

DICKSON SUGAHARA

OTIMIZAÇÃO DE UM FORNO DE REAQUECIMENTO A
ÓLEO – CONTROLE DE EMISSÕES E CRÉDITO DE
CARBONO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr.

DADOS CURRICULARES

DICKSON SUGAHARA

NASCIMENTO	26.08.1958 – OSVALDO CRUZ / SP
FILIAÇÃO	Tatsuo Sugahara Takako Sugahara
1978/1984	Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica Escola Politécnica - Universidade de São Paulo
2005/2008	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

À todos os professores que me incentivaram a desenvolver esse trabalho e em especial ao meu orientador Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr. que com muita paciência acreditou e me auxiliou nessa jornada.

À minha família que muitas vezes abdicou de atividades em minha companhia para que pudesse estudar e complementar esse trabalho.

À antigos companheiros de trabalho que me auxiliaram na correção do sistema de combustão do forno estudado e na coleta dos dados.

Ao Engenheiro Msc. André de Castro que ajudou na escolha do equipamento de análise e no treinamento para a operação.

À Ecofuel pelo apoio e pelas análises preliminares.

E finalmente à BR Distribuidora que forneceu dados e estudos dos óleos pesados e que possibilitou a aquisição do analisador utilizado no trabalho.

SUGAHARA, D. **Otimização de um forno de reaquecimento a óleo – controle de emissões e crédito de carbono**. 2008. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

RESUMO

Esse trabalho destina-se ao estudo da relação entre as condições de operação e o nível de emissão de CO₂ em um forno de soleira rotativa, a óleo, utilizado para o reaquecimento de blocos de aço carbono para forjamento de rodas ferroviárias. O foco principal foi a redução na emissão de CO₂ e a possibilidade de geração de créditos de carbono. Inicialmente foram apresentadas as características do sistema de aquecimento e suas influências no desempenho geral do forjamento. Em complemento foram expostas algumas condições de emissões relacionadas ao combustível e ao funcionamento do sistema de combustão. Foram selecionados parâmetros para a correção das condições de operação e ajustados para o tipo de combustível utilizado. A verificação foi feita através de análises de atmosfera. A metodologia foi eficiente e mostrou uma redução de 0,5% na concentração de CO₂ nos gases de combustão que equivale a uma redução de 3,6% na emissão total de CO₂.

PALAVRAS-CHAVE: emissão de CO₂, créditos de carbono, forjamento, sistema de combustão.

SUGAHARA, D. Reheating oil furnace optimization – emissions control and carbon credit. 2008. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

ABSTRACT

This work studied the relation between the operation condition and the level of CO₂ emission in an oil rotary furnace used to reheat steel carbon blocks to forge rail wheels. The main focus was a CO₂ reduction emission and carbon credits revenue. Initially, the heating system characteristics and its influence in the forging performance were presented. Additionally, some emission conditions related to the fuel and combustion system working were exposed. Parameters were selected to correct the operation condition and adjusted to the type of the fuel used. The results were verified by atmosphere analysis. The methodology was efficient and shows 0,5% reduction in the concentration of CO₂ in the combustion gases or 3,6% reduction in CO₂ total emission.

KEYWORDS: CO₂ emission, carbon credit, forging, combustion system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de um forno de soleira rotativa.	3
Figura 2	Esquema de um forno de soleira rotativa, vista em corte.	3
Figura 3	Calor absorvido em função da espessura.	4
Figura 4	Consumo final de energia por fonte.	8
Figura 5	Oferta interna de energia.	9
Figura 6	Produção e consumo de petróleo no Brasil.	10
Figura 7	Consumo de derivados de petróleo por setor.	10
Figura 8	Consumo de gás natural por aplicação.	11
Figura 9	Suprimento de energia mundial total e emissão de CO ₂ .	11
Figura 10	Suprimento de energia mundial por fonte.	12
Figura 11	Contribuição dos gases para o efeito estufa.	12
Figura 12	Emissão de NO _x em função do tamanho médio de gota.	20
Figura 13	Emissão de NO _x em função do número de swirl.	21
Figura 14	Queimador com injeção estagiada de combustível e oxidante.	22
Figura 15	Queima de uma gota – chama concêntrica.	23
Figura 16	Modos de combustão de gota.	25
Figura 17	Combustão simples de gota.	25
Figura 18	Combustão de grupo interno.	26
Figura 19	Combustão de grupo externo.	26
Figura 20	Combustão de grupo externo com envelope de chama.	27
Figura 21	Emissão de poluentes e produção.	29
Figura 22	Capacidade instalada do FGD nos Estados Unidos, Japão, Alemanha e resto do mundo.	30
Figura 23	Capacidade instalada do SCR em plantas a carvão nos Estados Unidos, Japão, Alemanha e resto do mundo.	31
Figura 24	Relação entre energia renovável e energia não renovável.	34
Figura 25	Emissão de CO ₂ em função do uso de energia.	34
Figura 26	Evolução do consumo de energia nos últimos 25 anos no	37

Brasil.

Figura 27	Consumo de energia por setor (1975 a 2000).	38
Figura 28	Demanda de energia por setor.	41
Figura 29	Emissão de dióxido de carbono.	41
Figura 30	Estrutura da carepa.	42
Figura 31	Teores de óxidos de ferro em função da temperatura.	43
Figura 32	Perda por oxidação em função da temperatura da superfície.	44
Figura 33	Perda por oxidação em função do tempo.	45
Figura 34	Vista lateral do forno de soleira rotativa.	50
Figura 35	Prensa 6.000tf.	51
Figura 36	Laminador.	52
Figura 37	Prensa 1.560 tf.	52
Figura 38	Fossa de resfriamento controlado.	53
Figura 39	Parâmetro de combustão do forno rotativo, zona 1.	57
Figura 40	Parâmetro de combustão do forno rotativo, zona 2.	58
Figura 41	Parâmetro de combustão do forno rotativo, zona 3.	59
Figura 42	Parâmetro de combustão do forno rotativo, zona 4.	60
Figura 43	Sistema de distribuição de ar.	66
Figura 44	Esquema geral de distribuição de óleo.	67
Figura 45	Disposição geral dos queimadores antes das modificações.	68
Figura 46	Disposição geral do queimador Ipem 50/25.	69
Figura 47	Vista em corte do queimador Ipem 50/25.	69
Figura 48	Análise preliminar.	80
Figura 49	Análise da Zona 2 do Forno rotativo com o sistema não corrigido.	81
Figura 50	Análise da Zona 3 do Forno rotativo com o sistema não corrigido.	82
Figura 51	Análise da Zona 2 do Forno rotativo com o sistema corrigido.	82
Figura 52	Análise da Zona 3 do Forno rotativo com o sistema corrigido.	83
Figura 53	Análises da Zona 2 do Forno Rotativo com as duas condições sobrepostas.	84

Figura 54	Análises da Zona 2 do Forno Rotativo com as duas condições sobrepostas.	84
Figura 55	Concentrações como função do tempo, para a zona 3 do forno rotativo.	85
Figura 56	Valores de CO ₂ para o excesso de ar de 20% no sistema corrigido e não corrigido.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Fatores de emissão de CO ₂ .	18
Tabela 2	Redução de emissão de CO ₂ para os anos de 2010 e 2020.	36
Tabela 3	Suprimento de energia.	39
Tabela 4	Compostos corrosivos de enxofre.	47
Tabela 5	Tipos de óleos, poder calorífico inferior e temperatura de queima.	49
Tabela 6	Dados básicos dos aquecedores da linha de alimentação de óleo pesado.	54
Tabela 7	Dados básicos dos sopradores do sistema de combustão.	55
Tabela 8	Dados básicos das bombas de alimentação de óleo pesado.	55
Tabela 9	Dados básicos dos queimadores do sistema de combustão.	55
Tabela 10	Especificação do óleo 3A..	70
Tabela 11	Tabela comparativa de óleos tipo A.	71
Tabela 12	Tabela de viscosidade em função da temperatura.	72
Tabela 13	Relatório de análise da Ecofuel.	78
Tabela 14	Dados do analisador novo, copiados e prontos para a geração do gráfico.	79

SUMÁRIO

Folha de rosto	I
Dados curriculares	II
Agradecimentos	III
Resumo	IV
Abstract	V
Lista de figuras	VI
Lista de tabela	IX
Sumário	X
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Objetivo do trabalho	1
1.2 Motivação do trabalho	1
1.3 Histórico e características do sistema de aquecimento	2
1.4 Estrutura do trabalho	5
Capítulo 2 – Revisão bibliográfica	6
2.1 Fornos de reaquecimento	6
2.2 Emissões	7
2.3 Combustíveis líquidos	21
2.4 Redução de emissões	27
2.5 Formação de carepa	41
2.6 Óleos combustíveis	46
Capítulo 3 – O forno estudado	50
3.1 Características do equipamento	50
3.2 Níveis de emissões	56
Capítulo 4 – Descrição da metodologia	62
4.1 Preliminares	62
4.2 Primeira etapa	62
4.3 Segunda etapa	63

4.4 Terceira etapa	64
4.5 Quarta etapa	73
4.6 Quinta etapa	74
4.7 Sexta etapa	75
4.8 Sétima etapa	76
Capítulo 5 – Resultados e discussão	77
5.1 Preliminares	77
5.2 Análise qualitativa	80
5.3 Análise de resultados	81
Capítulo 6 – Conclusões e recomendações para trabalhos futuros	89
Referências	90

Capítulo 1

Introdução

1.1 Objetivo do trabalho

Esse trabalho teve como objetivo principal o estudo da viabilidade de redução da emissão de CO₂ a partir da otimização do sistema de combustão aplicado em forno de reaquecimento. Concomitantemente, estudou-se a possibilidade de geração de Créditos de Carbono resultantes dessa redução de emissão.

1.2 Motivação do trabalho

O trabalho teve início com a investigação dos motivos do desempenho irregular da linha de forjamento de rodas ferroviárias da MWL BRASIL. Foram identificados alguns fatores que influenciavam negativamente o desempenho, entre eles a condição de aquecimento dos blocos oriundos do forno de soleira rotativa e que alimenta exclusivamente a linha de forjamento.

Desde a instalação desse forno algumas modificações foram introduzidas no sistema de combustão, mas nenhum estudo foi realizado para avaliar a capacidade de aquecimento em relação às modificações implementadas e às cargas normalmente aplicadas. Também pouco se fez para desenvolver métodos e equipamentos para reduzir o consumo de óleo e a emissão de gases.

A análise do sistema de combustão desse forno mostrou que alguns parâmetros precisariam ser modificados para regularizar seu desempenho e que seria possível reduzir suas emissões. Através dessas melhorias, além da otimização do processo com redução de consumo, poderia se obter de créditos de carbono que traria um ganho extra para a empresa.

1.3 Histórico e características do sistema de aquecimento

O forjamento de peças pesadas requer um aquecimento lento e gradual em que as perdas por oxidação dependem do tipo de sistema de combustão aplicado. Por ser um processo de alto consumo de energia e baixo custo agregado, a maior parte das forjarias pesadas utiliza fornos de reaquecimento a combustível, pois as características dos materiais permitem um grau de perda por oxidação bastante elevada.

Assim como nos processos de laminação, os combustíveis mais empregados nos processos de forjamento são óleo pesado e gás (Roberts, 1983). Os fornos modernos utilizam gás como fonte de energia, já os mais antigos ainda são a óleo. Esses fornos antigos podem ser convertidos a gás a um custo bastante elevado e, dependendo do tipo de óleo utilizado, sua amortização torna-se inviável. O tipo de combustível empregado é determinado em função das necessidades do processo de aquecimento e do material a ser aquecido.

Fornos de soleira rotativa são bastante empregados em forjarias pesadas e de alta produtividade (Lankford, 1985). São fornos, do tipo contínuo, cujas soleiras giram em um plano horizontal e seus sistemas de manuseio permitem o carregamento e descarregamento alternado de peças (Figuras 1 e 2).

Construídos a partir de estruturas metálicas e revestidos de material refratário, têm a desvantagem do alto custo de construção, pouca área efetiva de trabalho, ocupam grande espaço e têm custo de manutenção elevado. Em contrapartida, permitem trabalho contínuo e um controle de temperatura ao longo do processo mais eficiente em função da disposição dos queimadores e da divisão em zonas.

O controle de temperatura é feito através de termopares instalados nos pontos representativos das zonas de aquecimento e normalmente dispostos no teto do forno. Nos fornos modernos, a medição da temperatura comanda a quantidade de combustível a ser injetado e a relação ar/combustível permitindo um controle mais efetivo da atmosfera da câmara de combustão.

A seleção do forno se faz a partir das características do material como área da superfície, geometria, composição química, emissividade e das variáveis de processo a ser

utilizado. Ainda são levados em consideração a capacidade desejada, o espaço disponível, os equipamentos auxiliares e as características metalúrgicas no aquecimento.

