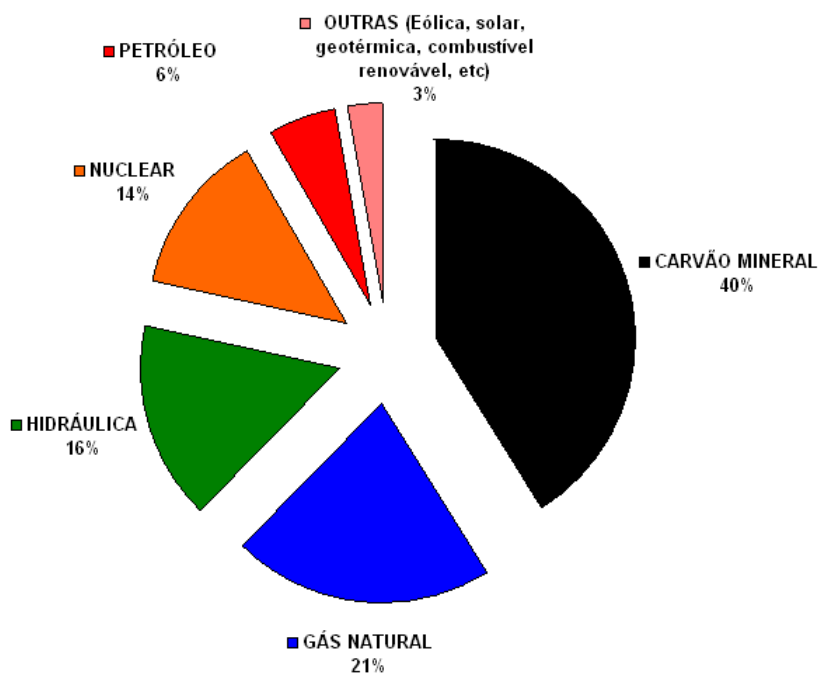


Figura 3.33 - Fontes para geração de energia elétrica mundial em 2008 (IEA, 2010).

A Tabela 3.10 mostra a potência instalada de energia elétrica por combustível fóssil no mundo em 2008 que foi de 2.607GW, sendo que os países Estados Unidos e China participaram com 50% do total e o Brasil somente 1%. A potência instalada de energia elétrica hídrica em 2008 foi de 854,2 GW, sendo que o Brasil apresentou uma potência instalada de 78,3 GW, 9,2% do mundo, perdendo apenas para a China com 20,1% do total mundial (ver Tabela 3.11)

Tabela 3.10 – Potência instalada-energia elétrica por combustível fóssil em 2008 (EIA, 2010).

| Países           | GW           | %           |
|------------------|--------------|-------------|
| 1 Estados Unidos | 764          | 29%         |
| 2 China          | 555          | 21%         |
| 3 Japão          | 177          | 7%          |
| 4 Rússia         | 151          | 6%          |
| 5 Índia          | 110          | 4%          |
| 6 Alemanha       | 73           | 3%          |
| 7 Itália         | 65           | 3%          |
| 8 Reino Unido    | 65           | 2%          |
| 9 Coreia do Sul  | 50           | 2%          |
| 10 Espanha       | 47           | 2%          |
| <b>30 Brasil</b> | <b>15</b>    | <b>1%</b>   |
| Outros           | 535          | 21%         |
| <b>Mundo</b>     | <b>2.607</b> | <b>100%</b> |

Tabela 3.11 – Potência instalada-energia elétrica hídrica em 2008 (EIA, 2010).

| Países           | GW           | %            |
|------------------|--------------|--------------|
| 1 China          | 171,5        | 20,1         |
| <b>2 Brasil</b>  | <b>78,3</b>  | <b>9,2</b>   |
| 3 Estados Unidos | 77,9         | 9,1          |
| 4 Canadá         | 74,4         | 8,7          |
| 5 Rússia         | 47,0         | 5,5          |
| 6 Índia          | 39,3         | 4,6          |
| 7 Noruega        | 28,2         | 3,3          |
| 8 Japão          | 21,9         | 2,6          |
| 9 França         | 20,9         | 2,4          |
| 10 Suécia        | 16,4         | 1,9          |
| 11 Venezuela     | 14,6         | 1,7          |
| 12 Turquia       | 13,8         | 1,6          |
| 13 Itália        | 13,7         | 1,6          |
| 14 Suíça         | 13,5         | 1,6          |
| 15 Espanha       | 13,1         | 1,5          |
| Outros           | 209,7        | 24,6         |
| <b>Mundo</b>     | <b>854,2</b> | <b>100,0</b> |

No ano de 2009, a potência instalada de energia nuclear no mundo era de 379,2 GW, sendo que os países Estados Unidos, França e Japão contribuíram com 55,8% do total e o Brasil 0,5%, ver Tabela 3.12. Em 2010, a potência instalada de energia eólica no mundo foi de 197 GW, sendo que os países China, Estados Unidos, Alemanha e Espanha contribuíram com 67,4% e o Brasil 0,5%, conforme Tabela 3.13.

Tabela 3.12 – Potência instalada de energia elétrica nuclear em 2009 (EIA, 2010).

| Países           | GW           | %            |
|------------------|--------------|--------------|
| 1 Estados Unidos | 100,7        | 26,5         |
| 2 França         | 63,3         | 16,7         |
| 3 Japão          | 47,9         | 12,6         |
| 4 Rússia         | 23,2         | 6,1          |
| 5 Alemanha       | 20,5         | 5,4          |
| 6 Coreia do Sul  | 17,7         | 4,7          |
| 7 Ucrânia        | 13,8         | 3,6          |
| 8 Canadá         | 13,3         | 3,5          |
| 9 Reino Unido    | 11,0         | 2,9          |
| 10 China         | 9,0          | 2,4          |
| 11 Suécia        | 8,9          | 2,4          |
| 12 Espanha       | 7,4          | 1,9          |
| 13 Bélgica       | 5,8          | 1,5          |
| 14 Taiwan        | 5,1          | 1,4          |
| 15 Índia         | 4,1          | 1,1          |
| <b>20 Brasil</b> | <b>2,0</b>   | <b>0,5</b>   |
| Outros           | 25,4         | 6,7          |
| <b>Mundo</b>     | <b>379,2</b> | <b>100,0</b> |

Tabela 3.13 – Potência instalada de energia elétrica eólica em 2010 (EIA, 2011).

| Países           | GW           | %            |
|------------------|--------------|--------------|
| 1 China          | 44,7         | 22,7         |
| 2 Estados Unidos | 40,2         | 20,4         |
| 3 Alemanha       | 27,2         | 13,8         |
| 4 Espanha        | 20,7         | 10,5         |
| 5 Índia          | 13,1         | 6,6          |
| 6 Itália         | 5,8          | 2,9          |
| 7 França         | 5,7          | 2,9          |
| 8 Reino Unido    | 5,2          | 2,6          |
| 9 Canadá         | 4,0          | 2,0          |
| 10 Dinamarca     | 3,8          | 1,9          |
| 11 Portugal      | 3,7          | 1,9          |
| 12 Japão         | 2,3          | 1,2          |
| 13 Holanda       | 2,2          | 1,1          |
| 14 Suécia        | 2,1          | 1,0          |
| 15 Austrália     | 1,9          | 1,0          |
| <b>21 Brasil</b> | <b>0,9</b>   | <b>0,5</b>   |
| Outros           | 13,6         | 6,9          |
| <b>Mundo</b>     | <b>197,0</b> | <b>100,0</b> |

### 3.7.1 Resumo da História da Indústria de Energia Elétrica

Este texto foi adaptado do artigo de GROSS (1986), com informações de RODITI (2005), MARTINS (2007) e BODANIS (2008).

Os estudos relativos aos fenômenos elétricos e magnéticos interessavam apenas a alguns poucos cientistas até o século XIX. Cientistas como William Gilbert (1544 – 1603), Charles Augustin de Coulomb (1736 – 1806), Luigi Aloisius Galvani (1737 – 1798), Otto von Guericke (1602 – 1686), Benjamin Franklin (1706 – 1790), Alessandro Giuseppe Antonio Anastásio Volta (1745 – 1827) e outros poucos fizeram significativas contribuições para a área da eletricidade. No entanto, na época não era mais que um conjunto limitado de conhecimentos não-sistematizados, isto é, não se conheciam aplicações práticas para esses conhecimentos, e a principal motivação para os estudos era a curiosidade intelectual.

Grandes avanços na compreensão dos fenômenos elétricos e magnéticos ocorreram durante esse mesmo período. Alguns cientistas, como Humphry Davy (1778 – 1829),

André-Marie Ampère (1775 – 1836), George Simon Ohm (1787 – 1854) e Johann Friedrich Karl Gauss (1777 – 1855), fizeram importantes descobertas, mas aquela que transformou a eletricidade de mero fenômeno científico interessante em uma tecnologia importante, com extensas implicações sociais, foi feita por dois cientistas que trabalharam independentemente um do outro: Michael Faraday (1791 – 1867) e Joseph Henry (1797 – 1878).

Entre 1800 a 1810, surgiram na Europa e depois nos EUA as companhias de iluminação a gás, o que ameaçou os interesses das indústrias das velas de sebo e querosene, que reagiram com vigor, descrevendo a nova tecnologia como uma ameaça à saúde e enfatizando o potencial explosivo dela. Entretanto, a óbvia vantagem de se ter mais luz com custo mais baixo não pôde ser ocultada indefinidamente. Em razão disso, essa nova indústria apresentou contínuo crescimento durante todo o século XIX e teve o seu apogeu por volta de 1885.

Em 1875, Thomas Alva Edison (1847 – 1931) construiu um laboratório, o primeiro centro de pesquisa industrial fora de uma universidade, para trabalhar em vários projetos na área de eletricidade, incluindo o desenvolvimento de uma lâmpada elétrica incandescente. Apenas em outubro de 1879, após muitas tentativas e experiências malsucedidas, um bulbo com vácuo contendo um filamento de fio de algodão carbonizado foi energizado. Não havia mais dúvidas de que uma lâmpada incandescente viável poderia ser desenvolvida. Subseqüentemente, Edison aprimorou a lâmpada e propôs um novo projeto de gerador que tinha inacreditável rendimento de quase 90%. Aproximadamente três anos mais tarde, em 1882, o

---

primeiro sistema instalado para vender energia elétrica para iluminação incandescente nos EUA começou a operar em Nova Iorque.

As companhias de energia elétrica daquela época autodenominavam-se companhias de iluminação porque esse era o único serviço que forneciam. O motor elétrico já era conhecido, e a existência de uma fonte de energia elétrica era um incentivo para o refinamento desse equipamento e a aceitação comercial dele. A força motriz de origem elétrica rapidamente tornou-se popular e foi usada para muitas aplicações. Em reconhecimento à sua nova atuação mais abrangente, as companhias de energia elétrica começaram a se autodenominarem companhias de força e luz.

Naquela época, o transporte era feito em baixa tensão, isto ocasionava elevadas perdas de energia. Como consequência, o custo do transporte crescia rapidamente com a distância, limitando a área geográfica cujo fornecimento de energia era viável economicamente. (MARANGON, 2001).

O aumento das correntes causava quedas de tensão inaceitáveis se os geradores estivessem localizados a uma distância considerável das cargas. A exigência de se manter a geração próxima às cargas tornou-se cada vez mais inaceitável, pois, freqüentemente, não havia disponibilidade de locais para geração de porte aceitável. Era sabido que potência elétrica é proporcional ao produto entre tensão e corrente elétricas; logo, seriam necessárias menores correntes para maiores tensões. Infelizmente, tensões elevadas não eram desejáveis tanto do ponto de vista da tecnologia da época quanto da segurança do consumidor. Dessa forma, a solução era transmitir potência a alta tensão por longas distâncias e, então, abaixar o valor

---

da tensão no ponto de consumo: havia a necessidade de se desenvolver um equipamento capaz de transformar os níveis de tensão e de corrente com eficiência e confiabilidade.

Nos anos 1890 do século XIX, a recém-criada Westinghouse Company havia experimentado uma nova forma de eletricidade, denominada corrente alternada (CA), inspirada no fato de que a corrente elétrica alternadamente revertia o sentido do seu fluxo em sincronismo com a rotação do gerador. Nikola Tesla (1856 – 1943) não tinha apenas inventado o motor de indução CA polifásico, mas também concebido um sistema elétrico CA polifásico completo. Essa abordagem tinha muitas vantagens inerentes: por exemplo, os problemas de comutação associados aos geradores CC eram eliminados. Uma vigorosa controvérsia entre Edison, da *General Electric Company*, e a *Westinghouse Company* desenvolveu-se para se decidir se a indústria deveria ser padronizada em CC ou em CA. A forma CA finalmente saiu-se vitoriosa pelos seguintes motivos: (a) o transformador CA possuía a tão necessária capacidade de converter facilmente níveis de tensão e de corrente com rendimento elevado; (b) os geradores CA eram inerentemente mais simples que os geradores CC; e (c) embora não tão versáteis naquela época, os motores CA eram mais simples e mais baratos que os motores CC.

Após a padronização em CA, o conceito de geração central estabeleceu-se firmemente, e as cargas remotas deixaram de ser problema. O suave brilho amarelado da lâmpada era mais conveniente, limpo, e, rapidamente, tornou-se mais barato que seu correspondente a gás. Mais e mais consumidores foram adicionados à lista de clientes das companhias de energia elétrica: uma vez que a maior parte

---

desse aumento de carga pôde ser atendido sem aumento no investimento de capital, o custo unitário da energia caiu, atraindo continuamente mais consumidores.

Empresas de eletricidade locais expandiram-se territorialmente até que começassem a compartilhar fronteiras: já em 1920, cada centro de carga da Europa Ocidental possuía seu próprio “sistema de potência”. Nesse momento, uma vantagem operacional podia ser vislumbrada: sabendo que as cargas de sistemas vizinhos não necessariamente atingiam seus picos simultaneamente, pensou-se em interconectar os sistemas e associar as condições de pico de carga à geração combinada dos sistemas, empregando melhor os equipamentos de todos os envolvidos. Porém, antes de se realizar a interconexão, era necessário superar um grave problema técnico: muitas frequências diferentes eram utilizadas naquela época, incluindo CC, 25 Hz, 50 Hz, 60 Hz, 125 Hz e 133 Hz. Tendo em vista que sistemas CA interconectados devem operar na mesma frequência, a diversidade de frequências impunha a necessidade de se utilizarem caros equipamentos conversores de frequência. Essa necessidade representou, na realidade, um incentivo à padronização de frequência. Naquele tempo, as unidades geradoras em diversas instalações hidrelétricas geravam em 25 Hz porque as turbinas hidráulicas podem ser projetadas para operar com um pouco mais de eficiência nas correspondentes velocidades mecânicas. Daí, havia forte amparo para se utilizar essa frequência. O problema com a frequência de 25 Hz era o perceptível efeito da cintilação luminosa (flicker) em lâmpadas incandescentes produzido por ela. Uma frequência mais alta, 60 Hz, era eventualmente aceita como padrão nos EUA, pois ela tinha características elétricas aceitáveis e pelo fato de que turbinas a vapor operavam satisfatoriamente nas correspondentes velocidades mecânicas de 1.800 rpm e 3.600

---

rpm. Como resultados disso, os EUA padronizaram a frequência em 60 Hz; a Europa, em 50 Hz.

O avanço tecnológico no projeto de equipamentos de potência continuou: quando uma empresa de eletricidade expandia o seu sistema, os novos geradores e transformadores adquiridos tinham, inevitavelmente, maiores capacidade e rendimento. Melhores lâmpadas elétricas foram desenvolvidas, dando ao consumidor mais luz por unidade de energia. Com a contínua queda nos custos da energia elétrica, o uso de motores elétricos como força motriz mecânica para todos os tipos de aplicações tornou-se popular.

Com tudo isso, criou-se o padrão atual de sistema elétrico de potência, que pode ser definido da seguinte forma (Charles A. Gross, 1986 – Power System Analysis).

*“Um sistema elétrico de potência é uma rede de componentes interconectados projetados para converter continuamente energia não-elétrica em energia elétrica, transportar a energia elétrica por distâncias potencialmente grandes, transformar a energia elétrica em uma forma específica sujeita a estreitas tolerâncias, e converter a energia elétrica transformada em uma forma não-elétrica utilizável.”*

De acordo com essa idéia, com propósitos organizacionais, pode-se dividir o sistema em cinco subsistemas muito conhecidos (Gross, 1986): geração, transmissão, subtransmissão, distribuição — primária e secundária — e consumo.

---

Com esse tipo de sistema elétrico, a resposta aos aumentos de demanda era aumentar a energia gerada; quando a demanda excedia a máxima capacidade de geração do sistema, a solução adotada era a construção de novas usinas geradoras, em geral de grande porte, e o aumento correspondente da capacidade de transmissão e distribuição da maior quantidade de energia comercializada.

Na década de 70 do século XX, porém, o grande porte das usinas entrou em choque com preocupações ambientais, com crises energéticas e com vazamentos causadores de prejuízos bilionários em grandes usinas nucleares, o que levou ao questionamento do paradigma da geração centralizada. Na década de 80 do século XX, a tendência de crescimento das usinas geradoras foi revertida, a partir do momento em que turbinas a gás de menor porte, produzidas em massa, chegaram ao mercado.

As contínuas inovações tecnológicas no setor elétrico, associadas à recente regulamentação dos mercados — em que o ambiente mais competitivo, especialmente na geração, possibilitou o surgimento de novos agentes, os produtores independentes e os autoprodutores, vendendo ou não excedentes de energia elétrica para a rede, concorrem com alguma liberdade.

### **3.7.2 A Indústria de Energia Elétrica no Brasil**

Os primórdios da energia elétrica no Brasil se caracterizaram por uma fase de pioneirismo, esta responsável por sua quase simultaneidade com a instalação dos mesmos serviços dos Estados Unidos e dos países mais adiantados da Europa, graças ao interesse que o imperador Pedro II dispensava às invenções e

---

descobertas científicas. No ano de 1879 ele inaugura a iluminação elétrica da antiga Estação da Corte e da Estrada de Ferro Central do Brasil 1 (MARANGON, 2001).

A primeira central hidrelétrica instalada no Brasil para serviços de utilidade pública é a de Marmelos-Zero, no rio Paraibuna, com o objetivo de fornecimento de energia para a cidade de Juiz de Fora, cujo desenvolvimento por intermédio deste empreendimento lhe permite ser chamada na época de “Manchester Brasileira”, pelas fábricas de tecido que nela se instalam. Sete anos mais tarde outra hidrelétrica seria construída, a Marmelos-1 (MARANGON, 2001).

No Brasil, a opção pela expansão do parque gerador priorizando a construção de usinas hidrelétricas foi feita pelo governo militar por considerá-la estratégica para o país. Grandes projetos de usinas hidrelétricas permitiram uma geração capaz de sustentar o crescimento econômico no período. Mais tarde, os aumentos das preocupações com os impactos ambientais da produção e uso da energia mostraram que essa seria uma imensa vantagem comparativa do país ao possuir vastos recursos hídricos e enormes potenciais hidrelétricos (MME/EPE v.3, 2007).

Em 1973, foi criada a Itaipu Binacional – ITAIPU, de acordo com o tratado firmado entre Brasil e Paraguai, regulando a construção e operação de hidrelétricas no rio Paraná. De acordo com Oliveira (2005), nos anos 80 e 90, as tarifas e investimentos em eletricidade tiveram uma queda significativa, comprometendo a proporção de recursos destinada aos novos investimentos que caiu de 71% em 1974 para 54% em 1980, 40% em 1985 e 29% em 1988.

---

O Plano 90 da Eletrobrás baseado nos patamares de crescimento econômico verificados na década de 70 foi estruturado diante de um crescimento anual da demanda de energia elétrica a taxas superiores a 11%. Também baseado neste forte crescimento do consumo de energia elétrica, foi assinado o acordo Nuclear do Brasil com a Alemanha, através do qual seriam construídos os maiores reatores do mundo, os PWR de 1.300MW em associação com a KWU-Siemens. Pelo acordo seria adicionado ao parque gerador brasileiro um reator desse tipo por ano até 1990. Com a recessão do início dos anos 80, houve uma relativa disponibilidade de energia secundária que levou o país a adotar uma política de estímulo à eletrotermia (MME/EPE v.3, 2007).

O rápido crescimento da demanda de eletricidade, principalmente para eletrotermia no setor industrial, pressionava a capacidade de oferta de eletricidade existente. Por outro lado, os preços do petróleo no mercado internacional diminuíram até níveis relativamente próximos aos anteriores ao período de crise. Somado a isso, a política de tarifas artificialmente baixas, para conter a inflação, começava a comprometer a capacidade de investimento na expansão da oferta, o que combinado com a alta das taxas de juros no mercado internacional criava grandes dificuldades financeiras para o setor elétrico que teve sua expansão em parte financiada por empréstimos com taxas de juros flutuantes (MME/EPE v.3, 2007).

Em 1984, entrou em operação a Usina Hidrelétrica Tucuruí, da Eletronorte, primeira hidrelétrica de grande porte construída na Amazônia. Foi concluída a primeira parte do sistema de transmissão Norte-Nordeste, permitindo a transferência de energia da bacia amazônica para a região Nordeste. Além disso, entrou em operação a Usina

---

Hidrelétrica Itaipu, maior hidrelétrica do mundo com 12.600 MW de capacidade instalada, com 18 unidades geradoras de 700 MW cada. As 18 unidades geradoras foram sendo instaladas ao ritmo de duas a três por ano. A 18ª entrou em operação em 9 de abril de 1991.

A energia produzida por Itaipu em 2004 atingiu 89,9 milhões de MWh, o suficiente para suprir 96% do consumo anual do Estado de São Paulo, o maior centro industrial do Brasil. Essa foi a terceira maior produção da história da usina, marca superada apenas em 2000 (93,4 milhões de MWh) e em 1999 (90 milhões de MWh). A produção de 2004 também seria suficiente para atender cerca de três vezes o consumo anual de energia elétrica do Estado do Rio de Janeiro ou 4,9 vezes o consumo anual de todo o Paraná. É justamente nessa época que o Brasil começa a importar energia elétrica do Paraguai (MME/EPE v.1, 2007).

Em 1985, a Usina Termonuclear Angra I inicia suas operações, sendo a primeira usina nuclear do Brasil. A opção da construção da Usina de Angra I era justificada pela proximidade dos grandes centros consumidores evitando, portanto, investimentos em transmissão e o aumento da importação de petróleo para geração termelétrica a partir de derivados (MME/EPE v.1, 2007).

Em 1986, entrou em operação o sistema de transmissão Sul-Sudeste, o mais extenso da América do Sul, transportando energia elétrica da Usina Hidrelétrica Itaipu até a região Sudeste. Nesse mesmo ano, a Eletrobrás publicou o Plano Diretor para Conservação e Recuperação do Meio Ambiente nas Obras e Serviços do Setor

---

Elétrico - I PDMA, marcando o início da reorientação do setor no equacionamento das questões socioambientais (MME/EPE v.1, 2007).

Em 12 de abril de 1990, foi sancionada pelo Presidente da República, Fernando Collor de Mello, a Lei n.º 8.031, criando o Programa Nacional de Desestatização – PND, que em 1995 incluiria as empresas controladas pela Eletrobrás. Preocupado com a falta de investimento na expansão do parque gerador, o governo federal emitiu em 1993, o Decreto nº 915, de 6 de setembro, viabilizando a formação de consórcios entre concessionárias e autoprodutores para a implantação e exploração dos aproveitamentos hidrelétricos. Este se constituiu em importante instrumento para viabilizar, inclusive, a conclusão de obras paralisadas (MME/EPE v.1, 2007).

No ano seguinte, foi inaugurada a primeira unidade geradora da Usina Hidrelétrica Xingó, com 500 MW, localizada entre Alagoas e Sergipe, nas cidades de Canindé do São Francisco (SE) e Piranhas (AL). Em 1997, com mais cinco unidades geradoras em funcionamento, atingiu-se a capacidade de 3.000 MW. É a maior usina da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco - CHESF e a última no rio São Francisco, tendo importância fundamental para a Região Nordeste e para o Sistema Interligado Norte-Nordeste (MME/EPE v.1, 2007).

Ainda nesse ano foi inaugurada, em outubro, a Usina Hidrelétrica Miranda, com capacidade de 390 MW, instalada no rio Araguari, entre Uberlândia (MG) e Indianópolis (MG). Foi a primeira do país a ser projetada com sistema de telecomando onde todos os controles operacionais são feitos de Belo Horizonte (MG) pelo Centro de Operações de Sistema - COS da Companhia Energética de

---

Minas Gerais - CEMIG. O telecomando aumentou a confiabilidade do sistema e reduziu custos, pois a usina pode ser mantida por pequeno número de funcionários (MME/EPE v.1, 2007).

Em 1998, entrou em operação a primeira das três turbinas da Usina Hidrelétrica Serra da Mesa, localizada no rio Tocantins, tendo na margem direita o município de Colinas do Sul (GO) e na margem esquerda o município de Minaçu (GO). A usina possui o maior reservatório, em volume de água do Brasil e totaliza 1.784 km<sup>2</sup> de área inundada (MME/EPE v.1, 2007).

Seguindo uma tendência ocorrida em todo o mundo, o setor elétrico passou por sucessivas reformas a partir do final da década de 90. A reestruturação do setor criou as agências reguladoras, políticas de desregulamentação com ênfase no livre acesso às redes de transporte e promoveu a abertura à novas empresas estimulando a desverticalização e privatizando, principalmente, as distribuidoras (MME/EPE v.1, 2007).

No entanto, a atratividade de novos investimentos na expansão não ocorreu como era esperado e os grandes reservatórios do sistema foram deplecionados seguidamente culminando no racionamento de energia elétrica no início de 2001 (MME/EPE v.1, 2007).

Para enfrentar a crise, as autoridades elaboraram três planos de ação: o Programa Prioritário de Termelétricidade (PPT), o Programa de Energia Emergencial e o Plano de Revitalização do Modelo do Setor Elétrico (MME/EPE v.1, 2007).

---

Assim, em 24 de fevereiro de 2000, foi criado pelo Decreto N° 3.371 o Programa Prioritário de Termelétricidade - PPT, que se apresentava como decisivo para a diversificação da matriz de geração brasileira, cuja potência total deveria passar a ser 80% hidrelétrica e 20% termelétrica até 2009. O PPT previa incentivos de longo prazo (20 anos) para as térmicas emergenciais e garantia um despacho das mesmas na base. O PPT previa a entrada de 49 termelétricas, na maioria a gás natural, das quais a maioria não saiu do papel e outras poucas foram viabilizadas (MME/EPE v.1, 2007). Ainda assim, o reflexo do aumento da geração termelétrica nessa época pode ser observado na Figura 3.34.

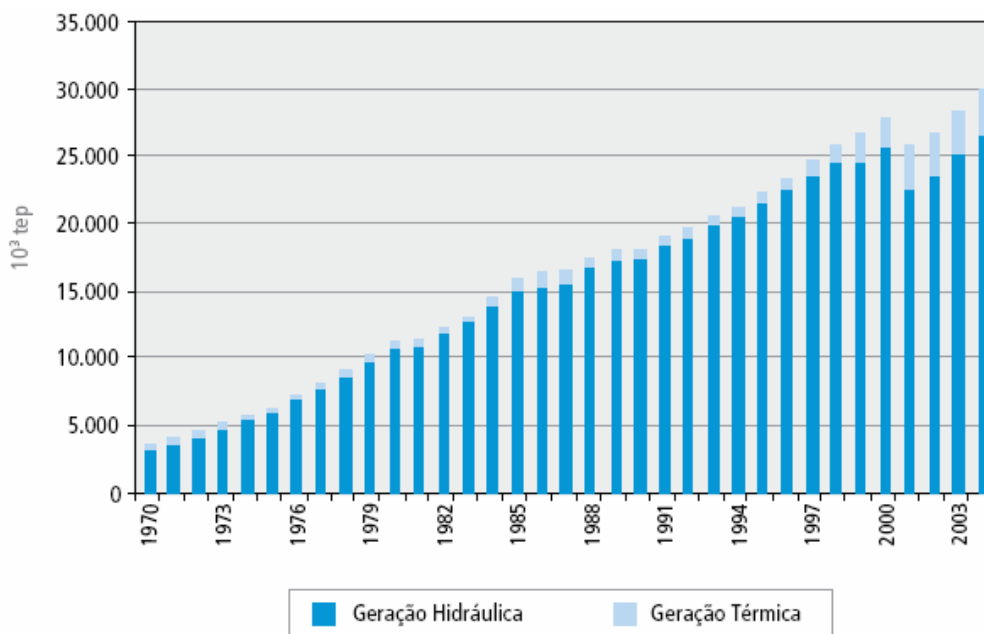


Figura 3.34 – Evolução de geração de eletricidade por tecnologia (MME/EPE v.1, 2007).

A análise da Figura 3.35 e Figura 3.36 comprova que a hidroeletricidade ainda é a opção natural do Brasil mesmo diante de barreiras ambientais cada vez mais restritivas aos aproveitamentos dos potenciais hidráulicos. De fato, tem sido crescente a dificuldade de licenciamento ambiental para novos empreendimentos

hidrelétricos (MME/EPE v.1, 2007). Tal fato tem sido acompanhado de uma expansão notável da geração termelétrica.

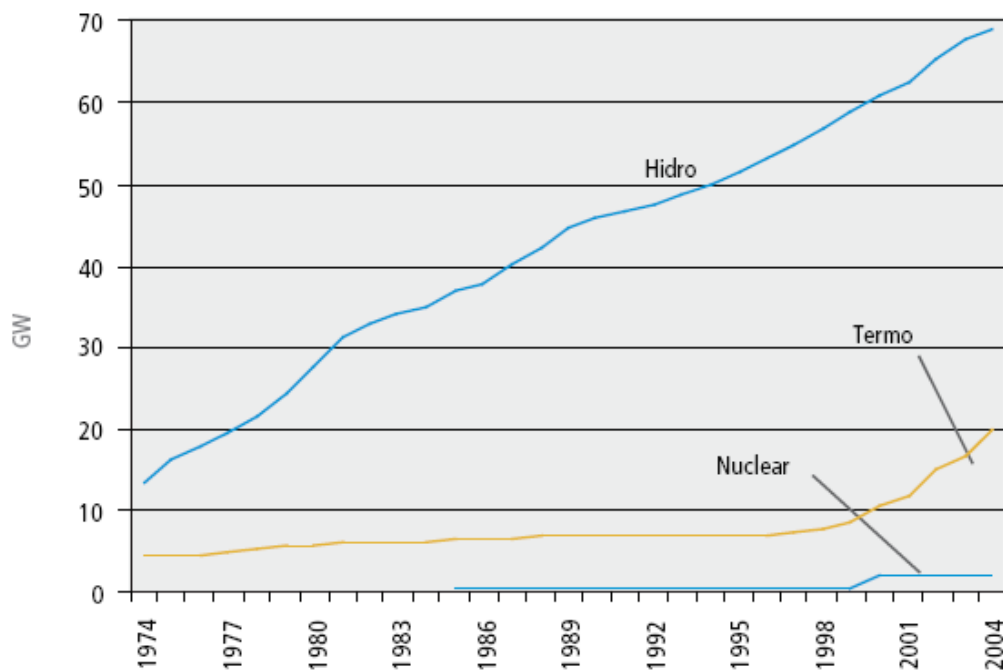


Figura 3.35 – Evolução da capacidade instalada de geração (MME/EPE v.1, 2007).

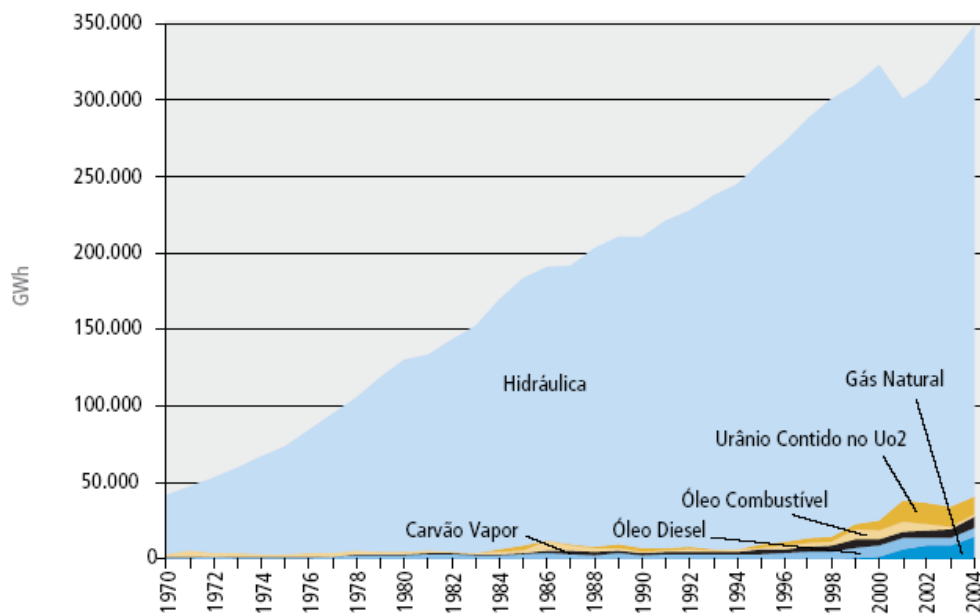


Figura 3.36 – Evolução da produção de energia elétrica por fonte (MME/EPE v.1, 2007).

Na geração térmica, são utilizados como combustíveis, principalmente, os derivados de petróleo tais como: óleo diesel e óleo combustível, que começaram a ceder espaço para a geração a partir do gás natural em meados da década de 90 (ver Figura 3.37).

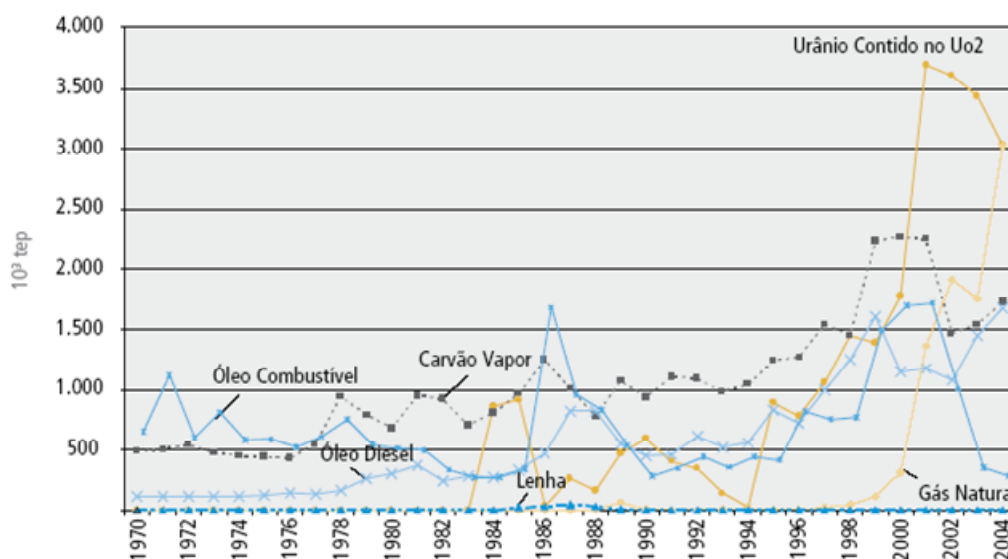


Figura 3.37 – Evolução do consumo de combustíveis na geração de eletricidade (MME/EPE v.1, 2007).

A geração de eletricidade a partir de usinas termelétricas, além de contribuir para mitigação dos riscos hidrológicos pela diversificação, conta também com a vantagem de localização próxima aos centros consumidores, diminuindo a necessidade de investimentos em transmissão (MME/EPE v.1, 2007).

Conforme Figura 3.38, a fonte principal de geração de energia elétrica no Brasil em 2010 foi a hidráulica com aproximadamente 81%, sendo 74,9% de geração própria e 6,3% de importação da usina hidráulica de Itaipu.

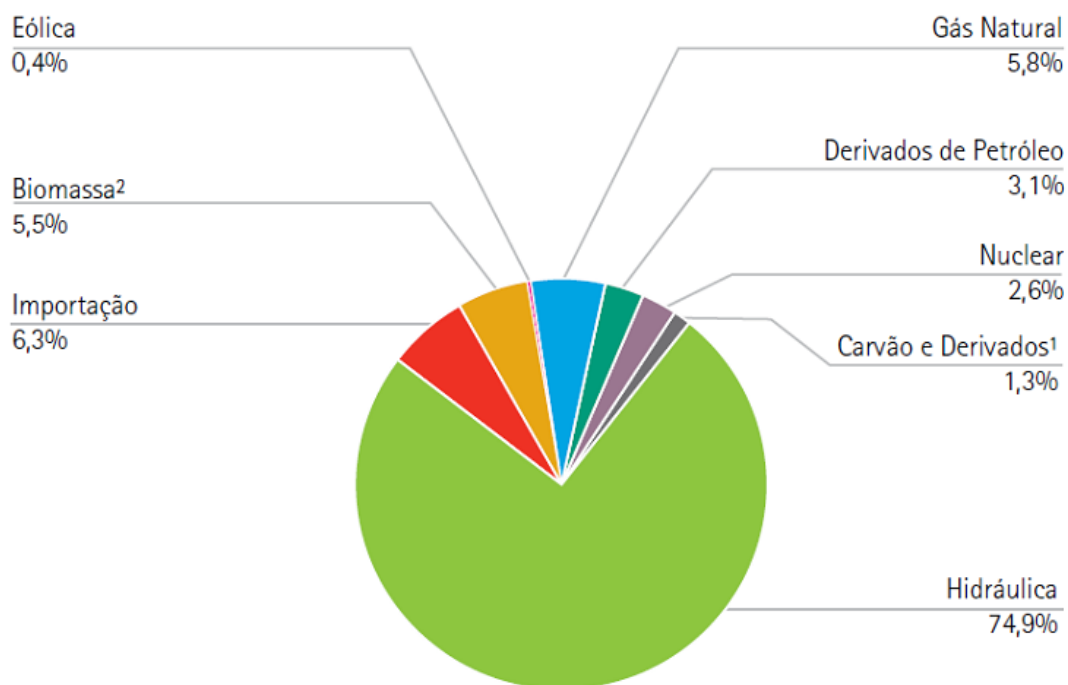


Figura 3.38 - Fontes de energia elétrica no Brasil em 2010 (BEN, 2011).

### 3.8 Efeito Estufa

O efeito estufa, fenômeno identificado pelo francês Jean Fournier, no século XIX, segundo SANTOS (2001), é o acréscimo constante da temperatura média da terra, em consequência do aumento da concentração atmosférica de alguns gases, tais como: Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), Metano ( $\text{CH}_4$ ), Óxido Nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Hidrofluorcarbonos (HFCs), Perfluorcarbonos (PFCs) e Hexafluoreto de Enxofre ( $\text{SF}_6$ ).

Estes gases, hoje predominantemente emitidos pelo setor de transporte, pela indústria e por queimadas de florestas e pastagens, absorvem parte da radiação infravermelha devolvida pela terra ao espaço e provocam o aumento da temperatura atmosférica e as conseqüentes mudanças climáticas (BARROS, 2007).

Segundo BROWN-HUMES (2007), apesar de a mudança climática poder ser uma força se movendo lentamente os preços dos ativos mudarão acentuadamente, quando novas evidências chegarem ao mercado ou políticas forem mudadas.

O efeito estufa, as guerras e o desenvolvimento do setor primário fazem com que o investimento na pesquisa, produção, utilização e divulgação dos combustíveis de origem vegetal (biocombustíveis), principalmente o etanol e o biodiesel, se propague por todo o mundo (BARROS, 2007).

As emissões de CO<sub>2</sub> em 2008 atingiram 29.381 milhões de toneladas, sendo que à China e Estados Unidos correspondem a 41,3% do total. O Brasil teve participação de 1,2% das emissões de CO<sub>2</sub> conforme Tabela 3.14. Na China, a evolução das emissões de CO<sub>2</sub> vem aumentando rapidamente e no ano de 2009 atingiu 7.518 milhões de toneladas (ver Figura 3.39).