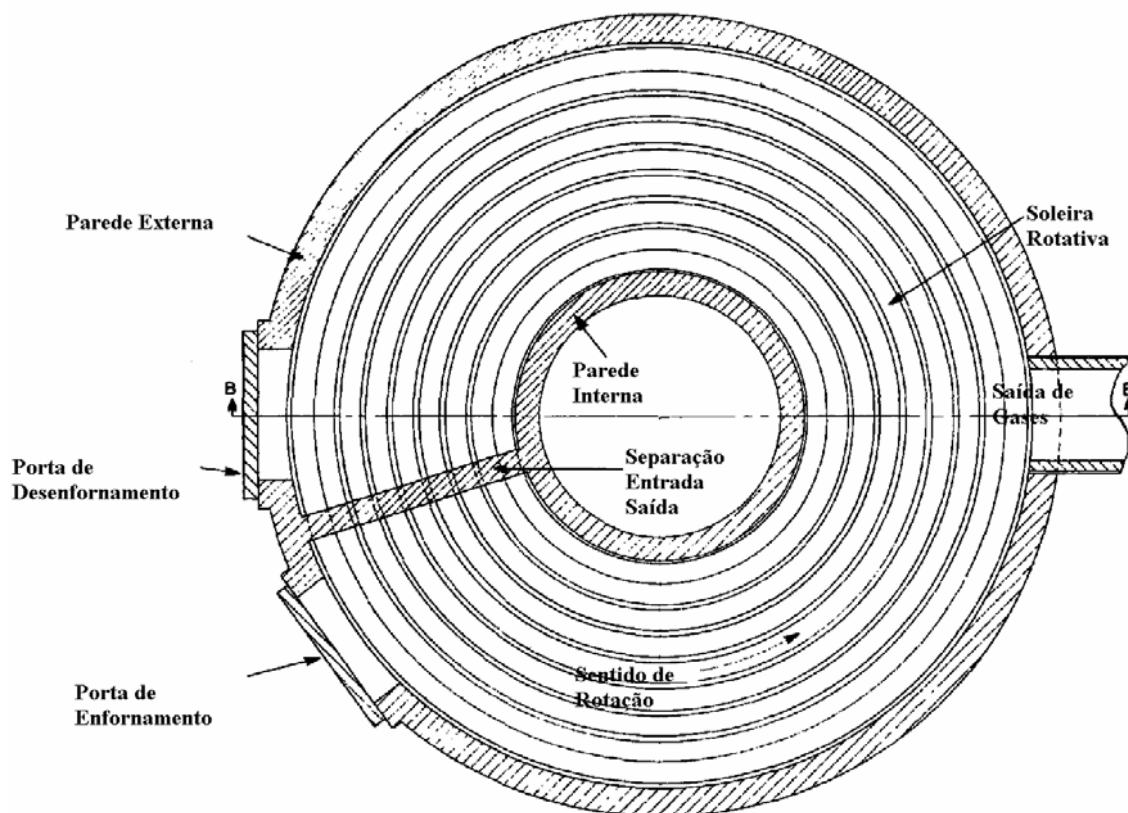


Figura 1 – Esquema de um forno de soleira rotativa.

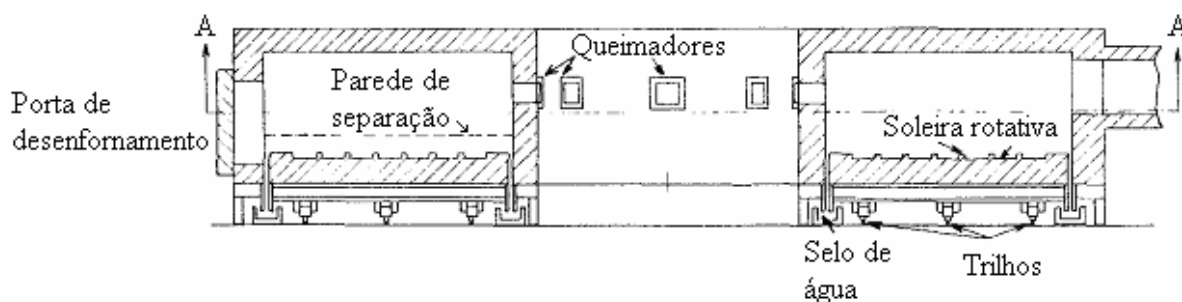


Figura 2 – Esquema de um forno de soleira rotativa, vista em corte.

A eficiência térmica de um forno é definida como a relação entre o calor requerido para elevar a temperatura da carga de sua temperatura inicial até a temperatura de trabalho e o calor total fornecido pelo sistema de combustão. A eficiência térmica varia entre 5 e 60%, mas para fornos de alta capacidade e dotados de recuperadores e boa isolamento térmica a eficiência térmica varia entre 30 e 40% (Lankford, 1985).

A eficiência térmica de um forno está intimamente ligada à temperatura de enformamento da carga, aos sistemas de recuperação de calor como regeneradores e recuperadores, ao esquema de operação do forno, aos sistemas de vedação do forno, ao tipo de refratário utilizado no revestimento e condições de manutenção. Historicamente, em regime de trabalho, são necessárias de 349.000 a 5.230.000 kJ/t aço aquecido (83.357 a 1.249.164 kcal/t aço aquecido) (Lankford, 1985).

As perdas de calor que resultam em baixa eficiência térmica são inerentes aos processos e às formas construtivas dos fornos e a principal delas é a perda pelos gases de exaustão. Outras perdas podem ser listadas como condução através do refratário das paredes, teto e soleira, radiação na abertura do forno, absorção pelo sistema de refrigeração de portas e selo da soleira, pelo excesso de ar de combustão e combustíveis não queimados lançados nos gases de exaustão.

Aços de alto carbono requerem ciclos de aquecimento mais longos comparados aos aços de baixo carbono. Para um mesmo aço, o aquecimento ocorre em velocidades diferentes para diferentes espessuras. A Figura 3 mostra as diferentes taxas de absorção de calor para um mesmo tipo de aço em função da espessura do material aquecido.

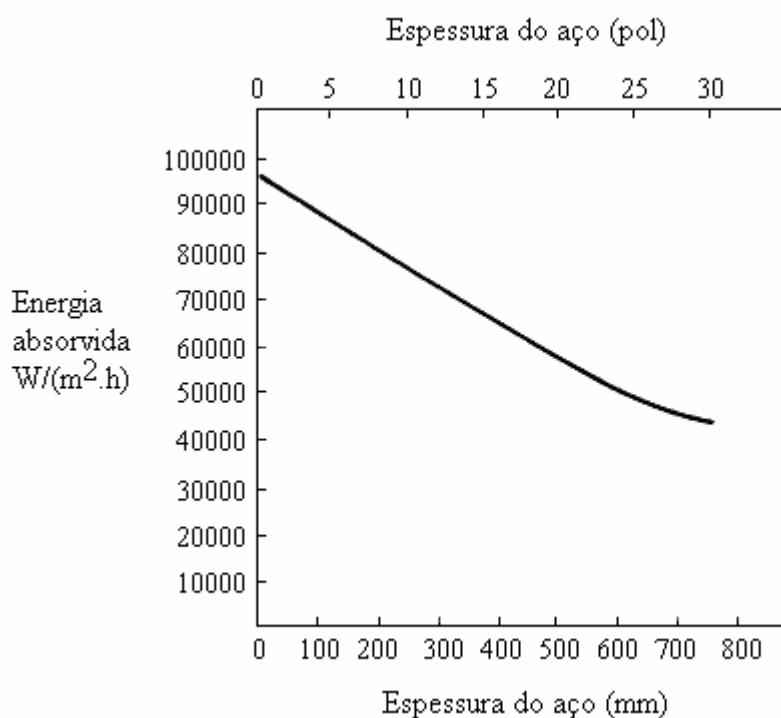


Figura 3 – Calor absorvido em função da espessura (para aço médio carbono).

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho foi desenvolvido a partir do estudo das características do forno e seus periféricos. Como complemento, algumas análises de atmosfera foram feitas a partir de Março de 2001 e intensificadas a partir do desenvolvimento do trabalho proposto.

Inicialmente as análises de atmosfera mostraram um funcionamento completamente irregular e que não era possível controlar o nível de emissões na condição apresentada.

O capítulo 2 constitui-se em uma revisão bibliográfica sobre os temas principais ligados ao desenvolvimento do trabalho: fornos de reaquecimento, emissões atmosféricas, combustão de gotas e sprays, métodos para redução de taxas de emissão, formação de carepa, e óleos combustíveis pesados.

O capítulo 3 mostra o levantamento e todas as características do forno e seus periféricos e as análises de atmosfera preliminares. Com esses dados foi desenvolvida uma metodologia que trouxesse os resultados esperados no trabalho.

O capítulo 4 traz a metodologia desenvolvida e aplicada em sete etapas, que satisfizes as expectativas e justificou o trabalho. A redução conseguida cria a possibilidade de se obter créditos de carbono, desde que mantida e estabilizada, registrada e auditada.

Os resultados obtidos são discutidos no capítulo 5. As conclusões e recomendações para trabalho futuro na mesma linha do trabalho desta dissertação são apresentadas no capítulo 6.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Fornos de reaquecimento

Fornos de reaquecimento a combustão permanecem em evidência. Por seu baixo custo operacional é um tipo de forno voltado a processos de baixo custo agregado como o forjamento de peças grandes.

A função dos fornos de reaquecimento é aquecer o material, de maneira uniforme, até uma temperatura em que a plasticidade seja suficiente para receber a deformação programada, seja por forjamento ou por laminação.

Normalmente são dotados de sistemas de carregamento e descarregamento adequados ao tipo e tamanho do material a ser manuseado e ao ritmo da produção. A capacidade de aquecimento do forno está relacionada à área da soleira e usualmente não ultrapassa 1.200kg/m^2 (Lankford, 1985).

A velocidade de aquecimento de peças grandes para forjamento deve ser cuidadosamente controlada para evitar trincas, fusão da pele, descarbonetação e geração excessiva de carepa na superfície. O controle no aquecimento também leva em consideração a composição química, a geometria e o histórico do tipo de material (Lankford, 1985).

Através desses controles pode-se obter temperatura uniforme em toda a peça, da superfície ao núcleo, no menor tempo possível, minimizando a formação de carepa e descarbonetação da superfície.

O aquecimento geralmente ocorre em patamares de temperatura. Nos fornos isso é obtido pela separação em zonas de temperaturas diferentes; apesar de não haver separação física é possível obter temperaturas diferentes através dos controles independentes dos queimadores.

Em fornos de soleira rotativa, os queimadores normalmente estão dispostos radialmente na lateral e podem operar individualmente. A divisão virtual desses queimadores e a operação independente de cada um permitem a manutenção de temperatura diferente em cada zona determinada.

Empiricamente, após a zona crítica de aquecimento (800°C), o aço pode ser aquecido a uma taxa de 22 a 33°C por hora até a temperatura de forjamento. Isso equivale a 45 min a 1 hora por 25 mm do diâmetro da peça a ser aquecida.

A temperatura de forjamento determinada deve permitir as melhores condições de deformação ao mesmo tempo produzir ao final do forjamento a melhor microestrutura para obtenção das propriedades mecânica após tratamento térmico. Temperaturas de forjamento finais mais baixas produzem microestrutura mais refinada que resultam em melhores propriedades mecânicas após o tratamento térmico. Apesar disso deve-se ter cautela, pois temperaturas muito baixas provocam rupturas internas no material pela tensão excessiva gerada no processo de forjamento.

Outras medidas de prevenção devem ser adotadas para evitar a queima e o superaquecimento das peças. A queima é caracterizada pela fusão e oxidação em contorno de grão austenítico, e é visível, uma vez que há o rompimento da pele do material. O superaquecimento não é visível, mas seu efeito é percebido no momento dos ensaios mecânicos pela baixa tenacidade e baixa ductilidade.

Para o bom funcionamento de qualquer sistema de combustão aplicado a esses fornos são necessários estudos profundos de combustão e combustíveis. Entenda-se como bom funcionamento, não apenas o aspecto do maior rendimento térmico, mas também o menor índice de emissões atmosféricas.

2.2 Emissões

Combustão é definida como uma reação exotérmica rápida que libera grande quantidade de energia na forma de calor e chama é definida como reação de combustão com a capacidade de propagar através de um meio apropriado (El-Mahallawy e El-Din Habik, 2002). Emissões atmosféricas são produtos que deixam o local do processo através do ar e

que lançados na atmosfera, misturam-se com o ar e são levados pelo vento em movimento não controlado (Carvalho e Lacava, 2003).

Atualmente no Brasil apenas 16,2% da energia consumida não é proveniente de combustão (BEN, 2005), conforme mostram as Figuras 4 e 5. Isso gera uma grande preocupação em relação ao meio ambiente. Mesmo sabendo que 47,8% dessa energia são provenientes de fontes renováveis, as emissões já atingiram um nível alarmante e vêm desencadeando efeitos nocivos como o efeito estufa.

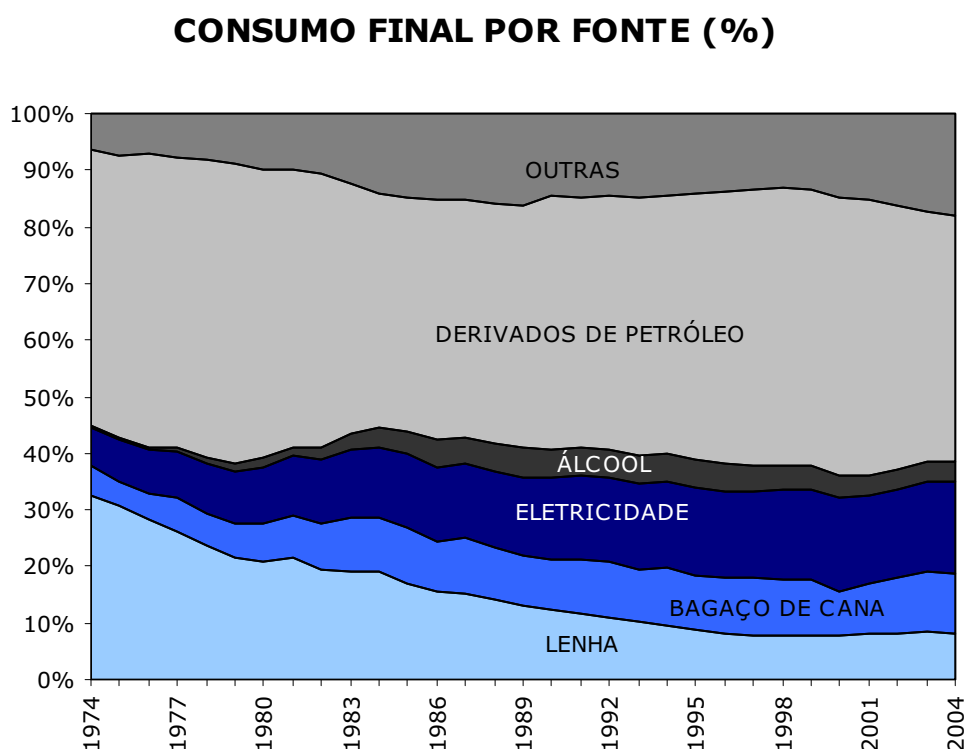


Figura 4 – Consumo final de energia por fonte (BEN, 2005).