Tabela 3.14 – Emissão de CO<sub>2</sub> em 2008 (EIA, 2010)

| Países            | 10 <sup>6</sup> t | %     |
|-------------------|-------------------|-------|
| 1 China           | 6.550             | 22,3  |
| 2 Estados Unidos  | 5.596             | 19,0  |
| 3 Rússia          | 1.594             | 5,4   |
| 4 Índia           | 1.428             | 4,9   |
| 5 Japão           | 1.151             | 3,9   |
| 6 Alemanha        | 804               | 2,7   |
| 7 Canadá          | 551               | 1,9   |
| 8 Reino Unido     | 511               | 1,7   |
| 9 Irã             | 505               | 1,7   |
| 10 Coreia do Sul  | 501               | 1,7   |
| 11 Itália         | 430               | 1,5   |
| 12 México         | 408               | 1,4   |
| 13 Austrália      | 398               | 1,4   |
| 14 Arábia Saudita | 389               | 1,3   |
| 15 Indonésia      | 385               | 1,3   |
| 17 Brasil         | 365               | 1,2   |
| Outros            | 7.816             | 26,6  |
| Mundo             | 29.381            | 100,0 |

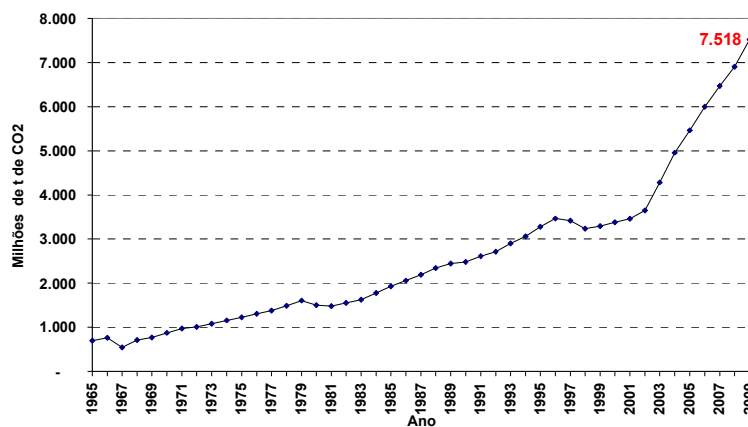


Figura 3.39 – Emissão de CO<sub>2</sub> na China até 2009 (BP, 2010).

### **3.9 Eficiência Energética**

Em junho de 2011 foi publicada a Norma do Sistema de Gestão de Energia – ISO 50.001. A Nova Norma deve conduzir as reduções nos custos, nas emissões de gases de efeito estufa e outros impactos ambientais através da gestão sistemática da energia. Ela se aplica a todos os tipos e tamanhos de organizações, independentemente de quaisquer condições geográficas, culturais ou sociais. Segundo VIEIRA (2011), a adoção da Norma levará as organizações a um reconhecimento internacional para:

- programas corporativos de sustentabilidade;
- iniciativas de redução de custo com energia;
- gestão de demanda na cadeia de suprimento;
- envolvimento com acordos de redução de emissão de carbono;
- participação em acordos climáticos.

Face ao acelerado crescimento do consumo mundial de energia associado às incertezas quanto ao suprimento das necessidades futuras; pesquisas por novas fontes energéticas são complementadas por outras que objetivam o seu melhor aproveitamento através de diferentes tecnologias, o que pode adiar no tempo a previsão de crises energéticas, pelo menos nas próximas décadas (BARROS, 2007).

Estudiosos da década de 70, tais como Darley e Herberlin, trataram, tradicionalmente, a eficiência energética como uma variável técnica, mas estudos das últimas décadas consideram a “eficiência” também como uma variável comportamental (ESTER, GELLER, OLSEN, AIE), conforme CAVALCANTI (2005). Assim, a Eficiência Energética pode ser interpretada como a economia de energia

---

gerada para executar a mesma atividade antes realizada, seja pelo uso de um equipamento mais eficiente (característica técnica), ou mesmo de uma nova tecnologia, ou apenas pelo uso racional da energia (característica comportamental).

O mesmo estudo considera que a “substituição energética” de uma fonte por outra menos nobre, como é o caso da energia elétrica por energia solar para gerar energia térmica, gera uma eficiência energética no sentido da prioridade do uso de fontes mais econômicas ou menos competitivas (característica de substituição energética).

Conforme descrito, e de acordo com a proposta da nota técnica MME (2007), os mecanismos de eficiência podem ser classificados no que se refere a sua característica predominante: característica comportamental, característica técnica ou característica de substituição energética.

Países desenvolvidos, como os EUA e o Canadá, e em desenvolvimento, como a China e a Índia, com muitos recursos naturais, inclusive energéticos, e que, por conseguinte, tem atraído, a instalação de indústrias energo-intensivas, tem firmado parcerias público-privadas para otimizar o uso dos recursos energéticos disponíveis por estas indústrias, e minimizar os impactos ambientais negativos que elas inevitavelmente produzem (CARVALHO, 2005).

Estas parcerias têm envolvido sociedades para a exploração de potenciais energéticos e programas de eficiência energética e manejo ambiental de vários tipos, destacando-se os projetos de P&D para desenvolvimento de novas tecnologias poupadoras de energia e mitigadoras de impactos ambientais, e projetos de maximização do aproveitamento de resíduos industriais (BAJAY et al, 2010).

---

As experiências descritas a seguir foram selecionadas considerando seu potencial de aplicação à realidade brasileira e são apresentadas basicamente como exemplos. Foram excluídas dessa listagem as medidas genéricas referentes à proteção ambiental e ao desenvolvimento tecnológico, privilegiando-se as medidas mais focadas em resultados tangíveis e imediatos no campo energético. O texto foi adaptado de BAJAY et al (2010).

### **3.9.1 Programa de Eficiência Energética nos Estados Unidos**

Os Estados Unidos desenvolvem diversos programas de eficiência energética na indústria, incluindo a imposição de eficiências mínimas obrigatórias na produção e importação de alguns equipamentos de uso geral na indústria, como motores elétricos, caldeiras, fornos e transformadores de distribuição, de baixa tensão. Há padrões mínimos de eficiência impostos pelo governo federal e pelos governos estaduais. No caso dos padrões federais, eles são revistos a cada cinco anos, aproximadamente, pelo Departamento de Energia (Department of Energy - DOE) do governo americano (NADEL, 2006).

Destaque-se, também, a utilização com sucesso, nos EUA, de normas de gestão de energia na indústria, compatíveis com a ISO 9000 e a ISO 14000 (MCKANE, 2007).

#### **3.9.1.1 O Programa de Tecnologias Industriais**

Segundo BAJAY et al (2010) no âmbito do governo federal, o Escritório de Tecnologias Industriais do Departamento de Eficiência Energética e Energias

---

Renováveis, vinculado ao Departamento de Energia (DOE) do governo americano, é responsável pelo Programa Tecnológico Industrial (*Industrial Technologies Program* - ITP), que visa melhorar a eficiência energética industrial e minimizar os impactos das atividades industriais no meio ambiente (EIA/DOE, 2005; EERE/DOE, 2008). Os objetivos principais deste programa são:

- a diminuição da intensidade energética na indústria em 30% no ano 2020, em comparação com 2002;
- a implementação comercial de mais de dez tecnologias eficientes até 2010, através de parcerias público - privadas em projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D).

Este programa, que é uma parceria entre os setores público e privado, é dividido nos três subprogramas descritos a seguir, que possuem uma forte relação entre si (BAJAY et al, 2010):

- Indústrias energo-intensivas (*Energy Intensive Industry*): o objetivo deste programa é a realização de parcerias com empresas privadas em projetos de P&D voltados para o desenvolvimento de tecnologias que melhorem a eficiência energética em oito tipos de indústrias energo-intensivas nos EUA – produção de alumínio, papel e celulose, vidro, fundição de metais, indústria química, mineração, refino de petróleo e siderurgia.
  - Tecnologias de amplo uso na indústria (*Crosscutting Technologies*): este subprograma lida com tecnologias comuns a vários ramos industriais e que oferecem oportunidades de melhoria de eficiência energética; o foco é em programas de P&D nas áreas de combustão, materiais, sensores e sistemas de controle de processos, envolvendo tanto energia térmica como
-

eletricidade. O propósito deste programa é estimular a pesquisa e o desenvolvimento de equipamentos eficientes nestas áreas tecnológicas comuns.

- **Melhores práticas (*Best Practices*):** o conhecimento das melhores práticas encontradas na indústria auxilia as empresas a economizar energia e a melhorar a sua produtividade. O propósito deste subprograma é realizar diagnósticos energéticos e divulgar informações sobre as melhores práticas encontradas, para pequenas e médias indústrias. O subprograma contempla o desenvolvimento de softwares de dimensionamento e a realização de cursos de treinamento e publicações nas áreas de motores, bombas, ventiladores, aquecimento direto, vapor de processo e ar comprimido. Para dar apoio ao Best Practices, o DOE instalou os Centros de Avaliação Industrial (*Industrial Assessment Centers - IAC's*), que, através de parcerias com universidades e centros de pesquisa, realizam diagnósticos energéticos e divulgam informações para pequenas e médias empresas.

### **3.9.1.2 Os programas Estaduais de Energia**

O DOE também trabalha em conjunto com as secretarias dos estados através dos Programas Estaduais de Energia (*State Energy Programs – SEP's*), buscando a descentralização dos programas, em concordância com o ITP (EIA/DOE, 2006; EERE/DOE, 2008). Os subprogramas dos estados são:

- **Indústrias do Futuro (*Industries of the Future - IOF*):** a estratégia é atingir oito segmentos industriais energo-intensivos em diversos estados, buscando a diminuição do gasto com energia e o aumento da competitividade. Os segmentos são:
-

- indústria de alumínio,
  - química,
  - papel e celulose,
  - mineração,
  - metalurgia,
  - siderurgia,
  - refino de petróleo.
- O subprograma visa levar em conta as especificidades de cada estado na aplicação dos recursos. É diretamente ligado ao subprograma de Indústrias Energo Intensivas (*Energy Intensive Industry*) do ITP, que compreende os mesmos oito ramos industriais;
  - Projetos Especiais (*Special Projects*): financia programas, as melhores tecnologias e procedimentos (*Best Practices*), invenções e inovações nas áreas de motores industriais, vapor, ar comprimido e ciclos termodinâmicos combinados.

É importante ressaltar que há fortes relações entre os programas federais e os estaduais, ambos financiados pelo DOE, conforme ilustrado na Figura 3.40. Como aproximadamente 70% de toda a eletricidade industrial utilizada nos Estados Unidos provêm de motores elétricos, no âmbito dos SEP's foi elaborado um programa específico para os estados chamado de "Desafio dos Motores" (*Motor Challenge Program*). Os estados que mais se destacaram neste programa foram Alabama e Ohio (BAJAY et al, 2010).

---

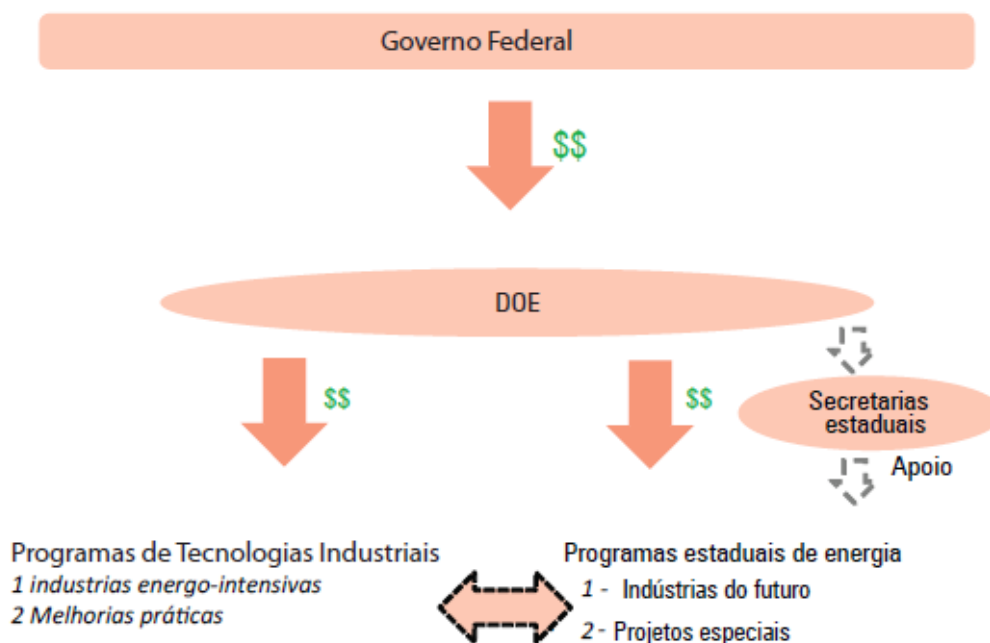


Figura 3.40 – Programas federais e estaduais de eficiência energética industrial financiados pelo DOE (BAJAY et al., 2010).

Um outro programa estadual interessante é o Projeto de Co-geração do Estado de Washington (*State of Washington's Combined Heat and Power Project*), realizado em parceria com a Universidade Estadual de Washington, que desenvolveu simulações e softwares para auxiliar a indústria em projetos de co-geração empregando ciclos combinados (BAJAY et al, 2010).

O Projeto Multi-Estados (*Multi-State Project*) visa a realização de workshops industriais voltados para pequenas e médias indústrias e concessionárias. O propósito deste programa é desenvolver capacitação profissional e disseminar informações após a desregulamentação dos setores de utilidade pública, enfatizando conceitos como a redução de consumo no horário de ponta, conservação de energia e desverticalização dos custos da energia (BAJAY et al., 2010).

### **3.9.1.3 Programas de Energia Elétrica e de Gás Canalizado**

Nos EUA, além dos programas dos governos estaduais e do governo federal, também há os programas de eficiência energética das concessionárias de eletricidade e de gás natural (Edison Electric Institute, 2007). Os Estados Unidos possuem um histórico de sucessos na realização de leilões de eficiência energética, ou programas de oferta-padrão, por concessionárias distribuidoras, utilizando monitoramento e verificação (M&V) dos resultados dos programas vencedores dos leilões e dos programas de oferta-padrão (Geller, 2006; Garcia, 2008). As ações de conservação envolvidas nestes leilões têm contemplado, entre diversas outras medidas em vários setores de consumo, a troca de motores em instalações industriais (BAJAY et al, 2010).

Através do subprograma Melhores Práticas é possível diminuir o consumo de energia através da troca, conversão ou melhoria da tecnologia existente por outra já disponível comercialmente. Os subprogramas Indústrias Energo-intensivas e o Tecnologias de Amplo Uso na Indústria buscam soluções no longo prazo, através do desenvolvimento de tecnologias que possam melhorar a eficiência energética de equipamentos industriais (foco em indústrias energo-intensivas e tecnologias de interface), visando sempre a implementação comercial. A Figura 3.41 ilustra as oportunidades de conservação de energia em processos industriais (EIA/DOE, 2006).

---

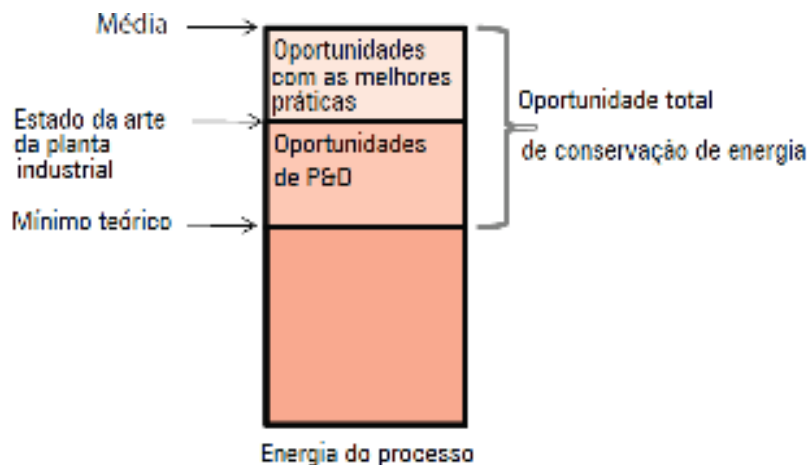


Figura 3.41 – Oportunidades de conservação de energia em processos industriais (EIA/DOE, 2006).

Além dos programas das concessionárias de gás e eletricidade nos Estados Unidos, algumas associações de classe não integrantes do programa “Industries of the Future” também promovem alguns programas de eficiência energética. Pode-se destacar a Associação dos Produtores de Cobre, que implantou um programa dirigido para motores elétricos industriais. Nos Estados Unidos também existem inúmeras ESCO’s, cujas atividades oferecerem serviços semelhantes às ESCO’s do Brasil (BAJAY et al., 2010).

### 3.9.2 Programa de Eficiência Energética da França

Na França, foram analisados os programas de eficiência energética, na indústria, da Agência do Meio Ambiente e de Gestão da Energia (Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Energie - ADEME), da Diretoria Geral de Energia e de Matérias-primas (Direction Generale de l’Energie et des Matieres Premieres - DGEMP) e da empresa estatal Electricité de France (EDF). A ADEME fica sob a tutela conjunta do Ministério da Ecologia, da Energia, do Desenvolvimento Sustentável e da Gestão do Território e do Ministério do Ensino Superior e da Pesquisa, enquanto que a DGEMP

faz parte do Ministério da Ecologia, da Energia, do Desenvolvimento Sustentável e da Gestão do Território. Seguem sínteses destas atividades (BAJAY et al, 2010)..

### **3.9.2.1 Agência do Meio Ambiente e de Gestão da Energia**

A ADEME atua no apoio à pesquisa, na realização de diagnósticos, na elaboração de ferramentas de apoio à gestão energética, na divulgação de informações, na concessão de incentivos fiscais e na capacitação profissional nos setores residencial, comercial, industrial e agrícola (AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAÎTRISE DE L'ENERGIE, 2008).

A Agência possui um grande acervo de informações relativas a gastos de energia que poderiam ser evitados em processos de filtragem, secagem, ar comprimido, produção e distribuição de frio, ventilação e processos químicos. São oferecidas, também, pela ADEME, algumas ferramentas que auxiliam na redução do consumo energético na indústria. Exemplos dessas ferramentas são guias técnicos e de gestão energética publicados pela ADEME e softwares como o Ventilation (ferramenta de otimização de instalações de ventilação). Além disso, a ADEME é o ponto de contato nacional, na França, para programas europeus de eficiência energética como o Motor Challenge (acompanhamento das empresas em seus processos de aumento de eficiência energética em sistemas motrizes) (Motor-Challenge, 2007) e o ProMot (plataforma de modelos e planilhas para otimizar sistemas motrizes em empresas industriais e do setor terciário) (ProMot, 2008).

Recentemente, foi criado o Fundo de Garantia de Investimentos em Conservação de Energia (Fonds de Garantie des Investissements de Maitrise de l'Energie -

---

FOGIME), direcionado para pequenas e médias empresas industriais, com o objetivo de incentivar a realização de projetos de conservação de energia (BAJAY et al., 2010).

### **3.9.2.2 Diretoria Geral de Energia e de Matérias Primas**

A Diretoria Geral de Energia e de Matérias-primas (DGEMP) é responsável por definir as políticas energéticas para a França, assim como garantir o seu abastecimento em fontes minerais (BAJAY et al, 2010).

A DGEMP tem, entre as suas atribuições (Direction Générale de l’Energie et des Matières Premières, 2008):

- analisar as perspectivas de evolução da matriz energética francesa;
  - coordenar pesquisas em matéria de eficiência energética, fontes renováveis de energia, combustíveis fósseis e energia nuclear;
  - elaborar regulamentos que visem melhorar a eficiência energética de equipamentos e edifícios (como inspeções periódicas de caldeiras, inspeções de prédios, classificação de redes de calor, e etiquetagem de aparelhos eletrodomésticos);
  - propor incentivos fiscais para equipamentos e materiais eficientes, do ponto de vista energético, assim como para alguns combustíveis, em certas aplicações, que se deseja incentivar;
  - estabelecer a obrigação da compra de excedentes de energia elétrica cogorada, pela estatal Electricité de France (EDF), dentro de limites pré-definidos.
-

Um outro mecanismo interessante aplicado pela DGEMP é o certificado de economia de energia, ou certificado branco. Este mecanismo obriga vendedores de energia, como a EDF, Gaz de France, e as redes de aquecimento distrital, a buscar economias de energia em um dado período. Do contrário, eles estarão sujeitos a penalidades financeiras. Para cumprir este objetivo, os vendedores têm liberdade para escolher, junto com seus clientes, as estratégias de conservação que julgarem mais adequadas: oferecimento de guias informativos, serviços de diagnósticos energéticos gratuitos, dispositivos de pré-financiamento, entre outros. Em 1 de janeiro de 2006, a DGEMP publicou uma lista de processos e equipamentos que podem ser envolvidos nesta certificação da economia de energia. Criou-se, também, a possibilidade destes certificados serem negociáveis, tornando, por conseguinte, mais dinâmico o mercado da eficiência energética (BAJAY et al, 2010).

A DGEMP também participa da formulação de regulamentos que visam a economia de energia. Há regulamentos na França sobre etiquetagem de aparelhos eletrodomésticos, etiquetagem de veículos, e publicidade no domínio da energia. No setor industrial, destaca-se o regulamento sobre eficiência mínima obrigatória de caldeiras e a sua fiscalização periódica (BAJAY et al., 2010).

As caldeiras de baixa capacidade (4 a 400 kW) devem ser fabricadas com uma eficiência mínima obrigatória, que é verificada antes de entrar em operação normal.

No caso das caldeiras de maior capacidade (400 kW a 50 MW), esta exigência de eficiência mínima deve ser cumprida durante toda a vida útil da caldeira. Ademais, é

---

imposta uma instrumentação de controle que permite a medição da eficiência da caldeira e da qualidade da combustão (BAJAY et al, 2010).

Para instalações térmicas cuja capacidade é superior a 1 MW, a legislação francesa prevê fiscalizações periódicas, através de visitas feitas por representantes de organismos técnicos credenciados, a fim de assegurar que se está respeitando a eficiência mínima prevista para estas instalações (BAJAY et al, 2010).

Na faixa de operação situada entre a capacidade nominal e um terço deste valor, a legislação francesa requer que caldeiras de alta potência (entre 400 kW e 50 MW) tenham eficiências mínimas. Estas variam com o tipo de combustível, conforme indicado na Tabela 3.15.

Tabela 3.15 – Eficiência mínima requeridas pela legislação francesa para caldeiras industriais com capacidade superior a 400 kW, por tipo de combustível (BAJAY et al., 2010).

| Combustível             | Eficiência mínima obrigatória (em %) |
|-------------------------|--------------------------------------|
| Óleo combustível leve   | 89                                   |
| Óleo combustível pesado | 88                                   |
| Combustível gasoso      | 90                                   |
| Carvão                  | 86                                   |

As caldeiras de recuperação térmica, cuja fonte de calor provém de gases de combustão de outras máquinas térmicas, estão isentas desta exigência de eficiência mínima (BAJAY et al, 2010).

As caldeiras de alta capacidade devem possuir os seguintes instrumentos, segundo a legislação francesa (BAJAY et al, 2010):

- Indicador da temperatura dos gases de combustão na saída da caldeira;
- Analisador de gás portátil para caldeiras de até 10 MW, e automático para capacidades superiores;

- Opacimetro manual para caldeiras até 10 MW, e contínuo para capacidades mais elevadas;
- Medidor de pressão para caldeiras até 2 MW, acoplado a sistema de registro para capacidades superiores
- Medidores de vazão do combustível e do fluido térmico;
- Um gravador de dados da pressão e da temperatura do vapor em caldeiras de capacidade nominal superior a 2 MW.

### **3.9.2.3 Companhia de Eletricidade Francesa**

A Electricité de France (EDF) propõe aos seus consumidores, através de um programa denominado Gestão da Demanda de Energia (Maîtrise de la Demande d'Énergie - MDE), várias maneiras de controlar sua demanda de energia elétrica (EDF, 2008). No contexto deste programa, a EDF oferece diagnósticos energéticos em prédios e instalações; disponibiliza uma ferramenta on-line – a di@lege, que permite um controle regular do consumo de energia dos seus clientes; oferece conselhos na escolha dos equipamentos elétricos mais adequados aos projetos dos clientes; e desenvolve soluções ambientalmente corretas com sua equipe de peritos (BAJAY et al., 2010).

Um grande número de projetos de P&D tem sido realizado pela EDF. Entre eles, podem ser destacados a gestão de novas fontes de energia diante de novos fatores de risco, utilizando a teoria de portfólios, e o desenvolvimento de simuladores estocásticos dos preços *spot* da energia elétrica (BAJAY et al, 2010).

---

Apesar da diversidade das ações da EDF no âmbito do programa MDE, suas prioridades residem em aspectos tarifários. O nível de interesse deste programa para o projeto é considerado médio (BAJAY et al., 2010).

### **3.9.3 Programa de Eficiência Energética do Japão**

O Centro de Conservação de Energia do Japão (Energy Conservation Center, Japan – ECCJ) tem como objetivo contribuir para a promoção do uso eficiente de energia, do desenvolvimento sustentável e da diminuição do aquecimento global. Os quatro programas envolvendo a indústria, coordenados pelo ECCJ, são: Plano de Ação Voluntário Ambiental Keidanren (Keidanren Environmental Voluntary Action Plan), Auditoria Energética em Fábricas (Energy Audit in Factories), Promoção de Projetos de Conservação de Energia (Energy Conservation Promotion Projects) e Melhoria de Sistemas de Co-geração (Improving Cogeneration Systems) (Energy Conservation Center, Japan, 2008).

O Plano de Ação Voluntário Ambiental Keidanren é um programa voluntário para a promoção do uso eficiente de energia, através de diagnósticos energéticos e divulgação de informações (guias práticos) nas indústrias energo-intensivas do Japão. Inicialmente, o programa foi concebido para as indústrias siderúrgica, química, papel, cimento e eletricidade. Mais recentemente, o programa foi estendido para outros ramos industriais, após uma revisão da Lei de Conservação de Energia japonesa (BAJAY et al, 2010).

O programa Auditoria Energética em Fábricas realiza diagnósticos energéticos gratuitos em pequenas empresas, visando uma orientação sobre métodos de

---

conservação de energia e melhor utilização dos recursos disponíveis. A partir destes diagnósticos é possível ter acesso a financiamentos e descontos na compra de equipamentos (BAJAY et al, 2010).

O programa Promoção de Projetos de Conservação de Energia financia projetos que minimizem desperdícios de energia, enquanto o programa Melhoria de Sistemas de Co-geração financia projetos voltados para a co-geração de energia. No Japão estimula-se as empresas a utilizarem ESCO's na análise e viabilização de projetos de conservação de energia (BAJAY et al., 2010).

#### **3.9.4 Programa de Eficiência Energética da União Européia**

A União Europeia é hoje composta por 27 países. Seu executivo é a Comissão Europeia e uma de suas divisões trata especificamente de questões ligadas a energia, promovendo, entre outras atividades, diversos programas intergovernamentais de fomento à conservação de energia (Commission Européenne - Energy, 2008).

Um dos principais programas da Comissão Europeia na área de energia se chama Energia Inteligente na Europa (Intelligent Energy Europe - IEE), que, na realidade, atua como um painel geral onde se agregam outros programas mais específicos, divididos por áreas de interesse e por setores de aplicação.

O programa IEE está dividido nas seguintes áreas: energia renovável, transporte, projetos de interesse inter-setorial, eficiência energética e países em desenvolvimento. Em cada uma dessas áreas existem diversos programas, alguns

---

dos quais de interesse para este projeto. Como exemplos, podem ser citados o Ceramim, direcionado para a indústria de cerâmica, o DEXA-MCP, que visa a disseminação de programas de eficiência energética na área de motores elétricos, o Cogen Challenge, que tem como objetivo a implementação de 1000 pequenas plantas de co-geração em cidades Europeias, e o EFFI, que apóia pequenas e médias empresas industriais através de serviços de gestão energética.

Um outro programa interessante da Comissão Europeia na área de energia, além do IEE, é o ManagEnergy, que fornece informações sobre estudos de caso, “melhores práticas”, legislação e subprogramas de fomento ao uso racional de energia à nível local e regional (ManagEnergy, 2008).

A Campanha Europeia de Energia Sustentável é um programa que tem por objetivo principal a conscientização de empreendedores e tomadores de decisão com relação à necessidade e os benefícios de aderir a programas de eficiência energética.

Há, também, um programa denominado “Concerto”, que agrupa 18 projetos envolvendo 46 cidades distribuídas por toda a Europa e que visa fomentar inovações em fontes renováveis de energia e eficiência energética (BAJAY et al., 2010).

Em seu portal na Internet, a Comissão Europeia disponibiliza informações sobre políticas energéticas em diversas áreas; são de interesse para este projeto as políticas na área de eficiência energética nos usos finais e nos serviços de energia, e na área de co-geração (BAJAY et al, 2010).

---

Na área de motores elétricos, a Comissão Europeia, junto com algumas agências governamentais nacionais, financiaram o desenvolvimento do programa ProMot, que serve como ferramenta de auxílio na seleção de motores eficientes, para usuários nos setores industrial e terciário (ProMot, 2008). Três outras ferramentas informáticas estão disponíveis no portal da Comissão: a EuroDEEM Internationale (base de dados de motores elétricos), o Módulo de Bombas e Variadores de Velocidade (que possibilita melhoramentos em sistemas de bombeamento), e o Módulo de Trocadores de Calor (calcula a eficiência energética de trocadores de calor à ar e à água) (BAJAY et al, 2010).

A ADEME (França), junto com outras agências nacionais de energia e com a Comissão Europeia, criou um banco de dados detalhado e indicadores energéticos para os 27 países membros da União Europeia, mais a Noruega e a Croácia. O conjunto constituído por esta base de dados e seus indicadores se chama Odyssee, está disponível na Internet e é regularmente atualizada com o apoio técnico da empresa de consultoria francesa Enerdata e da alemã Fraunhofer (Odyssee, 2008).

O Odyssee utiliza um indicador alternativo chamado ODEX (Odyssee Index), ao invés da já tradicional intensidade energética. O ODEX é um índice utilizado para os principais setores da economia, ou para a economia como um todo, e é calculado com base em indicadores de consumo específico por sub-setor, que são combinados em cada setor de consumo através de médias ponderadas, utilizando os consumos energéticos relativos destes sub-setores como pesos; estas médias são, então, transformadas em números índices. O mesmo procedimento é feito para

---

a economia como um todo, a partir dos números índices dos seus setores constituintes (World Energy Council, 2008). O ODEX se revela um indicador global, cuja maior utilidade é para comparações entre países (o ODEX foi desenvolvido para comparar intensidades energéticas nos países da União Europeia) (BAJAY et al, 2010).

A Comissão Europeia criou recentemente uma agência para gerenciar seus programas nas áreas de fontes renováveis de energia e de eficiência energética, a Agência Executiva da Energia Inteligente (Intelligent Energy Executive Agency) (World Energy Council, 2008).

### **3.9.5 Programa de Eficiência Energética do Brasil**

No Brasil, o setor industrial responde por 48% de toda energia elétrica consumida, sendo que os motores elétricos são responsáveis por 68% desse total (MME/EPE v.1, 2007). Na Figura 3.42 é apresentada a participação de cada setor no consumo de energia elétrica do país, com detalhe do setor industrial. Nesse setor existem as usinas siderúrgicas que utilizam grandes quantidades de energia. Nesse contexto, projetos de eficiência energética focados na economia de energia em processos acionados por motores elétricos são estratégicos para aumentar a competitividade e sustentabilidade de uma empresa.

---

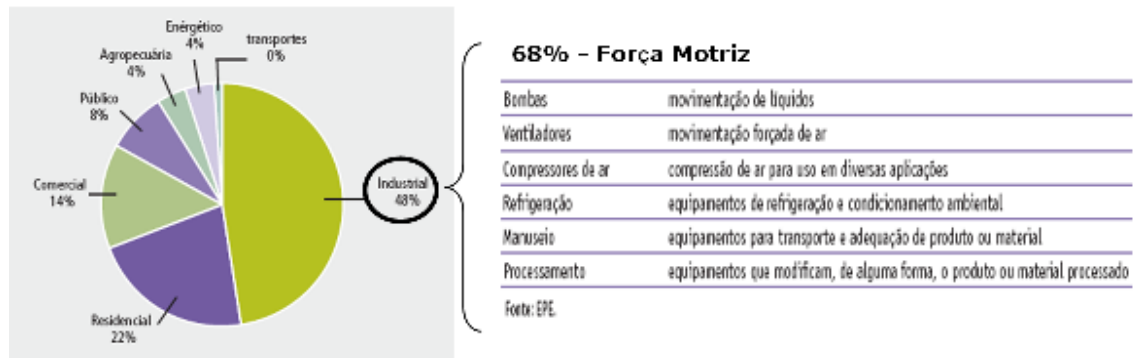


Figura 3.42 - Consumo de energia elétrica por setor (BEN, 2008).

A Eficiência Energética é um dos grandes desafios e oportunidades para o sucesso agora e no futuro, devido a:

- Uso extensivo da energia;
- Tarifas de energia sistematicamente crescentes em todos os países;
- Restrições ambientais e de recursos naturais para expansão da geração.

É importante, então, criar condições necessárias para desenvolver um mercado sustentável de eficiência energética para a indústria, visando aumentar a competitividade industrial.

A Empresa Siderúrgica conta com uma equipe de Eficiência Energética, e dentre as responsabilidades dessa Equipe está o mapeamento de equipamentos ou processos onde seja possível melhorar a eficiência energética.

Para a implantação do projeto de eficiência energética descrito nesta tese foram identificados equipamentos/processos com grandes potenciais de economia de energia elétrica, e o equipamento escolhido como piloto para esse projeto foi um

grupo motor/gerador de alimentação das pontes rolantes dos Fornos Elétricos a Arco da Aciaria.

O projeto foi executado utilizando o modelo de negócio conforme a Lei de Eficiência Energética da ANEEL, compilada no manual do programa de eficiência energética (ANEEL, 2008), com o apoio da CEMIG-D e suporte técnico da Efficientia S.A., responsável pelo processo de M&V (Medição e Verificação dos Resultados).

#### **3.9.5.1 Histórico da Eficiência Energética**

O Brasil vem desenvolvendo mecanismos de eficiência energética suportado principalmente por vários programas como o Programa Nacional do Álcool – PROÁLCOOL, os Programas PROCEL e CONPET e ações institucionais de relevada importância como a obrigação contratual das empresas distribuidoras de energia elétrica investirem um percentual de sua receita em Programas de Eficiência Energética (PEE) e a Lei de Eficiência Energética (MME/EPE v.11, 2007).

Uma ação estrutural que merece destaque é o estabelecimento de padrões e /ou etiquetas de eficiência energética dos equipamentos, de forma voluntária ou compulsória. A partir das ações adotadas na Califórnia, Estados Unidos, na década de 70, diversos países se sentiram motivados a repetir a experiência da implantação de padrões e etiquetas em vários produtos. Dentre outros, pode-se citar a França, Alemanha, Canadá, Japão, Austrália e o México. O Brasil começou a implementar seu programa, conhecido como Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) a partir de 1985.

---

A situação de incerteza relativa aos suprimentos mundiais de energia que apresentam, em determinados momentos, baixos e em outros, elevados preços do petróleo acompanhados de queda e incremento na demanda de energia, aliada aos sérios problemas ambientais associados à geração, transformação/transporte e utilização da energia, faz com que preocupações relacionadas ao uso eficiente da energia continuem a ser um importante componente da política energética de qualquer país.

No Brasil, no passado, os choques do petróleo de 1973-74 e 1979-81 criaram a percepção de escassez e elevaram os preços dos energéticos, justificando investimentos no aumento da produção de petróleo nacional, em conservação e maior eficiência no uso dos seus derivados e na diversificação de fontes alternativas de energia (MME/EPE v.11, 2007).

A estratégia adotada para reformulação da política de oferta de energia, contemplou a intensificação da prospecção de petróleo, o incremento da produção de carvão no país, o lançamento de um ambicioso programa nuclear visando à transferência de tecnologia nesta área e a construção de usinas nucleares para geração de energia elétrica, a criação do Programa Nacional do Álcool – PROÁLCOOL para produção de álcool anidro a ser misturado à gasolina, aproveitando a capacidade ociosa das indústrias de açúcar, e, no setor elétrico, foi dada continuidade à expansão da base hídrica para geração de eletricidade, que resultou em sobra de energia nos anos 80.

A demora no ajuste da economia brasileira à conjuntura internacional desfavorável, após 1973, colocou o país numa séria situação por ocasião do segundo choque do

---

petróleo, levando o governo a adotar medidas austeras em 1980, que resultaram numa recessão econômica sem precedentes e afetaram fortemente o setor industrial no período 1981-83.

Assim, pode-se citar como um primeiro esforço institucional de conservação de energia, com metas claramente definidas e na área de combustíveis líquidos, o Protocolo assinado, em 1979, pelo então Ministério da Indústria e do Comércio, prevendo uma redução de 20% do consumo de combustíveis através de automóveis a álcool. Ou seja, foi o primeiro programa efetivo assinado e implementado no Brasil formalmente na área de combustíveis líquidos. Enquanto a primeira fase do PROÁLCOOL após 1973 tratava do álcool aditivado, a segunda fase, após 1979, necessitava de motores desenvolvidos para funcionarem com álcool hidratado (não apenas com a adição do álcool a gasolina). Com esse programa se colocava a questão da introdução de novas tecnologias e não apenas o aperfeiçoamento dos automóveis que já existiam (MME/EPE v.11, 2007).

Em paralelo a essa questão da utilização dos automóveis movidos 100% com álcool hidratado, passou-se também a focalizar com maior intensidade a questão do óleo combustível consumido nas indústrias. Além da política de aumento de seu preço praticada a partir de 1980, o Conselho Nacional de Petróleo (CNP) impôs cortes lineares de 10% e 5%, respectivamente, no fornecimento de óleo combustível e diesel à indústria e implantou um sistema de controle de abastecimento através de cotas de combustíveis até 1983.

---

Diante da impopularidade gerada no meio empresarial com a adoção desse conjunto de medidas, o Governo Federal lançou, em 1981, o programa CONSERVE. Este Programa, que tinha como objetivo estimular a conservação e substituição do óleo combustível consumido na indústria constituiu-se no primeiro esforço de peso na direção da conservação de energia no país. Foram desenvolvidos protocolos que produziram efeitos sobre a eficiência energética de setores como os de cimento, siderurgia e papel/celulose. Entretanto, o que se verificou foi a predominância de um enfoque em termos de substituição energética, em prejuízo da diretriz primordial de conservação de energia. Ao lado dessa distorção, houve ainda um subaproveitamento dos recursos alocados ao Programa, devido à burocracia dos processos envolvidos, ao clima de recessão do período 1981-85, conferindo menor importância às iniciativas de conservação, e à falta de uma sinalização clara pelo governo quanto aos rumos das políticas econômica e energética (MME/EPE v.11, 2007).

Outro instrumento de política utilizado foi o incentivo à substituição de óleo combustível por energia elétrica de origem hidráulica, em aplicações térmicas. O quadro recessivo da economia verificado em 1981, com reflexos na redução da demanda de energia elétrica, resultou numa certa ociosidade da capacidade instalada do parque gerador de energia elétrica do país. Com o intuito de se aproveitar o excesso de capacidade de geração hidráulica, foi criada a EGTD (Energia Garantida por Tempo Determinado), com preços 30% menores que os normais, tendo como alvo o setor industrial, já pressionado pelos altos preços dos derivados de petróleo (MME/EPE v.11, 2007).

---

A EGTD teve o seu fornecimento garantido até o final de 1986, a fim de se permitir a amortização dos investimentos na instalação ou conversão de equipamentos pelas indústrias.

Na maior parte dos programas mencionados anteriormente, os resultados obtidos foram consideráveis, conduzindo a ganhos reais principalmente em termos de substituição de combustíveis derivados de petróleo. Contudo, com exceção do PROÁLCOOL, a maioria desses programas foram descontinuados com a queda dos preços do petróleo na segunda metade dos anos 80, tornando difícil justificar programas de conservação em um cenário de preços decrescentes e de abundância de petróleo. Além disso, com o processo inflacionário instalado nessa época no país, o governo passou a controlar os preços dos combustíveis como forma de conter o seu peso sobre a inflação, anulando boa parte dos esforços de conservação obtidos no passado (MME/EPE v.11, 2007).

Porém, novos problemas ganhavam destaque e visibilidade política. Com a crescente utilização da eletricidade para fins térmicos no setor industrial, promovida, parte pelo CONSERVE, parte pelo programa de Eletrotermia, verificou-se que, na verdade, ocorreu uma transferência da responsabilidade sobre a conservação de energia para o setor elétrico, uma vez que o crescimento da demanda por energia elétrica para fins térmicos na indústria passou a pressionar a capacidade de oferta do setor, que se encontrava mergulhado em crise financeira. A já limitada capacidade de expansão da oferta de energia elétrica passou também a ser pressionada dentro de um contexto de crescente valorização do meio ambiente e de questionamentos pelo grande desperdício de energia no país. Além disso, a tarifa de

---

energia elétrica passou também a ser utilizada como instrumento de combate inflacionário, durante a década de 80, inviabilizando o financiamento da expansão do sistema elétrico (MME/EPE v.11, 2007).