Para se ter uma noção da situação atual, os setores que mais contribuem no caso de emissões atmosféricas são o industrial e o de transporte, que no Brasil é basicamente rodoviário. O setor industrial corresponde a 37,8% e o de transporte a 26,9% do consumo total de energia, mesmo excluindo 7,76% correspondente ao consumo de eletricidade na indústria e 0,05% no transporte isso ainda representa um alto nível de emissões. Apesar desse cenário, os sistemas de combustão irão perdurar por muitas décadas na área de energia, pois a maioria dos países ainda centra o aproveitamento energético na queima de combustíveis

(Carvalho e Lacava, 2003). A oferta de energia no Brasil também é baseada nessas mesmas fontes (BEN, 2005).

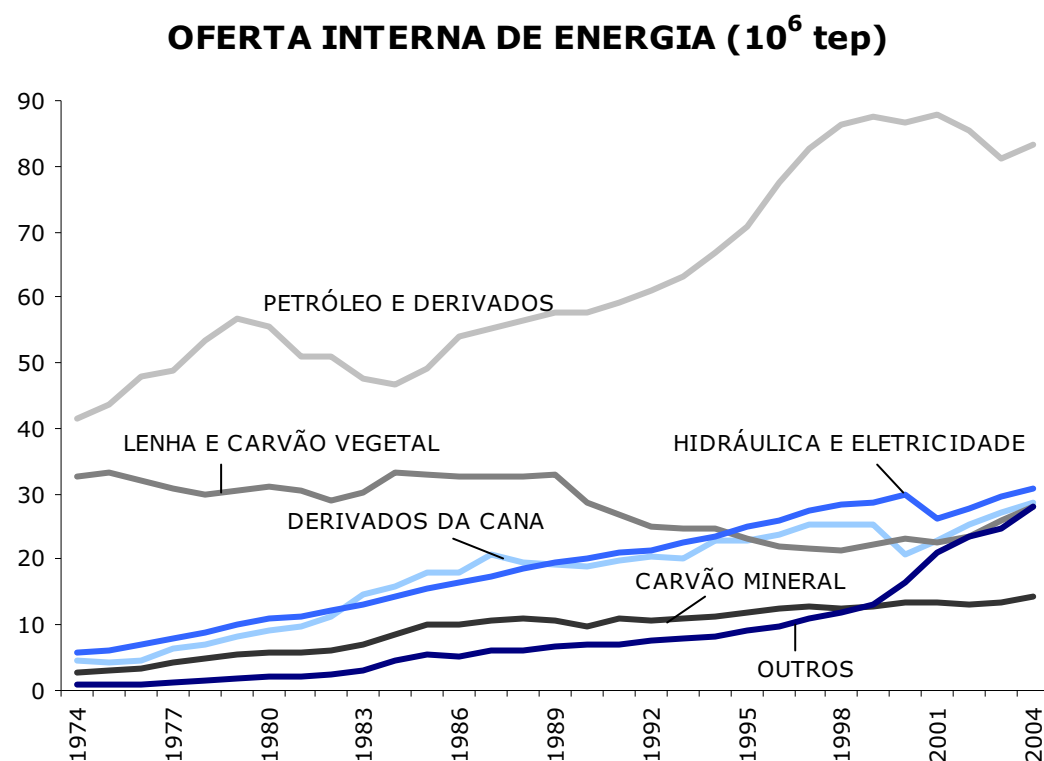


Figura 5 – Oferta interna de energia (BEN, 2005); *tep = tonelada equivalente de petróleo.

Do total de energia ofertada, 39,1% é oriunda de derivados de petróleo, isso apesar do volume produzido ser inferior ao consumido. Em relação ao petróleo, os setores que mais consomem são o de transporte e o industrial, representando 50,9% e 13,1%, respectivamente, conforme mostram as Figuras 6 a 8.

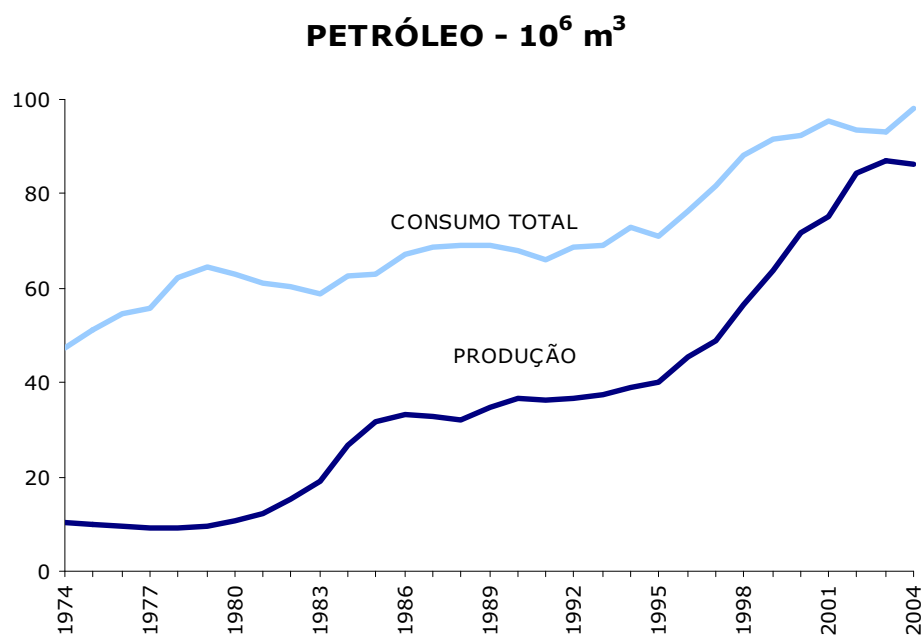


Figura 6 – Produção e consumo de petróleo no Brasil (BEN, 2005).

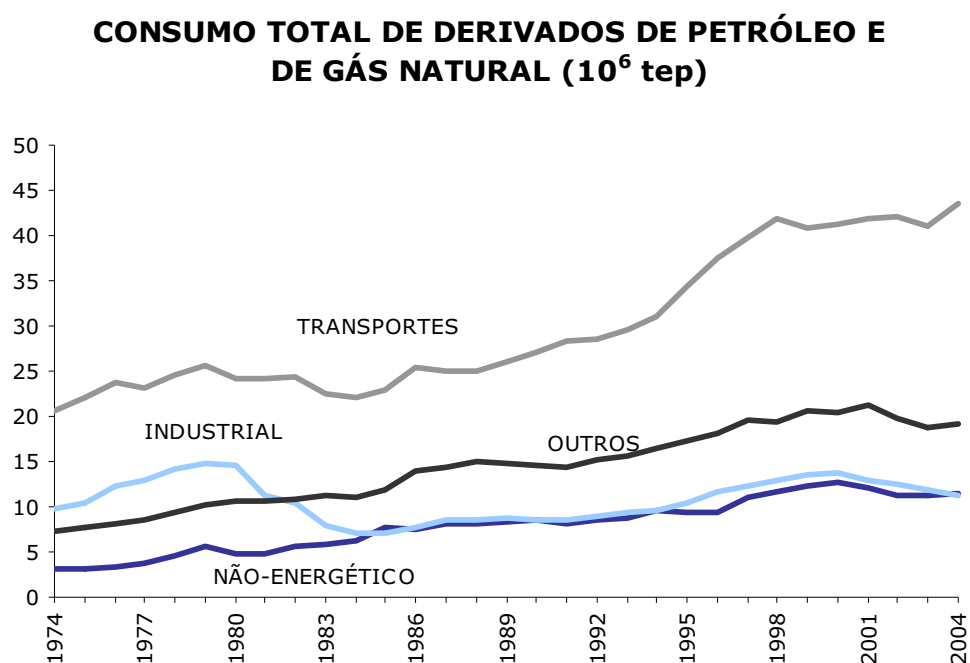


Figura 7 – Consumo de derivados de petróleo por setor (BEN, 2005).

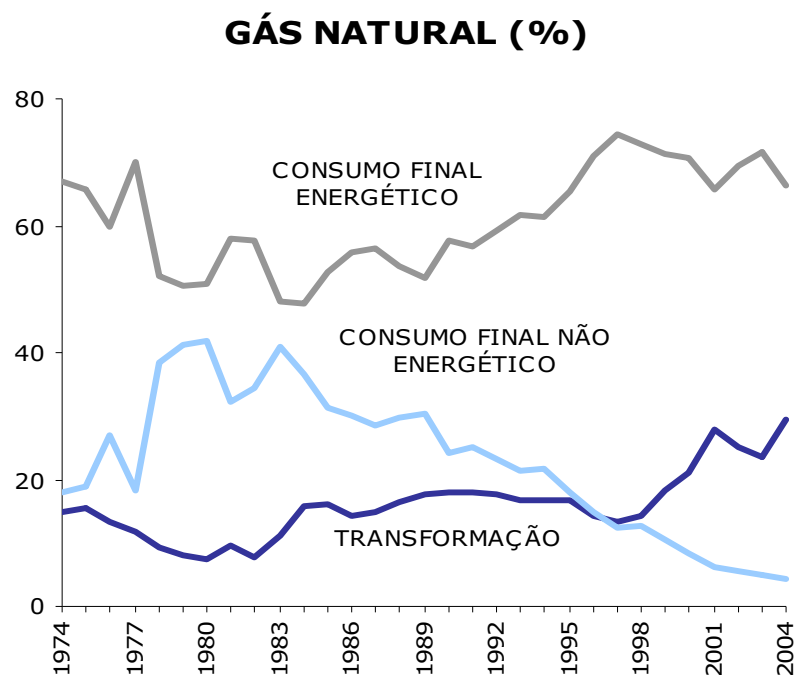


Figura 8 – Consumo de gás natural por aplicação (BEN, 2005).

Mundialmente o cenário permanece o mesmo, ou seja, com crescimento no consumo de energia e, conseqüentemente, nas emissões atmosféricas, conforme mostram as Figuras 9 e 10.

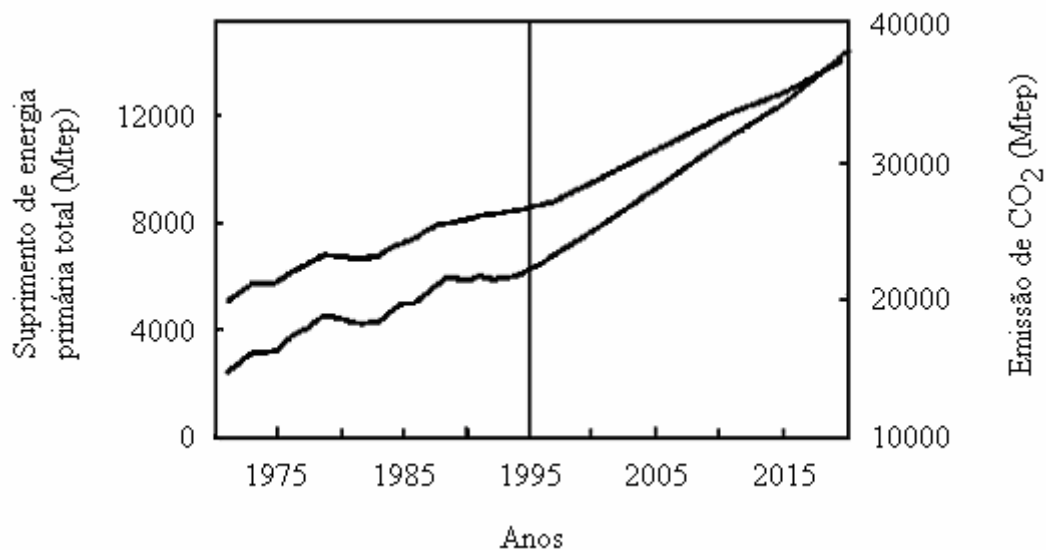


Figura 9 – Suprimento de energia mundial total e emissão de CO₂ (El-Mahallawy e El-Din Habik, 2002).

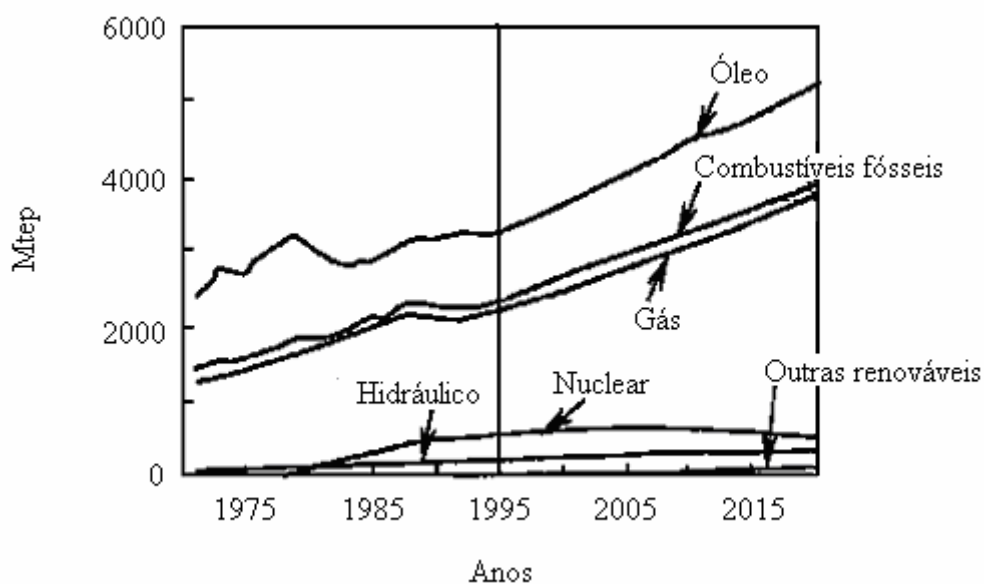


Figura 10 – Suprimento de energia mundial por fonte (El-Mahallawy e El-Din Habik, 2002).

As emissões atmosféricas resultantes de processos de combustão ganharam projeção a partir da década de 1970 quando as preocupações com o meio ambiente entraram em evidência. Nas décadas de 1980 e 1990 o aquecimento global atingiu nível alarmante devido ao efeito estufa.

O efeito estufa é aumento da temperatura da terra devido à absorção dos raios infravermelhos emitidos pela superfície da Terra por gases, cujas contribuições relativas estão representadas na Figura 11. A maior contribuição corresponde ao CO_2 com 70%, seguido pelo CH_4 (metano) com 27%, e pelo N_2O (óxido nitroso) (Lora, 2002).

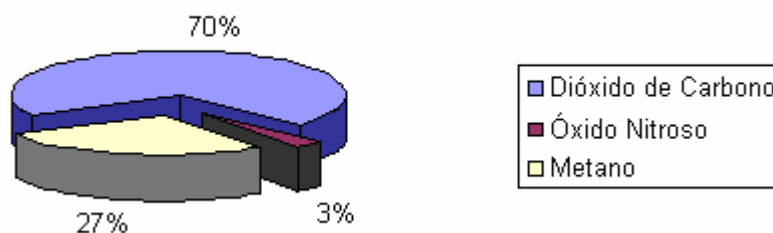


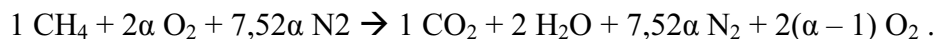
Figura 11 – Contribuição dos gases para o efeito estufa (Lora, 2002).

Em 1896, Arrhenius alertou sobre os possíveis impactos ambientais do aumento da concentração de CO₂ na atmosfera (El-Mahallawy e El-Din Habik, 2002). No século XIX, o francês Jean Fournier identificou o efeito estufa e, em 1938, o cientista G. Callendar publicou um artigo (“The Artificial Production of Carbon Dioxide and its Influence on Temperature”) em que afirmava que a utilização de combustíveis fósseis aumenta a concentração de CO₂ na atmosfera com conseqüentes mudanças climáticas (Lora, 2002).

Não só o efeito estufa preocupa, mas a poluição atmosférica em geral também. Os principais causadores de poluição atmosférica são oriundos dos gases de combustão. O material particulado, o dióxido de enxofre (SO₂), os óxidos de nitrogênio (NO_x), o monóxido de carbono (CO), o dióxido de carbono (CO₂), os hidrocarbonetos não-queimados, as dioxinas e os furanos presentes nos gases de combustão podem ser avaliados e ter suas concentrações medidas e diminuídas antes de lançados na atmosfera pelas chaminés.

Há métodos de medição da concentração diretos (equipamentos de análise de atmosfera) e indiretos (calculados a partir da composição do combustível queimado).

A estimativa de geração de poluentes em um processo de combustão pode ser obtida através do cálculo das concentrações dos componentes dos gases nessa reação de combustão (Carvalho e Lacava, 2003). Como exemplo mais simples, toma-se uma reação genérica de combustão de metano com excesso de ar normalizado (α):



As concentrações dos componentes dos gases de combustão serão:

$$[\text{O}_2] = \frac{2(\alpha - 1)}{1 + 2 + 7,52\alpha + 2(\alpha - 1)} = \frac{2(\alpha - 1)}{9,52\alpha + 1} ,$$

$$[\text{CO}_2] = \frac{1}{9,52\alpha + 1} ,$$

$$[\text{N}_2] = \frac{7,52\alpha}{9,52\alpha + 1} .$$

Como nos analisadores há a eliminação de água, consideraram-se as concentrações em base seca (subscrito BS):

$$[O_2]_{BS} = \frac{2(\alpha - 1)}{9,52\alpha - 1},$$

$$[CO_2]_{BS} = \frac{1}{9,52\alpha - 1},$$

$$[N_2]_{BS} = \frac{7,52\alpha}{9,52\alpha - 1}.$$

Para um excesso de ar de 10%, tem-se $\alpha = 1,1$, resultando nas seguintes concentrações:

$$[O_2]_{BS} = \frac{2(1,1 - 1)}{(9,52 \times 1,1) - 1} = 2,11\%,$$

$$[CO_2]_{BS} = \frac{1}{(9,52 \times 1,1) - 1} = 10,56\%,$$

$$[N_2]_{BS} = \frac{7,52 \times 1,1}{(9,52 \times 1,1) - 1} = 87,33\%.$$

As concentrações de CO, CO₂, O₂, NO_x e SO₂ são normalmente determinadas com o uso de um analisador, portátil ou contínuo, do tipo infravermelho ou do tipo célula eletroquímica. Esses equipamentos são bastante difundidos nos meios industriais, principalmente os portáteis por serem fáceis de transportar e manusear. A partir dessas análises, que são quase instantâneas, pode-se corrigir a mistura nos queimadores e reduzir as emissões.

A combustão incompleta resulta em emissão de monóxido de carbono (CO), que além de poluir também gera perda de energia, uma vez que deixou gerar calor, pois foi oxidado apenas parcialmente. O monóxido de carbono é um gás inodoro e bastante venenoso. Sua

aspiração pode acarretar um simples desconforto com dor de cabeça leve até o óbito (Carvalho e Lacava, 2003).

Durante a combustão dos hidrocarbonetos há a formação do CO e, posteriormente, a oxidação deste para CO₂. A oxidação do CO é lenta, mas na presença de compostos de hidrogênio essa oxidação é acelerada. Pequenas quantidades de H₂O ou H₂ provocam uma aceleração bastante significativa na oxidação do CO, pois a oxidação com o radical OH é muito mais rápida do que com o O₂ e O.

A reação global da formação e oxidação do CO é composta por 7 reações:



A reação que rege a oxidação do CO é a reação (c), mas a reação (a) é a que inicia o mecanismo. A reação (b) é a formadora de radical hidróxilo e a reação (g) é outra reação de oxidação, mas somente quando ocorre o radical HO₂.

A oxidação do CO para CO₂ não significa a eliminação de um poluente, mas criação de outro poluente. O CO₂ é o maior responsável pelo efeito estufa na terra. Apesar de o efeito estufa ser necessário para a manutenção da temperatura da terra, o excesso desse efeito é

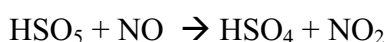
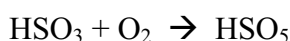
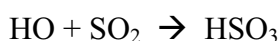
bastante danoso ao meio ambiente, pois gera mudanças climáticas que podem ser catastróficas.

Parte dos hidrocarbonetos não queimados – UHC (Unburned HydroCarbons) presentes nos gases de combustão é proveniente de degradação térmica do combustível primário em hidrocarbonetos de menor peso molecular que são arrastados sem sofrer oxidação completa e parte são provenientes de fase gasosa ou gotículas de combustível que não sofreram oxidação completa por tempo de residência na câmara de combustão insuficientes ou por deficiência na mistura entre reagentes.

Dioxinas são compostos orgânicos conhecidos quimicamente de dibenzo-p-dioxinas cuja forma clorada usualmente é chamada de dioxina. Furanos são compostos conhecidos como dibenzofuranos. Sua forma clorada é chamada de furano. Esses compostos podem fazer parte da composição dos gases de combustão quando ocorre combustão incompleta ou quando há a recombinação dos gases de combustão com compostos clorados. Estudos em animais mostraram que tanto as dioxinas quanto os furanos são cancerígenos e afetam a reprodução, mesmo em pequenas doses. Apesar disso, seu efeito em humanos ainda está sendo estudado.

As emissões não naturais de dióxido de enxofre (SO₂) são provenientes da queima de carvão (61%), da queima de óleo (25%), da fusão de minério de sulfeto de cobre (10%) e da fusão de sulfeto de zinco e chumbo (1,5%) (Carvalho e Lacava, 2003). Por ter um tempo de vida bastante longo na atmosfera (de 2 a 6 dias), o dióxido de enxofre pode viajar até cerca de 4.000 km longe de sua fonte emissora. Apesar de lançados normalmente por chaminés bastante altas esses gases podem se deslocar a centenas de quilômetros antes de sua dispersão completa se o nível de turbulência encontrado na atmosfera for baixo.

Um processo complexo de oxidação do dióxido de enxofre na atmosfera o leva à formação de ácido sulfúrico:





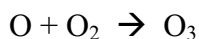
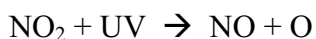
O ácido sulfúrico solubilizado no vapor de água das nuvens é posteriormente depositado no solo, nas águas e nas plantas pelo efeito da chuva. Essa chuva ácida normalmente contém ácido nítrico que é formado a partir dos óxidos de nitrogênio (NO_x). Há também a deposição seca a partir de gases ácidos e partículas. Metade do material ácido sofre deposição seca pela ação dos ventos.

A chuva ácida, como diz o nome, além de acidificar lagos e correntes de água também ataca pinturas, deteriora estruturas de edifícios, danifica a vegetação, prejudica a visibilidade e também afeta a saúde pública.

Os óxidos de nitrogênio genericamente chamados de NO_x são a soma de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2) gerados nos processos de combustão. O NO é formado em quantidades muito maiores que o NO_2 , mas após lançamento na atmosfera logo se transforma em NO_2 devido à baixa temperatura ambiente. Nessa temperatura a relação NO_2/NO é de cerca de 3, acima de 500°C esse número cai abaixo de 0,15.

A formação de NO_x se dá em altas temperaturas e em atmosferas oxidantes, mas a utilização de combustíveis com teores de nitrogênio maiores também contribui para a formação.

Como poluente, além de provocar a chuva ácida também participa de reações fotoquímicas que formam o smog fotoquímico e prejudicam a visibilidade. A ação de raios ultravioleta decompõe o NO_2 e leva à formação de ozônio (O_3). O NO_x e o O_3 provocam edema pulmonar, pois são solúveis em gordura e penetram profundamente nos alvéolos desnaturando as proteínas e transformando-os em tecidos porosos que acumulam lentamente um líquido espumoso. A formação do ozônio troposférico dá-se segundo o esquema:



O smog fotoquímico é de tonalidade marrom-amarelada e aparece em forma de névoa sobre as áreas urbanas em dias ensolarados e de temperatura alta. O smog é composto por ozônio (O₃), NO_x, componentes orgânicos voláteis, SO₂, aerossóis e material particulado (Carvalho e Lacava, 2003).

A redução de emissão de poluentes pode ser determinada a partir de técnicas de controle de operação dos sistemas de combustão, além do desenvolvimento de equipamentos específicos para essa finalidade.

A minimização da emissão de CO₂ pode ser obtida através do enriquecimento do ar de combustão com oxigênio. Uma vez que a concentração de oxigênio aumenta, proporcionalmente a concentração de nitrogênio cai e com isso há uma menor absorção de energia por parte do nitrogênio que não gera calor. Com isso a necessidade de calor é menor e consequentemente há uma menor injeção de combustíveis na câmara de combustão, gerando uma quantidade menor de CO₂. A utilização de gás natural é outro fator que pode contribuir para a redução da emissão de CO₂, uma vez que sua combustão gera quantidade menor se comparado a outros combustíveis. A Tabela 1 mostra os fatores de emissão de CO₂ para a combustão de diferentes combustíveis.

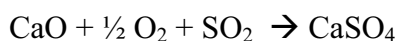
Tabela 1 – Fatores de emissão de CO₂ (El-Mahallawy e El-Din Habik, 2002).

Fator de emissão de CO₂			
Tipo combustível	ton CO ₂ /ton comb.	Tipo combustível	ton CO ₂ /ton comb.
GLP	2,9837	Óleo Diesel	3,2093
Gasolina	3,1046	Óleo combustível	3,1094
Querosene	3,2160	Outros óleos	2,9473
Óleo médio	3,2093	Gás Natural	2,615

No caso do CO, desenvolvimentos na área de queimadores estão sendo feitos para melhorar a mistura entre combustível e ar e propiciar uma melhor combustão. Apesar disso não pode ser negligenciada a utilização de um mínimo de excesso de ar se a operação do equipamento assim o permitir.

Métodos preventivos e métodos corretivos podem ser aplicados na redução da emissão de SO₂. Como método preventivo, pode-se aplicar os processos de dessulfurização do combustível que retira o enxofre antes da queima. É um método de alto custo e nem sempre viável economicamente. Como prevenção, a situação ideal é a utilização de combustíveis com baixo teor de enxofre ou mesmo a substituição por gás natural. O gás natural hoje representa 6,4% do consumo total de energéticos no Brasil e desses 6,4%, 66,2% são consumidos para fins energéticos.

Os métodos corretivos podem ser aplicados durante ou após a queima. Um exemplo durante a queima é a aplicação de combustores tipo leito fluidizado em que um material absorvente (cal, calcário ou dolomita) retém o enxofre. Se o agente absorvente for a cal a remoção será através da seguinte reação:



Comercialmente, os sistemas de dessulfurização dos gases de combustão por lavagem dos produtos de combustão são bastante difundidos. Nesses sistemas são aplicados agentes absorventes líquidos/gasosos que contém cal, calcário ou cinza alcalina. O desempenho desses sistemas chega a 90-95% de eficiência desde que a concentração de SO₂ nos gases esteja limitada a 5.000 ppm de SO₂ (Carvalho e Lacava, 2003).

O controle de emissão de NO_x pode ser executado durante ou após a combustão. Algumas técnicas podem reduzir a emissão de NO_x, mas por outro lado podem aumentar a emissão de outros poluentes ou reduzir a eficiência do processo.

Alguns métodos de controle durante a combustão podem ser aplicados a um custo relativamente reduzido. O controle da mistura por meio de atomizadores com fluido auxiliar podem variar o tamanho de gota e consequentemente alterar a formação de NO_x. Essa alteração se dá pela alteração do tempo de vaporização das gotas; gotas menores com tempo de vaporização menor misturam-se rapidamente ao ar de combustão obtendo temperatura mais elevada e consequentemente formação maior de NO_x, conforme mostra a Figura 12.