Dessa forma, a estratégia adotada diante da conjuntura existente foi a implementação de uma política de conservação de energia elétrica, que resultou na criação do PROCEL em 1985, constituindo-se assim na primeira iniciativa sistematizada de promoção do uso eficiente de energia elétrica no país. Entretanto, as barreiras à conservação de energia, a exemplo da contenção tarifária, legislação inconsistente e falta de interesse de consumidores e concessionárias, conduziram o PROCEL por várias fases de transformações, incluindo sua estagnação no período 1990-91. Visando conferir credibilidade às ações do Programa, criou-se o Grupo de Apoio à Secretaria Executiva do PROCEL - GASE, composto por cerca de 60 instituições nacionais e internacionais voltadas para atuar de forma complementar e integrada na área de eficiência energética, constituindo-se, na época, no principal elemento do processo de revitalização do PROCEL, iniciado a partir de 1994 (MME/EPE v.11, 2007).

Seguindo o modelo adotado pelo PROCEL, decidiu-se criar um programa análogo para o setor de petróleo e gás natural, sendo instituído assim, em 1991, o CONPET. Com atividades fundamentalmente de articulação, a atuação do CONPET no passado restringia-se basicamente à concepção da conservação e ao estabelecimento de parcerias com consumidores finais de combustíveis e com os demais órgãos da PETROBRAS (MME/EPE v.11, 2007).

---

Além de se dedicarem a fontes de energia distintas, no passado, nenhuma coordenação existia entre o PROCEL e o CONPET, no sentido de se estabelecer uma política integrada de eficiência energética, que possibilitasse ampliar a escala dos esforços empreendidos isoladamente e assegurar o aproveitamento do potencial de sinergia existente (MME/EPE v.11, 2007).

Porém, o fato de já existirem programas estabelecidos nas áreas de eletricidade e de petróleo, por si só, fornecem sustentação ao argumento da integração de esforços e geração de economias de escala. O momento é propício para se dar início à sua implementação. Existe hoje mais reconhecimento de que a eficiência energética está intrinsecamente associada ao aumento da produtividade e a benefícios ao meio ambiente. A reforma do setor elétrico, particularmente no tocante à criação da ANEEL e à privatização das distribuidoras de energia, vem agregar novo incentivo aos programas de conservação, com a vinculação contratual de parcela da receita anual das Concessionárias privatizadas em programas de combate ao desperdício de energia elétrica (MME/EPE v.11, 2007).

Outro argumento importante a ser considerado é a crescente importância conquistada pelos indivíduos enquanto consumidores, que, gradativamente, tornam-se mais exigentes, cobrando qualidade de bens e serviços a eles oferecidos. No caso particular da energia elétrica, se começa a fazer uma avaliação da relação entre o serviço oferecido e a tarifa praticada (MME/EPE v.11, 2007).

Merece também atenção a questão da qualidade e produtividade da indústria nacional, principalmente das empresas energo-intensivas, que concorrem em um

---

mercado global; programas bem sucedido de conservação de energia podem melhorar substancialmente sua posição competitiva neste mercado (MME/EPE v.11, 2007).

Entende-se que o grande desafio, hoje, é tornar sustentável o mercado e a atividade empresarial da eficiência energética no Brasil. O Estado deve se valer do seu aparato para fomentar os agentes econômicos, alocando recursos públicos já assegurados em lei, segundo prioridades definidas por relações benefício/custo favoráveis, visando sempre o desenvolvimento e consolidação de estruturas que tornem esse mercado, a médio e longo prazo, capaz de prescindir da intervenção governamental. Obviamente, não se pretende abrir mão da permanente atribuição de formulação política, tampouco da ação reguladora e fiscalizadora, que lhe competem, estruturalmente (MME/EPE v.11, 2007).

Foi publicada em 19 de outubro de 2011 pelo Ministério de Minas e Energia a PORTARIA MME Nº 594, DE 18 de outubro de 2011, que aprova o "Plano Nacional de Eficiência Energética - PNEf - Premissas e Diretrizes Básicas. Resumindo, o PNEf visa orientar (PNEE, 2011):

- Um conjunto de projetos prioritários e consistentes, a serem conduzidos sob orientação do MME, em articulação com os demais agentes de Governo.
  - A inserção da eficiência energética no planejamento do setor energético, em consonância com a Matriz Energética Nacional – MEN, o Plano Nacional de Energia – PNE e o Plano Decenal de Energia Elétrica – PDEE.
-

- O planejamento estratégico e a definição de ações prioritárias dos Programas Nacionais de Conservação de Energia – PROCEL e CONPET e outros que venham a ser definidos para áreas específicas.
- A formulação de mecanismos regulatórios eficazes e de instrumentos de fiscalização pelas agências de regulação do setor energético – ANEEL e ANP.
- A concessão de financiamentos pelos agentes financeiros oficiais em consonância com as diretrizes e linhas de ação estabelecidas.
- A política de P&D para a área de eficiência energética por meio da articulação dos recursos e das instituições envolvidas.
- A concepção e a implementação de projetos de eficiência energética das empresas distribuidoras do setor, em cumprimento aos regulamentos estabelecidos pelas agências reguladoras.

### **3.9.5.2 Lei de Conservação de Energia**

Marco importante para a eficiência energética no Brasil ocorreu, em 17 de outubro de 2001, com a sanção pelo Presidente da República da Lei nº 10.295 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. A lei prevê, em seu artigo 2º que o poder executivo estabelecerá “níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados e comercializados no país”. O Decreto nº 4.059, de 19 de dezembro de 2001, instituiu o Comitê Gestor de Indicadores e de Níveis de Eficiência Energética – CGIEE, que possui como atribuições, dentre outras, a elaboração das regulamentações específicas para cada tipo de aparelho consumidor de energia e o estabelecimento do Programa de Metas

---

com indicação da evolução dos níveis a serem alcançados por cada equipamento regulamentado (MME/EPE v.11, 2007).

Vários países vêm adotando, há algum tempo, ações semelhantes às preconizadas na Lei nº 10.295. Entre eles, pode-se citar o governo japonês, que, em 1993, efetuou uma revisão da sua “Lei de Conservação de Energia”, incorporando inicialmente preocupações ambientais. Em seguida, promulgou-se uma nova lei, a “Lei Complementar da Conservação de Energia”. A política energética definida por estes países trata, entre outras questões, da promoção de equipamentos e sistemas energéticos mais eficientes, estabelecendo programas de financiamento e redução de impostos para promover investimentos, por parte da indústria e do comércio, em equipamentos mais eficientes; aceleração do desenvolvimento e da difusão de tecnologias de conservação de energia e a promoção de sistema de etiquetagem com relação à conservação de energia em equipamentos. Assim, em 1995, os governos japonês e americano criaram o programa internacional denominado “Energy Star”, estabelecendo padrões de eficiência para equipamentos de escritórios automatizados. Os setores industrial, comercial e de transportes também seguiram nesta mesma direção. Várias normas foram estabelecidas com base na lei japonesa denominada “Lei da Conservação da Energia”. Tais normas se aplicam à operação de plantas industriais (por exemplo, a obrigatoriedade do gerenciamento energético da planta ser efetuado por profissionais devidamente capacitados), à construção de edifícios (por exemplo, a obrigatoriedade de adotar medidas que minimizem as perdas de energia térmica através das paredes externas, janelas, e utilização de equipamentos de ar condicionado, e sistemas de ventilação e

---

iluminação eficientes) e à fabricação de equipamentos (padrões mínimos de eficiência e sistemas de etiquetagem) (MME/EPE v.11, 2007).

A produção de equipamentos com inovações tecnológicas e mais eficientes energeticamente geram benefícios não apenas para o setor energético, mas também para outras áreas e setores da sociedade. Assim, por exemplo, quando se estimula o aperfeiçoamento tecnológico com o objetivo de reduzir o consumo de energia numa máquina de lavar roupa, pode-se obter, como consequência, um consumo menor de água. Estas inovações tecnológicas também podem trazer benefícios para o meio ambiente, como o desenvolvimento de refrigeradores eficientes livres de CFC (MME/EPE v.11, 2007).

Prescreve a Lei de Eficiência Energética, no caso brasileiro, que cabe ao Poder Executivo estabelecer os níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País, com base em indicadores técnicos pertinentes. Visando dar alcance de longo prazo dos efeitos da Lei, também é previsto o estabelecimento de um Programa de Metas que possibilite a progressiva evolução dos referidos níveis de eficiência (MME/EPE v.11, 2007).

Os procedimentos para a efetiva implementação deste instrumento legal foram regulamentados por intermédio do Decreto nº 4.059/01. Nesta ocasião foi instituído o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética - CGIEE, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia. Compõem também o CGIEE representantes dos Ministérios de Ciência e Tecnologia; Desenvolvimento, Indústria

---

e Comércio Exterior; ANEEL e ANP; bem como representantes da sociedade e da academia brasileiras (MME/EPE v.11, 2007). .

Compete ao CGIEE elaborar plano de trabalho e cronograma, bem como a regulamentação específica e o plano de metas relativo a cada máquina ou aparelho consumidor de energia. Para tanto, vale-se o CGIEE de Comitês Técnicos para instruir suas decisões e acompanhar o respectivo processo de regulamentação (MME/EPE v.11, 2007).

É importante assinalar que a Lei ao instituir inúmeras instâncias para interação com os agentes interessados: fabricantes, consumidores e organismos da sociedade civil. Assim, é prevista a convocação de consultas e audiências públicas, bem como o apoio técnico do INMETRO, PROCEL e CONPET. Assim, busca-se assegurar a maior transparência possível no estabelecimento dos indicadores de eficiência energética.

A Lei nº 10.295/01 também prevê que os níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País, devem ser estabelecidos com base em valores técnica e economicamente viáveis, considerando a vida útil das máquinas e aparelhos consumidores de energia. Em até um ano a partir da publicação desses níveis, deve ser definido um Programa de Metas para sua progressiva evolução. Os fabricantes e os importadores de aparelhos consumidores de energia serão obrigados a adotar as medidas

---

necessárias para que sejam obedecidas as regulamentações específicas e os programas de metas (MME/EPE v.11, 2007). .

O CGIEE iniciou seus trabalhos em julho de 2002 e obteve resultados concretos que se traduzirão em economia de energia significativa para o país ao longo do tempo.

Foram desenvolvidos os seguintes produtos principais:

- Plano de Trabalho para Implementação da Lei;
- Regulamentação Específica de Motores Elétricos Trifásicos;
- Regulamentação Específica das Lâmpadas Fluorescentes Compactas;
- Consulta e Audiências Públicas das Regulamentações Específicas dos seguintes equipamentos: refrigeradores e congeladores; condicionadores de ar; fogões e fornos;
- Minuta da Regulamentação Específica de Aquecedores de Água;
- Regulamentação para Etiquetagem Voluntária do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais e Públicos.

Para dar continuidade aos trabalhos, faz-se necessário o desenvolvimento de uma série de estudos para fornecer suporte técnico e operacional para embasar as decisões do Comitê Gestor. O ineditismo deste tipo de trabalho no país e a complexidade dos assuntos tratados exigem um esforço contínuo de pesquisa e de desenvolvimento de trabalhos técnicos.

A consolidação da implementação da Lei de Eficiência Energética irá produzir, como consequência, os seguintes fatos (MME/EPE v.11, 2007):.

---

- Retirar do mercado, no médio e longo prazo, os equipamentos menos eficientes energeticamente;
- Obter progressiva economia de energia ao longo do tempo;
- Promover o desenvolvimento tecnológico, através da fabricação de equipamentos energeticamente mais eficientes;
- Promover o aumento da competitividade industrial do país;
- Reduzir os gastos dos consumidores;
- Contribuir para a redução dos impactos sócio-ambientais através do uso de equipamentos que consomem menos energia.

Para alcançar estes objetivos de forma adequada, a tomada de decisão sobre o estabelecimento dos níveis de eficiência energética dos equipamentos requer amplo e sólido conhecimento sobre a realidade do mercado brasileiro, as características da indústria nacional, a capacidade dos consumidores de adquirir equipamentos eficientes, a infra-estrutura laboratorial disponível, as normas existentes e as possibilidades de inovação tecnológica (MME/EPE v.11, 2007).

### **3.9.5.3 Lei de Eficiência Energética**

Em 2000, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) divulgou a Lei nº 9.991, Lei de Eficiência Energética. De acordo com esta lei, as empresas concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica são obrigadas a aplicar, anualmente, o montante de, no mínimo, 0,5% de sua receita operacional líquida em pesquisa e desenvolvimento (P&D) do setor elétrico, e no mínimo 0,5% em programas de eficiência energética no uso final.

---

Do montante reservado a programas de eficiência energética no uso final, no mínimo 60% devem ser aplicados em programas destinados à baixa renda (fornecimento de equipamentos mais eficientes - lâmpadas, geladeiras, aquecedores, etc.) e projetos especiais (em entidades sem fins lucrativos) e, no máximo, 40% podem ser aplicados em projetos de eficiência energética (ANEEL, 2000).

O Programa de Eficiência Energética (PEE) é controlado pela ANEEL.

Todos os projetos de eficiência energética cujo beneficiário tenha fins lucrativos, devem ser feitos mediante Contrato de Desempenho, conforme Artigo 5º da Resolução ANEEL 176 de 28 de novembro de 2005.

A Lei de Eficiência Energética obedece aos seguintes critérios (ELETROBRAS / PROCEL, 2007):

- A recuperação do investimento por parte da Concessionária será parcelada, com parcelas limitadas ao valor da economia verificada;
  - O período de pagamento não poderá ser superior à vida útil das ações de eficiência energética implantadas;
  - Reembolso das despesas com equipamentos e mão-de-obra (possível graças à legislação específica);
  - Os valores recuperados por meio de Contrato de Desempenho voltam para a conta de Eficiência Energética da Concessionária e passam a fazer parte das obrigações de investimento em projetos de eficiência energética.
-

### **3.9.6 Exemplos de Ações Implantadas na Indústria Siderúrgica**

Segundo BISIO et al. (2001), com o aumento no custo da energia após a crise de 1970, especialmente no Japão e na Alemanha, surgiu a necessidade de se fabricar caldeiras cada vez mais eficientes. Este fato resultou em um processamento e operação deste equipamento, com maior segurança, e em novas caldeiras com uma melhor utilização da exergia (FUJII et al., 1980; THEKDY e VEREEKE, 1981). Os métodos mais utilizados nos processos industriais, são:

- controle da combustão do ar adicional;
- recuperação do calor do gás de combustão;
- enriquecimento do oxigênio do ar de combustão para reduzir o consumo de combustível total;
- enriquecimento do oxigênio do ar de combustão para substituir parte de um combustível de maior PCI (por exemplo gás natural ou gás de coqueria) por um de menor PCI (por exemplo, gás do alto-forno).

O uso racional de energia se tornou uma prioridade para todas as indústrias no Brasil, depois do racionamento de energia em 2001. Na Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), o gás de alto-forno e o gás de coqueria são utilizados para gerar energia elétrica e vapor para o processo. MODESTO e NEBRA (2006) desenvolveram um estudo que contempla uma análise energética e exergética global da planta e também dos equipamentos principais que a compõem. Os balanços de massa, energia e exergia nos equipamentos, possibilitam a análise em questão, identificando as possíveis fontes de irreversibilidades do sistema. As análises energéticas e exergéticas fornecem um diagnóstico do desempenho

---

térmico da planta, de maneira global, permitindo identificar onde se devem executar melhorias para o aumento de seu desempenho.

A oportunidade de utilização de combustíveis residuais dos processos produtivos das empresas Vallourec e Mannesmann Tubes do Brasil (gás de alto-forno e alcatrão vegetal), aliada à crise de energia, motivou a construção de uma unidade de co-geração. A construção da Usina Termelétrica Barreiro teve início neste período de crise, entrando em operação em fevereiro de 2004, com o fornecimento de uma energia limpa e segura, que corresponde a 30% da necessidade da empresa. Segundo SOUZA et al. (2004), o projeto envolveu uma parceria, em que a Vallourec cedeu o terreno, fornece o combustível e outros insumos, e consome toda energia gerada, e a Companhia Elétrica de Minas Gerais (CEMIG) responde pelo investimento, operação e manutenção do sistema implantado.

Segundo BARBOSA et al. (2005), o centro de energia da Companhia Siderúrgica Tubarão (CST) é responsável, pela distribuição dos gases siderúrgicos (gás de alto-forno, gás de aciaria e gás de coqueria) para o sistema, conciliando a geração versus consumo, de forma a ordenar o balanço equilibrado e evitar os extremos de falta de atendimento ou de desperdício, a maximizar a produção de energia elétrica e a minimizar as perdas de gases.

O aumento da produção de placas da CST de 5 Mt/ano passando para 7,5 Mt/ano, a inserção da CST no Grupo Arcelor, as alterações no modelo de mercado livre de energia elétrica brasileiro, e as possibilidades do crédito de carbono, motivaram o estudo de viabilidade econômica do projeto de recuperação de energia normalmente

---

perdida dos topos dos altos-fornos n° 2 (existente) e n° 3 (em construção), através do investimento em turbina de topo. Foram estudados, para cada alto-forno, os cenários de venda da energia, compra e fornecimento para o Grupo Arcelor Brasil (BORGES *et al.*, 2006). O resultado do trabalho indicou o investimento na turbina de topo no alto-forno n° 2 com o cenário de consumo de energia do Grupo Arcelor Brasil. No entanto, para o alto-forno n° 3, a implantação da turbina de topo é viável em qualquer cenário proposto.

CARVALHO *et al.* (2006) estudaram e desenvolveram um modelo matemático e computacional para simular e controlar o processo de recozimento contínuo de uma bobina (tira) de aço silício em um forno de combustão industrial. Ambos os processos de combustão e aquecimento da tira foram simulados, a partir de balanços de massa e de energia. São consideradas variáveis importantes como composição, temperatura e pressão da mistura de gás de alto-forno e GLP, temperatura adiabática de chama e temperatura interna do forno, dos produtos de combustão e da tira. São apresentados a otimização do processo, as incertezas e os erros do software SIMCO - RB2, que foi utilizado. O uso do programa permitiu a antecipação de problemas de manutenção, redução de custos com paradas não programadas, assim como o controle e a análise das condições operacionais do forno em tempo real.

Para aproveitamento do gás de alto-forno de baixo poder calorífico, PAUBEL *et al.* (2006), desenvolveram um queimador, misturando GAF com  $\text{CH}_4$  de alto poder calorífico e utilizando oxigênio puro para queima dos combustíveis, obtendo uma chama estável e segura. GIEQUEL *et al.* (2002) realizaram um estudo teórico da

---

chama de um queimador em uma caldeira de uma empresa siderúrgica, para queima da mistura de gás de alto-forno e gás de coqueria em diversas proporções, com percentual de oxigênio no ar de 12,5% a 23,0% e temperatura do ar variando de 300 a 823 K. Foram utilizadas simulações teóricas das propriedades físicas e químicas do ar e dos combustíveis e foi feita a comparação com as condições reais.

O pré-aquecimento do ar e/ou enriquecimento do ar com oxigênio reduz o consumo de combustível. BOJIC e TOMIC (1996) utilizaram um forno Pusher industrial em condições reais de processo para aquecimento de placa, onde o combustível utilizado foi o gás natural misturado com o gás de alto-forno. As variáveis analisadas foram as temperaturas teóricas de combustão, o calor recuperado no trocador de calor, o consumo da mistura de combustível (gás natural e gás de alto-forno), a quantidade de gás de alto-forno na mistura e o consumo de gás natural. O resultado foi o seguinte: quanto maior a quantidade de gás de alto-forno na mistura e menor a quantidade de oxigênio no ar de combustão, obtém-se uma menor temperatura teórica de chama, menor rendimento, menor recuperação de calor e um consumo de mistura de combustível mais alto. Para uma vazão de GAF constante, aumentando a troca térmica do ar de combustão, o consumo de gás natural cai em 34% com 22% do oxigênio no ar; e com o oxigênio no ar em 25%, o consumo de gás natural cai somente 3%.

A fim de reduzir o consumo de combustível total ou substituir parcialmente um combustível com maior poder calorífico por outro de menor PCI no aquecimento industrial, o enriquecimento do ar de combustão com oxigênio e o pré-aquecimento podem ser muito eficazes. De acordo com BISIO et al. (2006), foi possível formular,

---

em aplicações reais, a substituição do gás natural por gás do alto-forno, utilizando o ar pré-aquecido e enriquecido com oxigênio, do ponto vista técnico e financeiro; elevando a temperatura do gás de combustão do forno com o enriquecimento do ar de combustão com oxigênio, sendo mais vantajoso o pré-aquecimento do ar de combustão, conforme Figura 3.43. Então, geralmente, tal enriquecimento é uma alternativa ao pré-aquecimento do ar pelo gás de combustão. Segundo ATREYA e EVEREST (2001), aproximadamente 40% da energia utilizada nas indústrias é perdida. Foi realizado um estudo no forno de reaquecimento de placas, com ar pré-aquecido e teores de oxigênio no ar variando de 21% a 45%, constatando-se um aumento de produtividade, uma melhoria da eficiência e uma redução das emissões.

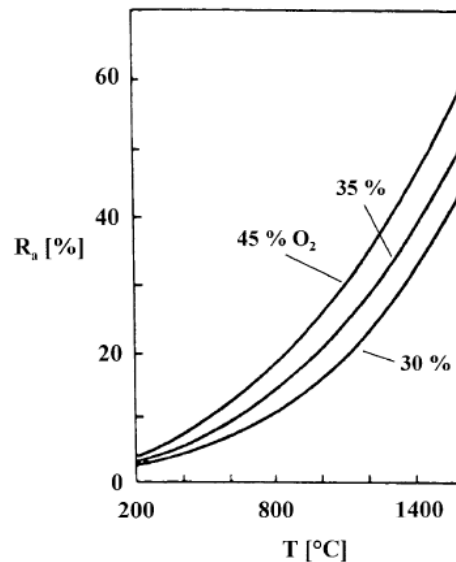


Figura 3.43 - Percentual de redução de combustível ( $R_a$ ) versus a temperatura dos gases de combustão ( $T$ ) com percentual de oxigênio como parâmetro. (BISIO et al., 2006).

## 4 METODOLOGIA

O desenvolvimento desta tese na Empresa Siderúrgica visa implantar uma estrutura para explorar as oportunidades tecnicamente viáveis de redução de custos, aumento de eficiência energética e captura dos benefícios ambientais dele decorrentes, buscando o aumento da competitividade. A metodologia foi desenvolvida pelo doutorando e foi dividida nas seguintes etapas:

- Etapa 1 - Gerenciamento da energia:
    - Inclui iniciativas realizadas no sentido de gerenciar a aquisição, distribuição e o consumo de energia, dentre as quais se destacam a alteração da matriz energética e a implantação de vários projetos para os vários energéticos utilizados.
  - Etapa 2 - Projeto piloto de eficiência energética:
    - Desenvolve o modelo de negócio inédito na Empresa Siderúrgica para ser aplicado em projetos com redução do consumo de energia elétrica.
  - Etapa 3- Desenvolvimento do projeto gás natural:
    - Ocorre a substituição do GLP pelo gás natural com a construção do gasoduto, rede de distribuição interna e adaptação dos equipamentos térmicos para utilizar gás natural.
  - Etapa 4 - Substituição do coque pelo carvão vegetal:
    - Descreve os resultados da substituição do coque por carvão vegetal, destacando-se a redução da emissão de CO<sub>2</sub>.
  - Etapa 5 – Otimização do gás de alto-forno:
    - Detalha o sistema de geração, distribuição e consumo do gás de alto-forno, incluindo o balanço de massa e energia para o mesmo.
-

- Etapa 6 - Processo de combustão:
  - Realiza o equacionamento da queima do gás de alto-forno, GLP e gás natural, misturado ou puro para atender as diversas variações do processo.

Todas estas etapas são discutidas a seguir.

#### **4.1 Gerenciamento da Energia**

Os energéticos energia elétrica e derivados de petróleo, consumidos pelos processos produtivos da Empresa Siderúrgica, no ano de 2005 representaram 10% no custo total de produção.

Para aumentar a competitividade da Empresa Siderúrgica, a matriz energética foi alterada, sendo o coque de carvão mineral substituído pelo carvão vegetal em junho de 2011 e o GLP pelo gás natural em abril de 2011.

Para a realização do gerenciamento da eficiência energética, este processo passou pela criação de uma equipe específica, qualificada para estudar e implantar projetos de eficiência energética. O autor da tese é coordenador desta equipe, que foi criada em janeiro de 2008 com quatro engenheiros, ligados à Gerência de Utilidades, e com uma equipe mínima de um engenheiro representando cada área da empresa, mas ligado a Gerência da Área específica. A Figura 4.1 mostra como foi estruturada a Equipe de Eficiência Energética da Empresa Siderúrgica.

---

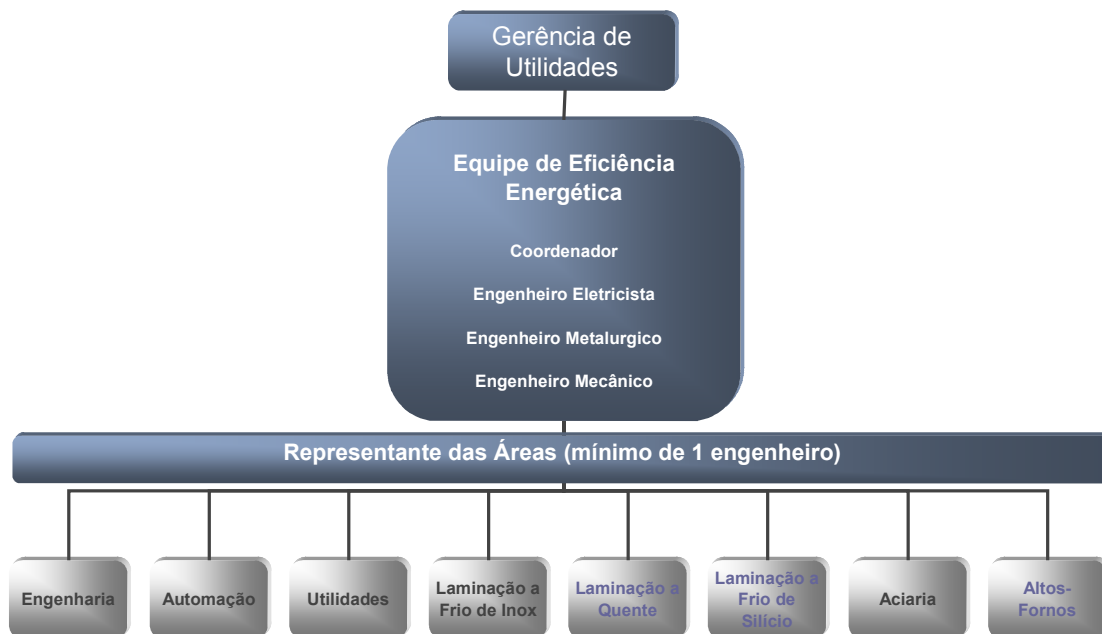


Figura 4.1 – Estrutura da equipe de eficiência energética da Empresa Siderúrgica.

A equipe tem o objetivo de gerenciar a energia na Empresa Siderúrgica buscando o menor custo, utilizando as mais avançadas técnicas de conservação de energia, em consonância com o planejamento estratégico da empresa. A equipe tem as seguintes atribuições:

- Identificar, nas áreas, as oportunidades de ganhos.
- Multiplicar a cultura de uso racional dos energéticos.
- Promover a sustentabilidade através do aumento da eficiência dos processos.
- Planejar e atuar na matriz energética da usina.
- Buscar as melhores práticas.
- Propor indicadores de eficiência energética.
- Acompanhar e intervir no perfil de consumo das utilidades.
- Subsidiar a área comercial para negociação de contrato dos energéticos.
- Elaborar relatórios para órgãos externos e internos.
- Prestar apoio aos projetos da área de utilidades.

- Realizar o balanço de massa, energia e CO<sub>2</sub> de toda a empresa.

A implantação de projetos para os vários energéticos pode ser resumida na Figura 4.2. Inicia-se com a gestão, a efficientização dos equipamentos e sistemas, mudança de hábitos e normas que tem um baixo investimento, mas com grande economia de energia. Em paralelo podem ser trabalhadas as modificações de processo, controle e automação e os limites tecnológicos que possuem investimentos e grau de complexidade elevado.

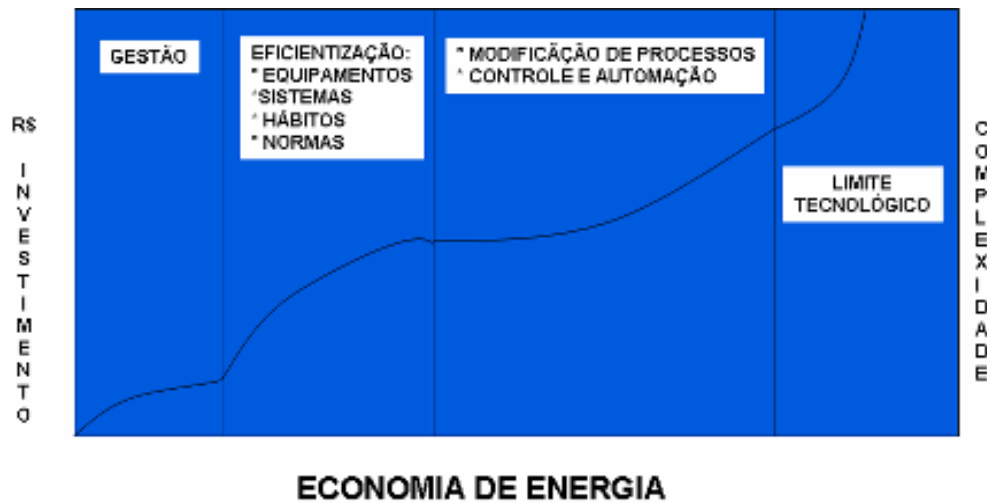


Figura 4.2 - Eficiência energética de uma instalação (VIEIRA, 2011)

Já foram desenvolvidos vários pequenos projetos e será apresentada a quantidade de energia economizada por energéticos, redução do CO<sub>2</sub> e o impacto em toda matriz energética. Foi utilizada a Tabela 4.1 como referência para o cálculo da economia realizada. O cálculo da energia e das emissões segue os preceitos do World Steel Association (WSA), entidade que reúne as principais organizações siderúrgicas do mundo.

Tabela 4.1 – Equivalência energética e emissão de CO<sub>2</sub> (WSA, 2008).

| <b>Energético</b>   | <b>Unid.</b>   | <b>Energia (MJ/Unid.)</b> | <b>Emissão de CO<sub>2</sub> (kg/Unid.)</b> |
|---------------------|----------------|---------------------------|---|
| GLP                 | kg             | 47,300                    | 2,985                                       |
| Gás Natural (GN)    | m <sup>3</sup> | 35,900                    | 1,877                                       |
| Óleo Diesel         | Litros         | 35,100                    | 2,601                                       |
| Óleo Combustível 1A | kg             | 37,700                    | 2,907                                       |
| Energia Elétrica    | kWh            | 9,800                     | 0,504                                       |
| Coque               | kg             | 30,100                    | 3,257                                       |
| Carvão Vegetal      | kg             | 18,810                    | 0,000                                       |

Foram escolhidos alguns dos trabalhos que tiveram a participação efetiva do autor desta tese e que agregam informação e conhecimento para o desenvolvimento da eficiência energética, principalmente na indústria siderúrgica.

## **4.2 Projeto Piloto de Eficiência Energética**

O projeto apresentado nesta tese foi implementado utilizando os recursos do Programa de Eficiência Energética (PEE), permitindo a execução de um projeto com condições especiais:

- O recurso financeiro pode ser tratado como prestação de serviço, sem caracterizar financiamento;
- O recurso financeiro é liberado mediante comprovação documental dos gastos com o projeto: equipamentos, instalação e serviços adquiridos pelo implementador das ações;
- Os pagamentos do montante disponibilizado pela concessionária só começam quando o benefício é verificado;
- As parcelas estão limitadas ao valor mensal da economia realizada.

O desembolso com o projeto de eficiência energética está representado na Figura 4.3, onde existem fases definidas para o projeto em termos de desembolso com energia elétrica e pagamento do projeto:

- Antes da implementação do projeto: a empresa tem um determinado desembolso com energia elétrica.
- Após a implementação do projeto: a empresa tem um desembolso menor com energia elétrica devido à economia de energia alcançada com a implementação do projeto. Nessa fase a empresa começa a reembolsar à concessionária (financiador) os recursos utilizados na fase de implantação do projeto, e também faz pagamentos mensais à ESCO (Energy Service Company) para remuneração dos serviços prestados de diagnóstico energético, medição e verificação. As parcelas pagas à ESCO e ao financiador são limitadas ao valor da economia de energia verificada.
- Após a amortização do projeto: a partir desse ponto a empresa passa a capturar os benefícios da economia de energia elétrica proporcionada pela implantação do projeto, além de ser a proprietária dos equipamentos instalados.

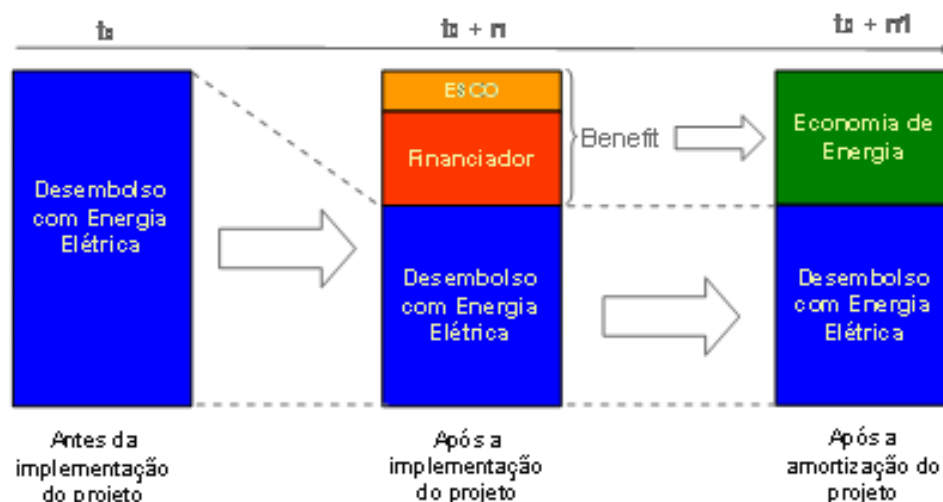


Figura 4.3 - Desembolso com o projeto de eficiência energética.

#### **4.2.1 Nivelamento do Modelo**

No início de 2009, a Empresa Siderúrgica teve conhecimento da Lei de Eficiência Energética e da oportunidade de implantação de projetos dessa natureza através do uso de recursos provenientes de concessionárias de energia elétrica. A equipe fez então contato com uma empresa fornecedora de equipamentos que havia executado um projeto de eficiência energética na Siderúrgica Barra Mansa (SBM) no Rio de Janeiro, utilizando como base essa Lei. O equipamento onde houve a aplicação deste projeto foi o desempoeiramento dos Fornos Elétricos a Arco (FEAs) da SBM, com características muito semelhantes ao mesmo equipamento da Empresa Siderúrgica em questão.

A Efficientia S.A – uma ESCO (Energy Service Company) – empresa do Grupo Cemig, apresentou então a metodologia de aplicação de projetos dessa natureza utilizando recursos financeiros da concessionária de distribuição de energia elétrica de Minas Gerais, a Cemig-D. Após amadurecimento da idéia e análise em conjunto com a aciaria e a oficina de motores da Empresa Siderúrgica, foi então definido que seria feito o diagnóstico energético do desempoeiramento dos FEAs 2 e 3 da Aciaria da Empresa Siderúrgica.

No segundo e terceiro trimestres de 2009 foram feitas análises da instalação atual do desempoeiramento dos FEAs. Com o apoio da Efficientia foram instalados os medidores para composição da linha de base do projeto. A equipe da Aciaria auxiliou com o fornecimento de informações e dados das etapas do processo dos FEAs. A composição das informações de processo associadas ao consumo de energia elétrica foi repassada ao fornecedor do equipamento proposto para o

---

projeto, com o objetivo de quantificar o potencial de economia de energia elétrica. A Efficientia realizou o diagnóstico energético, auditando a metodologia de cálculo do fornecedor e confirmando os resultados. Os resultados foram consolidados pela Empresa Siderúrgica e também foi quantificado o potencial de economia de energia elétrica em outro equipamento da Aciaria, o grupo motor/gerador de alimentação das pontes rolantes dos FEAs.

O projeto para o desempoeiramento dos FEAs consiste da instalação de inversores de frequência nos motores para variação da velocidade, e conseqüentemente controle da vazão de exaustão ao invés de usar os *dampers* para esse controle. O potencial de economia de energia elétrica desse projeto é de 60% do consumo do sistema atual, o que equivale a 6.987 MWh/ano.

Através da análise do projeto em termos técnicos, contábeis e tributários, e das análises jurídica e técnica das minutas de contratos da Efficientia e Cemig, foi elaborado um Dossiê com análise de viabilidade econômica do projeto. O projeto foi então submetido ao Comitê de Investimentos da Empresa Siderúrgica. O Comitê fez questionamentos a respeito da metodologia, e em função do elevado custo de implantação do projeto no desempoeiramento dos FEAs e da sua complexidade, foi proposto que a equipe avaliasse algum equipamento ou processo no qual o investimento fosse menor e que tivesse pouca interferência com o processo produtivo.

A Equipe de Eficiência Energética, em conjunto com a Aciaria e Oficina Elétrica analisaram e propuseram então que o equipamento piloto fosse o grupo

---

motor/gerador de alimentação das pontes rolantes dos Fornos Elétricos a Arco da Aciaria.

Os dados do Dossiê foram alterados contemplando o projeto em questão, e encaminhado para tramitação interna e aprovação. Nessa fase o trabalho foi feito em conjunto com as áreas de Controladoria e Estratégia, o que incluiu a análise de viabilidade do projeto.

O Dossiê foi aprovado internamente no dia 10 de setembro de 2010, quando foi encaminhado para aprovação no Segmento da Empresa Siderúrgica, na Europa.

#### 4.2.2 Etapas do Projeto

Em conformidade com a legislação brasileira, na Figura 4.4 são mostradas em linhas gerais, as etapas envolvidas em um projeto de eficiência energética para economia de energia elétrica, conforme Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética (ANEEL, 2008).

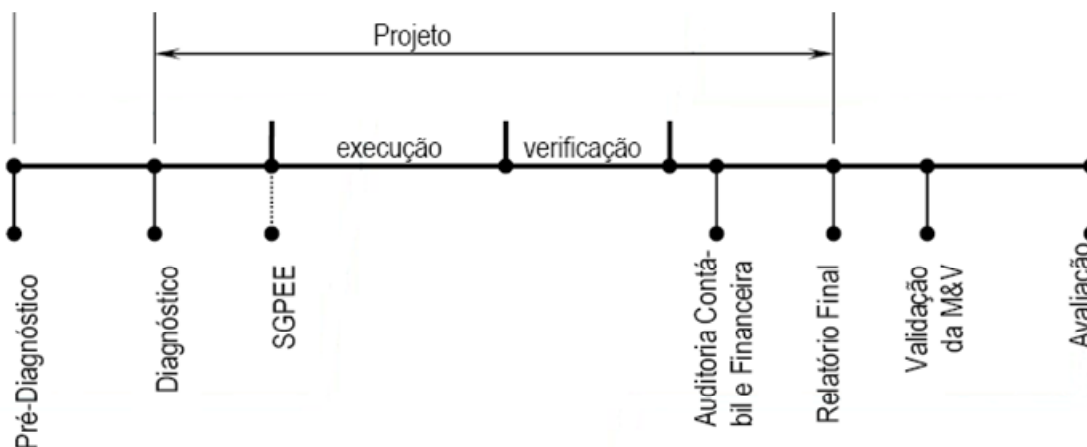


Figura 4.4 - Etapas de um projeto de eficiência energética (ANEEL, 2008).

#### **4.2.2.1 Pré-Diagnóstico**

As atividades de prospecção e identificação de potencialidade de economia de energia são feitas na etapa de pré-diagnóstico. Os custos desta etapa só podem ser apropriados para os pré-diagnósticos dos projetos que forem efetivamente executados e concluídos com sucesso.

Na Empresa Siderúrgica essa etapa foi executada internamente entre os meses de junho e julho/2009. Foram avaliados os potenciais de dois projetos:

- Implantação de um retificador para alimentação das pontes rolantes dos Fornos Elétricos a Arco da Aciaria;
- Instalação de um inversor de frequência para controle do desempoeiramento dos Fornos Elétricos a Arco.

O projeto piloto escolhido foi o primeiro, ou seja, a implantação de um retificador para alimentação das pontes rolantes dos fornos elétricos a arco da Aciaria. Os motivos que levaram a esta escolha foram:

- Baixa eficiência energética;
- Índice considerável de ociosidade do sistema;
- Baixo investimento necessário para execução do projeto;
- Tecnologia proposta de fácil implantação.

#### **4.2.2.2 Diagnóstico**

Esta etapa deve ser executada por empresa independente (*Energy Service Company* – ESCO). Nela são feitas medições para definição da linha de base do projeto, de acordo com o plano de medição e verificação desenhado, sempre se

---

baseando no Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (IPMVP, 2002). Na Empresa Siderúrgica esta etapa foi realizada em junho/2010.

#### **4.2.2.3 Execução do Projeto**

Esta etapa compreende as atividades de engenharia e obras previstas no projeto.

No caso da Empresa Siderúrgica esta etapa consistiu na aquisição de um painel com retificador para substituição do grupo motor/gerador anteriormente utilizado. Esta etapa foi concluída em abril/2011.

#### **4.2.2.4 Verificação**

Compreende a medição feita pela ESCO, para verificação dos reais ganhos de economia de energia obtidos, através da comparação das medições e dados da instalação pós-retrofit com aquelas estabelecidas na linha de base. Na Empresa Siderúrgica esta etapa foi realizada em maio/2011

#### **4.2.2.5 Demais Etapas**

Após a finalização de todas as atividades de execução e verificação do projeto, é então emitido o Relatório Final. Essa etapa configura o encerramento formal do projeto e após a submissão à ANEEL do Relatório Final e do Relatório de Auditoria Contábil e Financeira.

---

### 4.2.3 Modelo do Negócio

O modelo de negócio proposto neste trabalho que viabilizou a implantação do projeto piloto é mostrado na Figura 4.5, onde são destacados os fluxos de recursos e serviços.

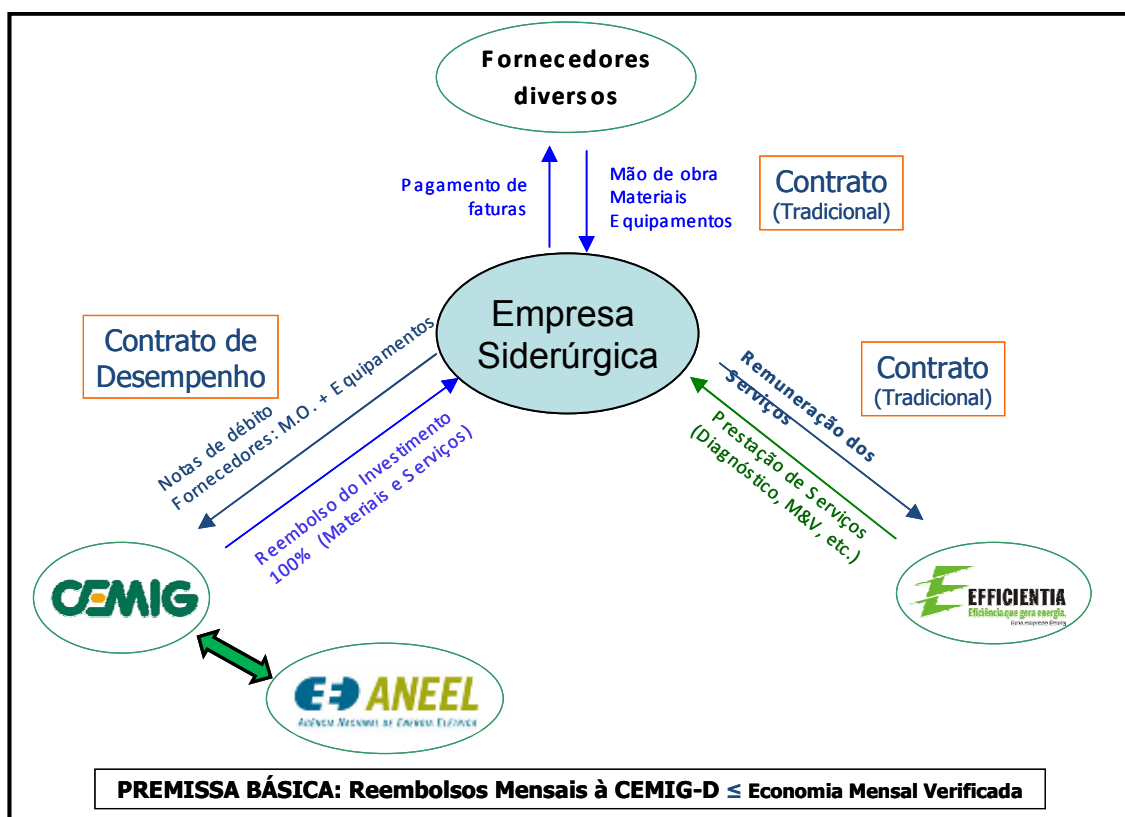


Figura 4.5 - Modelo de negócio.

Os contratos assinados para operar este modelo de negócio foram:

- Contrato entre a Empresa Siderúrgica e a CEMIG-D (Cemig Distribuição), que é a Concessionária de Energia Elétrica e a Financiadora do projeto: Durante o processo de aquisição de serviços (diagnósticos, preparação de metodologia de Medição e Verificação – M&V, etc.), equipamentos e execução do projeto, todos os recursos necessários para essas operações foram reembolsados

pela CEMIG-D, de acordo com a Lei 9991 e Resoluções da ANEEL que regulam este tipo de operação;

- Contrato entre a Empresa Siderúrgica e a Efficientia - ESCO (Energy Service Company): Participante de destaque no Modelo de Negócio, a Efficientia teve a responsabilidade de consolidação, em conjunto com a Empresa Siderúrgica, dos potenciais de economia de energia, formatando, também, a metodologia de Medição e Verificação (M&V) a ser empregada no caso em questão. Estes dados foram utilizados para estabelecer a linha de base (“base line”) do projeto e nortearam, também, a certificação dos resultados alcançados após a sua implantação. Além disso, a ESCO (Efficientia) foi a responsável pela análise de viabilidade técnica e econômico-financeira do projeto, dando segurança à Empresa Siderúrgica com relação aos resultados projetados e alcançados, responsabilizando-se, também, pela gestão do projeto frente às entidades envolvidas. A ESCO é reembolsada pelos serviços prestados nas fases de diagnóstico, formatação da metodologia de M&V e verificação das economias de energia.
  - Contratos da Empresa Siderúrgica com os Fornecedores: Com base nas especificações do projeto, a Empresa Siderúrgica selecionou o(s) fornecedor(es) de equipamentos e serviços de instalação, firmando contratos com os mesmos. Durante a execução do projeto o(s) fornecedor(es) emitiram as faturas / notas fiscais de serviços e equipamentos, que foram apresentadas e auditadas pela Empresa Siderúrgica e quitadas com os recursos repassados pela CEMIG-D.
-

Ao final do projeto, iniciou-se a etapa de Medição & Verificação para a confirmação da economia de energia projetada. Certificados os resultados, a Empresa Siderúrgica inicia, 30 dias após, os pagamentos (reembolsos) à companhia de energia (CEMIG-D), com parcelas mensais limitadas à economia de energia efetivamente verificada, pelo período necessário à amortização dos investimentos feitos. A seguir são detalhadas as responsabilidades das empresas:

**a) Responsabilidade da Empresa Siderúrgica**

Fornecer à Efficientia toda a documentação técnica ou outros elementos que dispõe e que sejam considerados necessários à execução dos estudos e da metodologia de Medição e Verificação (M&V).

Aquisição dos equipamentos, materiais, serviços, bem como a negociação com os fornecedores, para a implementação do projeto.

Contratação de empresas especializadas para instalação e montagem do projeto de efficientização energética, na forma recomendada e estabelecida no projeto.

**b) Responsabilidade da CEMIG-D**

Reembolso dos custos de implementação do projeto correspondentes à gestão, gerenciamento, aquisição de serviços, equipamentos e materiais, instalação, testes e verificação das medidas relacionadas à implementação do projeto.

---

### **c) Responsabilidade da Efficientia**

Consolidação, em conjunto com a Empresa Siderúrgica, de potenciais de efficientização energética.

Formatação da metodologia de Medição e Verificação (M&V), estabelecimento da “baseline” e medições para certificação da economia de energia após a implantação do projeto, com a supervisão da Empresa Siderúrgica.

Realização das análises de viabilidade técnica, econômica e financeira do projeto e elaboração de descritivo do projeto para obtenção de recursos financeiros.

## **4.2.4 Implantação do Projeto Piloto**

### **4.2.4.1 Situação Anterior ao Projeto**

O equipamento definido como piloto para execução do projeto utilizando recursos da Lei de Eficiência Energética foi o Grupo Motor/Gerador de Alimentação do Barramento das Pontes Rolantes 10, 11, 15 e 17 dos Fornos Elétricos a Arco (FEAs) – Sala Elétrica SE02 – Aciaria 1.

Esse grupo é composto por um motor síncrono de 725 kVA acoplado ao eixo de um gerador de corrente contínua de 500 kW. Esse equipamento foi especificado e dimensionado para alimentar não apenas as pontes rolantes dos FEAs, mas também cargas do Alto-Forno 1 (AF1). Após a modernização do AF1, parte das cargas foi removida desse grupo, sendo que atualmente o grupo está superdimensionado. Esse grupo alimenta um barramento de corrente contínua onde

---

estão conectadas as pontes rolantes. Esse sistema opera com carregamento médio de 30% com rendimento em torno de 36%.

Além da baixa eficiência, esse equipamento consome energia elétrica mesmo quando as pontes rolantes estão paradas, pois é necessário manter o motor síncrono e o gerador ligado 24 horas por dia de forma a alimentar as 4 pontes rolantes sempre que necessário. A Figura 4.6 ilustra a situação anterior ao projeto, com dados de potência, rendimento parcial e total.

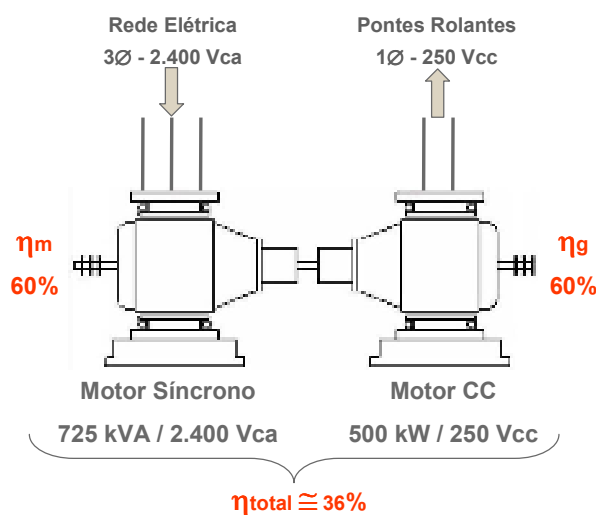


Figura 4.6 - Esquema anterior para alimentação das pontes rolantes dos FEAs.

A medição feita para compor a linha de base do projeto indica um consumo anual da ordem de 1.000 MWh.

Na Figura 4.7 é mostrada a sala elétrica da subestação 02 da Empresa Siderúrgica. O sistema anteriormente instalado, composto pelo gerador de corrente contínua e pelo motor síncrono, elevava a temperatura da sala para em torno de 45 °C, além de provocar alto nível de ruído. A alta temperatura e o nível de ruído prejudicavam as condições de trabalho na sala elétrica.



Figura 4.7 - Motor síncrono e gerador de corrente contínua na subestação 02.

Esse equipamento é obsoleto, operando desde 1958.

#### 4.2.4.2 Riscos do Projeto

A implantação desse projeto não teve riscos em termos de equipamento ou processo, visto que a proposta técnica de substituição consistiu em uma tecnologia já dominada e amplamente aplicada, além de ter alta eficiência e confiabilidade.

Não houve também riscos em termos ambientais, muito pelo contrário, já que com a implantação do projeto as condições de trabalho na sala elétrica da subestação 02 melhoraram consideravelmente, com a redução de ruído e calor.

Riscos com a não implantação do projeto: parada do fluxo de produção nos fornos elétricos a arco por um período de 5 dias em caso de indisponibilidade do grupo motor/gerador.

Considerando o ponto de vista financeiro, os riscos são extremamente baixos, porque:

- o projeto é avaliado técnica e financeiramente pela Empresa Siderúrgica e Efficientia;
- o projeto é submetido à ANEEL apenas se a análise técnica for consistente;
- os pagamentos para devolução dos montantes disponibilizados pela concessionária só têm início após a verificação do ganho alcançado pelo projeto.
- os pagamentos são limitados à economia realizada.

### **4.3 Desenvolvimento do Projeto Gás Natural**

Na estratégia da matriz energética brasileira, o GLP é direcionado preferencialmente para o uso residencial (80% do consumo), o que gera uma vulnerabilidade em sua política de preços e utilização. Por outro lado, o Gás Natural é direcionado preferencialmente para a indústria (55% do consumo) e acompanha a política de preços do mercado internacional. Diante deste fato, a Empresa Siderúrgica decidiu desenvolver um projeto para substituição do GLP pelo GN em sua matriz energética. Esta decisão tinha ainda uma forte motivação de redução de custos operacionais, uma vez que a energia decorrente do GN é aproximadamente 30% mais barata que a energia do GLP (base maio/09).

---

A utilização do GN na Empresa Siderúrgica demandou necessariamente algumas frentes de trabalho:

- Implantação do Gasoduto Gasbel 2 pela Petrobras.
- Implantação do Gasoduto Vale do Aço pela Gasmig.
- Implantação do Projeto Gás Natural pela Empresa Siderúrgica.

A Empresa Siderúrgica foi a primeira empresa da região do Vale do Aço a assinar contrato de fornecimento de GN com a Gasmig em abril/2005, com previsão de implantação do Gasoduto Vale do Aço em dezembro/2007, data em que era prevista a utilização de gás natural pelas empresas da região (GUIMARÃES, 2005).

A filosofia do empreendimento do Gasoduto Vale do Aço era de participação dos grandes consumidores na realização do investimento por meio de contribuições, com pagamentos não lucrativos, as quais seriam proporcionais à distância do consumidor e ao volume de gás contratado. Além disso, a categoria contratual seria do tipo “take or pay”, ou seja, seria garantido um pagamento de valor correspondente a um consumo mensal mínimo, mesmo que não houvesse este consumo.

A partir da assinatura do contrato com a Gasmig a Empresa Siderúrgica mobilizou uma grande equipe de profissionais para cuidar da implantação do Projeto Gás Natural dentro da empresa. Foram envolvidas neste processo as áreas de Utilidades, Automação, Instrumentação, Planejamento, Produção, além de

---

fornecedores externos sendo coordenados pela Equipe de Engenharia. Este projeto consistiu basicamente nas seguintes etapas:

- Aprovação do projeto e liberação da verba dentro do grupo da Empresa Siderúrgica.
- Realização de engenharia básica e de detalhamento.
- Concorrências técnica e comercial e contratação dos serviços e equipamentos necessários.
- Construção das redes e sistemas de distribuição do gás internamente na planta, composta por tubos e válvulas.
- Adequação dos equipamentos para consumir o gás, incluindo construção de estações redutoras e reguladoras de pressão; adequações em estações de mistura de gases combustíveis, sistemas de monitoramento e controle de queimadores de todas as instalações de aquecimento, tais como, fornos de reaquecimento de placas, fornos de recozimento contínuo, aquecedores de panela, etc.
- Comissionamento dos sistemas e início de utilização do gás.

A substituição de GLP por GN nos equipamentos da Empresa Siderúrgica foi planejada de forma a não interferir no plano de produção e venda, demandando assim um tempo de 10 meses para a implantação. Havia, entretanto, a necessidade de sincronizar o cronograma do projeto interno com os cronogramas de implantação dos dois gasodutos de responsabilidade da Petrobras e Gasmig, respectivamente. Dessa forma, seriam evitados a perda de oportunidade de uso do gás e o pagamento de “take or pay” ou antecipação de desembolso sem a contrapartida do uso do gás.

---

### 4.3.1 Situação do Fornecimento de GLP

O GLP consumido é proveniente da cidade de Betim, Minas Gerais. A Empresa Siderúrgica tem contrato de fornecimento com uma grande empresa distribuidora de GLP. A Fornecedora de GLP realiza o transporte do GLP na forma líquida através de carretas, além das operações de recebimento, descarga, estocagem, bombeamento, vaporização, redução da pressão e entrega aos consumidores na forma gasosa, conforme Figura 4.8. A Fornecedora de GLP ainda é responsável pela manutenção de todo sistema de abastecimento de GLP. Cabe à Empresa Siderúrgica a responsabilidade pelo pagamento do GLP, que é medido em balanças em sua própria planta, bem como o fornecimento, sem ônus, da energia elétrica e do vapor consumidos no fluxo de fornecimento de GLP.

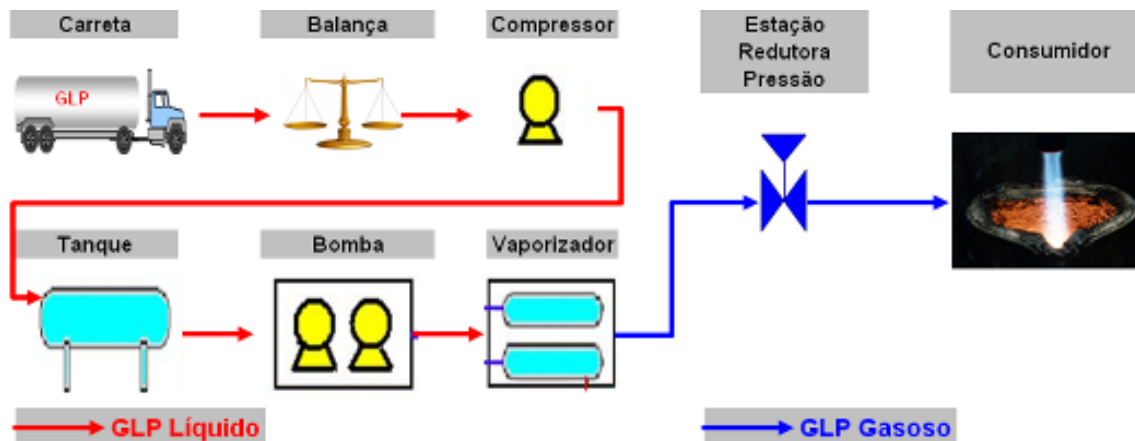


Figura 4.8 - Esquema dos escopos de atuação da Fornecedora de GLP e da Empresa Siderúrgica no fluxo do GLP.

O GLP é utilizado predominantemente para complementar a energia fornecida pelo Gás de Alto Forno (GAF) em fornos de aquecimento de placas na laminação de tiras a quente, fornos de recozimento de bobinas e secagem de revestimento nas laminações a frio e regeneradores de calor no alto-forno a coque. O GLP é ainda

utilizado puro em aquecedores de panela na aciaria, fornos de manutenção de temperatura e de tratamento térmico na laminação a quente, em maçaricos, em queimadores pilotos dos diversos fornos e da caldeira. A rede de distribuição de GLP na Empresa Siderúrgica é mostrada na Figura 4.9.

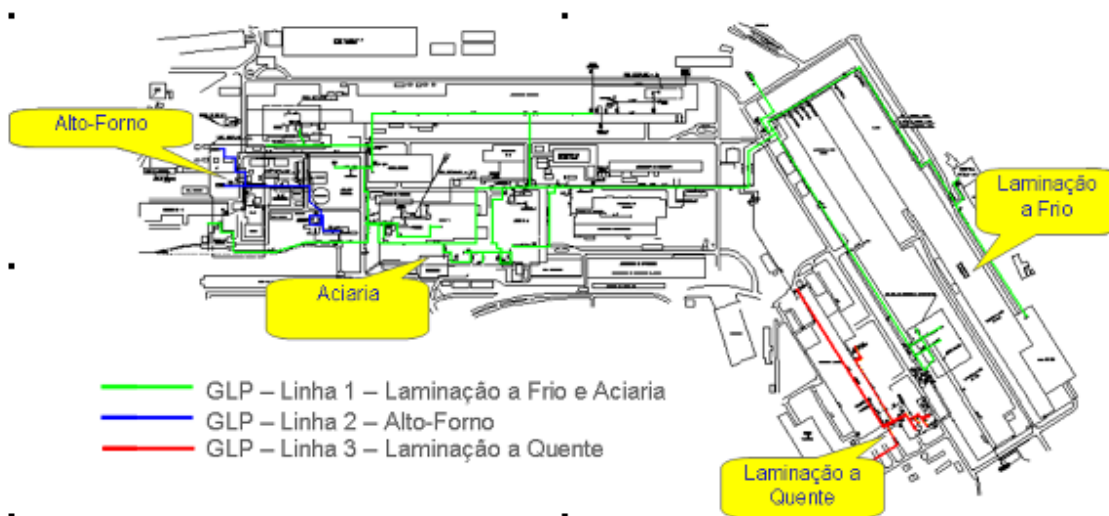


Figura 4.9 - Rede de distribuição de GLP na planta da Empresa Siderúrgica.

### 4.3.2 Implementação da Rede de Distribuição Interna de Gás Natural

As tubulações existentes de GLP não estavam adequadas para transportar o gás natural. Portanto, foi construída uma nova linha de gás em conformidade com a Norma Brasileira NBR 12312 (Controle e segurança para utilização de gases combustíveis em processos de baixa e alta temperatura) e com a Norma de Distribuição de Gás Natural NDG 5.2 (Critérios para dimensionamento de rede interna de gás natural).

A rede de gás foi construída em uma única etapa e planejada para ficar pronta simultaneamente com a chegada do gás na planta. A Figura 4.10 mostra um esquema da rede geral de distribuição que foi montada.

O gás foi disponibilizado pela Gasmig em um “Conjunto de Medição e Regulagem de Pressão - (CMRP)” na entrada da planta industrial.



Figura 4.10 - Rede geral de distribuição de GN na planta da Empresa Siderúrgica.

### 4.3.3 Adaptação dos Equipamentos Térmicos para Utilizar Gás Natural

Uma das premissas básicas do projeto de adequação era a de que o GLP seria substituído por GN, porém seriam mantidos os outros combustíveis complementares. Assim as premissas foram:

Nas instalações que usavam GLP misturado com GAF:

- Queimadores seriam mantidos.
- Estações misturadoras seriam adequadas para receber GN. A rede de GLP não poderia ser utilizada para GN, porque a vazão volumétrica de GN é aproximadamente 3 vezes maior que a do GLP.
- Como contingência para falta do GN a alternativa de mistura de GLP + GAF seria mantida.
- O que representa 70% do consumo de GLP da Empresa Siderúrgica.

Nas instalações que usavam GLP puro:

- Queimadores seriam trocados. Com GN sua potência energética ficaria limitada a 36% da potência do queimador com GLP, porque o poder calorífico inferior do GLP é aproximadamente 25.000 kcal/Nm<sup>3</sup> e o do gás natural é 9.000 kcal/Nm<sup>3</sup>.
- Seriam construídas novas estações controladoras.
- Como contingência para falta do GN seriam implantadas, em nível de equipamento, estações misturadoras de AR + GLP, de forma a adequar o uso do GLP em queimadores projetados para GN.
- O que representa 30% do consumo de GLP da Empresa Siderúrgica.

A concepção das soluções e a estratégia de utilização do GN deveria objetivar a introdução do menor número possível de modificações nos equipamentos, sem alteração dos atuais patamares e características. Procurou-se evitar soluções que impliquem na realização de mudanças estruturais nos equipamentos e da necessidade de grandes paradas para implantação das modificações propostas.

---

Um dos critérios adotados para que dois gases sejam intercambiáveis é que seus Índices de Wobbe sejam aproximadamente os mesmos, dentro de um intervalo de  $\pm 5\%$  (CARVALHO Jr, 2011). O Índice de Wobbe é uma medida do conteúdo energético de um gás, medido com base no seu poder calorífico por unidade de volume à pressão e temperatura padrão. Segue abaixo o detalhamento das equações.

Segundo CARVALHO Jr (2011), o Índice de Wobbe decorre da Equação (4.1):

$$ENERGIA = PCI \times Q \quad (4.1)$$

Onde:

*ENERGIA* = Taxa de energia térmica em kcal/h

*PCI* = Poder calorífico inferior do gás em kcal/Nm<sup>3</sup>

*Q* = Vazão volumétrica do gás em Nm<sup>3</sup>/h

Ao detalhar a vazão volumétrica do gás chega-se a Equação (4.2):

$$ENERGIA = PCI \times A \times K \times \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (4.2)$$

Onde:

*A* = Área da seção transversal do orifício de gás no queimador

*K* = Coeficiente de descarga do orifício

---

---

$\Delta p$  = Pressão manométrica de suprimento do gás

$\rho$  = massa específica do gás

A Equação (4.2) pode ser escrita conforme Equação (4.3):

$$ENERGIA = \frac{PCI \times A \times K}{\sqrt{\rho_{ar}}} \times \sqrt{\frac{\Delta p}{d}} \quad (4.3)$$

Onde:

$\rho_{ar}$  = Massa específica do ar

$d$  = Densidade do gás combustível em relação ao ar

Wobbe definiu seu índice conforme Equação (4.4):

$$IW = \frac{PCI}{\sqrt{d}} \quad (4.4)$$

O índice recebe o nome do engenheiro e inventor Goffredo Wobbe, que o desenvolveu em 1926 (CARVALHO Jr, 2011).

Para conseguir um mesmo Índice de Wobbe (IW), utilizaram-se misturas de gases que nesta tese foi trabalhada para todas as situações reais de trabalho na Empresa Siderúrgica.

Ao inserir o Índice de Wobbe na Equação (4.3) chega-se a Equação (4.5):

---

$$ENERGIA = \frac{IW \times A \times K}{\sqrt{\rho_{ar}}} \times \sqrt{\Delta p} \quad (4.5)$$

Portanto, dois gases diferentes produzirão no mesmo queimador, com a mesma pressão manométrica, a mesma taxa de energia térmica, se os Índices de Wobbe forem os mesmos, concluiu CARVALHO Jr, 2011.

A Figura 4.11 mostra um esquema comparativo das situações antes e após a modificação dos equipamentos.

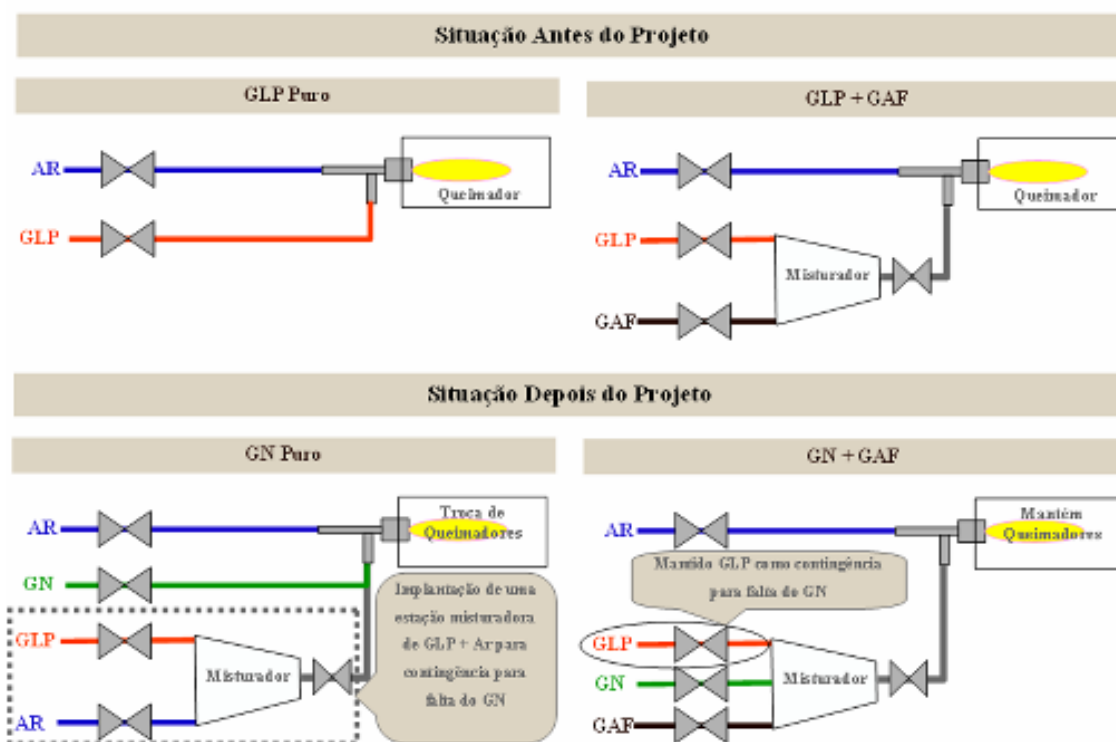


Figura 4.11 - Esquema das adequações dos equipamentos para consumo do GN.

De acordo com a estratégia de implantação do projeto, as adequações dos equipamentos possíveis de serem feitas sem afetar o fluxo de produção seriam feitas antecipadamente. As adequações que exigissem paradas do fluxo de produção seriam distribuídas aproveitando as oportunidades de paradas

programadas. O planejamento da produção definiria estas oportunidades em data mais próxima da implantação, utilizando a flexibilidade contratual de evolução do consumo em até 10 meses para atingir o consumo contratado com a Gasmig (MANELA et al., 2007).

#### 4.3.4 Fluxo de Processo do Gás Natural na Empresa Siderúrgica

Após a implantação do Projeto Gás Natural, o fluxo de abastecimento e distribuição de gás combustível para os equipamentos da Empresa Siderúrgica foi significativamente simplificado. A Figura 4.12 mostra todo este fluxo para o caso do Gás Natural. Cabe ao fornecedor, a Gasmig, disponibilizar o gás na forma gasosa na saída da CMRP, nas condições contratadas de vazão, pressão e poder calorífico. É de responsabilidade da Empresa Siderúrgica o pagamento do GN, que é medido e devidamente corrigido na CMRP. Diferentemente do GLP, o GN não é tarifado por massa, ou volume, e sim por energia. Dessa forma, o poder calorífico real do GN é medido pela Gasmig/Petrobras de forma a corrigir os montantes medidos na CMRP. Cabe agora à Empresa Siderúrgica a manutenção do sistema interno de distribuição, basicamente tubulações e válvulas.

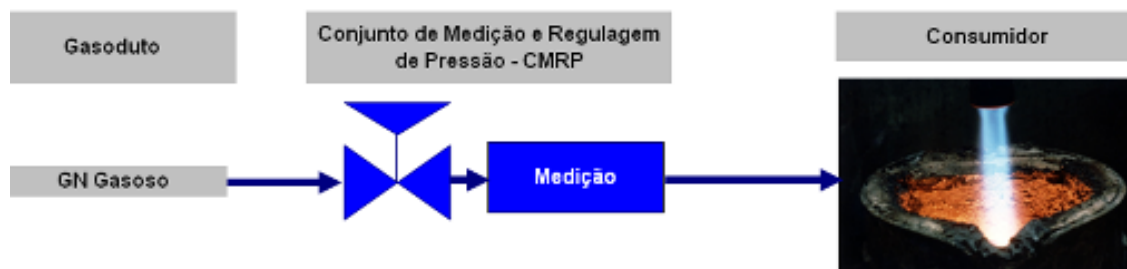


Figura 4.12 - Esquema do escopo de atuação da Gasmig e Empresa Siderúrgica.

O GLP será mantido como contingência para o caso de falta do gás natural.

## **4.4 Substituição de Coque por Carvão Vegetal**

A substituição de coque por carvão vegetal na Empresa Siderúrgica ocorreu com investimento no fluxo de fornecimento de carvão vegetal, que contemplou:

- Plantação de floresta;
- Fornos de carbonização;
- Transporte do carvão vegetal;
- Reforma e adequação do alto-forno e pátio de matérias primas.

Nesta tese foi abordada a análise do efeito desta substituição nas emissões de CO<sub>2</sub> e na geração, distribuição e consumo do gás de alto-forno.

### **4.4.1 Emissão de CO<sub>2</sub>**

Os projetos florestais com fins energéticos em substituição aos combustíveis fósseis têm notáveis contribuições para redução do CO<sub>2</sub> atmosférico. Para a produção de ferro-gusa, utilizando coque de carvão mineral, emite-se CO<sub>2</sub>, enquanto que, com o carvão vegetal, resgata-se CO<sub>2</sub> da atmosfera, no fluxo global. Mas, nesta tese foi utilizada a metodologia WSA (*World Steel Association*) conforme Tabela 4.1; que é a mesma do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), em que se considera zero a emissão de CO<sub>2</sub> quando se utiliza carvão vegetal de floresta plantada na siderurgia.

---

## 4.5 Otimização do Gás de Alto-Forno

### 4.5.1 Geração do Gás de Alto-Forno

Em operação desde 1979, o Alto-Forno 2 da Empresa Siderúrgica foi originalmente projetado para funcionar à base de carvão vegetal com Poder Calorífico Inferior do gás variando de 900 a 1.100 kcal/Nm<sup>3</sup>. Em março de 1996, em virtude do baixo preço do coque importado, foi alterado o combustível e agente redutor do alto-forno n°2, de carvão vegetal para coque, que é obtido pelo processo de coqueria do carvão mineral. Com isso, o poder calorífico inferior do gás foi reduzido para 700 a 800 kcal/Nm<sup>3</sup>/h. Em junho de 2011, este alto-forno voltou a operar com carvão vegetal, mas com opção de utilizar coque.

Na Empresa Siderúrgica, a outra fonte de gás de alto-forno é o alto-forno n°1, que opera desde 1944 e utiliza carvão vegetal como combustível e agente redutor. Como é um forno antigo, com baixa eficiência, o poder calorífico inferior do gás de alto-forno é de 950 a 1200 kcal/Nm<sup>3</sup>.

O ar atmosférico é captado e comprimido por um soprador a uma pressão de 2 bar, passa por um sistema de aquecimento chamado de *cowper* (regenerador de calor), sendo aquecido até à temperatura de 1.100°C. Injetado na parte inferior do alto-forno pela ventaneira, juntamente com oxigênio puro e finos de carvão, reage com a carga do alto-forno que desce em sentido contrário ao fluxo de ar, gerando gusa e escória que saem na parte inferior pelo furo de corrida, e o gás sai no topo do alto-forno, a uma pressão de 1,3 bar e temperatura de 200 °C.

---

---

No alto-forno, o GAF passa por um ciclone para a retirada do pó mais pesado, que é arrastado pela carga, entra no sistema de lavagem para retirada do pó mais fino, sendo o gás em fluxo contrário ao da água. O GAF, depois do sistema de limpeza, sai a uma pressão de 250 a 500 mmCA e temperatura máxima de 50°C, mantida a mesma vazão; uma parte vai para o *cowper*, para o aquecimento do ar injetado no alto-forno, e a outra, é enviada para a rede de distribuição. Cada alto-forno possui três *cowpers*, sendo que um fica aquecendo o ar que está entrando no forno e dois ficam sendo aquecidos com o próprio gás gerado, durante 40 minutos aproximadamente. Para troca de *cowper*, que normalmente demora 10 minutos, ficam dois *cowpers* aquecendo o ar e um em processo de aquecimento com gás de alto-forno, haja vista que o alto-forno necessita de uma vazão constante de ar aquecido a 1.100°C. Estes três *cowpers* ficam revezando em aquecimento com GAF ou promovendo o aquecimento do ar.

Segundo JACOMINO et al. (2002), a redução do consumo de carvão ou coque depende principalmente do aumento da eficiência da troca gasosa no interior do alto-forno, o que implica diretamente no aumento do rendimento da combustão do alto-forno, conforme a Equação (4.6), e, conseqüentemente, na queda do Poder Calorífico Inferior (PCI) do gás.

$$\eta = \frac{CO_2}{CO_2 + CO} \quad (4.6)$$

Conclui-se, portanto, que a melhora na produção do ferro-gusa, implica na disponibilidade de um gás energeticamente mais pobre para a utilização em outros pontos da fábrica.

---

Quando não se tem a vazão de geração do gás de alto-forno, a mesma pode ser calculada por meio do balanço de nitrogênio (LAGE,1999), conforme a Equação (4.7).

$$V_{GAF} \cdot Y_{GAF} = V_{AR} \cdot Y_{AR}$$

$$V_{GAF} = \frac{V_{AR} \cdot Y_{AR}}{Y_{GAF}} \quad (4.7)$$

em que:

$V_{GAF}$  = Geração do gás de alto-forno em Nm<sup>3</sup>/h

$Y_{GAF}$  = Nitrogênio no gás de alto-forno em %

$V_{AR}$  = Volume de ar que é injetado no alto-forno em Nm<sup>3</sup>/h

$Y_{AR}$  = Nitrogênio no ar que é injetado no alto-forno em %

O GAF gerado que não é consumido nos *cowpers* é enviado para o sistema de distribuição, sendo controlado pelo centro de energia, onde se define se o gás será armazenado, consumido ou queimado em torres.

#### 4.5.2 Distribuição do Gás de Alto-Forno

A Figura 4.13 apresenta o fluxograma simplificado do sistema de distribuição do Gás de Alto-Forno (GAF) da Empresa Siderúrgica. Conforme esquematizado na Figura 4.13, o sistema de distribuição do GAF é constituído de seis *cowpers* (três para cada alto-forno), sendo C1, C2 e C3 para o Alto-Forno n°1 (AF1), representado por R1; e C4, C5 e C6 para o Alto-Forno n°2 (AF2), representado por R2; quatro torres de

queima (duas para cada alto-forno, T3 e T4 para o AF1, e T1 e T2 para o AF2); um gasômetro e uma caldeira. Os cowpers para cada alto-forno são compostos de três unidades, enquanto dois estão sendo alimentados com o GAF, os outros estão sendo alimentados com ar. O objetivo das torres é queimar o GAF de maneira a manter o nível do gasômetro entre 60 e 85% do volume total.

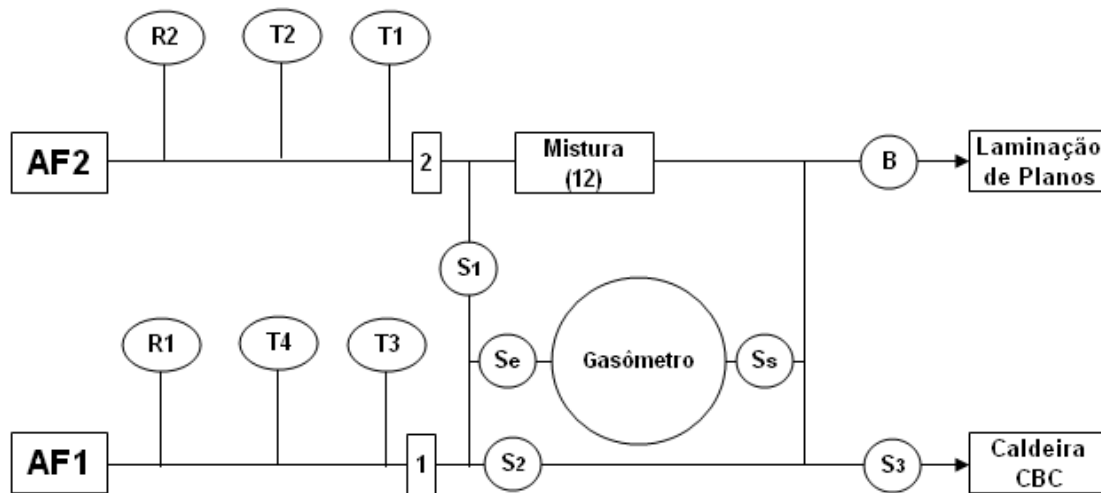


Figura 4.13- Fluxograma simplificado de distribuição do gás de alto-forno na Empresa Siderúrgica

em que:

R1 – Consumo de gás dos Cowpers do alto-forno 1.

R2 – Consumo de gás dos Cowpers do alto-forno 2.

T1 – Torre de queima 1 do alto-forno 2.

T2 – Torre de queima 2 do alto-forno 2.

T3 – Torre de queima 3 do alto-forno 1.

T4 – Torre de queima 4 do alto-forno 1.

1 – Circuito de gás do alto-forno 1

2 – Circuito de gás do alto-forno 2.

Mistura (12) – Circuito de mistura do gás do alto-forno 1 e alto-forno 2.

S<sub>2</sub> – Sifão de *by-pass* do gasômetro.

S<sub>e</sub> – Sifão de entrada do gasômetro.

S<sub>1</sub> – Sifão de interligação do circuito do AF1 e AF2.

S<sub>s</sub> – Sifão de saída do gasômetro.

S<sub>3</sub> – Sifão de alimentação da caldeira.

B – Booster de alimentação de GAF da laminação de planos.

O gás entra na rede de distribuição a uma pressão próxima de 280 mmCA, que é a mesma pressão do gasômetro, caldeira, torres de queima e entrada do *booster* que eleva a pressão para 1.500 mmCA, para ser consumido nos fornos da laminação a quente e laminação a frio. A pressão da rede de distribuição deve ser mantida constante, mesmo com as variações de consumo e de geração do GAF. Portanto, o controle é realizado pelo nível do gasômetro que comanda o fechamento e a abertura das torres de queima, ou seja, se o nível aumenta abrem-se as torres de queima; caso contrário, fecham-se as torres de queima. Os equipamentos que fazem parte do sistema de distribuição de gás de alto-forno são descritos a seguir.