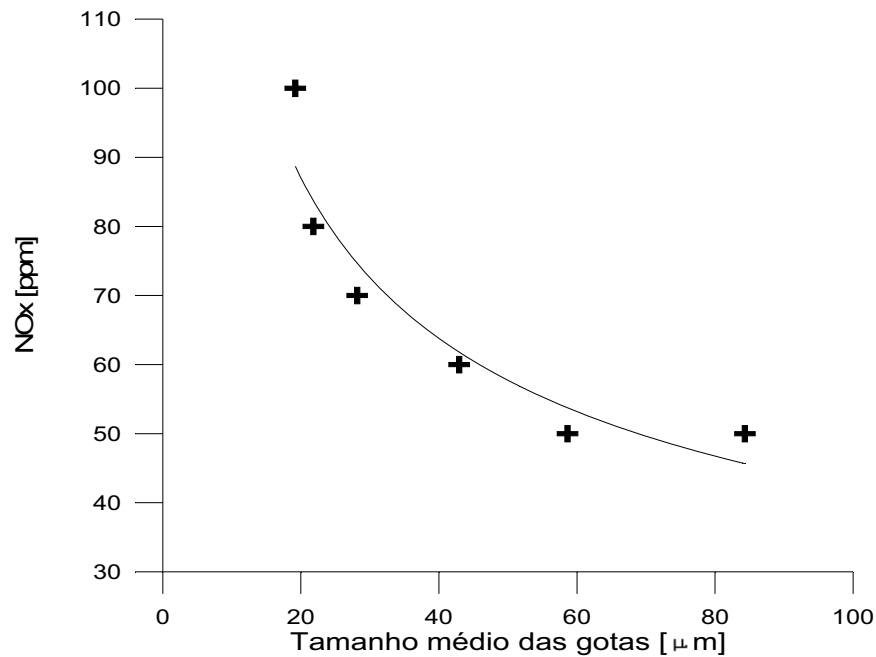


Figura 12 – Emissão de NO_x em função do tamanho médio de gota (Lacava, 2000).

Outra forma de controle da mistura é pela alteração da zona de recirculação a jusante do queimador que tem como função a manutenção da chama nas proximidades do queimador. Um dispositivo denominado ancorador de chama é inserido em posição estratégica no queimador para tal fim. Esses ancoradores podem ser de dois tipos: de corpos rombudos ou de geradores vorticais (swirlers).

Os de corpos rombudos são pouco utilizados uma vez que seu desenvolvimento é totalmente empírico por não haver uma teoria abrangente disponível para seu projeto. Geralmente são cônicos e com rasgos ou orifícios que permitem a passagem direta de ar para resfriamento a fim de evitar o superaquecimento com formação de carbono na face posterior.

Já os swirlers são bastante difundidos em queimadores industriais e em turbinas a gás, pois podem ser projetados com o auxílio de expressões matemáticas em seu dimensionamento (Turns, 2000). Nesse caso a estabilização da chama se dá por rotação onde os gradientes de pressão radiais e axiais controlam o escoamento. Há a formação de uma zona de recirculação interna onde o spray é lançado e apenas parte do oxigênio necessário é suprido. Nessa zona ocorre parte da combustão, em atmosfera rica com alta concentração de hidrocarbonetos não queimados e CO e que resulta em baixa formação de NO_x, conforme mostra a Figura 13.

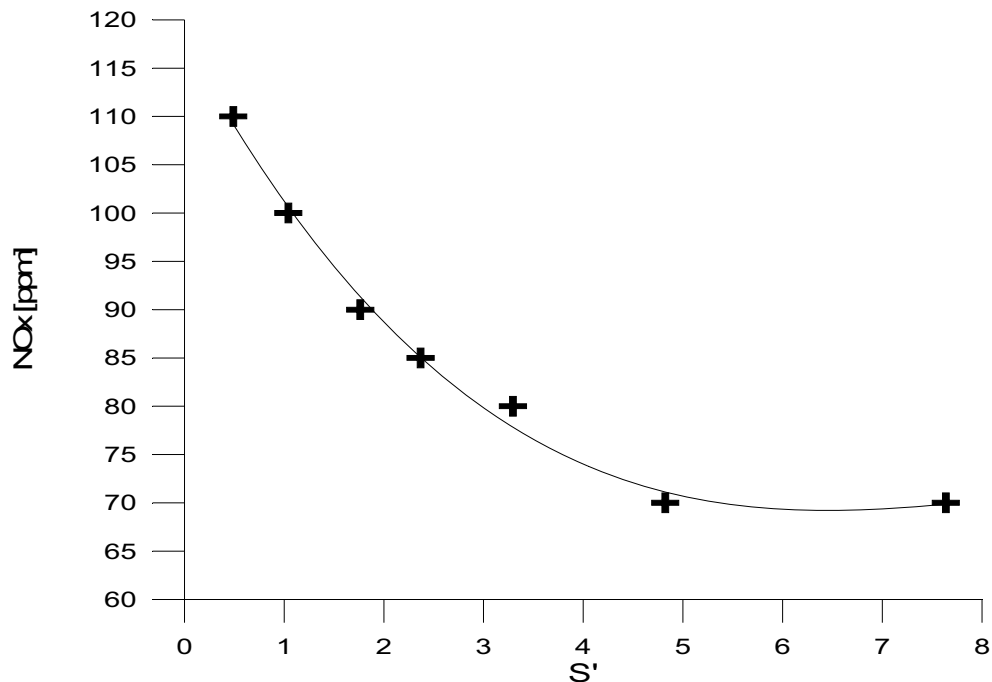


Figura 13 – Emissão de NO_x em função do número de swirl (Lacava, 2000).

O número de swirl é um adimensional que caracteriza a intensidade do swirl e está diretamente relacionado ao perfil de velocidade e à pressão estática na seção de saída do queimador.

A combustão estagiada é outra técnica de redução de NO_x. Seu princípio está baseado na combinação de zonas ricas e pobres na câmara de combustão (Figura 14), o que evita o aparecimento de condições favoráveis de temperatura e concentração para a formação do NO_x. Responde bem na combustão de hidrocarbonetos com ar, mesmo que o ar seja pré-aquecido acima de 1.000°C condição que normalmente gera alta emissão de NO_x.

2.3 Combustão de líquidos

Outro fator importante no controle de emissões gasosas é a forma com que a queima se processa. A queima de uma gota em atmosfera oxidante segue os seguintes passos:

- Evaporação do combustível da superfície.
- Difusão da parte evaporada para a chama.

- Difusão do oxigênio para a chama.

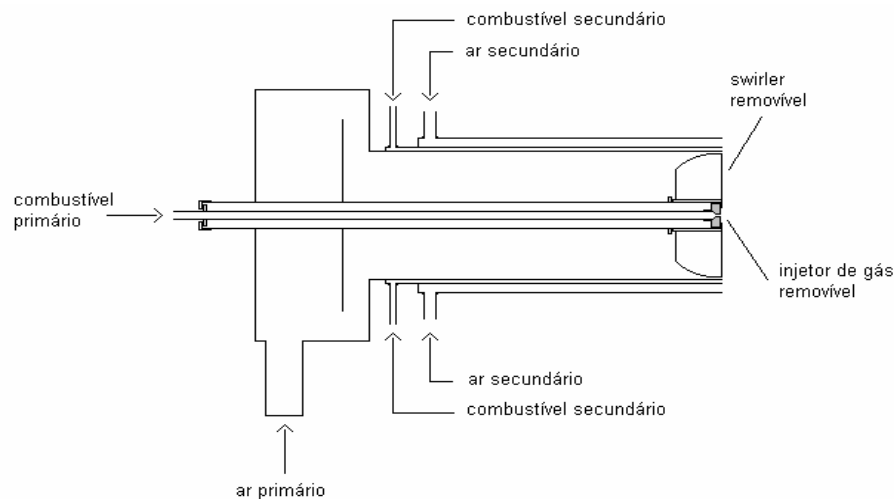


Figura 14 – Queimador com injeção estagiada de combustível e oxidante (Carvalho e Lacava, 2003).

Nessa queima ocorrem as seguintes etapas:

- Retardo de ignição: quando ainda não há combustão, apenas há a vaporização pelos gases quentes até que a mistura seja capaz de sustentar a combustão.
- Queima da gota: nessa etapa ocorre a maior parte da queima, obedecendo a Lei D^2 de evaporação.
- Queima residual: quando a gota não existe mais e são queimados os gases resultantes de sua vaporização.

A queima da gota produz uma chama concêntrica (Figura 15). A queima da gota se processa segundo a lei D^2 de evaporação:

$$D^2 = D_0^2 - \lambda t,$$

onde D é o diâmetro instantâneo da gota, D_0 é o diâmetro inicial da gota, λ é a constante de evaporação e t é o tempo. Para hidrocarbonetos queimando em ar a constante λ vale $(10 \pm 2) \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

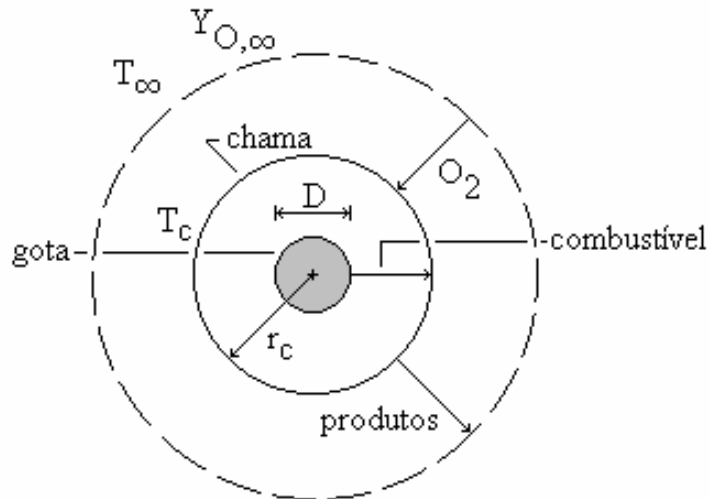


Figura 15 – Queima de uma gota – chama concêntrica (Turns, 2000).

O tempo de queima, t_q , é determinado quando o tamanho da gota é $D = 0$:

$$t_q = \frac{D_0^2}{\lambda}.$$

Em condições operacionais o combustível é injetado em forma de spray onde as gotas não estão mais em uma atmosfera totalmente oxidante devido aos produtos da evaporação das gotas. A queima dos combustíveis líquidos segue as seguintes etapas:

- Atomização: o combustível é desagregado em pequenas gotas através de processos mecânicos.
- Evaporação: o combustível já atomizado é evaporado pela ação do calor da chama.

- Mistura: o combustível na fase gasosa se mistura ao comburente formando uma mistura inflamável.
- Combustão: queima da mistura liberando energia na forma de calor.

Os sistemas que queimam combustíveis líquidos normalmente operam com chamas de difusão, onde as fases de mistura e combustão ocorrem simultaneamente.

Sistemas de combustão industriais geram sprays densos cujas gotas não queimam individualmente e sim formam uma chama coletiva ao redor da nuvem de gotas. Esse procedimento é denominado combustão de grupo (Paz, 2007).

No centro da nuvem o oxidante é insuficiente para a queima individual das gotas que apenas vaporizam são transportados para a área exterior do spray onde é misturado ao oxidante para queimar.

A taxa de queima da nuvem é mais baixa que a de uma simples gota, portanto o tempo de queima da nuvem é maior que o tempo de queima da gota.

Há quatro modos de combustão de grupo:

- Combustão simples de uma gota.
- Combustão de grupo interno.
- Combustão de grupo externo.
- Combustão de grupo externo com envelope de chama.

A Figura 16 mostra os modos de combustão como função da distância adimensional entre as gotas. As Figuras 17 a 20 mostram especificamente cada um dos modos.

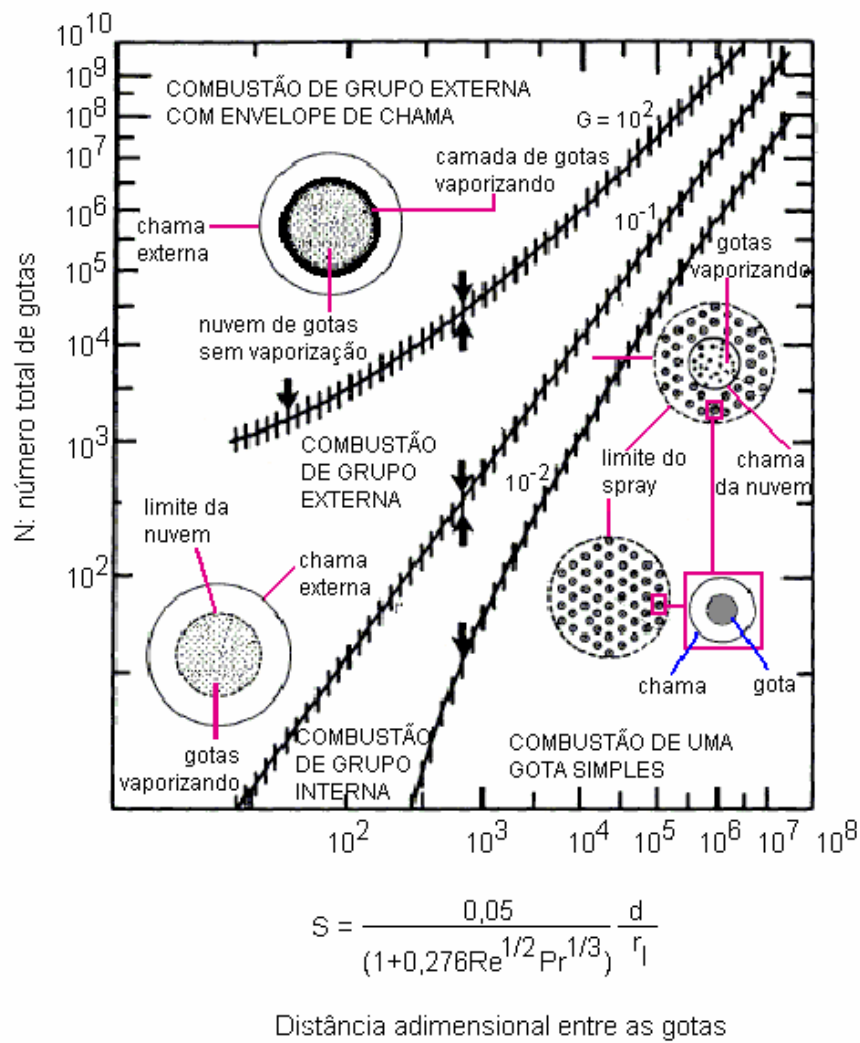


Figura 16 – Modos de combustão de gota (d: distância média entre gotas; r_l : raio médio da gota).

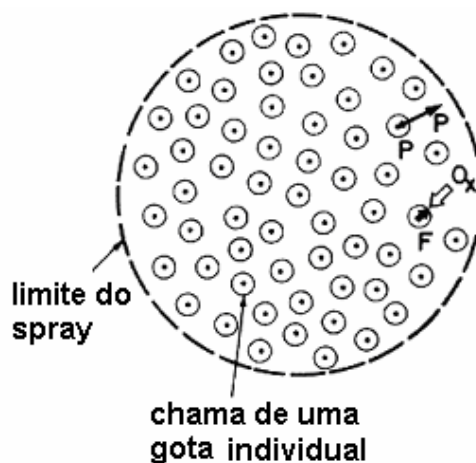


Figura 17 – Combustão simples de uma gota.

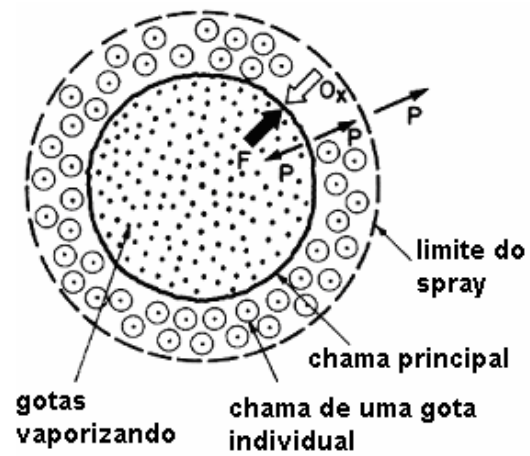


Figura 18 – Combustão de grupo interno.

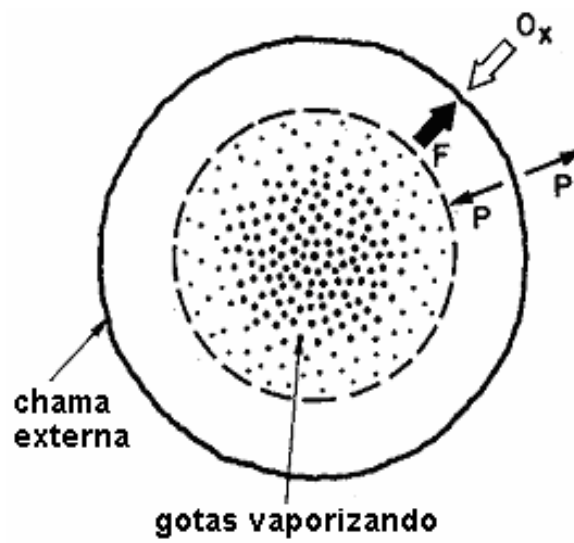


Figura 19 – Combustão de grupo externo.

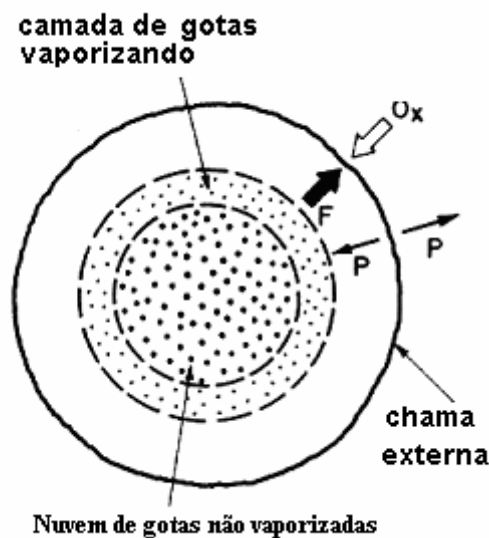


Figura 20 – Combustão de grupo externo com envelope de chama.

Na combustão simples de uma gota a difusão de oxidante para o interior da nuvem é suficiente para a combustão individual da gota. Na combustão de grupo interno há uma zona de gotas vaporizando, pois a difusão de oxidante para o interior da nuvem tem velocidade inferior à de vaporização. Apenas na parte externa da nuvem há oxidante suficiente para permitir a combustão individual de gotas.

A combustão de grupo externo apresenta uma região em que as gotas apenas vaporizam por deficiência de oxidante e outra em que os vapores queimam. A combustão de grupo externo com envelope de chama apresenta uma região mais interna em que há uma nuvem de gotas não vaporizadas, uma outra camada de gotas vaporizando e a camada externa em que os vapores queimam.

2.4 Redução de emissões

Lopez e Mandujano (2005) descrevem o ganho na qualidade do ar com a substituição parcial do óleo combustível pesado por gás natural. No México, como em outros países, o crescimento no consumo de óleo acompanhou o desenvolvimento industrial. O óleo utilizado contém cerca de 3,8% de enxofre, que impacta de maneira negativa a qualidade do ar, pois emite grande quantidade de SO_2 e particulado.

Uma alternativa para a redução da poluição é a utilização de gás natural, mas infelizmente há falta do combustível e a maior parte é importada no México. Outra dificuldade envolve o aspecto econômico, pois a troca de combustível é bastante onerosa e envolve grandes investimentos, tanto público como privado. O custo associado para o emprego do gás natural é fator importante na avaliação da viabilidade do uso.

No experimento relatado, foram empregados três laboratórios móveis que executaram as análises simultaneamente, monitorando o dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO), ozônio e partículas em suspensão. Dados meteorológicos também foram colhidos nesse experimento (direção e velocidade do vento, temperatura ambiente, pressão atmosférica e radiação solar).

Os métodos de análise foram aprovados e sugeridos pela Agência de Proteção ao Meio Ambiente dos Estados Unidos (US EPA), as áreas selecionadas baseadas em históricos de ventos predominantes para a avaliação da dispersão de poluentes, as informações sobre emissões foram obtidas da autoridade do meio ambiente do México e ainda incluíram informações sobre combustíveis (óleo pesado e gás natural) e as correspondentes capacidades produtivas.

O resultado mostrou que a substituição parcial de óleo pesado pelo gás natural reduziu o nível de emissão de poluentes de maneira bastante significativa (Figura 21).

Muitos estudos foram realizados ao longo dos anos, mas a maioria dos modelos utilizados ignora o impacto da inovação e difusão da tecnologia ambiental.

Rubin et al. (2004) apresentam dados de duas tecnologias de controle cujos resultados são bastante positivos. São sistemas aplicados em plantas movidas a carvão e largamente difundidos. O sistema de dessulfurização de gás de combustão (FDG – Flue Gas Dessulfurization) utilizado para controlar a emissão de SO₂ e o sistema de redução catalítica seletiva (SCR – Selective Catalytic Reduction) para controlar a emissão de NO_x. Fazem o controle pós-combustão em caldeiras e fornos e são considerados os mais eficientes na remoção de poluentes em plantas a carvão.

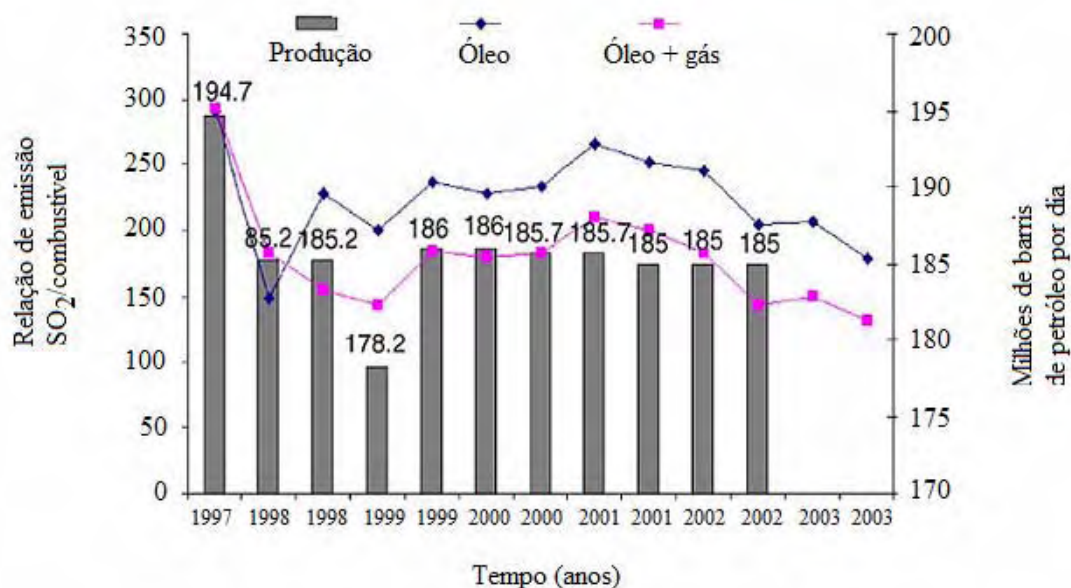


Figura 21 – Emissão de poluentes e produção no México (Lopes e Mandujano, 2005).

O FGD domina o mercado de sistemas dessulfurizadores com cerca de 86%. São dois tipos de sistema: um conhecido como “wet” FGD que utiliza cal ou calcário como reagente químico e que remove cerca de 90% do SO₂, mas pode atingir até 99% e o “Dry” FGD que usa cal como reagente químico aplicado em sistema de spray seco, sendo menos eficiente que o “Wet” FGD. Ambas as tecnologias atendem plenamente as rígidas especificações da norma de desempenho de novas fontes dos Estados Unidos (NPS – New Source Performance Standards). A Figura 22 apresenta a capacidade instalada de equipamentos FGD em diferentes locais.

Esses sistemas têm como desvantagem a geração de resíduo sólido que tem que ser tratado para ser aproveitado ou descartado.

Cada país adota suas próprias medidas de controle. Nos países industrializados o rigor das medidas adotadas levou as empresas a adotar o FGD como estratégia de controle de emissão de SO₂ por ser bastante eficiente.

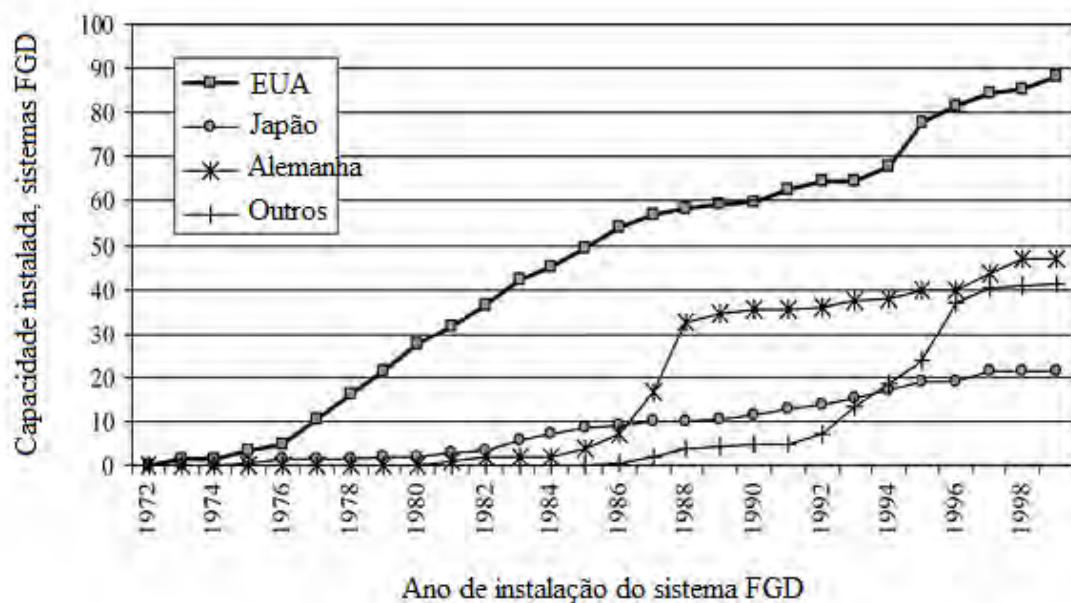


Figura 22 – Capacidade instalada do FGD nos Estados Unidos, Japão, Alemanha e resto do mundo (Rubin et al., 2004).

Nos Estados Unidos o Congresso exige o uso do que chamam de “melhor tecnologia de controle disponível” (BACT – Best Available Control Technology). Em 1971 a Agência de Proteção ao Meio ambiente definiu um padrão de desempenho cujo limite de emissão para o SO_2 era de 1,2 lb/MBtu de energia introduzida na caldeira, o que corresponde a 75% de redução na emissão.

Após revisão pelo Congresso em 1979 a redução na emissão de SO_2 passou a ser de 70 a 90% para plantas novas.

O SCR começou a ser usado no Japão no início da década de 1970, mas teve seu uso generalizado na Alemanha em meados da década de 1980. Nos Estados Unidos a utilização do SCR começou apenas em 1993. Esse sistema também tem sido empregado em plantas geradoras de eletricidade que queimam óleo e gás natural, pois esses sistemas também produzem NO_x . A Figura 23 apresenta a capacidade instalada de equipamentos SCR em diferentes locais.