#### **a) Gasômetro**

É um equipamento que foi adquirido da *Bethlehem Steel Company* e instalado na Empresa Siderúrgica em meados de 1949 (ARAÚJO, 1997). É do tipo “calota flutuante”, constituído basicamente por dois cilindros, de diâmetros diferentes, fechados em uma de suas extremidades, sendo o cilindro de maior diâmetro montado de boca para cima (balão fixo – reservatório de água de selagem) e o outro montado de boca para baixo (balão móvel – câmara de gás), inserido no primeiro. “Os cilindros são fabricados em aço carbono, espessura de 3/16 polegadas. A

---

subida ou descida da parte móvel do gasômetro é consequência da maior ou menor pressão do gás em seu interior. O movimento de subida e descida do balão móvel, de forma aprumada, é garantido por guias existentes no balão fixo, sobre as quais se deslocam os carrinhos existentes na parte móvel. As capacidades do balão fixo e do balão móvel são, respectivamente, 16.172 m<sup>3</sup> e 14.185 m<sup>3</sup>, sendo seus respectivos diâmetros internos de 37 e de 36 m. Tem duas entradas/saídas de gás interligadas com os altos-fornos 1 e 2 e com os *boosters* 2A/B. Na Figura 4.14 (a) é apresentado o gasômetro da Empresa Siderúrgica, sendo a parte inferior, de cor cinza, o balão fixo e a parte superior, o balão móvel.

O gasômetro tem por finalidade estabilizar a pressão do gás na linha e funcionar como armazenador, podendo absorver gás quando a geração for maior que o consumo, ou fornecer quando ocorrer o contrário. É o nível do gasômetro que define a abertura ou fechamento das torres de queima

#### **b) Torres de Queima**

As torres de queima têm a função de regular o nível do gasômetro e aliviar a pressão da rede de gás, conferindo maior estabilidade ao sistema, bem como efetuar a queima de todo o excesso de GAF.

Atualmente, estão instaladas quatro torres de queima, sendo duas no circuito do alto-forno 1 e duas no circuito do alto-forno 2, conforme mostrado na Figura 4.14 (b). A vazão nominal (de projeto) é de 25.000 Nm<sup>3</sup>/h para cada torre, dotada de uma válvula de controle com posicionador comandada por meio de um controlador digital, localizado no centro de energia. A medição da vazão de gás através das

---

torres de queima, pela concepção atual, é realizada pela diferença entre a geração líquida e o consumo de gás.

### **c) Booster**

É utilizado para elevar a pressão do gás de alto-forno de 280 mmCA para 1.500 mmCA. Atualmente, a Empresa Siderúrgica tem dois *boosters* instalados, sendo um de reserva, denominados 2 A/B, com uma vazão nominal de 55.000 Nm<sup>3</sup>/h cada.

A partida é remota, efetuada pelo centro de energia, mas, opcionalmente, também pode ser local. Além das proteções elétricas normais, estes boosters são equipados individualmente com transmissores de pressão de sucção, detector de temperatura de gás de sucção, válvula de bloqueio na saída, registro radial para controle de vazão e válvula de controle de vazão de recirculação, conforme a Figura 4.14 (c).

### **d) Sifão**

As tubulações da rede de gás, com formato tipo U, conforme a Figura 4.14 (d), são denominadas de sifão. Elas têm a função de bloquear a passagem de gás por meio de uma coluna de água. Para garantir a estanqueidade do gás, normalmente adota-se uma vez e meia a pressão do gás para a definição da altura da coluna de água.

Nas grandes empresas siderúrgicas, há uma grande geração de gás de alto-forno (acima de 100.000 Nm<sup>3</sup>/h) e uma baixa pressão de distribuição (mmCA), com os circuitos de grandes diâmetros, normalmente acima de 70 polegadas. Neste caso, é mais econômico investir em sifão para realizar o isolamento da rede de distribuição

---

do que em válvulas. A Empresa Siderúrgica, não é diferente, tendo-se mais de 100 sifões instalados em todo o circuito de gás de alto-forno.

Os principais equipamentos da distribuição de GAF da Empresa Siderúrgica são mostrados na Figura 4.14.

| <b>Equipamento</b>   | <b>Função Principal</b>   |
|--|---|
| <p data-bbox="483 359 638 390">Gasômetro</p>  <p data-bbox="540 642 581 674">(a)</p>        | <p data-bbox="911 464 1333 562">Estabilizar a pressão da rede e armazenar o gás de alto-forno.</p>  |
| <p data-bbox="448 716 675 747">Torre de Queima</p>  <p data-bbox="540 999 581 1031">(b)</p> | <p data-bbox="870 852 1373 884">Queimar a sobra de gás de alto-forno.</p>   |
| <p data-bbox="508 1073 610 1104">Booster</p>  <p data-bbox="540 1377 581 1409">(c)</p>    | <p data-bbox="870 1220 1373 1251">Elevar a pressão de gás de alto-forno.</p>  |
| <p data-bbox="524 1451 594 1482">Sifão</p>  <p data-bbox="540 1749 581 1780">(d)</p>      | <p data-bbox="854 1524 1390 1692">Bloquear a passagem de gás de alto-forno, para a realização de manutenção ou por necessidade operacional.</p> |

Figura 4.14 – Equipamentos da distribuição de GAF da Empresa Siderúrgica

#### 4.5.2.1 Análise do Sistema de Distribuição do Gás de Alto-Forno

Procurou-se desenvolver os balanços de massa e de energia deste sistema de distribuição de gás de alto-forno. O objetivo desta etapa é dar subsídios para o sistema supervisorio calcular o poder calorífico do GAF a ser queimado na caldeira e/ou nos fornos de laminação. O poder calorífico desta mistura depende da quantidade de gás armazenada no gasômetro, do consumo de GAF, e do percentual de abertura das torres de queima.

O gás que é gerado pelos altos-fornos segue para o consumo da usina e para os *cowpers*. Para o primeiro caso, ele pode ser queimado nas torres ou ser armazenado no gasômetro, conforme Equação ( 4.8).

$$V_{AF}=V+V_R+V_T \pm V_E \quad ( 4.8)$$

em que:

$V_{AF}$  = Geração total de GAF

$V$  = Vazão de GAF que está sendo consumida na usina

$V_R$  = Vazão de GAF que está sendo consumida nos *cowpers*

$V_T$  = Vazão de GAF que está sendo queimado nas torres de queima

$V_E$  = Vazão de GAF que entra ou sai do gasômetro.

Deve-se observar que o gasômetro fica variando o seu nível para equilibrar a pressão da rede de distribuição. Portanto, o estoque de gás no gasômetro ( $V_E$ ) é positivo, quando o gasômetro está subindo, ou seja, está armazenando GAF, e é negativo quando estiver fornecendo GAF para o sistema.

Os balanços de massa e de energia foram divididos em três partes. Na primeira parte são calculadas a vazão e a energia total contida no gás do alto-forno no ponto 1 (conforme pode ser observado na Figura 4.13), a segunda parte corresponde à determinação da vazão e da energia do GAF no ponto 2, e na última parte, calculam-se estes dados para a mistura (ponto de mistura 12 da Figura 4.13). Estes cálculos são descritos a seguir:

### **Balanços de Massa e Energia do Gás do Alto-forno 1**

A vazão de gás disponível para ser distribuído ( $V_1$ ), na Figura 4.13, é a diferença da geração bruta do gás do alto-forno1 ( $V_{AF1}$ ) pelo somatório do gás que é queimado nas torres ( $V_{T3}+V_{T4}$ ) e nos cowpers ( $V_{R1}$ ), conforme Equação ( 4.9).

$$V_1 = V_{AF1} - (V_{R1} + V_{T3} + V_{T4}) \quad (4.9)$$

A energia ( $ENERGIA_1$ ) é calculada pela multiplicação da vazão disponível ( $V_1$ ) pelo poder calorífico inferior do gás de alto-forno 1 ( $PCI_{AF1}$ ), conforme Equação ( 4.10).

$$ENERGIA_1 = PCI_{AF1} \times [V_{AF1} - (V_{R1} + V_{T3} + V_{T4})]$$

$$ENERGIA_1 = PCI_{AF1} \times V_1 \quad (4.10)$$

### **Balanços de Massa e Energia do Gás do Alto-forno 2**

De modo análogo, a vazão de gás disponível para ser distribuído ( $V_2$ ), na Figura 4.13, é a diferença da geração bruta do gás do alto-forno 2 ( $V_{AF2}$ ) pelo somatório do gás que é queimado nas torres ( $V_{T1}+V_{T2}$ ) e nos cowpers ( $V_{R2}$ ), conforme a Equação ( 4.11):

$$V_2 = V_{AF2} - (V_{R2} + V_{T1} + V_{T2}) \quad (4.11)$$

A energia (ENERGIA<sub>2</sub>) é calculada pela multiplicação da vazão disponível (V<sub>2</sub>) pelo poder calorífico inferior do gás de alto-forno 2 (PCI<sub>AF2</sub>), Equação (4.12).

$$ENERGIA_2 = PCI_{AF2} \cdot V_2 \quad (4.12)$$

### **Balancos de Massa e Energia da Mistura dos Gases dos Altos-Fornos**

Por meio das Equações (4.9) e (4.11), tem-se o balanço de massa da mistura, conforme a Equação (4.13).

$$V_{12} = V_1 + V_2 \quad (4.13)$$

Na determinação do balanço de energia da mistura, considera-se que toda a energia que entra é igual à que sai, (MORAN e SHAPIRO, 2000), conforme a Equação (4.14).

$$PCI_{12} \cdot V_1 + PCI_{12} \cdot V_2 = PCI_{AF1} \cdot V_1 + PCI_{AF2} \cdot V_2 \quad (4.14)$$

$$PCI_{12}(V_1 + V_2) = PCI_{AF1} \cdot V_1 + PCI_{AF2} \cdot V_2$$

$$PCI_{12} = \frac{(PCI_{AF1} \cdot V_1) + (PCI_{AF2} \cdot V_2)}{(V_1 + V_2)}$$

Desta forma, consegue-se determinar qual será o PCI do GAF de mistura a ser consumido.

### 4.5.3 Consumo de Gás de Alto-Forno

O gás de alto-forno na Empresa Siderúrgica é gerado em dois altos-fornos que juntos são os maiores consumidores. É utilizado nos cowpers para o preaquecimento do ar de combustão que será injetado na ventaneira e também na injeção de finos para a secagem dos finos de carvão vegetal. A Tabela 4.2 mostra os principais consumidores.

A geração de vapor na caldeira da Empresa Siderúrgica consome no mínimo, 350kg/h de óleo combustível 1A, complementado com GAF, com vazão máxima de 40.000Nm<sup>3</sup>/h, sendo o maior consumidor individual. Na regeneração de ácido clorídrico (HCl) é utilizado em substituição ao óleo diesel.

Tabela 4.2 – Consumo de gás de alto-forno na Empresa Siderúrgica.

| Equipamento      | Consumo Máximo (Nm <sup>3</sup> /h) | Consumo Médio (Nm <sup>3</sup> /h) |
|------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Alto-Forno 1     | 15.000                              | 11.000                             |
| Alto-Forno 2     | 30.000                              | 22.000                             |
| Injeção de Finos | 1.000                               | 1.000                              |
| Caldeira CBC     | 40.000                              | 29.000                             |
| HCl              | 5.000                               | 3.000                              |
| LTQ              | 15.000                              | 9.000                              |
| RB1              | 5.000                               | 2.500                              |
| RB2              | 4.000                               | 2.500                              |
| RB3              | 6.000                               | 3.000                              |
| RB4              | 4.000                               | 3.000                              |
| Carlite          | 4.000                               | 3.000                              |
| Tandem           | 1.000                               | 1.000                              |
| <b>Total</b>     | <b>130.000</b>                      | <b>90.000</b>                      |

Na Laminação de Tiras a Quente (LTQ), é utilizado nos fornos de aquecimento de placas, fornos *Walking Beam* e *Pusher*, misturados com o gás natural (GN) ou GLP, com PCI de mistura padrão de 4.600 kcal/Nm<sup>3</sup> e 6.000 kcal/Nm<sup>3</sup>, respectivamente. O

ar que entra no forno junto com a mistura GLP/GAF ou GN/GAF é pré-aquecido à temperatura máxima de 500°C. A pressão mínima do GAF na chegada dos fornos é de 1.200 mmCA.

Na laminação a frio de aço inoxidável, é utilizado nos fornos de recozimento de bobinas laminadas a frio de aços inoxidáveis (fornos RB1, RB3 e RB4), sendo o PCI máximo de mistura igual a 4.000 kcal/Nm<sup>3</sup>. O ar que entra no forno junto com a mistura gás natural ou GLP é pré-aquecido à temperatura máxima de 350°C. A pressão mínima de GAF na chegada dos fornos é de 1.300 mmCA.

Na laminação a frio de aço ao silício, é utilizado nos fornos de recozimento de bobinas laminadas a frio de aços GO e GNO (forno RB2), forno Carlite e Tandem, sendo o PCI padrão de mistura igual a 2.500 kcal/Nm<sup>3</sup>. O ar que entra no forno junto com a mistura gás natural ou GLP e GAF é pré-aquecido à temperatura máxima de 350°C. A pressão mínima de GAF na chegada dos fornos é de 1.300 mmCA. Destaque para o forno *Carlite* em que não há necessidade de utilizar energia de combustível fóssil.

#### **4.6 Otimização do Processo de Combustão**

Nesta etapa, calculou-se a quantidade de gás natural ou GLP necessária para se misturar com o gás de alto-forno, de forma a serem queimados nos fornos da laminação a quente e a frio, e produzir a energia necessária ao sistema. É importante ressaltar que quanto menor for o PCI do GAF, maior será a quantidade de gás natural ou GLP consumido e, conseqüentemente, maior o custo operacional.

---

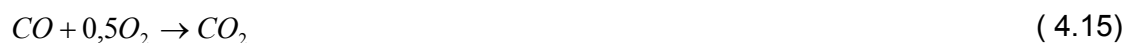
O equacionamento do balanço de massa e energia foi base para o desenvolvimento de projetos térmicos de conservação de energia e a referência para implantação da lógica do sistema supervisorio em todos os fornos durante o projeto de implantação do gás natural na Empresa Siderúrgica.

#### **4.6.1 Combustão do Gás de Alto-Forno**

Segundo CARVALHO e MCQUAY (2007), o processo de combustão caracteriza-se por uma reação exotérmica muito rápida entre combustível e oxidante, acompanhada por liberação de calor. Em geral, os elementos químicos nos combustíveis responsáveis pela liberação do calor são carbono, hidrogênio e enxofre.

O gás de alto-forno por ser um subproduto da fabricação do gusa, contém em sua composição química aproximadamente 70% de elementos que não são combustíveis, nitrogênio com 50% e dióxido de carbono com 20%. Os combustíveis do gás de alto-forno são o monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>).

O principal combustível do gás de alto-forno é o CO. Segue em ( 4.15) a reação de combustão do monóxido de carbono, formando o dióxido de carbono:



Para cada 1 Nm<sup>3</sup> de CO são necessários 0,5 Nm<sup>3</sup> de O<sub>2</sub>.

A equação ( 4.16) apresenta a reação de combustão do hidrogênio, formando água.

---



Para cada 1 Nm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> são necessários 0,5 Nm<sup>3</sup> de O<sub>2</sub>.

A equação ( 4.17) apresenta a reação de combustão do metano, formando água e dióxido de carbono.



Para cada 1 Nm<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> são necessários 2 Nm<sup>3</sup> de O<sub>2</sub>.

Portanto, para queimar 1 Nm<sup>3</sup> de gás de alto-forno, a equação ( 4.18) define a quantidade de oxigênio necessária para uma combustão estequiométrica.

$$O_2 = 0,5 \times (CO + H_2) + 2 \times CH_4 \quad (4.18)$$

em que:

$CO = \text{Teor de monóxido de carbono}$

$H_2 = \text{Teor de hidrogênio}$

$CH_4 = \text{Teor de metano}$

#### 4.6.2 Combustão do Gás Natural

O gás natural contém em sua composição química aproximadamente 94% de metano (CH<sub>4</sub>), cuja reação química já foi apresentada na equação ( 4.17). Os demais componentes são etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), butano (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), nitrogênio e o dióxido de carbono.

A reação de combustão do etano em ( 4.19), forma dióxido de carbono e água:



---

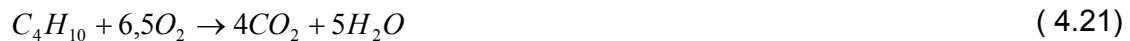
Para cada 1 Nm<sup>3</sup> de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> são necessários 3,5 Nm<sup>3</sup> de O<sub>2</sub> para a reação de combustão.

A equação ( 4.20) é a reação de combustão do propano, formando dióxido de carbono e água.



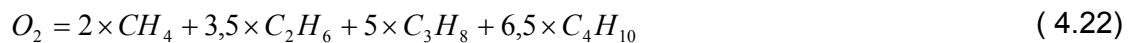
Para cada 1 Nm<sup>3</sup> de C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> são necessários 5 Nm<sup>3</sup> de O<sub>2</sub>.

A equação ( 4.21) apresenta a reação de combustão do butano, formando água e dióxido de carbono.



Para cada 1 Nm<sup>3</sup> de C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, são necessários 6,5 Nm<sup>3</sup> de O<sub>2</sub>.

Portanto, para queimar 1 Nm<sup>3</sup> de gás natural, a equação ( 4.22) define a quantidade de oxigênio necessária para uma combustão estequiométrica.



em que:

$CH_4 = \text{Teor de metano}$

$C_2H_6 = \text{Teor de etano}$

$C_3H_8 = \text{Teor de propano}$

$C_4H_{10} = \text{Teor de butano}$

---

### 4.6.3 Combustão do GLP

O GLP é um combustível derivado de petróleo e contém em sua composição química propano ( $C_3H_8$ ) e butano ( $C_4H_{10}$ ), cujas reações químicas já foram apresentadas nas equações ( 4.20) e ( 4.21), respectivamente. Os demais combustíveis são buteno ( $C_4H_8$ ) e propeno ( $C_3H_6$ ), que foram considerados neste trabalho.

A reação de combustão do buteno em ( 4.23), forma dióxido de carbono e água:



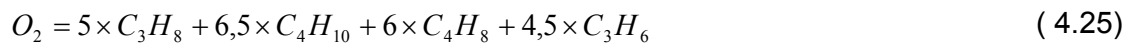
Para cada 1 Nm<sup>3</sup> de  $C_4H_8$  são necessários 6 Nm<sup>3</sup> de  $O_2$ .

A equação ( 4.24) apresenta a reação de combustão do propeno, formando dióxido de carbono e água.



Para cada 1 Nm<sup>3</sup> de  $C_3H_6$  são necessários 4,5 Nm<sup>3</sup> de  $O_2$ .

Portanto, para queimar 1 Nm<sup>3</sup> de GLP, a equação ( 4.22) define a quantidade de oxigênio necessária para uma combustão estequiométrica.



em que:

$$C_3H_8 = \text{Teor de propano}$$

$$C_4H_{10} = \text{Teor de butano}$$

$$C_4H_8 = \text{Teor de buteno}$$

$$C_3H_6 = \text{Teor de propeno}$$

#### 4.6.4 Poder Calorífico

Dois poderes caloríficos são reconhecidos por este nome: o poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI). O poder calorífico superior é obtido quando toda a água formada na combustão é um líquido; o poder calorífico inferior é obtido quando toda a água formada na combustão é vapor em uma pressão e uma temperatura de referência. A diferença entre o PCS e o PCI equivale à energia que seria necessária para vaporizar o líquido formado (MORAN e SHAPIRO, 2000).

Neste trabalho, será utilizado o Poder Calorífico Inferior (PCI), já que os produtos de combustão estão na forma de vapor em sistema industrial. Os valores utilizados neste trabalho estão na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Poder calorífico inferior (PERRY; CHILTON, 1973)

| Substância          |                                | Massa Molecular (g) | PCI     |                         |
|---------------------|--------------------------------|---------------------|---------|-------------------------|
|                     |                                |                     | (cal/g) | (kcal/Nm <sup>3</sup> ) |
| Hidrogênio          | H <sub>2</sub>                 | 2                   | 28.670  | 2.560                   |
| Monóxido de Carbono | CO                             | 28                  | 2.415   | 3.019                   |
| Metano              | CH <sub>4</sub>                | 16                  | 11.954  | 8.539                   |
| Etano               | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 30                  | 11.350  | 15.201                  |
| Propano             | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 44                  | 11.079  | 21.762                  |
| Buteno              | C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>  | 56                  | 10.825  | 27.062                  |
| Butano              | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 58                  | 10.932  | 28.306                  |
| Propeno             | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>  | 42                  | 10.942  | 20.516                  |

As equações ( 4.26), ( 4.27) e ( 4.28), fornecem o PCI do gás de alto-forno, gás natural e GLP, respectivamente.

$$PCI_{GAF} = 2.560 \times H_2 + 3.019 \times CO + 8.539 \times CH_4 \quad (4.26)$$

$$PCI_{GN} = 8.539 \times CH_4 + 15.201 \times C_2H_6 + 21.762 \times C_3H_8 + 28.306 \times C_4H_{10} \quad (4.27)$$

$$PCI_{GLP} = 20.516 \times C_3H_6 + 21.762 \times C_3H_8 + 27.062 \times C_4H_8 + 28.306 \times C_4H_{10} \quad (4.28)$$

Onde:

$PCI_{GAF}$  = Poder calorífico inferior do gás de alto-forno

$PCI_{GN}$  = Poder calorífico inferior do gás natural

$PCI_{GLP}$  = Poder calorífico inferior do gás liquefeito de petróleo

Normalmente, os combustíveis não apresentam repetitividade na sua composição e, portanto, há sempre uma variação no seu poder calorífico.

#### 4.6.5 Equacionamento dos Balanços de Massa e Energia

Nesta etapa do trabalho, foram equacionadas as necessidades de combustível e oxigênio ou ar atmosférico, para fornecer a energia necessária ao processo, visando atender a todas as composições dos combustíveis e a todas as variações no PCI. A equação (4.29) define qual a necessidade do sistema em termos de combustível.

$$Q_{GM} \times PCI_{GM} = Q_{GN} \times PCI_{GN} + Q_{GLP} \times PCI_{GLP} + Q_{GAF} \times PCI_{GAF} \quad (4.29)$$

Onde:

$Q$  = Vazão ( $Nm^3/h$ )

$PCI$  = Poder Calorífico Inferior ( $kcal/Nm^3$ )

$GAF$  = Gás de Alto-Forno

$GN = \text{Gás Natural}$

$GLP = \text{Gás Liquefeito de Petróleo}$

$GM = \text{Gás Misto}$

Tem-se ainda a equação ( 4.30):

$$Q_{GM} = Q_{GN} + Q_{GLP} + Q_{GAF} \quad (4.30)$$

Combinando as equações ( 4.29) e ( 4.30):

$$(Q_{GN} + Q_{GLP} + Q_{GAF}) \times PCI_{GM} = Q_{GN} \times PCI_{GN} + Q_{GLP} \times PCI_{GLP} + Q_{GAF} \times PCI_{GAF}$$

$$Q_{GN} \times PCI_{GM} + Q_{GLP} \times PCI_{GM} + Q_{GAF} \times PCI_{GM} = Q_{GN} \times PCI_{GN} + Q_{GLP} \times PCI_{GLP} + Q_{GAF} \times PCI_{GAF}$$

$$Q_{GAF} \times PCI_{GM} - Q_{GAF} \times PCI_{GAF} = Q_{GN} \times PCI_{GN} - Q_{GN} \times PCI_{GM} + Q_{GLP} \times PCI_{GLP} - Q_{GLP} \times PCI_{GM}$$

$$Q_{GAF} \times (PCI_{GM} - PCI_{GAF}) = Q_{GN} \times (PCI_{GN} - PCI_{GM}) + Q_{GLP} \times (PCI_{GLP} - PCI_{GM})$$

Chega-se à equação ( 4.31), que determina a quantidade de GAF necessária para atingir o PCI de mistura desejado, em função das variações das quantidades e PCI's dos demais gases.

$$Q_{GAF} = Q_{GN} \times \frac{(PCI_{GN} - PCI_{GM})}{(PCI_{GM} - PCI_{GAF})} + Q_{GLP} \times \frac{(PCI_{GLP} - PCI_{GM})}{(PCI_{GM} - PCI_{GAF})} \quad (4.31)$$

Com a definição da necessidade de combustível, foi definida a quantidade de ar necessária para a combustão conforme equação ( 4.32):

$$Q_{ar}^{GM} = a_0 \times f_y \times Q_{GM} \quad (4.32)$$

Onde:

$Q_{ar}$  = vazão de ar ( $Nm^3/h$ )

$Q_{GM}$  = vazão de gás misto ( $Nm^3/h$ )

$a_0$  = quantidade estequiométrica de ar necessária para queimar  $1 Nm^3$  de GM

$f_y$  = fator de excesso de ar

A equação ( 4.32) também pode ser escrita da seguinte forma:

$$Q_{ar}^{GM} = Q_{ar}^{GN} + Q_{ar}^{GLP} + Q_{ar}^{GAF} \quad (4.33)$$

A equação 4.33 é detalhada nas equações ( 4.34), ( 4.35) e ( 4.36):

$$Q_{ar}^{GN} = a_0^{GN} \times f_y \times Q_{GN} \quad (4.34)$$

$$Q_{ar}^{GLP} = a_0^{GLP} \times f_y \times Q_{GLP} \quad (4.35)$$

$$Q_{ar}^{GAF} = a_0^{GAF} \times f_y \times Q_{GAF} \quad (4.36)$$

Substituindo as equações ( 4.34), ( 4.35) e ( 4.36) em ( 4.33):

$$a_0 \times f_y \times Q_{GM} = a_0^{GN} \times f_y \times Q_{GN} + a_0^{GLP} \times f_y \times Q_{GLP} + a_0^{GAF} \times f_y \times Q_{GAF}$$

$$a_0 \times Q_{GM} = a_0^{GN} \times Q_{GN} + a_0^{GLP} \times Q_{GLP} + a_0^{GAF} \times Q_{GAF}$$

Chega-se à equação ( 4.37):

$$a_0 = \frac{a_0^{GN} \times Q_{GN} + a_0^{GLP} \times Q_{GLP} + a_0^{GAF} \times Q_{GAF}}{Q_{GM}} \quad (4.37)$$

Ou ainda, na equação ( 4.38):

$$a_0 = \frac{a_0^{GN} \times Q_{GN} + a_0^{GLP} \times Q_{GLP} + a_0^{GAF} \times Q_{GAF}}{Q_{GN} + Q_{GLP} + Q_{GAF}} \quad (4.38)$$

Sendo detalhada nas equações ( 4.39), ( 4.40), ( 4.41) e ( 4.42):

$$a_0^{GN} = \frac{O_2^{GN}}{f_{O_2}^{ar}} \quad (4.39)$$

$$a_0^{GLP} = \frac{O_2^{GLP}}{f_{O_2}^{ar}} \quad (4.40)$$

$$a_0^{GAF} = \frac{O_2^{GAF}}{f_{O_2}^{ar}} \quad (4.41)$$

$$f_{O_2}^{AR} = 0,21 + \frac{e}{100} \quad (4.42)$$

Onde:

$O_2$  = quantidade de oxigênio necessária para reagir com 1 Nm<sup>3</sup> de determinado gás

$f_{O_2}^{ar}$  = percentual de oxigênio no ar de combustão

$e$  = percentual de oxigênio de enriquecimento

Substituindo as equações ( 4.39), ( 4.40) e ( 4.41) na equação ( 4.38) tem-se a equação ( 4.43):

$$a_0 = \frac{\frac{O_2^{GN}}{f_{O_2}^{ar}} \times Q_{GN} + \frac{O_2^{GLP}}{f_{O_2}^{ar}} \times Q_{GLP} + \frac{O_2^{GAF}}{f_{O_2}^{ar}} \times Q_{GAF}}{Q_{GM}} \quad (4.43)$$

Onde se tem o volume de oxigênio necessário para queimar cada componente do gás misto, baseado nas reações de combustão estequiométricas.

Para o GLP foi considerada uma composição média e constante conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Composição química do GLP (SHV, 2008).

| Substância                     | Quantidade                 |
|--------------------------------|----------------------------|
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>  | 25,0%                      |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 14,0%                      |
| C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>  | 30,0%                      |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 31,0%                      |
| TOTAL                          | 100%                       |
| PCI <sub>GLP</sub>             | 25069 kcal/Nm <sup>3</sup> |

Ao utilizar a equação ( 4.25) chega-se ao valor de 5,64 Nm<sup>3</sup> de oxigênio para queimar 1 Nm<sup>3</sup> de GLP, conforme equação ( 4.44).

$$O_2^{GLP} = 5,64 \quad (4.44)$$

No caso do gás natural foram coletados os dados da composição química e PCI diários do gás fornecido pela GASMIG do dia 01/01/2011 à 31/07/2011. Foi utilizada a equação ( 4.22) para definição da necessidade de oxigênio. A Figura 4.15 representa a relação da necessidade de oxigênio estequiométrico para queimar 1 Nm<sup>3</sup> de gás natural de acordo com a variação do PCI.

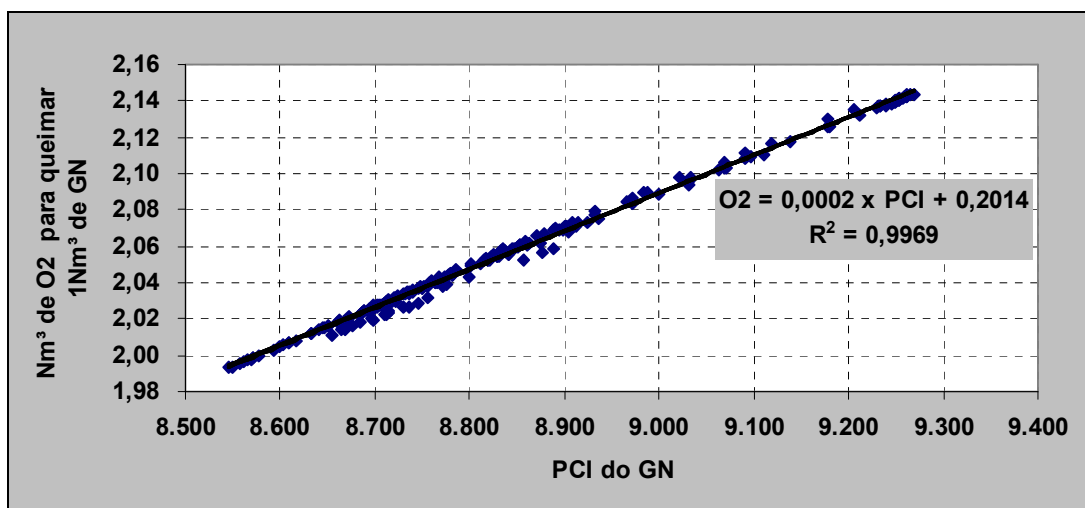


Figura 4.15 – Oxigênio estequiométrico para queimar 1 Nm<sup>3</sup> de gás natural de acordo com a variação do PCI.

Portanto, no caso do gás natural, o volume de oxigênio necessário para a combustão varia lineamente com o PCI do gás, conforme equação ( 4.45).

$$O_2^{GN} = 0,2014 + (0,0002 \times PCI_{GN}) \quad (4.45)$$

O gás de alto-forno é o combustível que sofre a maior variação do poder calorífico. Foi considerada a variação de 1 kcal/Nm<sup>3</sup> de 700 kcal/Nm<sup>3</sup> até 1.200 Nm<sup>3</sup>/h para determinar qual a relação com a necessidade de oxigênio. A medição do PCI é realizada por um calorímetro na Laminação de Tiras a Quente, que disponibiliza esta informação para os demais equipamentos da usina. Foi utilizada a equação ( 4.18) para definição da necessidade de oxigênio. A Figura 4.16 representa a relação da necessidade de oxigênio estequiométrico para queimar 1 Nm<sup>3</sup> de gás de alto-forno de acordo com a variação do PCI.

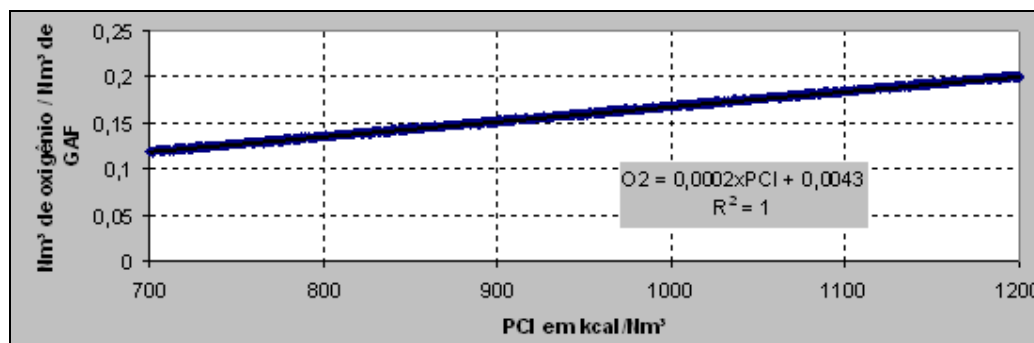


Figura 4.16 – Oxigênio estequiométrico para queimar 1 Nm<sup>3</sup> de gás de alto-forno de acordo com a variação do PCI.

Portanto, no caso do gás de alto-forno o volume de oxigênio necessário para a combustão varia lineamente com o PCI do gás, conforme equação ( 4.46).

$$O_2^{GAF} = 0,0043 + (0,0002 \times PCI_{GAF}) \quad (4.46)$$

Substituindo as equações ( 4.44), ( 4.45) e ( 4.46) na equação ( 4.43) tem-se então a equação ( 4.47). Volume de ar de combustão para queima de 1 Nm<sup>3</sup> de gás misto (GN, GLP ou GAF):

$$a_0 = \frac{(0,2014 + 0,0002 \times PCI_{GN}) \times Q_{GN} + (5,64) \times Q_{GLP} + (0,0043 + 0,0002 \times PCI_{GAF}) \times Q_{GAF}}{f_{O_2}^{ar} \times Q_{GM}} \quad (4.47)$$

Ou ainda:

$$a_0 = \frac{(0,2014 + 0,0002 \times PCI_{GN}) \times f_{GN}^{GM} + (5,64) \times f_{GLP}^{GM} + (0,0043 + 0,0002 \times PCI_{GAF}) \times f_{GAF}^{GM}}{f_{O_2}^{ar}}$$

Onde:

$$f_{GN}^{GM} = \frac{Q_{GN}}{Q_{GM}} = \frac{Q_{GN}}{Q_{GN} + Q_{GLP} + Q_{GAF}}$$

$$f_{GLP}^{GM} = \frac{Q_{GLP}}{Q_{GM}} = \frac{Q_{GLP}}{Q_{GN} + Q_{GLP} + Q_{GAF}}$$

$$f_{GAF}^{GM} = \frac{Q_{GAF}}{Q_{GM}} = \frac{Q_{GAF}}{Q_{GN} + Q_{GLP} + Q_{GAF}}$$

Uma lógica de controle baseada nestas equações foi implantada em todos os fornos da Empresa Siderúrgica que utilizam mistura de gases durante a implantação do Projeto Gás Natural.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medidas de conservação de energia e de eficiência energética, permitiram que a Empresa Siderúrgica economizasse 421 mil GJ de energia por ano em suas operações, além da redução de emissões de CO<sub>2</sub> em 26.405 toneladas por ano. Essa economia foi possível pela implantação de vários projetos e a melhorias tecnológicas, conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Principais projetos de eficiência energética implantados.

| ITEM | DESCRIÇÃO DO PROJETO   | UTILIDADE                    | UNID.           | ECONOMIA ANUAL (UNID./ano) | ECONOMIA ANUAL DE ENERGIA (GJ/ano) | REDUÇÃO DE EMISSÃO DE CO <sub>2</sub> (t/ano) |
|------|--|------------------------------|-----------------|----------------------------|------------------------------------|---|
| 1    | Mistura de GAF para economizar GLP   | GLP                          | kg              | 2.712.253                  | 128.290                            | 8.096   |
| 2    | Otimizar o uso de bombas e exaustores das torres de refrigeração de acordo com a demanda de água | Energia Elétrica             | kWh             | 6.660.000                  | 65.268                             | 3.357   |
| 3    | Substituir o óleo diesel por gás de alto-forno e oxigênio na Regeneração de Ácido Clorídrico     | Economia de Óleo Diesel      | Litros          | 1.507.854                  | 52.926                             | 3.922   |
|      |  | Consumo de Oxigênio          | Nm <sup>3</sup> | (1.411.200)                | (9.737)                            | (501)   |
| 4    | Reduzir o consumo de GLP nos aquecedores de panela   | GLP                          | kg              | 497.426                    | 23.528                             | 1.485   |
| 5    | Otimizar a geração de ar comprimido com implantação de novo compressor                           | Óleo Diesel                  | Litros          | 430.000                    | 15.093                             | 1.118   |
|      |  | Energia Elétrica             | kWh             | 2.889.000                  | 28.312                             | 1.456   |
| 6    | Substituir nitrogênio por ar de instrumento na RB3   | Economia de Nitrogênio       | Nm <sup>3</sup> | 13.270.000                 | 26.540                             | 1.367   |
|      |  | Consumo de Ar de Instrumento | Nm <sup>3</sup> | (13.270.000)               | (13.441)                           | (730)   |
| 7    | Implantar piloto econômico de GLP nas torres de queima de GAF                                    | GLP                          | kg              | 1.071.739                  | 50.693                             | 3.199   |
| 8    | Reduzir o consumo de óleo combustível na caldeira CBC  | Óleo Combustível 1A          | kg              | 166.881                    | 6.291                              | 485   |
| 9    | Reduzir consumo de energia elétrica no escritório central  | Energia Elétrica             | kWh             | 474.525                    | 4.650                              | 239   |
| 10   | Reduzir consumo de GLP nas RBs inox  | GLP                          | kg              | 716.508                    | 33.891                             | 2.139   |
| 11   | Alterar estratégia de implantação do projeto gás natural   | Economia de GLP              | kg              | 538.085                    | 25.451                             | 1.606   |
|      |  | Consumo de Gás Natural       | m <sup>3</sup>  | (677.987)                  | (24.340)                           | (1.272)                                       |
| 12   | Implantar projeto piloto utilizando o recurso da lei de eficiência energética                    | Energia Elétrica             | kWh             | 870.741                    | 8.533                              | 439   |
|      |  |                              |                 | <b>Total</b>               | <b>421.949</b>                     | <b>26.405</b>                                 |

As principais ações englobam:

- Mistura de gás de alto-forno para economizar GLP;

- Otimização do uso de bombas e exaustores das torres de refrigeração, por meio de adequações no sistema de distribuição, monitoramento e gerenciamento;
- Substituição de óleo diesel por gás de alto-forno na planta de Regeneração de Ácido Clorídrico;
- Melhoria no controle no aquecimento de painéis da aciaria, resultando na redução dos consumos de GLP e oxigênio;
- Instalação de compressor de ar mais moderno e eficiente em substituição a dois compressores a óleo e dois compressores obsoletos;
- Uso de ar de instrumento, em lugar de nitrogênio, na linha de Recozimento e Decapagem de aços inoxidáveis;
- Aumento da eficiência dos queimadores pilotos das torres de queima dos altos-fornos;
- Redução da pressão de óleo combustível nos queimadores da caldeira;
- Otimização do uso do sistema de refrigeração do escritório central da Empresa Siderúrgica em Timóteo;
- Melhoria do controle da combustão no forno da linha de recozimento e decapagem de aços inoxidáveis.

No último caso, a melhoria do controle de combustão foi possível através da lógica de controle implantada. Através dela, a modulação de vazão de combustível, com a conseqüente modulação do ar de combustão para atender a demanda (set-point) de temperatura, é baseada num controle contínuo do PCI do combustível de forma a manter o processo mais estável, conforme demonstrado na Figura 5.1. Nesta figura é mostrada a dinâmica do sistema de controle que, baseado no desvio resultante

---

entre a referência de temperatura (Set Point – SP) e o valor de temperatura medido (Process Variable – PV), incrementa ou decrementa as vazões de combustível e de ar de combustão, visando manter a temperatura dentro dos limites estabelecidos.