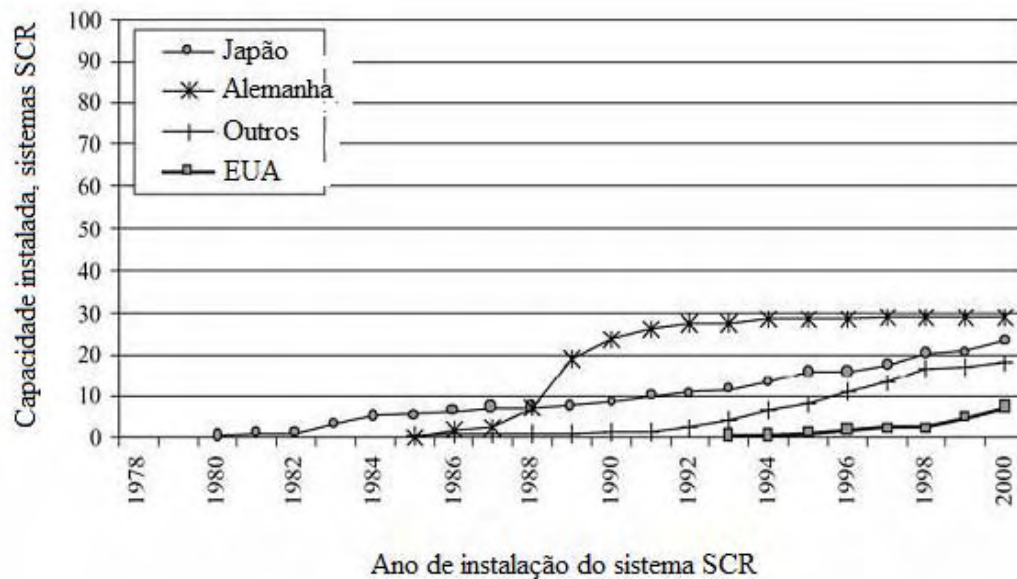


Figura 23 – Capacidade instalada do SCR em plantas a carvão nos Estados Unidos, Japão, Alemanha e resto do mundo (Rubin et al., 2004).

A política para o controle de emissão de NO_x é diferente em cada país. Nos Estados Unidos os limites de emissão de NO_x seguem os mesmos princípios da emissão de SO_2 , mas a diferença está no maior rigor em relação à redução de emissão. Nos Estados Unidos, de 1970 a 1990 a redução exigida era mínima e que podia ser atendida apenas com a instalação de queimadores de baixo NO_x (LNB – Low NO_x Burner), mas a partir de 1994 a EPA estabeleceu uma redução de 85% na emissão de NO_x , o que gerou um disparo no uso dessa tecnologia.

A última revisão imposta pelo Congresso americano estabeleceu parâmetros que só podem ser atingidos com a implementação de sistemas SCR.

A meta de estabilização da concentração de CO_2 na atmosfera tem ocupada posição de destaque no cenário internacional nesses últimos anos devido às mudanças climáticas que causando catástrofes ao redor do mundo.

Valverde e Webster (1999) destacaram as questões mais relevantes das discussões sobre o efeito estufa e identificaram dois aspectos importantes: a estimativa de custo econômico e a relação entre a emissão de gás de efeito estufa e o ciclo de carbono global. As

discussões envolvem três aspectos: técnico (capacidade da sociedade de impor repressão à emissão de carbono), político (boa vontade das nações signatárias para implementar medidas cooperativas a fim de obter os benefícios regionais e globais) e econômico (o custo da redução ou mitigação).

Richels e Edmonds (1995) foram um dos precursores da exploração do aspecto econômico da estabilização da concentração de CO₂ na atmosfera. Seus estudos envolviam as metas de estabilização e a maneira como eram implementadas. Enfatizaram a importância da flexibilidade do programa de estabilização nos primeiros anos onde os custos tendem a ser mais altos e as metas de estabilização que exigem redução de emissão com conseqüente custo elevado. Uma alternativa para redução do custo é a transferência da redução das emissões para outros anos.

Segundo Valverde e Webster (1999), cada etapa de restrição na emissão de carbono corresponde a um objetivo de estabilização cujo custo econômico é distinto e depende do nível de restrição imposto.

Para as comparações fizeram análises usando um programa computacional do MIT denominado “Emission Prediction and Policy Analysis (EPPA)”. Esse programa abrange os setores de óleo, gás, carvão e eletricidade. Também inclui tecnologias não fósseis (solar e nuclear) e novas fontes de carbono que possam substituir os combustíveis fósseis convencionais. O modelo projeta as emissões de CO₂, CO, CH₄, SO₂, NO_x e N₂O) em doze diferentes regiões geopolíticas (Estados Unidos, Comunidade Econômica Européia, Japão, outras nações alinhadas, China, Índia, Brasil, Economia Dinâmica Asiática, Exportadores de Energia, antiga União Soviética, Europa Central e Leste e resto do Mundo). A comercialização de cotas de carbono também foram incluídas

Esse estudo concluiu que acordo global com a comercialização de cotas minimiza o custo da redução da emissão, reconhece que os regimes de estabilização são técnica, política e economicamente viáveis e que a efetiva e eficiente redução de emissão de gases de efeito estufa só será implementada com a participação e coordenação dos maiores emissores e que os países ricos deveriam assumir a maior parte da responsabilidade na redução da emissão.

No Brasil há uma corrente que discorda em muitos aspectos sobre a participação das diferentes nações na responsabilidade da política climática. A proposta brasileira baseia-se na contribuição para mudanças climáticas em vez da proposta atual baseada apenas nas emissões anuais.

Rosa et al. (2004) expuseram a proposta brasileira estabelecida após discussão com o governo em 1997 durante a Conferência no Rio de Janeiro. Também desenvolveram um modelo simples para calcular a contribuição relativa no aumento da temperatura global a partir da emissão de gases de efeito estufa. Funcionou bem para a simulação em diferentes cenários mostrando-se claro e transparente. Apenas difere do método usado na proposta brasileira porque usa fórmulas analíticas em vez de integração numérica.

A proposta brasileira é encontrar um modelo para computar a contribuição de cada país no aumento da temperatura global. Essa proposta ainda está em discussão, mas já foi pauta de encontros de especialistas em 1999, 2001 e 2002 sob os aspectos científicos e metodológicos.

Nesses encontros concluíram que a proposta brasileira tem base científica e técnica suficiente para operar, que os indicadores diferentes para medir a contribuição no aquecimento global gera diferentes responsabilidades e que as simulações de modelos diferentes apresentam valores similares quando medem a contribuição para o aquecimento global.

Em suma, a questão mais importante da proposta brasileira é que as emissões anuais não são as melhores medidas do efeito de mudança climática, nem a melhor medida para se estabelecer responsabilidades (Rosa, 2004).

Ainda no Brasil, Szklo et al. (2005) mostraram algumas políticas energéticas e seus efeitos na redução da emissão de CO₂. A Figura 24 mostra a relação entre as energias renovável e não renovável no Brasil. A Figura 25 apresenta a emissão de CO₂ em função do uso de energia no Brasil.

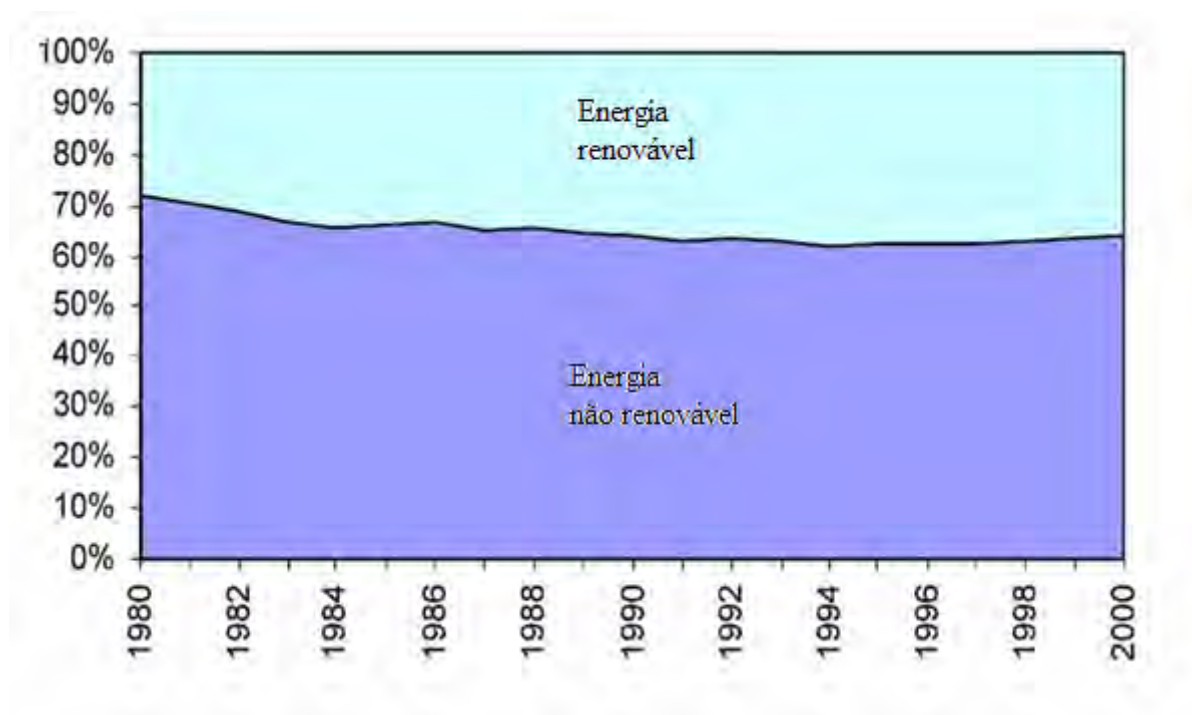


Figura 24 – Relação entre energia renovável e energia não renovável no Brasil (Szklo, 2005).

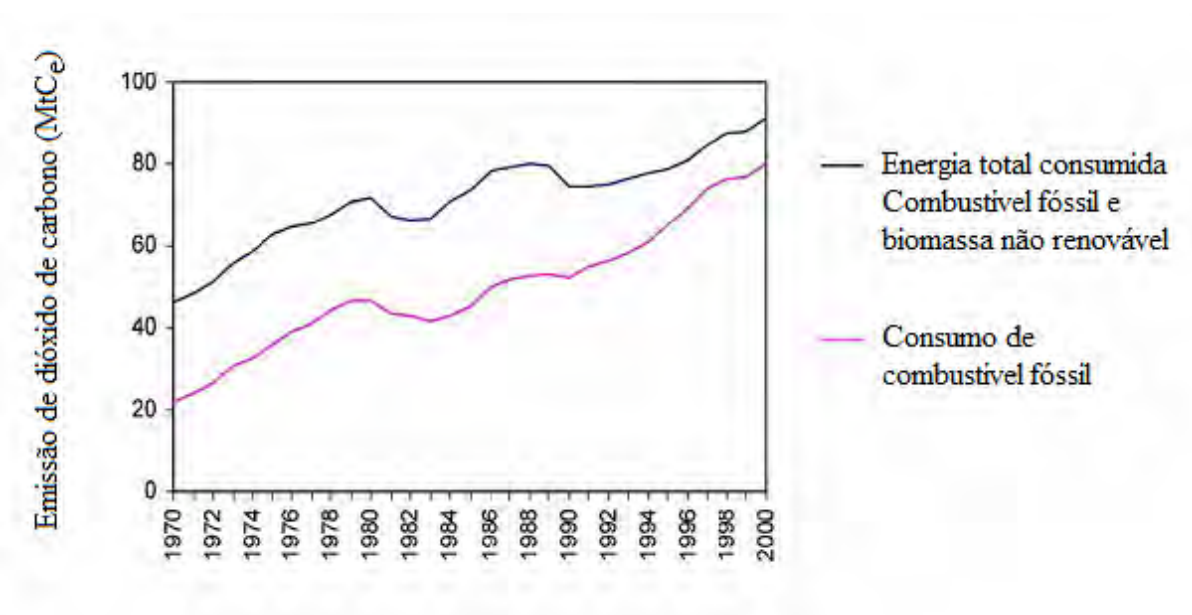


Figura 25 – Emissão de CO₂ em função do uso de energia no Brasil (Szklo, 2005).

A Convenção das Nações Unidas para Mudança no Clima (UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change) em seu artigo 4.1 estabelece obrigações comuns para todos os participantes da convenção, mas com responsabilidade diferenciadas tendo em vista suas prioridades específicas nacionais e regionais de desenvolvimento.

Reconhece ainda que a maior parte das emissões de gases de efeito estufa são gerados pelos países desenvolvidos.

O Brasil, apesar de ser visto como um país que usa grande parte de energia renovável, em face ao rápido crescimento econômico nas últimas décadas trouxe um aumento no consumo de combustíveis fósseis e consequentemente um aumento na emissão de CO₂ proveniente do uso dessa energia.

A parte negativa da participação do governo é que ainda não implementou medidas eficazes para reduzir a dependência de energia importada, diversificar fontes de energia, desenvolver e empregar mais fontes de energia renovável, reduzir impactos ambientais e contribuir para o desenvolvimento social e econômico.

Apesar do nível de emissões atualmente já estar alto, tornar-se-á mais alto ainda no futuro se medidas enérgicas não forem adotadas.

Alguns programas e medidas existentes já produziram efeitos positivos na redução da emissão de CO₂, mas ainda insuficientes.

Os programas e medidas para o setor de suprimento de energia estão centrados no etanol e bagaço de cana e no desenvolvimento do mercado industrial de gás natural.

O programa de incentivo à produção do álcool (Proalcool) em sua primeira fase incentivou a expansão da capacidade das destilarias para produzir álcool anidro para ser misturado à gasolina. A segunda fase incentivou a construção de novas destilarias para produzir álcool hidratado para uso veicular. Na época, os subsídios para a produção e uso de etanol eram justificados pelo impacto positivo econômico, social e do meio ambiente.