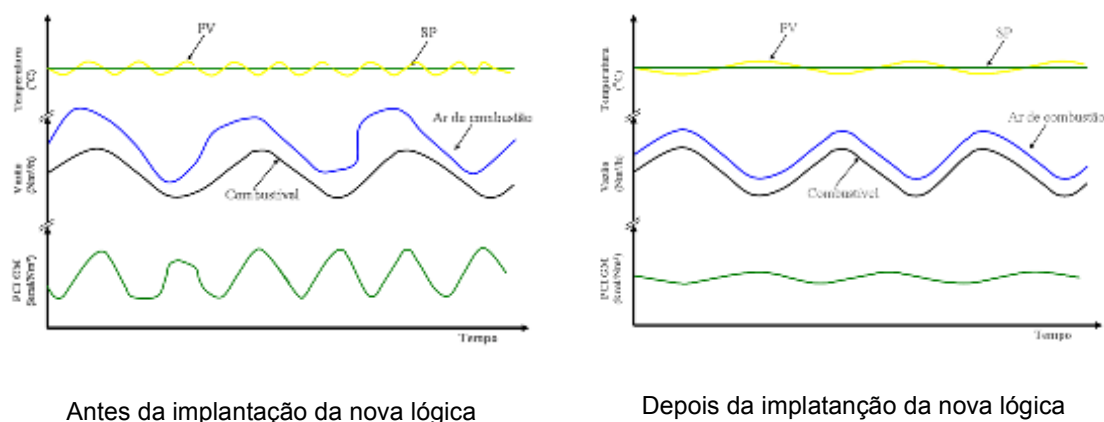


Figura 5.1 – Esquema da dinâmica de funcionamento do sistema de controle de combustão. (MIRANDA et Al., 2008)

Os resultados são atingidos com um bom controle do PCI da mistura e das relações ar/combustível. Devido à maior estabilidade do controle de temperaturas, o sistema permite reduzir o PCI da mistura de combustíveis, aumentando a vazão de gás de alto-forno e mantendo a mesma energia para o processo, conforme Figura 5.2, gerando os seguintes benefícios:

- Melhor funcionamento dos queimadores.
- Maior confiabilidade nas medições de vazão.
- Necessidade de menor excesso de ar.
- Maior transferência de calor por convecção, mesmo a transferência por radiação correspondendo a aproximadamente 90%.

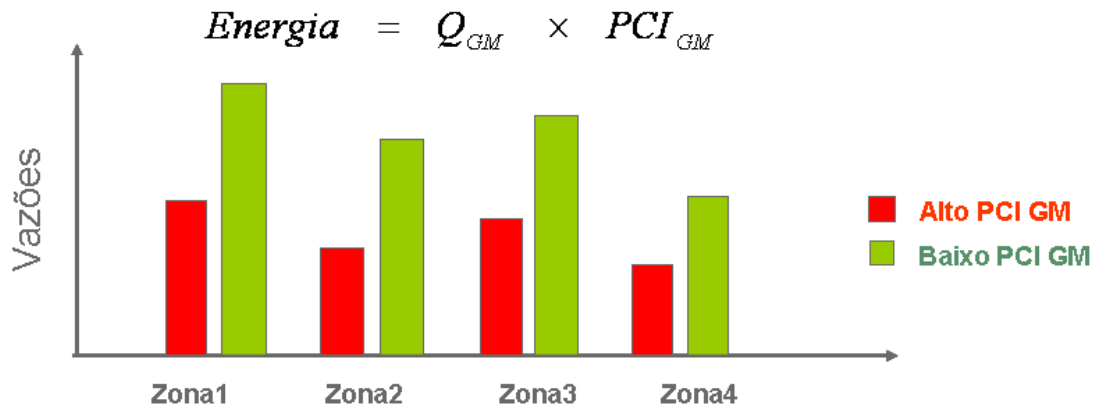


Figura 5.2 – Influencia do PCI do gás misto nas vazões dos queimadores. (MIRANDA et Al., 2008)

O doutorando trabalhou indiretamente na elaboração da norma mundial ISO 50.001 (Norma do Sistema de Gestão de Energia), conforme anexo A1, que foi divulgada pela ABNT no dia 07 de julho de 2011. Também contribuiu para aprovação, estratégia e implantação do Projeto Gás Natural e do Projeto Piloto utilizando o recurso da lei de eficiência energética, com os resultados sendo detalhados ao longo deste trabalho.

## 5.1 Projeto Piloto de Eficiência Energética

### 5.1.1 Solução Técnica

A solução técnica consistiu na substituição do grupo motor/gerador por um retificador estático para alimentação das pontes rolantes. Esse sistema tem maior eficiência e confiabilidade, conforme mostrado na Figura 5.3.

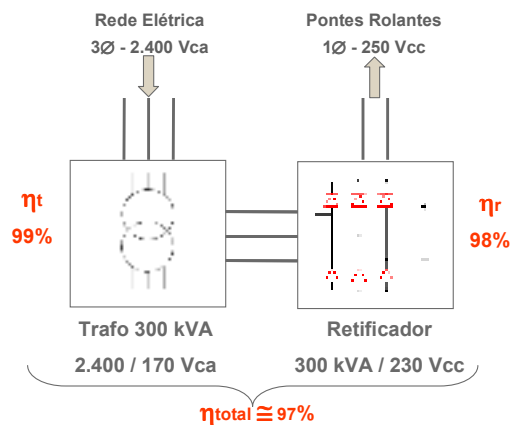


Figura 5.3 - Esquema do retificador para alimentação das pontes rolantes dos FEAs.

Na Figura 5.4 é mostrada a situação atual de alimentação do barramento das pontes rolantes, através de um retificador e transformador conforme esquema anterior.



Figura 5.4 - Retificador e transformador para alimentação das pontes rolantes

### 5.1.2 Resultado do projeto Piloto

A instalação do retificador para alimentação das pontes rolantes dos FEAs permitiu desligar o grupo motor/gerador, que se trata de um sistema obsoleto, onde não havia possibilidade de adquirir peças de reposição, e sua substituição trouxe os seguintes benefícios para a Empresa Siderúrgica:

- Economia de energia elétrica superior a 870.741 kWh/ano (80% de redução do consumo de energia elétrica).
- Melhoria considerável das condições do ambiente da sala elétrica da subestação 02, através da redução significativa de calor e ruído. Além disso, permitiu a disponibilização de espaço na sala pela retirada do sistema antigo.
- Redução dos gastos com manutenção com o sistema antigo.
- Redução de emissões de CO<sub>2</sub> da ordem de 400 t/ano (WSA, 2008).

Na Tabela 5.2 é apresentada uma comparação dos dois sistemas.

Tabela 5.2 - Economia de energia elétrica no projeto piloto de eficiência energética

|                     | Energia Elétrica |           | Emissões de CO <sub>2</sub><br>(t/ano) |
|---------------------|------------------|-----------|--|
|                     | kWh/ano          | kW médio  |  |
| Grupo motor/gerador | 1.042.677        | 119       | 525                                    |
| Retificador         | 171.937          | 20        | 86                                     |
| <b>Redução</b>      | <b>870.741</b>   | <b>99</b> | <b>439</b>                             |

### 5.2 Projeto Gás Natural

O projeto Gasoduto Vale do Aço foi inaugurado pela Gasmig em setembro de 2010. Neste mesmo mês, partiu o primeiro equipamento da Empresa Siderúrgica, que consome 40% do volume do gás natural contratado. Em maio de 2011,

aproximadamente noventa por cento (90%) de todo o GLP que era consumido já estava praticamente substituído.

Após 6 meses de utilização do gás natural na Empresa Siderúrgica, os principais resultados observados foram: a redução de custo com combustível, a melhoria da qualidade de aquecimento dos produtos, a redução de emissões de CO<sub>2</sub> e o aumento da segurança nos processos.

### 5.2.1 Redução de Custo com Combustível

O principal ganho do projeto, e o que motivou a sua realização, foi a redução do custo unitário da energia consumida. Neste período de utilização do GN foi apurada uma redução de 32% neste custo. A Tabela 5.3 apresenta uma comparação deste com outros custos com o GN e o GLP na Empresa Siderúrgica.

Tabela 5.3 – Comparação dos custos com GN e GLP na Empresa Siderúrgica.

| Item | Descrição                   | GN       | GLP        | Comentários  |
|------|-----------------------------|----------|------------|--|
| 1    | Custo de mão de obra        | Menor    | Maior      | O GLP necessita de operadores para monitorar descarga, bombeamento e vaporização. GN é comandado à distância.          |
| 2    | Consumo de energia elétrica | Dispensa | Necessário | GLP necessita de energia elétrica para descarga e bombeamento. GN já é fornecido na pressão de consumo.                |
| 3    | Consumo de vapor            | Dispensa | Necessário | GLP necessita de vapor para a vaporização. GN já é fornecido na forma gasosa.  |
| 4    | Custo de manutenção         | Menor    | Maior      | GLP necessita tubulações, válvulas, bombas, vaporizadores, tanques, etc. GN necessita apenas de tubulações e válvulas. |
| 5    | Custo com seguro            | Menor    | Maior      | GLP é transportado e armazenado na forma líquida. GN é transportado em gasoduto já na forma gasosa.                    |

## 5.2.2 Melhoria no Aquecimento dos Produtos

O primeiro equipamento a ser adaptado para o consumo do GN foi o Forno de Reaquecimento de Placas Walking Beam na Laminação de Tiras a Quente. Como dito anteriormente, este é o maior consumidor individual da empresa. Neste equipamento, foi detectada uma grande influência na qualidade de aquecimento das placas, atestada através de alguns indicadores descritos a seguir:

- Foram observadas significativas reduções nas correntes dos motores no laminador desbastador, primeiro equipamento após o forno, indicando reduções nas cargas de laminação. Em geral, quanto maior a temperatura média e uniformidade de temperatura da placa, menores são as cargas de laminação, para um mesmo plano de passes de redução.
- As “Temperaturas de Tesoura”, ou seja, as temperaturas das tiras na entrada do laminador acabador Steckel apresentaram um aumento sistemático.
- Diminuíram as ocorrências de “pontas altas” no laminador desbastador, ou seja, as extremidades da tira tendendo a se projetar para cima ao sair do laminador. Entre as variáveis que influenciam esta ocorrência está a uniformidade de temperatura da placa, embora esta não seja a principal. Mantendo-se inalteradas as demais variáveis influentes, observou-se que estas ocorrências diminuíram para todos os aços produzidos, e, em especial, para uma classe de aços onde isto ocorria com elevada incidência. Neste último caso, a ocorrência de “pontas altas” foi praticamente eliminada.

Nos fornos de recozimento nas laminações a frio, também foi encontrada evidência de melhor aquecimento das tiras. Em todos os casos, existem pirômetros medindo a temperatura da tira. A observação destes processos mostrou que as indicações de

---

temperatura das tiras aumentaram sistematicamente, mesmo mantendo as mesmas temperaturas de forno usadas anteriormente. Para contornar este efeito e, conseqüentemente, garantir as corretas temperaturas de recozimento das tiras, foi necessário reduzir as temperaturas dos fornos.

Este efeito de melhoria do aquecimento dos produtos nos fornos era esperado e pode ser explicado, principalmente, pelos seguintes fatos:

- Existe uma maior concentração de vapor d'água ( $H_2O$ ) nos produtos da combustão com GN, quando comparado aos produtos da combustão com o GLP. Esta maior quantidade de vapor d'água aumenta a emissividade dos gases, aumentando assim a transferência de calor por radiação para os produtos (PINHEIRO, 1996).
  - O volume de gases com o GN é um pouco superior ao volume com GLP, contribuindo para uma maior troca de calor também por convecção.
  - A queima com GN ocorre de forma mais eficiente do que a com GLP. O GN é facilmente miscível com o ar, formando com este uma melhor mistura e com contato íntimo, contribuindo para uma combustão completa com menos excesso de comburente. Com o GN é mais fácil o controle da atmosfera do forno e a obtenção de uma chama longa, de combustão lenta, com liberação gradual e uniforme de energia. Esta uniformidade de liberação de energia também contribui para um aquecimento mais uniforme dos produtos (PINHEIRO, 1996).
-

### 5.2.3 Redução de Emissões de CO<sub>2</sub>

As emissões diretas de CO<sub>2</sub> na queima do GN são inferiores às da queima do GLP. O fator de emissão do GN é de 0,052 t CO<sub>2</sub>/GJ enquanto o do GLP é de 0,063 t CO<sub>2</sub>/GJ (WSA, 2008). Com esta redução de 14% no fator de emissão direta, a substituição de aproximadamente 90% do consumo de GLP por GN no Projeto Gás Natural propiciou um potencial de redução anual de 24.818 t CO<sub>2</sub>. Além deste montante, existem outras emissões indiretas cujas reduções não foram quantificadas. Por exemplo, a logística de abastecimento do GLP exigia o tráfego de aproximadamente 250 carretas/mês percorrendo uma distância média de 400 km (ida e volta). Com a redução de 92% deste montante, as emissões indiretas correspondentes a 2760 carretas/ano deixaram de ser geradas neste transporte.

### 5.2.4 Melhoria na Segurança dos Processos

Sob vários aspectos, desde o transporte até a utilização, a operação com GN é bem mais segura do que com GLP. A Tabela 5.4 mostra uma comparação entre GN e GLP de vários aspectos de segurança envolvidos.

Tabela 5.4 - Comparação dos aspectos de segurança com GN e GLP na Empresa Siderúrgica.

| Item | Descrição                     | GN         | GLP    | Comentários   |
|------|-------------------------------|------------|--------|---|
| 1    | Acúmulo de gás                | Menor      | Maior  | GLP é bem mais pesado do que o ar e se mantém no ambiente. GN é mais leve que o ar e se dispersa facilmente.  |
| 2    | Risco de asfixia              | Não existe | Existe |   |
| 3    | Risco de explosão             | Quase nulo | Maior  | GLP tende a se acumular em caso de vazamento, possui limites de inflamabilidade mais amplos e menor valor de limite inferior de inflamabilidade. GN se dispersa facilmente em caso de vazamentos, possui limites mais estreitos de inflamabilidade e maior valor de limite inferior de inflamabilidade. |
| 4    | Risco interno de fornecimento | Menor      | Maior  | GLP apresenta risco de falha em bombas, vaporizadores, válvulas termostáticas e redutoras de pressão. GN apresenta risco apenas em válvulas.  |
| 5    | Risco externo de fornecimento | Maior      | Menor  | O GLP tem estoque para dois dias de consumo. O GN não possui estocagem.   |
| 6    | Segurança no transporte       | Maior      | Menor  | GLP é transportado em carretas. GN é transportado em gasodutos.   |

### 5.2.5 Outros Benefícios Não Mensuráveis ou Não Quantificados

Além dos benefícios citados anteriormente a substituição do GLP pelo GN traz ainda outros não mensuráveis ou que não foram quantificados. A Tabela 5.5 e Tabela 5.6 resumem estes principais benefícios e compara o GN com o GLP.

Tabela 5.5 - Comparação entre GN e GLP na Empresa Siderúrgica – manuseio e estocagem.

| Item | Descrição                    | GN                     | GLP                  | Comentários   |
|------|------------------------------|------------------------|----------------------|---|
| 1    | Condicionamento              | Dispensa               | Necessário           | GLP necessita ser estocado, bombeado e vaporizado para consumo. GN necessita apenas redução da pressão.   |
| 2    | Mudança de fase para líquido | Temperatura criogênica | Temperatura Ambiente | GLP muda de fase pela alteração de temperatura, pressão e vazão. GN é sempre gasoso nas condições de uso. |
| 3    | Estocagem                    | Dispensa               | Necessário           | GLP é armazenado na forma líquida. GN não é armazenado.   |
| 4    | Área utilizada               | Menor                  | Maior                | GLP necessita área para estocagem, bombeamento e vaporização para consumo.                                |

Tabela 5.6 - Comparação entre GN e GLP na Empresa Siderúrgica – controle e faturamento.

| Item | Descrição                | GN         | GLP        | Comentários  |
|------|--------------------------|------------|------------|--|
| 1    | Medição para faturamento | Energia    | Peso       | GLP é faturado em massa. GN tem medição de vazão, com correção para pressão, temperatura e energia para faturamento. |
| 2    | Take or Pay              | Necessário | Dispensa   | GLP não tem exigência de consumo mínimo. GN requer um consumo mínimo do volume contratado.                           |
| 3    | Condição de pagamento    | Após o uso | Antecipado | GLP é pago quando a carreta é descarregada e vai para estoque. GN é pago após o consumo.                             |
| 4    | Vazão máxima             | Necessário | Dispensa   | GLP não tem limitação na vazão máxima. GN requer uma vazão máxima contratada em função da limitação do gasoduto.     |

Outra vantagem do GN em relação ao GLP é o nível de impurezas do gás. GLP contém óleo e água e GN é praticamente isento deles.

## **5.2.6 Índice de Wobbe**

A premissa para a substituição de GLP por GN misturado com o GAF é que fossem mantidos os mesmos queimadores, portanto, foi trabalhado para manter o mesmo índice de Wobbe. Neste trabalho, foi simulado o Índice de Wobbe para a faixa mínima de 1.000 kcal/Nm<sup>3</sup>, situação em que se utiliza o mínimo de GN misturado ao GAF, e máximo de 11.700 kcal/Nm<sup>3</sup>, que é a utilização de GN puro.

Na situação anterior ao Projeto Gás Natural se utilizava GLP misturado com gás de alto-forno a coque (GAF a Coque). Esta situação foi comparada com a utilização de GN misturado com GAF a coque e também com a situação atual, em que se utiliza GN misturado ao gás de alto-forno a carvão vegetal (GAF a Carvão Vegetal). Para todas as situações foi simulado o volume e a energia do gás de mistura para o mesmo Índice de Wobbe.

### **5.2.6.1 Volume do Gás de Mistura**

A Figura 5.5 mostra a situação anterior ao Projeto Gás Natural, em que se define a proporção em volume do GLP e GAF a Coque, com poder calorífico inferior de 750 kcal/Nm<sup>3</sup>, que será a base para as demais simulações. Merece destaque para o Índice de Wobbe de 11.700 kcal/Nm<sup>3</sup>, em que a mistura é composta por 55% de GLP e 45% de GAF a Coque. Para esta situação o volume de GN é 100%, conforme Figura 5.6.

---

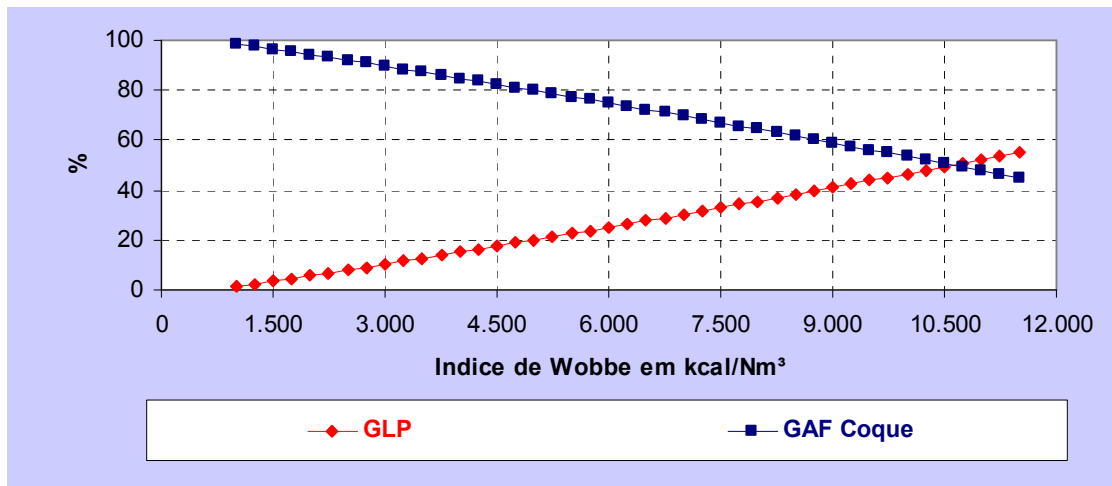


Figura 5.5 – Situação anterior – proporção em volume de GLP e GAF para diversos Índices de Wobbe.

A Figura 5.6 apresenta a situação depois da implantação do projeto GN, em que foi necessária a redução da proporção em volume do GAF a Coque na mistura para manter o mesmo Índice de Wobbe.

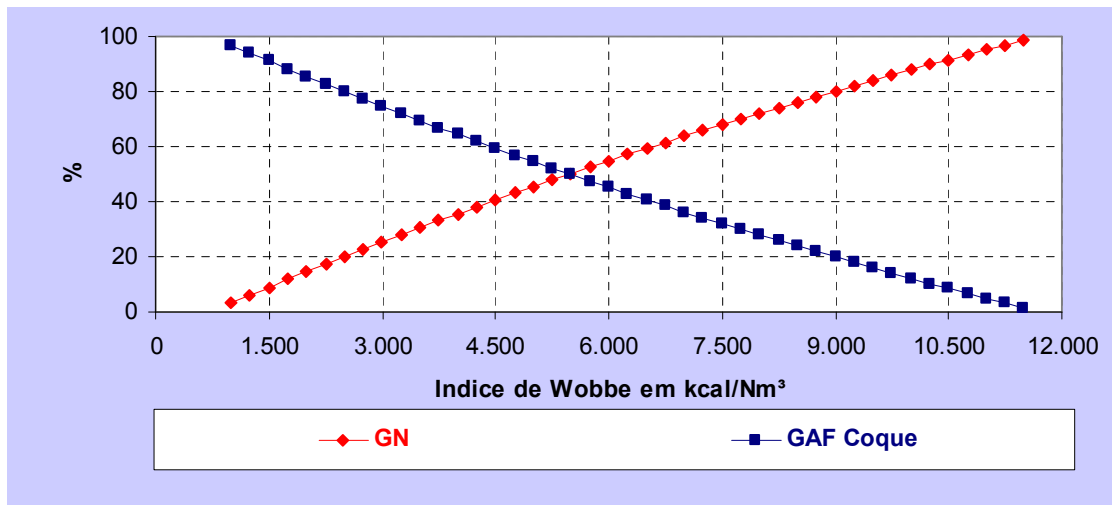


Figura 5.6 - Situação atual – proporção em volume de GN e GAF para diversos Índice de Wobbe.

Quanto maior o Índice de Wobbe, menor é a participação do GAF na mistura de GLP e GN, porém a redução da proporção de GAF na mistura com GN é ainda maior e atinge valor máximo quando se queima GN puro. Para manter o mesmo Índice de

Wobbe nesta situação, a proporção em volume de GAF na mistura com GLP é de aproximadamente 45%, conforme Figura 5.7.

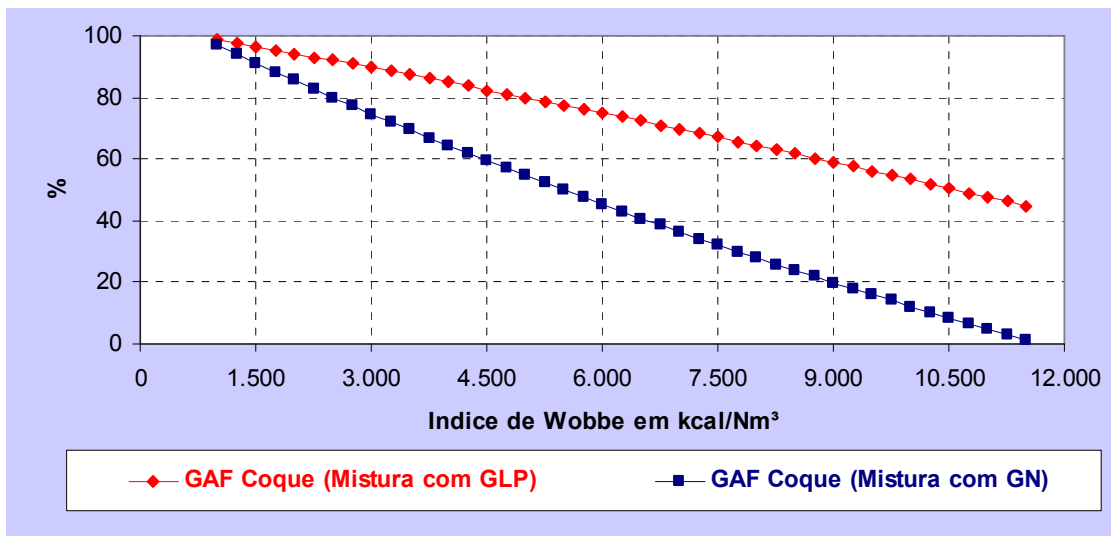


Figura 5.7 – Comparação da proporção em volume de GAF na mistura com GLP e GN.

A Figura 5.8 mostra a variação das relações entre os volumes de GN e GLP e dos volumes de GAF a Coque misturados com GLP ou GN.

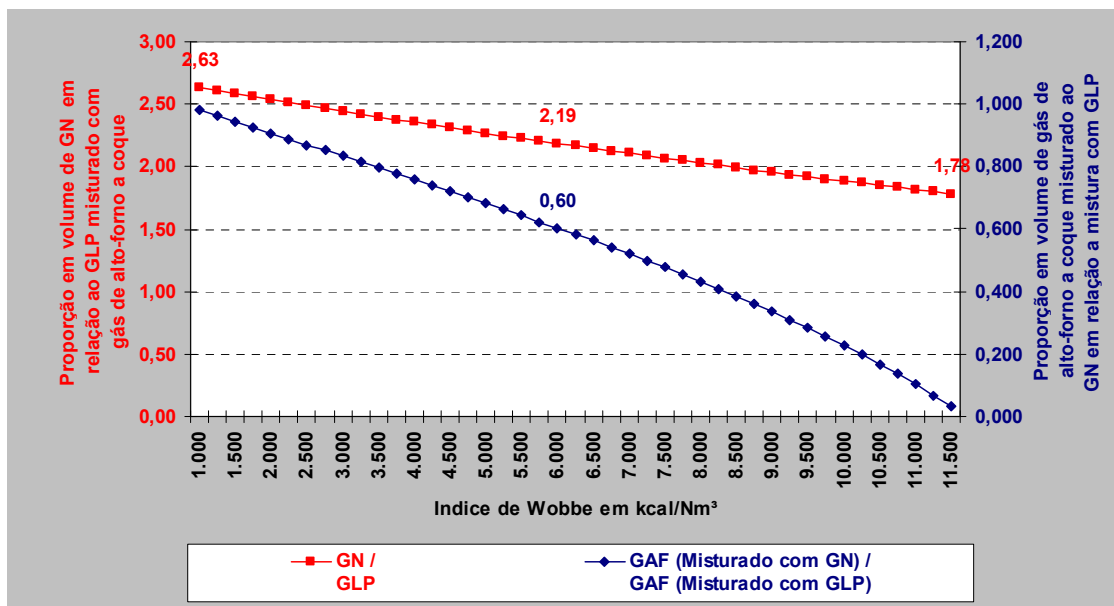


Figura 5.8 – Proporção em volume de GN em relação ao GLP misturado ao GAF a Coque.

Da Figura 5.8 pode-se concluir:

- Quanto maior é o índice de Wobbe, menor será a relação entre GN e GLP.
- Menor volume de GAF misturado com GN em relação ao volume misturado com GLP. Portanto, há necessidade do aumento do volume de GN com redução de GAF para manter o mesmo Índice de Wobbe da mistura de GAF com GLP.
- A redução da razão GN/GLP é explicada pelo maior volume de GAF na mistura com o GLP, comparado à mistura com GN. Portanto, ao retirar GAF e substituir por GN, para manter o mesmo Índice de Wobbe, o rendimento do processo aumenta devido à redução dos gases inertes (nitrogênio e dióxido de carbono) contidos no GAF.

Logo após a substituição do GLP pelo GN na Empresa Siderúrgica, ocorreu a substituição do coque por carvão vegetal no alto-forno, portanto, o poder calorífico inferior do GAF passou de 750 kcal/Nm<sup>3</sup> para 950 kcal/Nm<sup>3</sup>. Dessa forma, foi feita uma comparação da situação anterior ao Projeto Gás Natural com a situação atual da empresa, que contempla tanto a implantação do Gás Natural quanto a substituição do coque por carvão vegetal. A Figura 5.9 apresenta a variação de duas relações em função do aumento do Índice de Wobbe. A primeira relação é a razão entre os volumes de GN (misturado com GAF a Carvão Vegetal) e GLP (misturado com GAF a Coque). A segunda relação é a razão dos volumes de GAF a Carvão Vegetal (mistura com GN) e GAF a Coque (misturado com GLP)

---

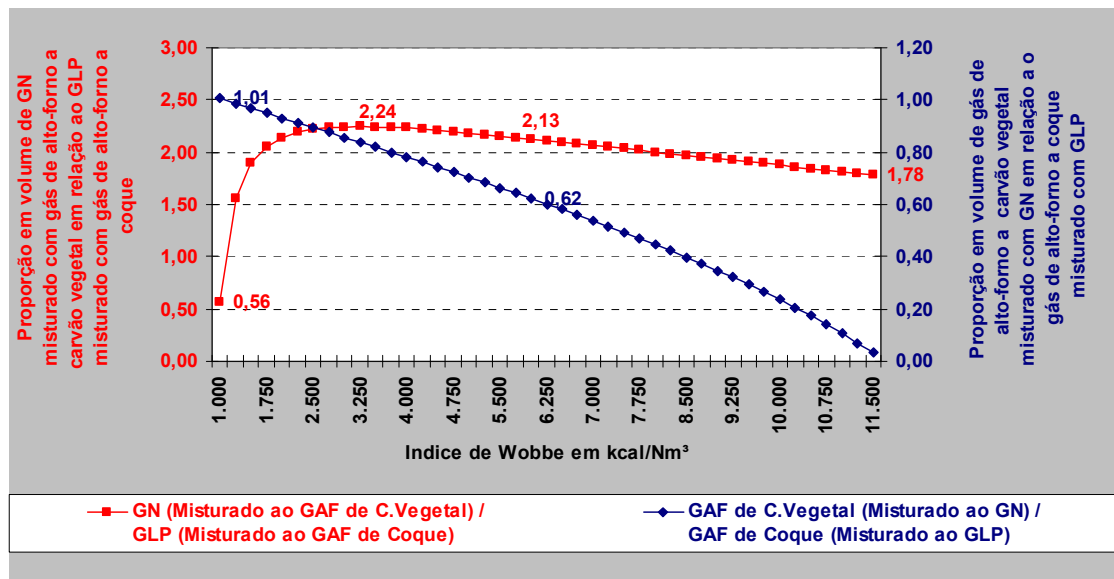


Figura 5.9 - Proporção em volume de GN misturado com GAF a Carvão Vegetal em relação ao GLP misturado com GAF a Coque.

Nesta figura observa-se que, para um Índice de Wobbe de 1.000 kcal/Nm<sup>3</sup>, o volume de GN ficou 44% menor que o de GLP.

Têm-se as seguintes vantagens da situação atual, que corresponde à utilização de GN misturado ao GAF a Carvão Vegetal, em relação à situação anterior, em que o GLP era misturado ao GAF a Coque:

- A redução do consumo de GN chega a 79% para o Índice de Wobbe de 1.000 kcal/Nm<sup>3</sup>, mas reduz à medida que o índice de Wobbe aumenta, conforme Figura 5.10.
- O aproveitamento do GAF chega a aumentar 2,5% para o Índice de Wobbe de 1.000 Kcal/Nm<sup>3</sup>, conforme Figura 5.11.

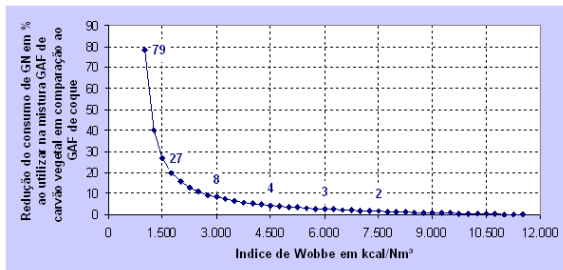


Figura 5.10 – Redução do consumo de GN misturado com GAF a Carvão Vegetal em comparação ao GAF a Coque

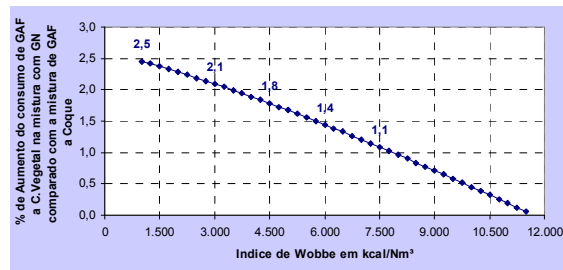


Figura 5.11 – Aumento do consumo de GAF a Carvão Vegetal misturado com GN em comparação a mistura com GAF a Coque

### 5.2.6.2 Energia do Gás de Mistura

A Figura 5.12 mostra a situação anterior ao Projeto Gás Natural, apresentando a variação da proporção da energia da mistura do GLP com GAF a Coque, com poder calorífico inferior de 750 kcal/Nm<sup>3</sup>. Quanto maior o Índice de Wobbe, menor é a proporção da energia fornecida pelo GAF.

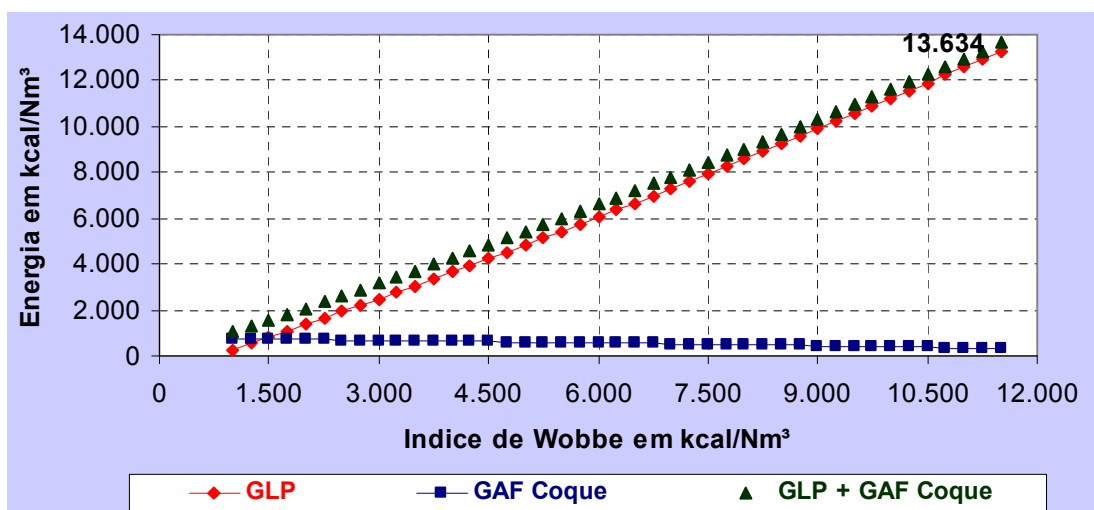


Figura 5.12 – Situação anterior - energia da mistura do GLP e GAF a Coque para diversos Índices de Wobbe.

A Figura 5.13 apresenta a situação depois da implantação do projeto GN. A energia da mistura diminuiu em relação à situação anterior, ou seja, para manter um Índice

de Wobbe de 11.700 kcal/Nm<sup>3</sup>, a energia fornecida pelo GN foi de 9.161 kcal/Nm<sup>3</sup> e a mistura GLP mais GAF era de 13.634 kcal/Nm<sup>3</sup> (ver Figura 5.12).

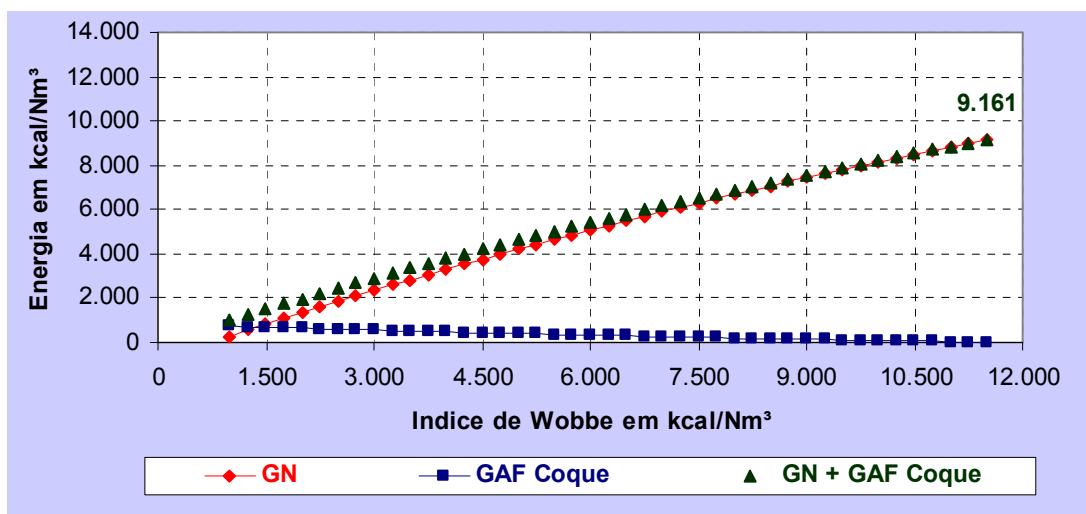


Figura 5.13 – Energia da mistura do GN e GAF a Coque para diversos Índices de Wobbe.

Quanto maior o Índice de Wobbe, menor é a participação da energia do GAF na mistura de GLP e GN, porém, a redução do GAF na mistura com GN é ainda maior e atinge valor máximo quando se queima GN puro. Para manter o mesmo Índice de Wobbe nesta situação, a energia do GAF na mistura com GLP é de aproximadamente 330 kcal/Nm<sup>3</sup>, conforme Figura 5.14.

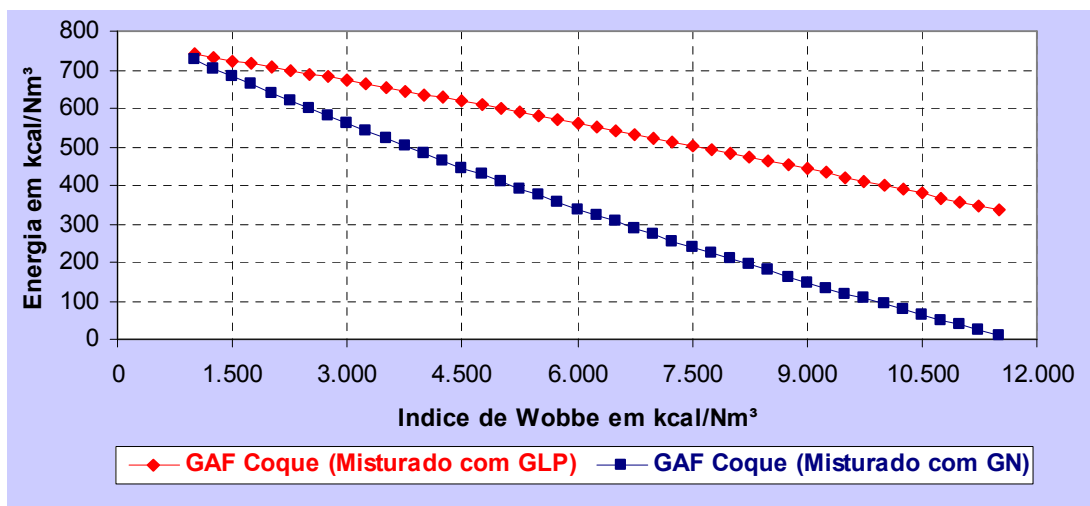


Figura 5.14 - Energia do GAF a Coque na mistura com GLP e GN.

A energia fornecida pela mistura de GLP com GAF aumenta em relação à mistura de GN com GAF, à medida que aumenta o Índice de Wobbe, ver Figura 5.15. Este fato está associado ao menor volume de GAF na mistura com GN, reduzindo o volume de nitrogênio e dióxido de carbono na mistura dos combustíveis, gases estes que não fornecem energia e ainda absorvem calor.

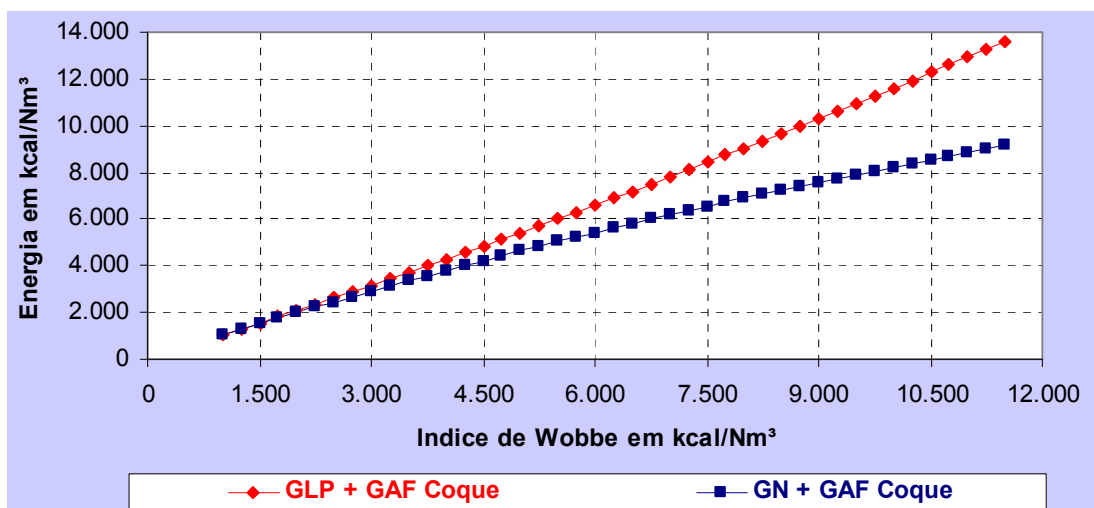


Figura 5.15 – Energia total da mistura do GLP e GN com GAF a Coque.

Em relação à energia da mistura do GAF a Coque misturado com GLP ou GN tem-se (ver Figura 5.16):

- Quanto maior é o índice de Wobbe, menor é a relação de energia entre GN e GLP e também de GAF misturado com GN em relação ao GAF misturado com GLP.

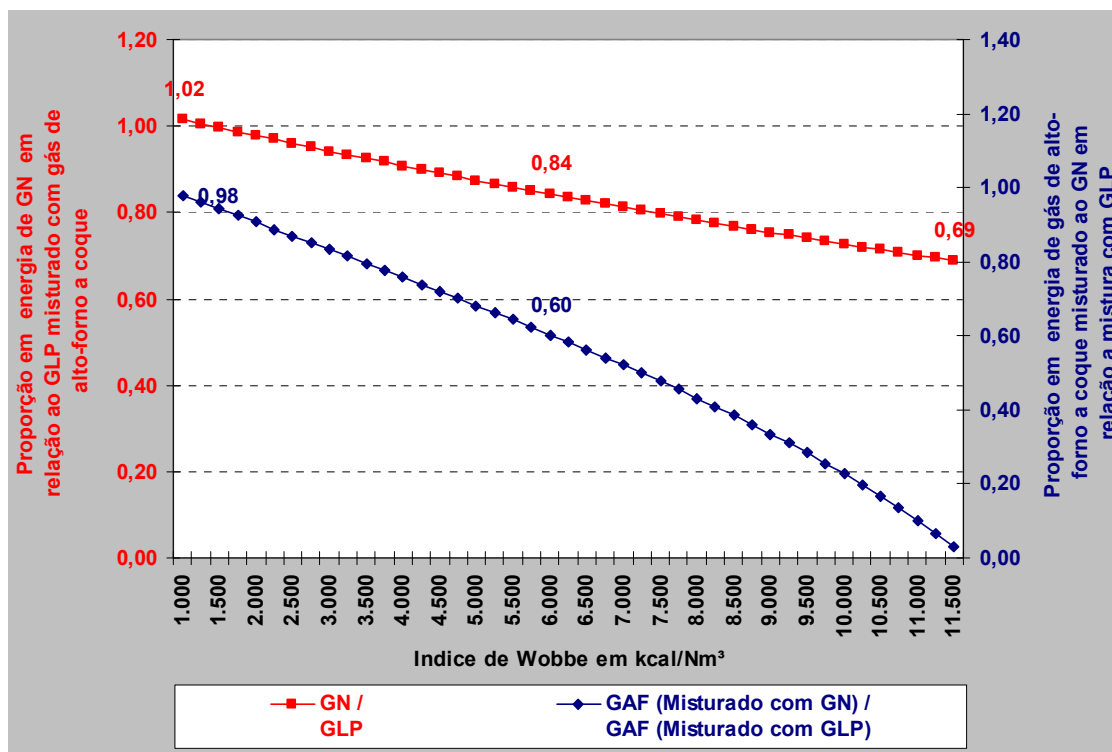


Figura 5.16 – Energia do GN em relação ao GLP, misturados ao GAF a Coque, e a relação dos volumes de GAF nas misturas com GN e com GLP.

A Figura 5.17 mostra que, quanto maior o Índice de Wobbe, menor é a energia do GAF fornecida para as misturas com GLP e com GN. Porém, na Figura 5.18 é mostrado que a diferença de energia fornecida pelo GAF na mistura com GN aumenta significativamente com o aumento do Índice de Wobbe em comparação com a mistura com GLP.

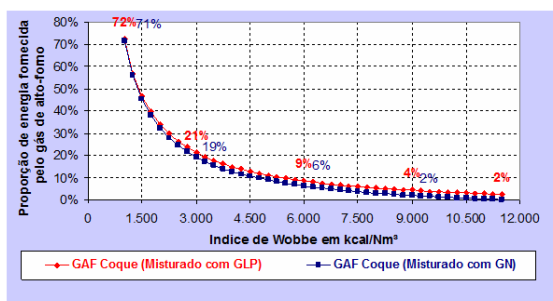


Figura 5.17 – Energia fornecida pelo GAF a Coque nas misturas com GLP e com GN

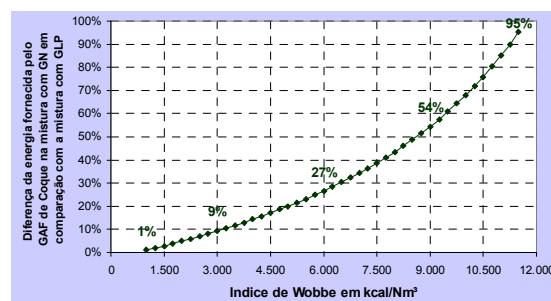


Figura 5.18 – Diferença da energia fornecida pelo GAF a Coque na mistura com GN e com GLP

A situação atual contempla o GAF a Carvão Vegetal, com poder calorífico inferior de 950 kcal/Nm<sup>3</sup>, misturado com GN, representando um aumento de 200 kcal/Nm<sup>3</sup> em relação ao GAF a Coque, que era de 750 kcal/Nm<sup>3</sup>. Esta condição permite reduzir a relação energética do GN/GLP, que é compensada pela energia adicional contida no GAF a Carvão Vegetal (Figura 5.19).

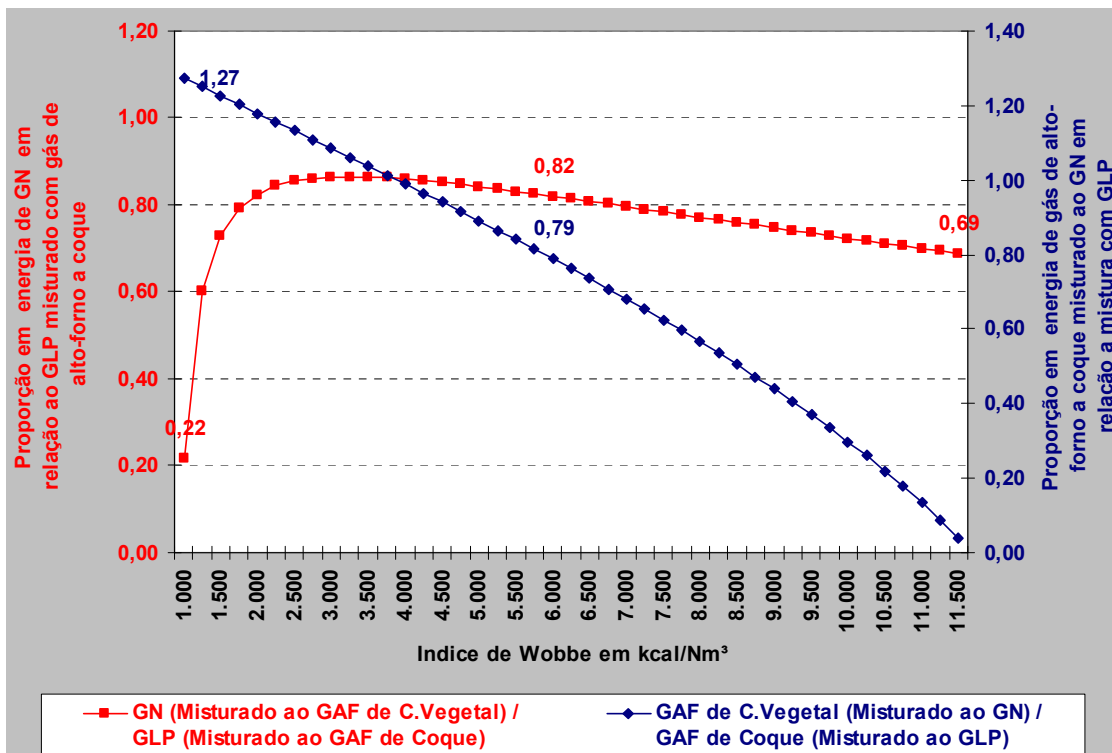


Figura 5.19 - Proporção em volume de GN misturado com GAF a Carvão Vegetal em relação ao GLP misturado com GAF a Coque.

A situação atual, onde o GN é misturado ao GAF a carvão vegetal, em comparação com a situação anterior, em que o GLP era misturado ao GAF a Coque (Figura 5.20), apresenta o seguinte resultado:

- Para Índice de Wobbe abaixo de 5.750 kcal/Nm<sup>3</sup>, a energia fornecida pelo GAF a Carvão Vegetal na mistura com GN é maior que a do GAF a Coque misturado com GLP. Esta faixa contempla a maioria dos equipamentos da Empresa Siderúrgica.

- Para Índice de Wobbe acima de 5.750 kcal/Nm<sup>3</sup>, as energias fornecidas pelo GAF na mistura com GN e com GLP ficaram abaixo de 10%, chegando a zero no caso do GN e a 2% no do GLP. Neste último caso, vale lembrar que o volume de GAF a Coque na mistura com GLP representava aproximadamente 45% do volume total.

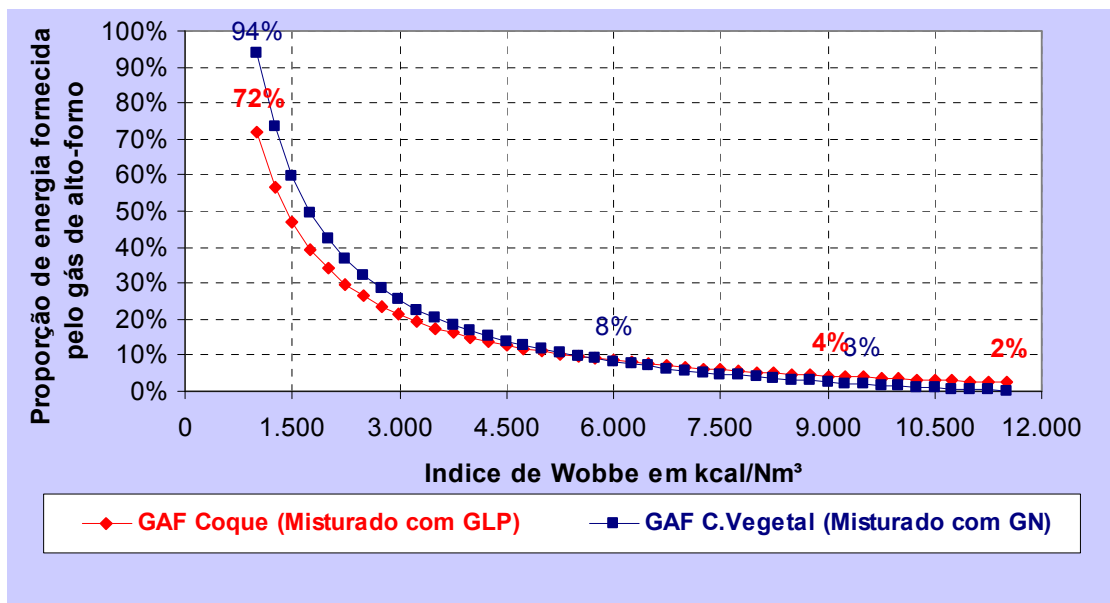


Figura 5.20 – Energia do GAF a Coque misturado com GLP em comparação com a energia do GAF a Carvão Vegetal misturado com GN.

### 5.3 Substituição do Coque pelo Carvão Vegetal

Com a substituição do coque pelo carvão vegetal, a Empresa Siderúrgica passou, em junho de 2011, a possuir o maior alto-forno a carvão vegetal do planeta. Esta solução é economicamente viável e ecologicamente correta. Foi reduzido o custo de aquisição do agente redutor, uma vez que o coque era importado da China, além de se eliminar a emissão de 500 mil toneladas de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Além disto, ocorreram benefícios adicionais com a ampliação da floresta renovável, no Vale do Jequitinhonha no Norte de Minas Gerais, proporcionando desenvolvimento social em

uma das regiões mais pobres do Brasil. Nesta tese, entretanto, é considerada somente a substituição do coque pelo carvão vegetal na planta industrial da Empresa Siderúrgica.

Na Figura 5.21 tem-se o resultado do consumo de coque da Empresa Siderúrgica entre os anos de 2004 e 2008.

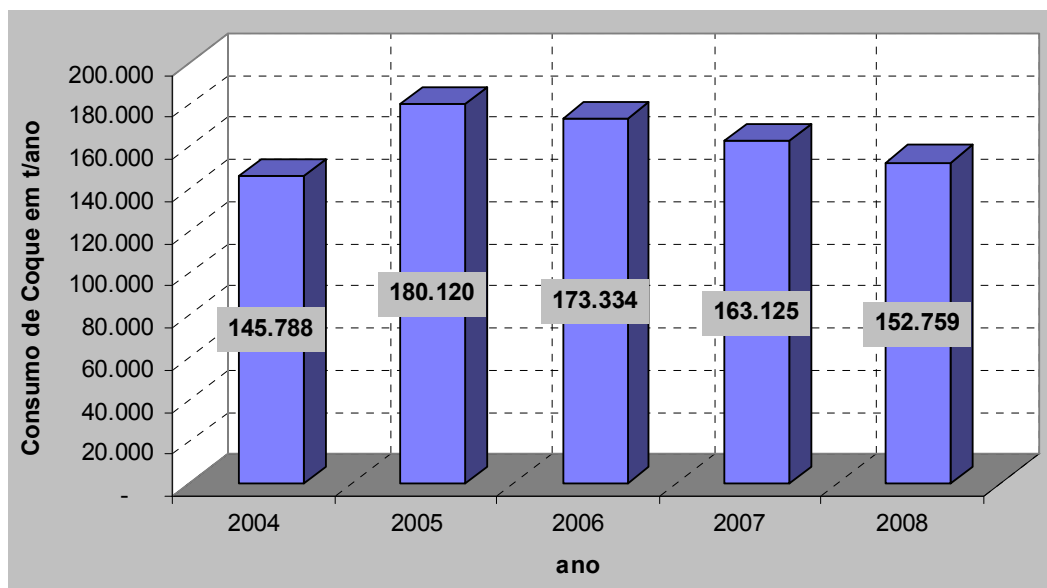


Figura 5.21 – Consumo de coque na Empresa Siderúrgica.

Para cada 1 tonelada de coque consumido são emitidas 3,257 toneladas de CO<sub>2</sub> para atmosfera, segundo a metodologia WSA (2008), que foi utilizada nesta tese para a quantificação de emissões. Os resultados destas emissões são apresentados na Figura 5.22.

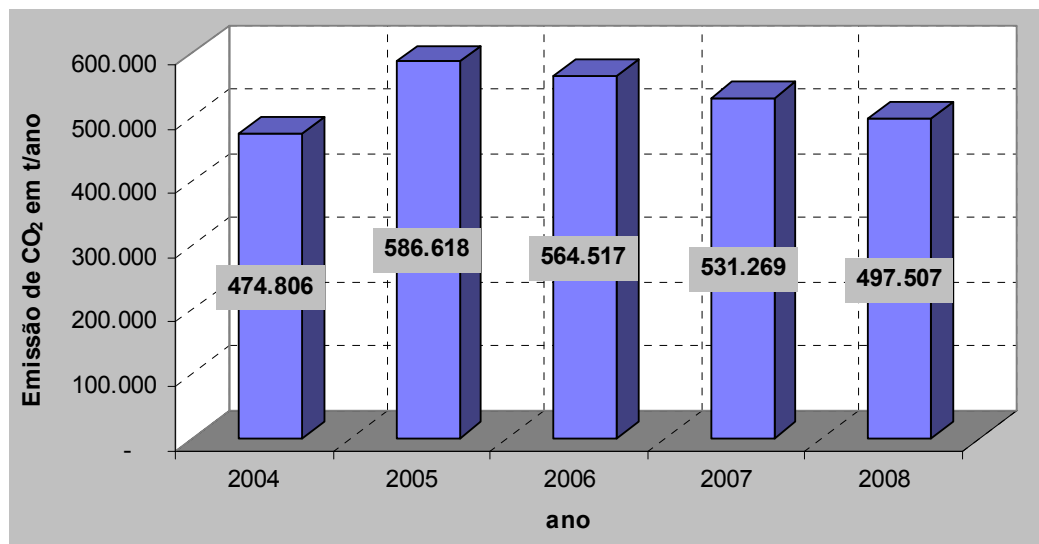


Figura 5.22 – Emissão de CO<sub>2</sub> pelo consumo de coque na Empresa Siderúrgica entre 2004 e 2008.

O carvão vegetal veio a substituir todo o coque utilizado na Empresa Siderúrgica. Na metodologia WSA (2008) a emissão de CO<sub>2</sub> para o carvão vegetal é considerada “Zero”. Dessa forma, a média de emissões de CO<sub>2</sub> foi reduzida em 530.943 toneladas por ano entre 2004 e 2008. A redução das emissões de CO<sub>2</sub> só não foi maior, porque a Empresa Siderúrgica em questão já era a única no mundo que injetava finos de carvão vegetal em um alto-forno a coque.

A Tabela 5.7 apresenta o resultado da geração do gás de alto-forno mostrando as situações antes e após a substituição do coque pelo carvão vegetal. Neste caso, são consideradas as mesmas condições da injeção de finos de carvão vegetal, o mesmo volume de oxigênio usado para enriquecimento do ar de combustão e a utilização da mesma carga metálica. As dimensões do alto-forno não foram alteradas, portanto o volume de produção de ferro-gusa reduziu em 14,5%, devido à menor densidade do carvão vegetal quando comparado ao coque. A geração de gás de alto-forno por tonelada de gusa foi equivalente, mas o volume total foi reduzido na mesma proporção da redução de produção. O rendimento do alto-forno ficou

muito próximo, mas o PCI teve um aumento de 26% em função da maior quantidade de materiais voláteis que se encontra no carvão vegetal, principalmente hidrogênio e metano.

Tabela 5.7 - Comparação do GAF produzido no alto-forno a coque em comparação com o carvão vegetal

| Descrição                    | Unidade              | Alto-Forno a Coque | Alto - Forno a Carvão Vegetal |
|------------------------------|----------------------|--------------------|-------------------------------|
| Produção de Ferro-Gusa       | t/dia                | 1.220              | 1.043                         |
| Geração de GAF               | Nm <sup>3</sup> /h   | 87.439             | 74.691                        |
| Específico da geração de GAF | Nm <sup>3</sup> /t   | 1.720              | 1.719                         |
| Consumo no Cowper            | Nm <sup>3</sup> /h   | 26.918             | 21.920                        |
| Hidrogênio                   | %                    | 3,6                | 6,6                           |
| Metano                       | %                    | 0,2                | 1,5                           |
| Monóxido de Carbono          | %                    | 21,3               | 21,6                          |
| Dióxido de Carbono           | %                    | 23,1               | 22,5                          |
| Nitrogênio                   | %                    | 51,8               | 47,8                          |
| Rendimento                   | %                    | 0,52               | 0,51                          |
| PCI                          | kcal/Nm <sup>3</sup> | 753                | 951                           |

#### 5.4 Otimização do Gás de Alto-Forno

Foi elaborada uma planilha de acompanhamento on-line para os operadores da distribuição de GAF da Empresa Siderúrgica em que são calculados a geração e o PCI do GAF. São calculados:

- o volume de GAF disponibilizado por cada alto-forno;
- o PCI da mistura;
- o nível do gasômetro e sua autonomia para atingir o limite de segurança, definido em 35%.
- a sobra de GAF;
- as emissões de CO<sub>2</sub> que deixariam de ser emitidas se o gás fosse todo aproveitado. Neste processo é utilizado o gás natural como referência, ou

seja, o aproveitamento do GAF reduz o consumo de gás natural. Estes resultados são calculados instantaneamente e projetados por hora, mês e ano.

Os principais equipamentos consumidores de GAF têm medição de consumo e estas informações são coletadas através de um sistema de gerenciamento de informação dos processos (PIMS - *Process Information Management System*). Além disto, no forno *Walking Beam*, na laminação a quente, existe um calorímetro, que mede o PCI real do GAF e disponibiliza a informação também via PIMs. Para os demais equipamentos o PCI é calculado levando-se em consideração a distância percorrida pelo gás entre os altos-fornos e o respectivo equipamento e as vazões nas tubulações, determinando-se, assim, o tempo de deslocamento do gás. A Figura 5.23 apresenta uma condição real, onde a geração de gás nos altos-fornos estava reduzida e a queima do GAF era preferencialmente daquele de menor PCI. Neste caso, o impacto negativo da queima de GAF no custo de produção e nas emissões de CO<sub>2</sub> é causado pelo baixo consumo, devido à paradas em diversos equipamentos.

---





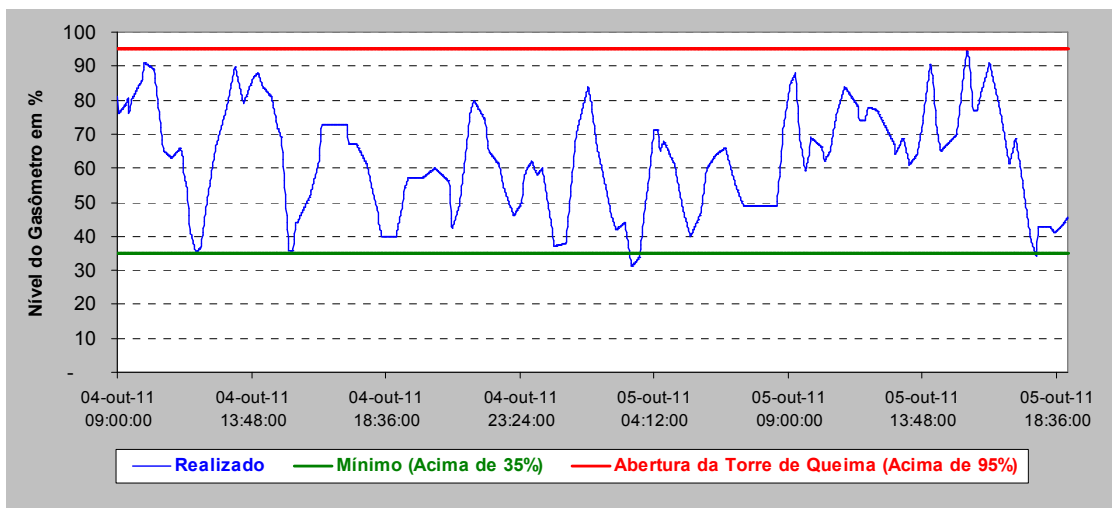


Figura 5.25 – Nível do gasômetro com parada do alto-forno 1 e alto-forno 2 com geração de gás reduzida.

O comportamento da variação do nível do gasômetro é explicado pela grande variação no consumo em toda empresa (Figura 5.26). Os picos de consumo ultrapassaram 80.000 Nm<sup>3</sup>/h para uma geração média de 62.000 Nm<sup>3</sup>/h.

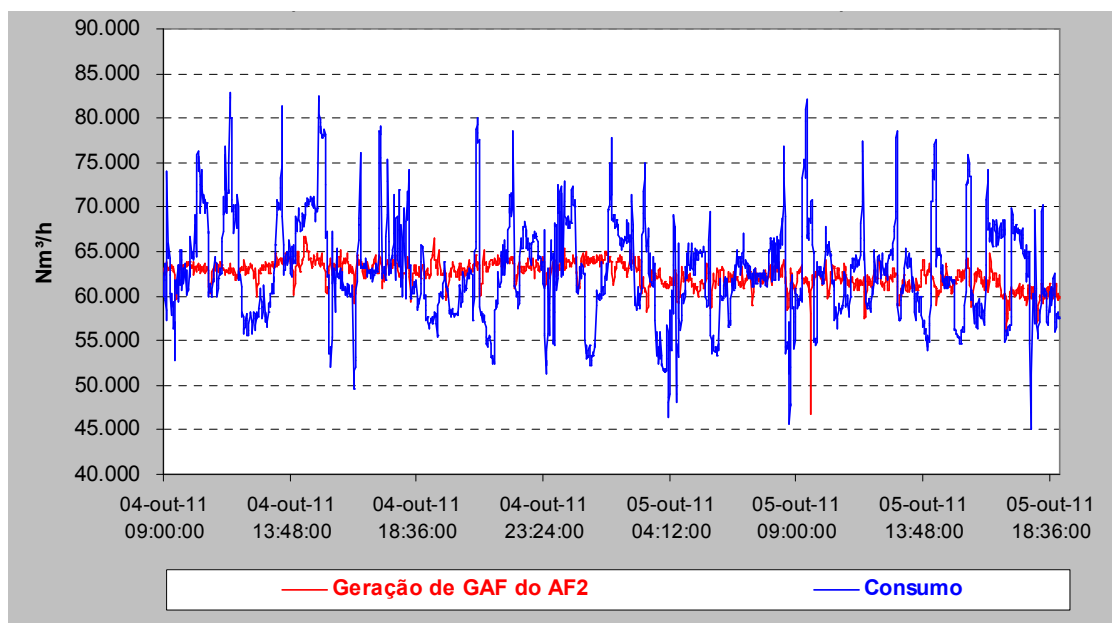


Figura 5.26 – Geração e consumo de GAF com alto-forno 1 parado e alto-forno 2 com vazão reduzida

Esta condição operacional, proporcionada pelo desenvolvimento desta tese, gerou uma economia de 66.478 kg de óleo combustível 1A, que deixou de ser consumido

na Caldeira CBC, e uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> de 193 toneladas nas 38 horas de parada do Alto-Forno 1.

## 5.5 Alteração da Matriz Energética e Balanço de CO<sub>2</sub>

Além dos projetos de eficiência energética apresentados nesta tese, a matriz energética da Empresa Siderúrgica já contribui constantemente para a redução de emissões de CO<sub>2</sub>, pelo uso de carvão vegetal (energia renovável) nos altos-fornos através da injeção de carvão vegetal pulverizado nas ventaneiras. Outro fator que contribui para a redução de emissões é o aproveitamento de mais de 70% de todo o gás de alto-forno nos fornos e caldeira, reduzindo a aquisição de combustíveis derivados do petróleo.

Neste sentido, em 2011, quando o Alto-Forno 2 passou de coque para carvão vegetal, a matriz de redutores passou a ser composta exclusivamente de biomassa, não gerando, portanto, emissões líquidas de CO<sub>2</sub>. Com isso, o uso de energia de fonte renovável na matriz energética da Empresa Siderúrgica, que era de 64% em 2008 conforme Figura 5.27, passou para 88% em 2011, conforme Figura 5.28.

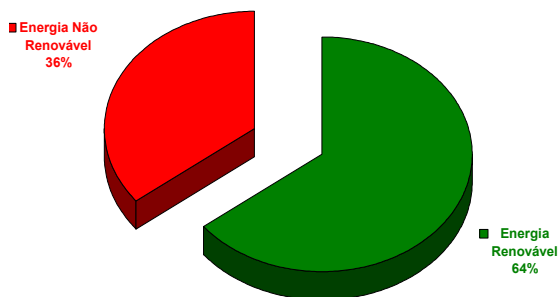


Figura 5.27 – Matriz energética da Empresa Siderúrgica no ano de 2008.

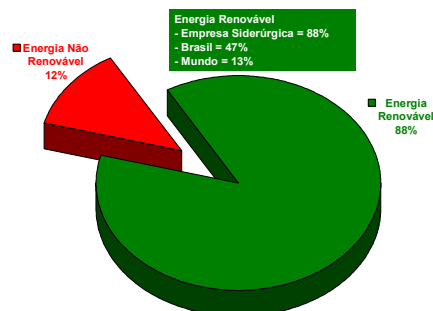


Figura 5.28 - Matriz energética da Empresa Siderúrgica no ano de 2011.

A Empresa Siderúrgica, com 88% de fontes de energia renovável, passa a ter uma matriz energética das mais limpas do mundo. Em comparação, a matriz energética brasileira apresenta 47% de fontes de energia renovável, e a mundial, 13%.

No ano de 2008, os combustíveis fósseis representavam 36% da matriz energética da empresa, sendo 22% de coque e 14% de derivados do petróleo (GLP, óleo combustível 1A e óleo diesel), conforme mostra a Figura 5.27. Com a implantação dos projetos de eficiência energética, a substituição do GLP pelo gás natural e do coque por carvão vegetal, os combustíveis fósseis em 2011 passaram a representar 12% de toda matriz energética da Empresa Siderúrgica, Figura 5.30.

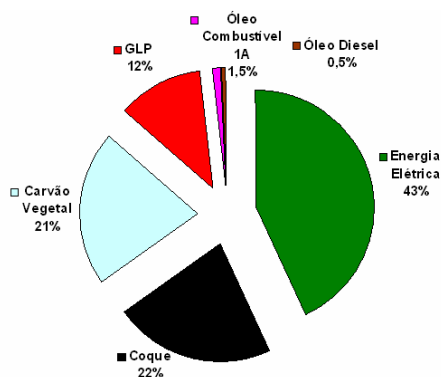


Figura 5.29 – Detalhe da matriz energética da Empresa Siderúrgica no ano de 2008.

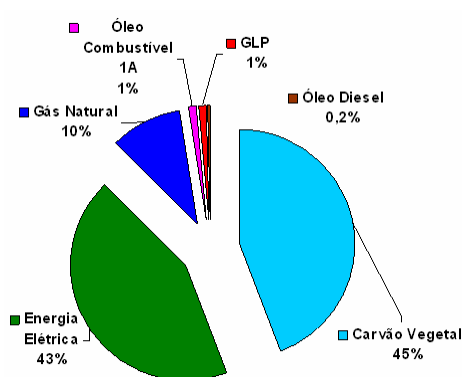


Figura 5.30 – Detalhe da matriz energética da Empresa Siderúrgica no ano de 2011.

A Empresa Siderúrgica emitiu, em 2008, 1,168 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>, detalhadas por fonte energética na Figura 5.31. As emissões foram reduzidas após implantação dos projetos, passando para 619 mil toneladas de CO<sub>2</sub>, conforme Figura 5.32. A matriz energética da empresa, cada vez mais baseada em fontes renováveis, aliada a projetos de eficiência e conservação de energia, tem contribuído para reduzir sistematicamente as emissões de CO<sub>2</sub>.

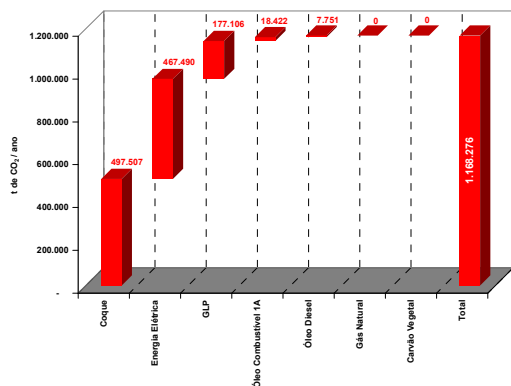


Figura 5.31 - Emissão de CO<sub>2</sub> na Empresa Siderúrgica no ano de 2008.

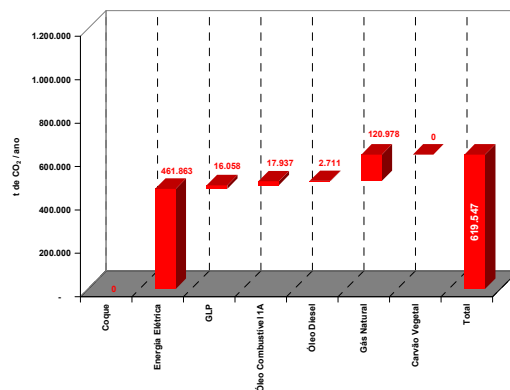


Figura 5.32 - Emissão de CO<sub>2</sub> na Empresa Siderúrgica no ano de 2011.

As emissões de CO<sub>2</sub> da Empresa Siderúrgica foram reduzidas em 549 mil toneladas devido a projetos voltados para uso de tecnologias mais limpas. É o caso da conversão do Alto-Forno de coque para carvão vegetal, reduzindo em 497 mil toneladas anuais as emissões de CO<sub>2</sub>. Com os principais projetos de eficiência energética 26 mil toneladas de CO<sub>2</sub> deixaram de ser emitidas. Outra iniciativa com impacto positivo sobre as emissões do gás foi a substituição de cerca de 90% do GLP pelo gás natural, reduzindo em 25 mil toneladas as emissões de CO<sub>2</sub>, conforme Figura 5.33.

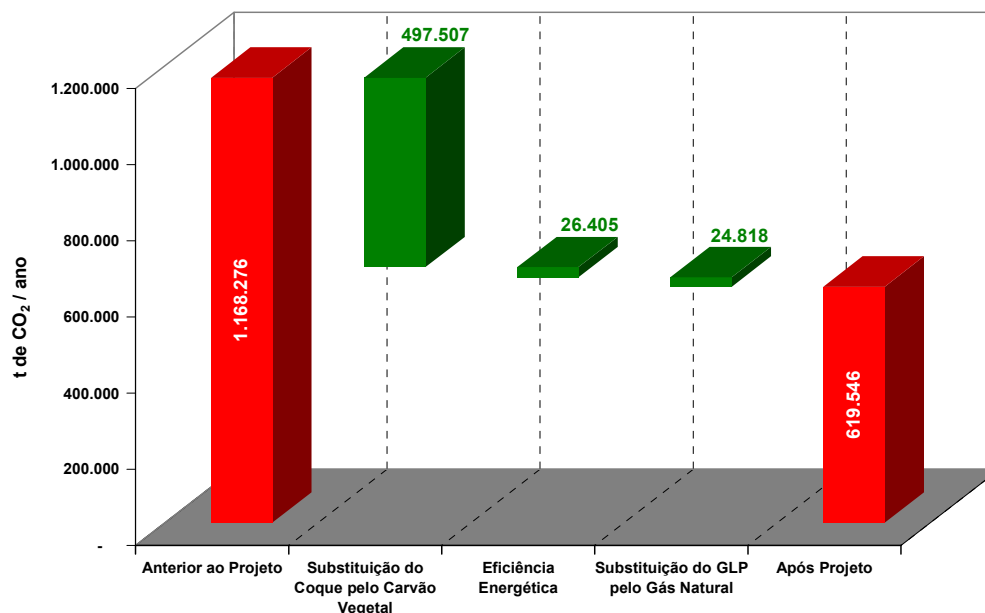


Figura 5.33 – Redução da emissão de CO<sub>2</sub> na Empresa Siderúrgica.

Além de investir na economia de energia, a Empresa Siderúrgica desenvolve produtos que contribuem para a eficiência energética de seus clientes. Entre eles, citam-se os aços elétricos, usados na confecção de núcleos de motores e transformadores de alto rendimento, com baixas perdas magnéticas. Nos últimos anos, a empresa vem trabalhando no desenvolvimento de aços para fabricação dos motores elétricos utilizados nos carros híbridos, veículos que se valem do uso do tradicional motor a combustão aliado ao motor elétrico, gerador e bateria.

## 5.6 Aumento da Competitividade

Os projetos apresentados nesta tese, além de sustentáveis, aumentam a competitividade da Empresa Siderúrgica. Na Figura 5.34, tem-se a distribuição de desembolso da matriz energética da Empresa Siderúrgica no ano de 2008. O coque aparece em primeiro lugar com 36%, a energia elétrica em segundo com 28% e o

GLP em terceiro com 18%. Estas 3 fontes representavam 82% de todo o desembolso energético. Portanto, foi necessário trabalhar na mudança da matriz energética com projetos estratégicos e na eficiência energética para a continuidade dos processos e na busca constante de redução de consumo de todos os energéticos, emissões de CO<sub>2</sub> e custos.

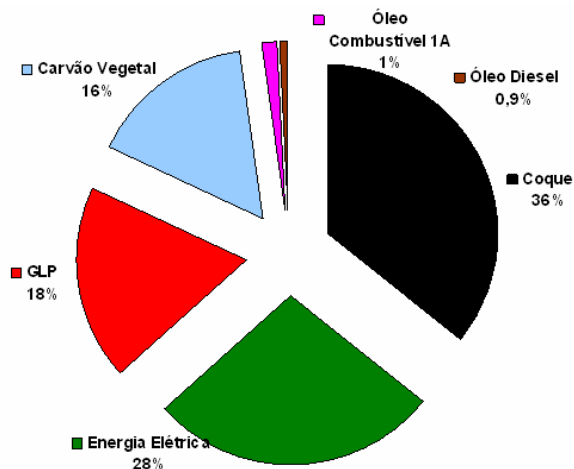


Figura 5.34 - Distribuição de desembolso da matriz energética da Empresa Siderúrgica no Ano de 2008.

Na mudança da matriz energética, a substituição do coque por carvão vegetal representou aproximadamente 60% de redução de custo e o GLP por gás natural representou uma economia de 32%. Nos projetos de eficiência energética, foram obtidas as seguintes reduções de custo: em primeiro lugar o óleo diesel com 65%, depois o GLP com 10%, óleo combustível 1A com 3% e energia elétrica com 2%. A economia total em relação ao ano de 2008 representou 30%, conforme Figura 5.35 e os investimentos realizados estão detalhados na Figura 5.36

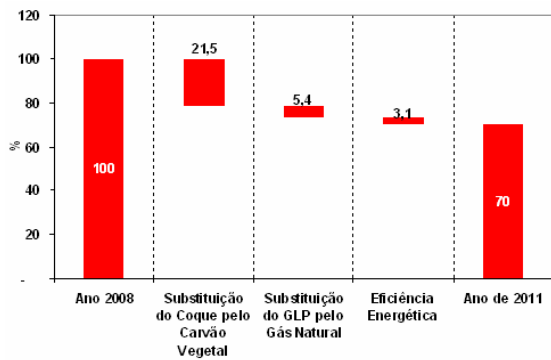


Figura 5.35 – Redução do desembolso da matriz energética da Empresa Siderúrgica.

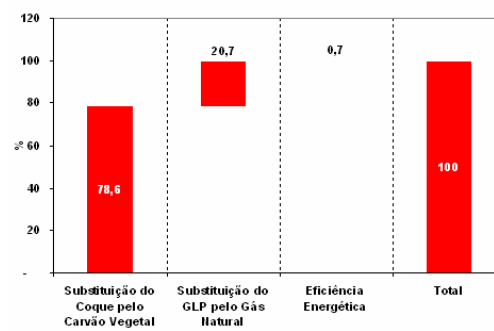


Figura 5.36 – Investimentos na matriz energética da Empresa Siderúrgica

Os projetos de eficiência energética com a redução de custo de 3,1% e investimento de 0,7% ocasionaram uma relação investimento/redução de custo de 0,22. Os projetos de mudança da matriz energética foram realizados com alto investimento e a relação investimento/redução de custo foi de 3,65 para a substituição do coque por carvão vegetal e de 3,85 para a substituição do GLP por gás natural.

## **6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Esta tese reforça a necessidade dos governantes, empresários e toda a população mundial em trabalhar na mudança da matriz energética para fontes renováveis buscando o máximo de eficiência energética, para reduzir a emissão de gases que provocam o efeito estufa, aumentando a competitividade e a realização do crescimento sustentável.

A substituição do coque por carvão vegetal na Empresa Siderúrgica eliminou a dependência da importação do coque, que é proveniente da China, e proporcionou geração de emprego e riqueza para o norte de Minas Gerais, uma das regiões mais pobres do Brasil.

O consumo de energia elétrica no setor industrial e seu potencial de redução são grandes. A Lei de Eficiência Energética é uma grande oportunidade para realização deste tipo de projeto em diversas empresas. Está sendo realizado um trabalho junto a Associação Brasileira de Grandes Consumidores de Energia (ABRACE) para permitir que os consumidores livres de energia elétrica possam reduzir a demanda em caso de projetos de eficiência energética com resultados comprovados.

O futuro do planeta Terra exigirá da população mundial ações concretas no sentido da utilização de fontes de energia renovável, e que emitam menor quantidade de gases que provocam o efeito estufa, aliada a projetos de eficiência energética.

.

---

## 7 CONCLUSÕES

Esta tese apresentou a mudança da matriz energética em uma Empresa Siderúrgica por meio de duas grandes linhas de ação: a substituição de fontes energéticas e a melhoria da eficiência energética. Na primeira linha, foram abordadas a substituição do coque por carvão vegetal e do GLP por gás natural. A segunda linha contemplou a implantação de projetos de eficiência para os vários energéticos utilizados na empresa e o desenvolvimento de um projeto piloto para economia de energia elétrica, utilizando o recurso da Lei de Eficiência Energética. Com a conclusão dos trabalhos, a Empresa Siderúrgica passou a ter o maior alto-forno a carvão vegetal do mundo e uma das matrizes energéticas mais limpas do setor, além de promover uma grande redução das emissões de CO<sub>2</sub> e aumentar significativamente sua competitividade.

A substituição do coque por carvão vegetal na Empresa Siderúrgica, que é uma tecnologia limpa e mais favorável ao equilíbrio ambiental, promoveu a redução de aproximadamente 500.000 toneladas de CO<sub>2</sub> por ano e aumentou a competitividade, através da redução de 21,5% no custo com a matriz energética.

Na Empresa Siderúrgica, a substituição do GLP por gás natural gerou um expressivo benefício em termos de redução do custo unitário com energia, da ordem de 30%, contribuindo também para um aumento de competitividade da empresa. Além deste, outros benefícios relacionados à redução de custos em todo o processo de recebimento, manuseio e distribuição do gás também foram alcançados. O gás natural se mostrou ainda vantajoso quando foram analisados outros aspectos como

---

segurança, qualidade, controle, faturamento e meio ambiente. Neste último aspecto, a introdução do gás natural no lugar do GLP gerou um potencial de redução anual de 24.818 t de emissões de CO<sub>2</sub>. Uma marcante melhoria na qualidade de aquecimento dos produtos nos principais processos siderúrgicos envolvidos foi ainda detectada. Finalmente, a introdução desta nova forma de energia na Empresa Siderúrgica tornou sua matriz energética mais flexível.

O trabalho desenvolvido permitiu a implantação de um projeto de eficiência energética, que servirá de referência, abrindo portas para aplicação da metodologia apresentada na melhoria da eficiência energética do ponto de vista da eletricidade em outros equipamentos e processos da planta. Através deste tipo de projeto, as oportunidades de utilização de recursos disponibilizados através da Lei de Eficiência Energética podem ser aproveitadas. No caso do projeto piloto escolhido, a solução técnica adotada propiciou um aumento de rendimento do processo da ordem de 60%, gerando um potencial de economia anual superior a 800.000 kWh. Além deste, outros ganhos secundários foram identificados, como, por exemplo, a melhoria das condições ambientes da sala elétrica, redução de obsolescência e custos com manutenção, e a redução da emissão de CO<sub>2</sub> da ordem de 400 t/ano.

O resultado final foi o aumento da participação de fontes de energia renovável na matriz energética da empresa, passando de 64% em 2008 para 88% em 2011; redução das emissões de CO<sub>2</sub> em aproximadamente 50% representando 550.000 toneladas por ano e aumento da competitividade com a redução de custos com energéticos em 30%.

---

## 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O doutorando junto com a equipe de eficiência energética da Empresa Siderúrgica já fez levantamentos de outros potenciais de economia de energia, e identificou as seguintes lateralidades:

- Aplicar inversores de frequência em motores do desempoeiramento dos fornos elétricos a arco, pré-tratamento de gusa, conversor de gusa em aço.
  - Realizar controle automático de acionamento dos ventiladores das torres de refrigeração de acordo com a variação da temperatura.
  - Reduzir consumo de energia elétrica nos fornos de recozimento em caixa (RC2) na linha de Laminação a Frio de Aços Elétricos através da melhoria de eficiência dos fornos do sistema de aquecimento dos fornos.
  - Implantar cogeração, com objetivo de aproveitar toda sobra do gás de alto-forno, moimha de carvão vegetal e eliminação do consumo de óleo combustível 1A na caldeira CBC.
  - Implantar cogeração nos fornos de carbonização no norte de Minas Gerais.
  - Substituir GLP por gás natural nos demais equipamentos da empresa.
  - Alterar processo de geração de hidrogênio de eletrólise da água por Steam Methane Reform (SMR) a gás natural.
  - Desenvolver e implantar um sistema de gestão de energia alinhado à ISO 50.001, que é a norma de gestão de energia.
  - Melhorar o controle de combustão nos fornos levando-se em consideração cálculos de Índice de Wobbe.
  - Substituir o combustível das empilhadeiras de GLP para gás natural.
-

- Realizar os balanços de massa, energia e emissões de CO<sub>2</sub> nos fornos da laminação de planos.
  - Implantar enriquecimento do ar de combustão com oxigênio para economizar gás natural no(s) forno(s) de reaquecimento de placas.
  - Aperfeiçoar o aquecimento das panelas da aciaria através de melhoria de controle e a utilização de gás de alto-forno.
  - Melhorar o controle de combustão nos fornos, através de implantação de um cromatógrafo para analisar a composição química do gás natural e envio da informação online para seus sistemas de controle.
  - Substituir gás natural por gás de alto-forno em fornos com necessidade de baixa temperatura.
  - Realizar diagnóstico mais detalhado em todos os energéticos para identificar potenciais técnicos de redução do consumo.
-

---

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRACE – Associação Brasileira de Grandes Consumidores de Energia. Relatório Técnico Abrace, Brasília, Outubro de 2010.
  - AGENCE DE L'EFFICACITÉ ENERGETIQUE. Disponível em: <<http://www.aee.gouv.qc.ca/industries>>. Acesso em: fev. 2008.
  - AGENCE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA MAITRISE DE L'ENERGIE. Disponível em: <<http://www2.ademe.fr>>. Acesso em: mar. 2008.
  - AISI - AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE, Steel Industry technology roadmap. American Iron and Steel Institute. 2006.
  - AMERICAN LANDS ALLIANCE, 1999. Climate Change Policy and Forest Conservation: Goals and Standards for Forest Sequestrations. March 1, 1999. Endereço da Internet [www.americanlands.org/forestwebb/co2\\_pos.html](http://www.americanlands.org/forestwebb/co2_pos.html), visitado em 31 de Janeiro de 2001.
  - ANA: Agência Nacional de Águas. Disponível em: <[www.ana.gov.br](http://www.ana.gov.br)>. Acesso em: fev 2009.
  - ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. “Atlas da Energia Elétrica do Brasil”. 2ª Ed. Brasília: ANEEL, 2005.
  - ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Capacidade de Geração de Energia Elétrica. Brasília, 2003.
  - ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Lei 9.991, 24 de julho de 2000 - Dispõe sobre realização de investimentos em pesquisa e desenvolvimento e em eficiência energética por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica, e dá outras providências.
  - ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Manual do Programa de Eficiência Energética da ANEEL. Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento e Eficiência Energética – Aprovado pela Resolução Normativa nº 300, 12 de fevereiro de 2008.
  - ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, “Anuário estatístico da indústria brasileira do petróleo 1990 - 1998”, Rio de Janeiro, 1999.
  - ANP - Agência Nacional do Petróleo. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro, 2001.
-

- 
- ANP - Agência Nacional do Petróleo. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro, 2004.
  - ANP - Agência Nacional do Petróleo. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro, 2009.
  - ANP - Agência Nacional do Petróleo. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro, 2010.
  - ARAÚJO, S. Ampliação da rede geral de gás de alto-forno. Timóteo: engenharia de implantação, 1997. 125p.
  - ARAÚJO, S. Reforma da rede geral de gás de alto-forno. Timóteo: engenharia de implantação, 2007. 18p.
  - ATREYA, A., EVEREST, D. Highly Preheated Combustion Air Furnace with Oxygen Enrichment for Metal Processing to Significantly Improve Energy Efficiency and Reduce Emissions. Energy, Paris, n.36, p.921-935, jul. 2001.
  - BAJAY, Sérgio Valdir. Oportunidades de eficiência energética para a indústria: experiências internacionais em eficiência energética para a indústria / Sérgio Valdir Bajay, Paulo Henrique de Mello Sant Ana,. – Brasília: CNI, 2010. 88 p.
  - BARBOSA, A. R, NETO, J. L., FARIA, D. S. Implantação do Sistema de Recuperação e Distribuição de Gás de Aciaria na Companhia Siderúrgica de Tubarão. XXVI Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades Industriais, Salvador, p51-60. 2005.
  - BARROS, R. Energia para um novo mundo. Rio de Janeiro: Monte Castelo Idéias, 2007. 160p.
  - BATJES, N.H.; SOMBROEK, W.G. Possibilities for carbon sequestration in tropical and subtropical soils. Global Change Biology 3: 161-173. 1997.
  - BECONCHINA. Disponível em: <<http://www.beconchina.org/institutional.htm>>. Acesso em: fev. 2008.
  - BEG - SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 25., 2003, Florianópolis. Anais. Florianópolis: ABM, 2004. 724p.
  - BEG - SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 26., 2004, Salvador. Anais. Salvador: ABM, 2005. 701p.
  - BEG - SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 27, 2005, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: ABM, 2006. 586p.
-

- 
- BEG - SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 28, 2006, Vitória . Anais. Vitória: ABM, 2007. 593p.
  - BEG - SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 31., 2009, São Paulo. Anais. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2009, 522p.
  - BEG - SEMINÁRIO DE BALANÇOS ENERGÉTICOS GLOBAIS E UTILIDADES, 33, 2011, Salvador. Anais. Salvador: ABM, 2011. 646p.
  - BEHRENS, A. (1990). "Regional energy trade: its role in South America", Energy Policy. March, pp. 175–185.
  - BELL, I. L., Principles of the manufacture of iron and steel. George Routledge and Sons, London, p 184-195. 1984.
  - BEN – Balanço Energético Nacional, Rio de Janeiro. Anuário 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011.
  - BISIO, G., BOSIO, A., RUBATTO, G. Thermodynamics applied to oxygen enrichment of combustion air. Energy Conversion and Management, Genoa, n.43, p.2589–2600, nov. 2001.
  - BISIO, G., First and second law analyses on energy recoveries in blast-furnace regenerators. Energy The International Journal 1996;21:147–55.
  - BODANIS, David – Universo Elétrico – Editora Record – 2008.
  - BOGDANDY, L., ENGELL H. J. - The reduction of iron ores. Verlag Stahleisen m.b. H, Dusseldorf. 1971.
  - BOJIC, M., TOMIC, M. Effect of refuse-gas fuel use on energy consumption in an industrial pusher furnace. Energy, Nagoia, v.23, n.9, p.767–775, dez. 1996.
  - BORBA, R. F. Balanço Mineral Brasileiro. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM: Brasília, 2001.
  - BORGES, C. G., GOMES, D., ABREU, C., SILVA, H. V., ENDLICH, W. L. Análise de viabilidade econômica do investimento em turbinas de topo em altos fornos, considerando o mercado de energia livre e de crédito de carbono. XVII Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades Industriais, Porto Alegre, p12-20. 2006.
  - BORMAN, L.B. e RAGLAND, W. R., "Combustion engineering", McGraw-Hill, 1998.
-

- 
- BOUMAN, R. W. - Historical development of the blast furnace. Iron and Steelmaking; Feb, pag 17-23. 1978.
  - BP – British Petroleum. Statistical Report. United Kingdom. BP, 2010.
  - BRITO, J. O., Desafios e Perspectivas da Produção e Comercialização do Carvão Vegetal no Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal, Belo Horizonte, MG, 20 a 22/10/2008.
  - BROWN-HUMES, Christopher. Aquecimento global significa clima de mudança para empresas. Trad. George El Khouri Andolfato. Financial Times 04/02/2007.
  - CALDEIRA, M.V.W. et al. Carbono orgânico em solos florestais. Curitiba: 2002. p. 191-214.
  - CALLEN, H.B., Thermodynamics and an introduction to thermostatics . 2° Edição. New York – USA: John Wiley e Sons, 1985.
  - CAMPBELL, D.A., FLIERMAN, G., MALGARINI, G., SMITH, R.B., September 1991. Oxy-coal Injection at Cleveland Ironworks .Second European Ironmaking Congress, Glasgow,UK.
  - CAMPOS, C. P. A Conservação das Florestas no Brasil, Mudança do Clima e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, 2001. 169p.
  - CARBON TRUST. Disponível em: <<http://www.carbontrust.co.uk/default.ct>>. Acesso em: 17 jan. 2008.
  - CARBON TRUST. Making the low carbon economy a reality: what the carbon trust does. UK, 2007
  - CARDOSO, Beatriz. FOSTER, Maria das Graças. Gás Natural: aptidão despertada. Revista Brasileira de Petróleo, Gás, Química fina e indústria do plástico. Rio de Janeiro. n.37, p.20-27, 2004.
  - CARVALHINHO FILHO, J. C. L. O valor da flexibilidade em cláusulas “Take or Pay” de contratos para fornecimento de gás natural industrial. Dissertação de Mestrado em Administração. Departamento de Administração, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
-

- 
- CARVALHO Jr, J. A. Chamas de Difusão de Combustíveis Gasosos. Apostila de Combustão Industrial, Timóteo – MG: Programa de Educação Continuada da ABM, 2011. 64p.
  - CARVALHO, A. Manual de dados técnicos do gás natural. Rio de Janeiro. Petrobras, 2001, 53p. Relatório Técnico.
  - CARVALHO, C. B. Avaliação crítica do planejamento energético de longo prazo no Brasil, com ênfase no tratamento das incertezas e descentralização do processo, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005. Tese (Doutorado).
  - CARVALHO, J. A.; MCQUAY, M. Q. Princípios de Combustão Aplicada. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007. 176p.
  - CARVALHO, S. R., ONG, T. H., GUIMARÃES, G. A mathematical and computational model of furnaces for continuous steel strip processing. Journal of Materials Processing Technology, Uberlandia, nº178, p.379–387, abr. 2006.
  - CAVALCANTI, V. L. Liderança e motivação: Série gestão de pessoas. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2005.
  - CENTRE DE LA TECHNOLOGIE DE L'ENERGIE DE CANMET – CTEC. Disponível em: <<http://cetc-varenes.nrcan.gc.ca/fr/>>. Acesso em: jan. 2008.
  - CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Relatório Final do Estudo Incremento do Carvão Vegetal Renovável na Siderurgia Brasileira: 2010. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010. 188p.
  - CHINA ENERGY GROUP. Disponível em: <[http://ibl.gov/china\\_industry-ieee.html](http://ibl.gov/china_industry-ieee.html)>. Acesso em: fev. 2008.
  - CHOULET, R.J., CHAN, A.H., PATIL, B.V., FRUEHAN, R. J., Refining of Stainless Steel. Making, shaping and treating of steel. 11a Edição. Pittsburg, USA: The AISE Foundation, p.716, 1998.
  - COMMISSION EUROPÉENNE – ENERGY. Disponível em: <[http://ec.europa.eu/energy/index\\_fr.html](http://ec.europa.eu/energy/index_fr.html)>. Acesso em: mar. 2008
  - CONAE. Disponível em: <<http://www.conae.gob.mx>>. Acesso em: fev. 2008.
  - CONIECO. Disponível em: <<http://www.conieco.com.mx>>. Acesso em: fev. 2008.
  - COSTA, M.M., SCHAEFFER, R. “An investigation of air emission levels from distinct iron and steel production processes with the adoption of pollution
-

---

control and pollution prevention alternatives.” In: Proceedings of 1999 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry – Industry e Inovation in the 21st Century, pp. 75-86, 1999.

- CSIRO – Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. Disponível em: <[http:// www.csiro.au](http://www.csiro.au)>.
  - DARKEN, L. S; GURRY, R. W. The system iron-oxygen II. Equilibrium and thermodynamics of liquid oxide and other phases: Journal of the American Chemical Society, vol 68, p 798-816. 1946.
  - DIRECTION GÉNÉRALE DE L'ÉNERGIE ET DES MATIÈRES PREMIÈRES. Disponível em: <<http://www.industrie.gouv.fr/energie/sommaire.htm>>. Acesso em: mar. 2008.
  - DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. Anuário Mineral de 2005. Brasília, 2005.
  - DONG, X. F.; PINSON, D.; ZHANG, S. J.; ZULLI, P., Gas-powder flow in blast furnace with different shapes of cohesive zone. 2006.
  - EDGAR, T.F.; HIMMELBLAU, D.M. Optimization of chemical processes. 2° Edição. New York – USA: McGraw-Hill Companies, 2001.
  - EDISON ELECTRIC INSTITUTE. Residential / commercial / industrial efficiency and demand response programs for 2006 / 2007. USA, 2007.
  - EERE. Disponível em: <[http://www.eere.energy.gov/state\\_energy\\_program/funding\\_states.cfm](http://www.eere.energy.gov/state_energy_program/funding_states.cfm)>, Acesso em: 17 jan. 2008.
  - EIA/DOE.”Internatinal Energy Outlook”. Energy Information Administration – Department of Enegy, 2005.
  - EIA/DOE.”Internatinal Energy Outlook”. Energy Information Administration – Department of Enegy, 2006.
  - EIA/DOE.”Internatinal Energy Outlook”. Energy Information Administration – Department of Enegy, 2007.
  - EIA/DOE.”Internatinal Energy Outlook”. Energy Information Administration – Department of Enegy, 2008.
  - EIA/DOE.”Internatinal Energy Outlook”. Energy Information Administration – Department of Enegy, 2009.
-

- 
- EIA/DOE. "International Energy Outlook". Energy Information Administration – Department of Energy, 2010.
  - EIPPCB - EUROPEAN INTEGRATED POLLUTION PREVENTION AND CONTROL BUREAU, Integrated Pollution, Prevention and Control (IPPC). Document on Best Available Techniques in the Iron and Steel Industry, Institute for Prospective Technological Studies, Sevilla. 1999.
  - ELECTRICITÉ DE FRANCE. Disponível em: <<http://www.edf.fr>>. Acesso em: jan. 2008.
  - ELETROBRAS/PROCEL. Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil, Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso, ano base 2005, Classe Residencial, Relatório Brasil, Rio de Janeiro, 2007.
  - END USE ENERGY EFFICIENCY PROGRAMME. Disponível em: <<http://www.eueep.cn>>. Acesso em: dez. 2007.
  - ENERGY CONSERVATION CENTER, JAPAN. Disponível em: <[http://www.eccj.or.jp/index\\_e.html](http://www.eccj.or.jp/index_e.html)>. Acesso em: 10 jan. 2008.
  - ENERGY CONSERVATION CENTER, JAPAN. Keidanren environmental voluntary action plans. Disponível em: <[http://www.eccj.or.jp/eng/e3104keidanren\\_plan.html](http://www.eccj.or.jp/eng/e3104keidanren_plan.html)>. Acesso em: 10 abr. 2008.
  - ENERGY EFFICIENCY AND CONSERVATION AUTHORITY. Disponível em: <<http://www.eecabusiness.govt.nz/>>. Acesso em: 12 jan. 2008.
  - ENERGY EFFICIENCY OPPORTUNITIES. Disponível em: <<http://www.energyefficiencyopportunities.gov.au>>. Acesso em: abr. 2008.
  - ENERGY PROFILE TOOL. Disponível em: <<http://www.energyprofiletool.com/xcelenergy/>>, consultado em 30/04/2008.
  - ENTERGI. Disponível em: <<http://entergy.apogee.net/ces/>>. Acesso em: abr. 2008.
  - EPE – Empresa de Pesquisa Energética.. Eficiência Energética na indústria e nas residências no horizonte decenal (2010-2019). Rio de Janeiro, EPE, 2010. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>.
  - ERTEM, M. E., GURGEN, S. Energy balance analysis for Erdemir blast furnace number one. Applied thermal engineering, Turkey, n.26, p1139-1148, out. 2005.
-

- 
- FERREIRA, O. C. O Futuro do Carvão Vegetal na Siderurgia; Economia e Energia Nº. 21; Julho/Agosto 2001; <http://ecen.com>.
  - FIDE. Disponível em: <<http://www.fide.org.mx>>. Acesso em: fev. 2008.
  - FUJII, T., NOZAKI, H., YAMAGISHI, Y., Energy saving in steelmaking processes. Trans ISIJ 1980;20:40–53 [originally published in Tetsu-to Hagane].
  - FUPAI/Unifei. Levantamento e análise de projetos e ações de eficiência energética para a indústria. Itajubá, MG, 2008.
  - GARCIA, A. G. P., Leilão de eficiência energética no Brasil. 2008. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos)–COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
  - GASMIG. Relatório de Acompanhamento do Gasoduto Vale do Aço. Belo Horizonte: GASMIG, 2010.
  - GELLER, H. Proposta para leilão de eficiência energética no Brasil. EUA: Southwest Energy Efficiency Project, 2006.
  - GICQUEL, O., VERVISCH, L., JONCQUET, G., LABEGORRE, B., DARABIHA, N. Combustion of residual steel gases: laminar flame analysis and turbulent flamelet modeling. Fuel, Saint Etienne, n.82, p.983–991, out. 2002.
  - GIULI, M., HANNIKER, G., KOSTER, J., KREIBICH, K., VAN LANGEN, J.M., DE LASSAT DE PRESSIGNY, Y., POOS, A., September 1986. Blast furnace auxiliary fuel injection in Europe. European Ironmaking Congress, Aachen.
  - GREENHOUSE CHALLENGE PLUS. Disponível em: <<http://www.environment.gov.au/settlements/challenge> em abril de 2008>.
  - GROSS, Charles A. – Power System Analysis – 2nd edition – New York – John Wiley – 1986.
  - GUDENAU, H.W. September 1986. Fundamentals of blast furnace coal injection. European Ironmaking Congress, Aachen.
  - Guia de Medição e Verificação – Procel Info – Centro Brasileiro de Informação em Eficiência Energética – Eletrobrás -2010
  - GUIMARÃES, D. Gasmig e Empresa Siderúrgica viabilizam gasoduto. Gazeta Mercantil, Belo Horizonte, p. 4, 20 abr. 2005.
-

- 
- HALIM, A. K. S. Effective utilization of using natural gas injection in the production of pig iron. *Materials Letters*, Cairo, nov. 2006. 6p.
  - HEILIGENSTAEDT, W., *Thermique appliqué aux fours industriels*. 1° Edição. Paris – França: Verlag Staleisen M. B. H., 1971.
  - HEYNERT, G. ; PETERS, K. H. RINGKLOFF, G. - Five years experience with the bell-less top. *Iron and Steelmaker*, vol 5, n 3, p 15-24. 1978.
  - HIMMELBLAU, D. M. *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*. 6nd. ed. New Jersey. Prentice Hall International, 1996.
  - HOLOWATY, M. O. *Blast Furnace Theory and Practice*, Chapter 1 – Gordon and Breach, 1969.
  - IBS - INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA, 2006. Distribuição regional da produção de aço no Brasil. Estatística. Disponível em <http://www.ibs.org.br>. Acesso em agosto de 2006.
  - IBS – Instituto Brasileiro de Siderurgia, Anuário 2004, 2005, 2006 e 2007.
  - IEA – International Energy Agency. *Key World Energy Statistics 2003*. IEA: Paris, 2002.
  - IEA – International Energy Agency. *Key World Energy Statistics 2003*. IEA: Paris, 2003.
  - IEA – International Energy Agency. *Key World Energy Statistics 2005*. IEA: Paris, 2005.
  - IEA – International Energy Agency. *Key World Energy Statistics 2010*. IEA: Paris, 2010.
  - IISI – INTERNATIONAL IRON AND STEEL INSTITUTE, 2007. *World Steel*, USA. Disponível em [www.steel@iisi.be](http://www.steel@iisi.be). Acesso em julho de 2007.
  - IPMVP - International Performance Measurement & Verification Protocol – Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings – Volume 1 – March 2002
  - ISSF - INTERNATIONAL STAINLESS STEEL FORUM, 2005. Committee on Economic Studies, Belgium, Brussels. Disponível em <http://www.worldstainless.org>. Acesso em setembro de 2005.
  - ISSF - INTERNATIONAL STAINLESS STEEL FORUM, 2007. Committee on Economic Studies, Belgium, Brussels. Disponível em <http://www.worldstainless.org>. Acesso em janeiro de 2007.
-

- 
- JACOMINO, V.M.F., CASTRO, L.F.A., RIBEIRO, E.D.L., LEÃO, M.M.D., SOUZA, C.M., GOMES, A.M., ALMEIDA, M.L.B., LOPES, L.E.F. Minas Ambiente; controle ambiental das indústrias de ferro-gusa em altos-fornos a carvão vegetal. Projeto Minas Ambiente. 1ªed. Belo Horizonte: SEGRAC Editora e Gráfica Limitada, 2002. 302p.
  - JIANWEI, Y., GUOLONG, S., CUNJIANG, K., TIANJUN, Y. Oxygen blast furnace and combined cycle (OBF-CC) an efficient iron-making and power generation process. *Energy*, Beijing, n.28, p.825–835, set. 2001.
  - KANBARA, K. - Dissection of blast furnace and their internal state, *Transactions ISIJ*, vol 17, p 371-380. 1977.
  - KOSKELA, J., NYGREN, P., BERNINGER, F., LUUKKANEN, O. 2000. Tropical Forestry Reports: Implications of the Kyoto Protocol for Tropical Forest Management and Land Use: prospects and pitfalls. University of Helsinki, Department of Forest Ecology. Documento da Internet no endereço [www.honevbee.helsinki.fi/tropic](http://www.honevbee.helsinki.fi/tropic), visitado em fevereiro de 2001.
  - LAGE, L. D. Superoxigenação do comburente usado na queima de óleo diesel em um forno contínuo. Belo Horizonte: Departamento de engenharia térmica, Universidade Federal de Minas Gerais -UFMG, 1999. 82p. (Tese de Mestrado em Engenharia Térmica).
  - LEFFLER, W.L., “Petroleum refining for nontechnical person”, PennWell Books, 1985.
  - LEITE, A. D., A energia do Brasil. 2ª edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
  - LIGHTER, J. E – Historical Dictionary of American English Slang. Random House, 1994.
  - LINDENBERG, H., SCHUBERT, K., ZÖRCHER, H., Developments in stainless steel process metallurgy. *Metallurgical Plant and Technology*. 42-45. 1988.
  - LOURENÇO, S. R., Gás Natural: Perspectivas e Utilização, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 106p. Dissertação (Mestrado).
  - LU, W.K., KUMAR, R.V., The feasibility of nitrogen free blast furnace operation. *Iron and Steel Society of AIME. Transactions* 1984;5:25–31.
-

- 
- MA, J.T., EDSTROM, J.O., The balanced oxygen blast furnace (BOBF) ironmaking process. *Scandinavian Journal of Metallurgy* 1992;21:104–11.
  - MACHADO, P. L. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global - *Química Nova*, Vol. 28, N°2, 329-334, 2005.
  - MANAGENERGY. Disponível em: <<http://www.managenergy.net/index.html>> acesso em: março de 2008.
  - MANELLA, R.; BASTOS, P. R. M.; PESSOA, I. Q.; LAGE, L. D.; GONÇALVES, I. N; ARAUJO, S.; Switching from LPG into Natural Gas. Dossiê Interno da Empresa Siderúrgica, Novembro 2007.
  - MARANGON, José Wanderley – Mercado de Energia Elétrica – Apostila do Curso de Especialização em Sistemas Elétricos – CESE – EFEI - Itajubá – MG – 2001.
  - MARES, D. R. (2004). “Natural Gas Pipelines in the Southern Cone”, In: *Geopolitics of Gas Working Paper Series, Working Paper 29*, James A. Becker III. Institute for Public Policy Energy Forum, Rice University, May.
  - MARTINS , A. R. S. et al. Eficiência energética: integrando usos e reduzindo desperdícios. Brasília: ANEEL/ANP, 1999. 432 p.
  - MARTINS, Jader Benuzzi – A história da eletricidade – Rio de Janeiro – Ciência Moderna – 2007.
  - MATHIAS, M. C. P. P. A formação da indústria global de gás natural: definição, condicionantes e desafios. 2008. 253p. Tese de Doutorado em Ciências de Planejamento Energético. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
  - MATSUMOTO, T., FUJIMORI, H., WATANABE, Y., TAGUCHI, S., September 1986. Present condition of pulverized coal injection for blast furnace in Japan. *European Ironmaking Congress*, Aachen.
  - McCULLOCH, Rachel. Trade deficits, industrial competitiveness, and the Japanese. *California Management Review*, v. 27, p. 140-156, Winter '85.
  - MCKANE, A. Industrial energy management: issues paper, UNIDO's Expert Group Meeting: using Energy Management Standards to stimulate persistent application of Energy Efficiency in Industry. Vienna, Áustria, 2007.
  - MEDEIROS, F. T. P., FILETI, A. M. F., CUNHA, A. P. Desenvolvimento de um modelo de predição de condições operacionais de altos-fornos siderúrgicos
-

---

com base em redes neurais artificiais.. Campinas: Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas -UNICAMP, 2006. 134p. (Tese Doutorado em Engenharia Química).

- MEDEIROS, F.T. P. - Injeção de gás natural nos altos-fornos da CSN – XLII Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais, Belo Horizonte. 1987.
  - MIRANDA, C. A. Uso do Carvão Vegetal nos Altos-Fornos da Arcelor Mittal Juiz de Fora, 2010.
  - MIRANDA, L. L.; FULLIN, B.; ZIVIANI, M. Uma nova estratégia de controle de potência para redução do consumo energético do forno W. Beam. Equipe de Eficiência Energética da Empresa Siderúrgica, 2008. 18p.
  - MME – Ministério de Minas e Energia. Matriz Energética Nacional 2030: Ano Base 2007. Brasília: MME: EPE, novembro de 2007. 254p.
  - MME/EPE v.1, 2007 - BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Análise retrospectiva, vol. 1 do Plano Nacional de Energia 2030, Ministério de Minas e Energia (MME), com a colaboração da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília, 2007.
  - MME/EPE v.11, 2007 - BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Eficiência energética, vol. 11 do Plano Nacional de Energia 2030, Ministério de Minas e Energia (MME), com a colaboração da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília, 2007.
  - MME/EPE v.3, 2007 - BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Geração hidrelétrica, vol. 3 do Plano Nacional de Energia 2030, Ministério de Minas e Energia (MME), com a colaboração da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília, 2007.
  - MME/EPE v.4, 2007 - BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Geração termelétrica a partir de Petróleo e derivados, vol. 4 do Plano Nacional de Energia 2030, Ministério de Minas e Energia (MME), com a colaboração da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília, 2007.
  - MME/EPE v.5, 2007 - BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Geração termelétrica a partir do gás natural, vol. 5 do Plano Nacional de Energia 2030, Ministério de Minas e Energia (MME), com a colaboração da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília, 2007.
-

- 
- MME/EPE v.6, 2007 - BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Geração termelétrica a partir do carvão mineral, vol. 6 do Plano Nacional de Energia 2030, Ministério de Minas e Energia (MME), com a colaboração da Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília, 2007.
  - MODESTO, M., NEBRA, S. A. Analysis of a repowering proposal to the power generation system of a steel Mill plant through the exergetic cost method. Energy, Campinas, n. 31, p.3261-3277, dez. 2006.
  - MONTES, P. M. F. O potencial de consumo do gás natural pelo setor industrial no Brasil. 2000. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.
  - MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N., Princípios de termodinâmica para engenharia. 4° Edição. Rio de Janeiro – RS – Brasil: LTC – Livros técnicos e científicos, 2000.
  - MOTOR-CHALLENGE. Disponível em: <<http://www.motor-challenge.eu>>. Acesso em: dez. 2007.
  - MURAVIEV, V. M.; - Stal in English , p 591. 1970.
  - NADEL, S. International experience with appliance and equipment efficiency standards, International Seminar on Energy Efficiency Campinas, 2006.
  - NAKICENOVIC, N., et al, 2000, Global Natural Gas Perspectives, IIASA International Institute for Applied Systems Analysis, 1a edição, Kyoto, Japão, International Gás Union for the Kyoto Council Meeting.
  - NATIONAL DEVELOPMENT AND REFORM COMMISSION. Disponível em: <<http://en.ndrc.gov.cn>>. Acesso em: jan. 2008.
  - NOGAMI, H.; Junichiro, Y.; Ronaldo, S. S. Exergy Analysis of Charcoal Charging Operation of Blast Furnace; ISIJ International, Vol. 44, 2004, N°10, pp. 1646–1652.
  - ODYSSÉE. Disponível em: <<http://www.odyssee-indicators.org>>. Acesso em: fev. 2008.
  - OFFICE DE L'EFFICACITÉ ENERGETIQUE. Disponível em: <<http://oee.mean.gc.ca/francais/>>. Acesso em: fev. 2008.
-

- 
- OHNO, Y., MATSUURA, M., MITSUFUJI, H., Process characteristics of commercial-scale oxygen blast furnace process with shaft gas injection. *ISIJ International* 1992;32(7):838–47.
  - OLIVEIRA, H. L. Eficiência energética industrial. Vitória, 2008. Palestra proferida no 5º Congresso Brasileiro sobre Eficiência Energética e Cogeração de Energia, realizado em Vitória, ES, em junho de 2008
  - ONLINE SYSTEM FOR COMPREHENSIVE ACTIVITY REPORTING. Disponível em: <<http://www.climatechange.gov.au/oscar/index.html>>. Acesso em: abr. 2008.
  - PAIXÃO, F. A. Quantificação do Estoque de Carbono em Floresta Plantada de Eucalipto e Avaliação Econômica de Diferentes Alternativas de Manejo. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004. 76p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal).
  - PAIXÃO, F. A.; SOARES, C. P. B.; JACOVINE, L. A. G.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. Quantificação do Estoque de Carbono e Avaliação Econômica de Diferentes Alternativas de Manejo em um Plantio de Eucalipto. *R. Árvore*, Viçosa-MG, v.30, n.3, p.411-420, 2006
  - PARO, A. C. Estudo da contribuição do gás natural no setor elétrico – uma análise de cenários de sua expansão nos setores de geração termelétrica, cogeração e residencial. 2005. 101p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005
  - PAUBEL, X., CESSOU, A., HONORE, D., VERVISCH, L., TSIAVA, R. A flame stability diagram for piloted non-premixed oxycombustion of low calorific residual gases. *Proceedings of the Combustion Institute*, Saint Etienne, n.31, p.3385–3392, jan. 2007.
  - PEEREA. In-depth review of energy efficiency policies and programmes of sweden, energy charter protocol on energy efficiency. Sweden, 2006.
  - PERRY, R. E.; CHILTON, C.H. (Ed.). *Chemical Engineers' Handbook*. New York: McGraw-Hill, 1973.
  - PNEE – Plano Nacional de Eficiência Energética. PLANO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA (PNEf) - PREMISSAS E DIRETRIZES BÁSICAS. MME – Ministério de Minas e Energia: Secretária de Planejamento e
-

---

Desenvolvimento Energético e Departamento de Desenvolvimento Energético. Brasília, 2011.

- PETROBRAS. Pequena História do Petróleo. Rio de Janeiro, 1986.
  - PINHEIRO, P. C. C. O Gás Natural e sua Utilização em Equipamentos Térmicos. In. II SEMINÁRIO DE GERENCIAMENTO ENERGÉTICO DA INDÚSTRIA QUÍMICA E PETROQUÍMICA, 12-13 Junho 1996, Guarulhos, SP, Anais... São Paulo, ABIQUIM, Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados, Palestra 9, 11 p.
  - PITANGA, F. J., Combustão de Líquidos e de Gases. São Bernardo do Campo. FEI, 1992.
  - PORTER. Michael E. A Vantagem Competitiva das Nações. 1990. Rio de Janeiro: Campus, 1993.
  - PROMOT. Disponível em: <[http://promot.cres.gr/promot\\_plone](http://promot.cres.gr/promot_plone)>. Acesso em: jan. 2008.
  - QIN, M.S., GAO, Z.K., WANG, G.L., The research of blast furnace using oxygen only. Iron & Steel 1987;22(12):1-7 Chinese.
  - REZENDE, A.V. O estoque de carbono no cerrado: um estudo de caso. Curitiba: 2002. p. 175-191.
  - RODITI, I. – Dicionário Houaiss de Física – Rio de Janeiro – Objetiva – 2003.
  - ROMEIRO, B. B. S. Química na siderurgia. Rio Grande do SUL: instituto de química da UFRGS, 1997. 48p.
  - SANTOS, A. H. M. Análise econômica em conservação de energia. In: Jamil Haddad; André Ramon Silva Martins; Milton Marques. (Org.). Conservação de energia eficiência energética de instalações e equipamentos. Itajubá: Editora da Efei, 2001.
  - SASAKI, K. - Investigation of quenched number 2 Blast Furnace at Kokura Works, Transactions ISIJ, vol 17, p 252 – 261. 1976.
  - SCHUMACHER, M.V. Estoque de carbono em florestas plantadas de Pinus Plantadas no estado do Rio Grande do Sul – Brasil. Curitiba: 2002. p. 141-152.
  - SEDJO, R. "Forest Carbon Sequestration: Some Issues for Forest Investments," 2001.
-

- 
- SEVERINO, M. M. Avaliação Técnico Econômica de um sistema híbrido de geração distribuída para atendimento a comunidades isoladas da Amazônia. 2000. 226p. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Brasília. Brasília. 2000.
  - SHUHAN, M., QINGHUA, T., September 1991. Practice and considerations on oxygen-coal blast furnace in Anshan. Second European Ironmaking Congress, Glasgow, UK.
  - SHV Gases Brasil. Composição Típica do GLP Fornecido pela SHV. Belo Horizonte, 2008.
  - SOUZA, C. P.; MARQUES, S. G. F.; SILVA, L. B. Utilização de Energia Renovável para Cogeração na V & M do Brasil. XXV Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades, Florianópolis, p.82-94. 2004.
  - TAKANO, C. Energia na Redução: Análise e Perspectivas. ABM – Seminário de Redução, Salvador, BA, 18/09/2007.
  - TEIXEIRA, F. N., LORA, E. S. Suprimento Energético para Termelétricas. São Paulo: engenharia mecânica da USP, 2000. 62p.
  - THEKDY, A.C., VEREEKE, F.J., Fuel efficiency improvement by oxygen enrichment of combustion air. Ind Heat 1981:22– 3.
  - US DEPARTMENT OF ENERGY DOE. Industrial Technologies Program, Improving the Energy Performance of U.S. Industry. U.S. Department of Energy, Washington, DC, 2006.
  - US DEPARTMENT OF ENERGY DOE. State Energy Program: Industrial Sector. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy (DOE), Washington, DC, 2000.
  - US DEPARTMENT OF ENERGY DOE. Strategic Plan: Industrial Technologies Program. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, (DOE), Washington, DC, 2003.
  - US DEPARTMENT OF ENERGY. Energy Efficiency and Renewable Energy. Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov/industry/>>. Acesso em: 15 jan. 2008.
  - VELEDA, R. Minas Gerais busca autosuficiência em gás natural . Folha de S. Paulo, São Paulo, p. 6, 23 jun. 2011.
-

- VIEIRA, F. A. Sistemas de Gestão da Energia ISO 50.001 Uma Grande Oportunidade para a Indústria. XXXII Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades da ABM, Salvador, 2011.
  - WALTZLAWICK, L.F. Fixação de carbono em floresta ombrófila mista em diferentes estágios de regeneração. Curitiba: 2002. p. 153-174.
  - WCI - World Coal Institute. Clean Coal-Building a future through technology. Website: [www.wci-coal.com](http://www.wci-coal.com). Publicação disponível on-line desde 2005.
  - WORLD ENERGY COUNCIL. Energy efficiency policies around the world: review and evaluation. London, 2008.
  - WSA - WORLD STEEL ASSOCIATION. CO2 Emissions Data Collection – User Guide. Bélgica, 2008.
  - WYLEN, G.J.V.; SONNTAG, R.E.S., Fundamentos da termodinâmica clássica. 2º Edição. São Paulo – SP – Brasil: Edgard Blucher LTDA, 1973.
  - WYLEN, G.J.V.; SONNTAG, R.E.S.; BORGNAKKE, C., Fundamentos da termodinâmica clássica. 4º Edição. São Paulo – SP – Brasil: Edgard Blucher LTDA, 1994.
-

## 10 ANEXOS

### A.1 – Pesquisa da ISO 50.001

**ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O  
DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL**



## NORMA DE SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA

(MANAGEMENT SYSTEM STANDARD FOR ENERGY)

### PESQUISA INDUSTRIAL UNIDO

JANEIRO 2009

**Contatos da empresa pesquisada:**

|                 |   |        |                |
|-----------------|---|--------|----------------|
| Responsável     | Isac Quintão Pessoa                         |        |                |
| Nome da empresa | ArcelorMittal Inox Brasil (ex-ACESITA S.A.) |        |                |
| Endereço        | Praça 1º de maio, centro, nº9               |        |                |
| CEP             | 35.180.000                                  | Cidade | Timóteo        |
| Estado          | Minas Gerais                                | País   | Brasil         |
| E-mail          | isac.pessoa@arcelormittal.com.br            |        |                |
| Telefone        | (31) 3849 7573                              | Fax    | (31) 3849 7009 |

**Para informações e assistência em relação ao questionário, favor entrar em contato:**

Francine Costa Vaurof  
Confederação Nacional da Indústria - CNI  
Fone: +55 (61) 3317-9965  
E-mail: [fvaurof@cni.org.br](mailto:fvaurof@cni.org.br)

Marco Matteini  
United Nations Industrial Development - UNIDO  
Tel: 0043 1 26026 4583  
Fax: 0043 1 26026 6855  
E-mail: [M.Matteini@unido.org](mailto:M.Matteini@unido.org)