Produzir o etanol a partir da cana de açúcar incrementa o balanço de pagamentos do país, reduz o desemprego, diminui a pressão urbana e promove benefícios locais e globais. No ano de 2000 essa produção representou uma redução de 5,4 MtC nas emissões.

Quanto ao mercado industrial de gás natural, apesar da implementação das duas macro políticas pelo governo, ainda não atingiu o desenvolvimento esperado. A política de

diversificação da matriz energética centrada expansão do suprimento de gás natural e as reformas institucionais para o setor de gás não surtiram efeito, uma vez que o processo foi bloqueado pelo alto custo do gás importado.

Muitos dos programas e medidas para promover a eficiência no uso da energia implementados pelo governo ainda estão em desenvolvimento. Em 1985 o governo instituiu o Programa Nacional de Conservação de Energia (Procel) para promover a eficiência no uso final da energia e redução nas perdas de transmissão e distribuição.

Outros programas para esse fim também foram implantados, como o de incentivo à produção de pequenos motores (1993) que reduziu o IPI. O princípio dessa medida era obter um índice menor de emissões com um consumo menor de combustível.

Para 2010 e 2020 estima-se uma redução significativa das emissões em função desses programas e medidas conforme a Tabela 2.

Tabela 2 – Redução de emissão de CO₂ para os anos de 2010 e 2020 (Szklo et al., 2005).

Emissão de CO₂ evitada para o Brasil sob os cenários de 2010 e 2020 (MtC)		
Alternativas para abatimento	Incremento de emissões evitadas de CO₂	
	2010	2020
Uso de etanol	1,2	1,7
Cogeração (CHP) com bagaço de cana	3,4	5,3
Energia eólica	1,9	3,5
PCH	2,9	4,5
Cogeração (CHP) com gás natural	1,8	4,4
Conservação de energia	7,1	25,2
Abatimento total	18,3	44,6

Segundo Geller et al. (2004), nos países em desenvolvimento a população cresce 1,5% ao ano ao passo que em países desenvolvidos industrialmente a taxa de crescimento

populacional é de apenas 0,2%. Entretanto o consumo per capita nos países em desenvolvimento é baixo, com cerca de 39% do consumo de energia global apenas 32% são provenientes de fontes de energia modernas. Apesar disso, o consumo nesses países vem crescendo rapidamente e esse crescimento vem de consumo de óleo e carvão. Esse crescimento pode ter um efeito nocivo nas condições climáticas em relação ao aquecimento global.

O Brasil é o quinto país em população e o maior na América Latina. Economicamente é o nono do mundo e o primeiro na América Latina. O consumo de energia cresceu rapidamente em 25 anos, conforme mostra a Figura 26. A Figura 27 mostra o consumo de energia por setor. A Tabela 3 mostra o suprimento de energia por fonte.

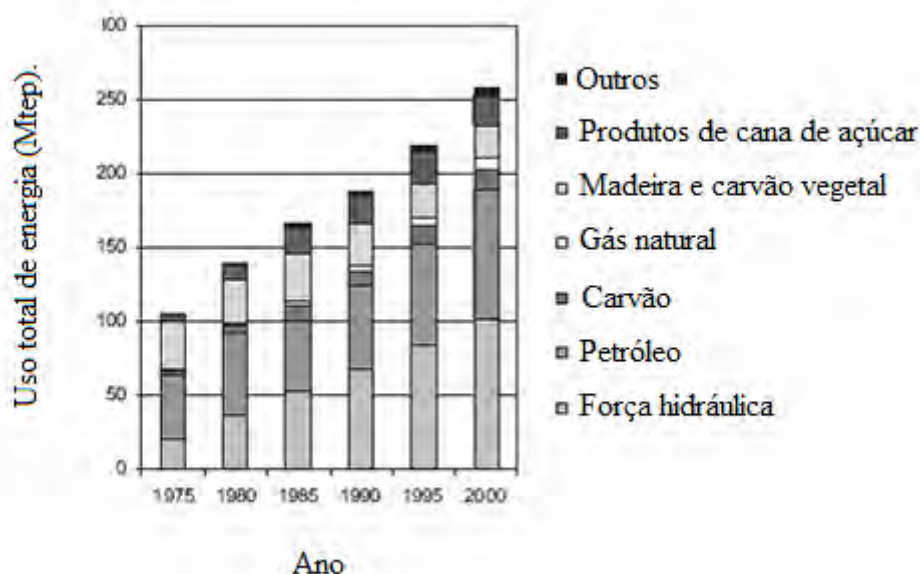


Figura 26 – Evolução do consumo de energia no Brasil em 25 anos (Geller et al., 2004).

Esse crescimento é devido à rápida industrialização e ao crescimento dos serviços. A distribuição do consumo de energia por setor mostra que houve um grande crescimento na área industrial. A área comercial e a de energia também cresceram, ao passo que as áreas de transporte e residencial decresceram.

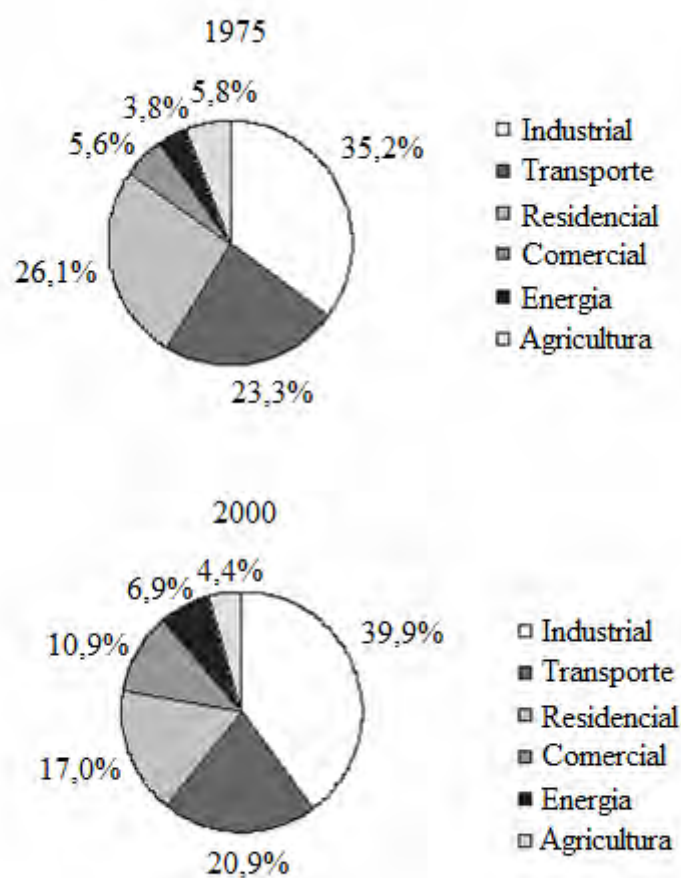


Figura 27 – Consumo de energia por setor (1975 e 2000) (Geller et al., 2004).

A política de energia do Brasil, nos últimos 25 anos, se limitou a reduzir a dependência de energia importada e a incentivar o desenvolvimento de fontes de energia internas. Visou principalmente o aumento da produção de petróleo, expansão da produção de etanol, o uso de energia nuclear e a preservação de energia. Essas políticas trouxeram benefícios para a balança comercial, a segurança nacional, a indústria e ao mercado de trabalho.

Apesar do esforço para estimular o desenvolvimento e utilização do gás natural, seu custo em função do gás importado não permitiu um desenvolvimento pleno como planejado.

A política de privatização e a reestruturação do setor energético ainda não foram finalizadas. Algumas políticas, como a política de aumento de fontes de energia renovável e a

de aumento na produção de petróleo, conseguiram êxito pleno, as outras ainda estão em desenvolvimento, mas já atingiram sucesso moderado.

Tabela 3 – Suprimento de energia (Geller et al., 2004).

Suprimento de energia primária nos cenários de Base e de Energia Limpa (CE)					
Fonte de Energia	2000	2005		2010	
		Base	CE	Base	CE
Petróleo e Derivados	87,9	100,2	94,4	119,7	97,2
Gás Natural	9,8	44,1	30,8	62,2	42,5
Carvão	13,4	15,6	14,0	17,4	14,0
Nuclear	1,8	3,3	3,3	3,3	3,3
Subtotal Não Renovável	112,8	163,2	142,5	202,6	156,9
Força Hidráulica	99,1	113,3	115,2	118,7	119,4
Madeira e Carvão Vegetal	21,4	20,9	19,8	20,4	17,7
Cana de Açúcar e Produtos	22,2	23,4	24,9	23,5	24,9
Outros	3,9	4,4	4,3	5,1	4,6
Subtotal Renovável	146,6	162,0	164,2	167,6	166,7
Total	259,4	325,2	306,7	370,2	323,6

Face a essa situação, para efetuar uma projeção em uma situação comparativa a essa base de hoje, propôs-se um cenário de Energia Limpa para o Brasil em que constam doze políticas nacionais:

- Adotar um padrão mínimo de eficiência para eletrodomésticos, motores e produtos elétricos.
- Expandir os investimentos na eficiência do uso final da energia.
- Adotar um código de requisitos de eficiência de energia para novos prédios comerciais.

- Expandir o uso de gás natural.
- Adotar padrões de eficiência mínima para novas plantas térmicas.
- Adotar metas de redução de intensidade de energia na indústria (toneladas de óleo equivalente por 1000 US\$ do produto interno bruto).
- Adotar padrões de economia de combustível ou emissão de CO₂ para novos veículos de passeio.
- Expandir a produção e uso de etanol combustível.
- Estimular os sistemas combinados de calor e força (CHP - Cogeração) usando bagaço e outros produtos da cana (cogeração).
- Estimular a geração eólica.
- Estimular o uso de energia renovável em aplicações fora das redes elétricas.
- Melhorar a eficiência no transporte de carga.

Usando um modelo computacional conhecido como Modelo Integrado para Planejamento de energia (IMEP – Integrated Model for Energy Planning) foram analisadas as projeções para o suprimento de energia para os cenários base e de energia limpa. A Figura 28 apresenta a demanda de energia por setor e a Figura 29 a emissão total anual de dióxido de carbono.

O cenário proposto promove uma série de benefícios como a diminuição da demanda crescente de energia através dos programas de eficiência no uso, a redução da importação de energia através da expansão da produção e uso de energia renovável e a redução de impactos ambientais pelos programas de redução de emissões.

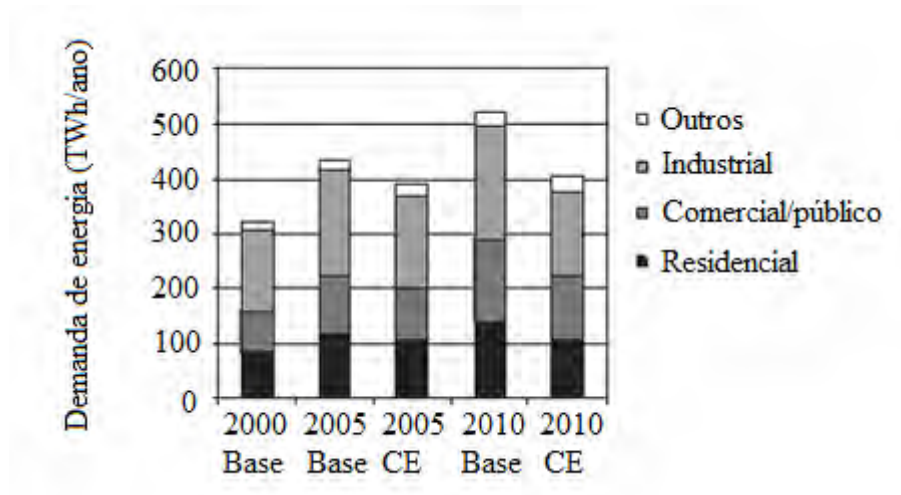


Figura 28 – Demanda de energia por setor (Geller et al., 2004).

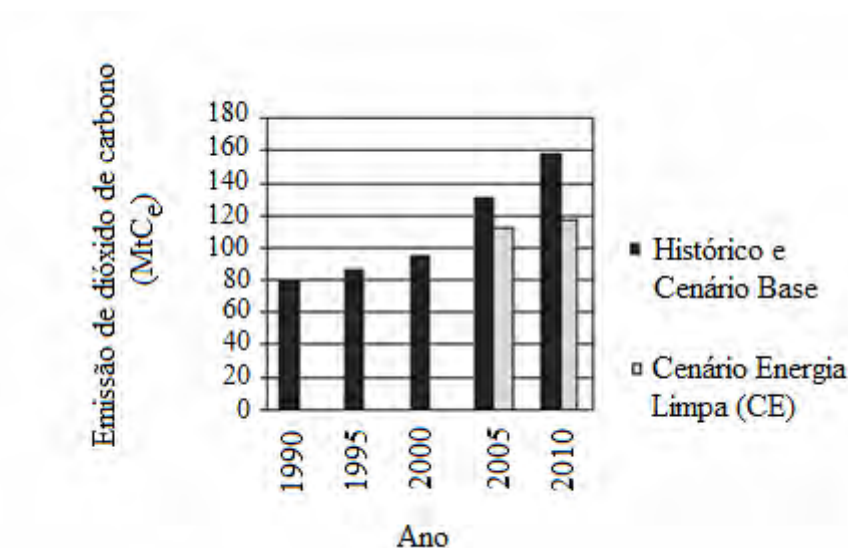


Figura 29 – Emissão de dióxido de carbono (Geller et al., 2004).

2.5 Formação de carepa

Em atmosferas oxidantes a formação de carepa é um fator importante para cálculo do custo e para qualidade final da superfície do produto. A carepa é formada a altas temperaturas e é constituída por camadas de óxido sobre a superfície do metal (Figura 30). Há três tipos de óxidos de ferro na formação da carepa: wustita (FeO), magnetita (Fe_3O_4) e hematita (Fe_2O_3).

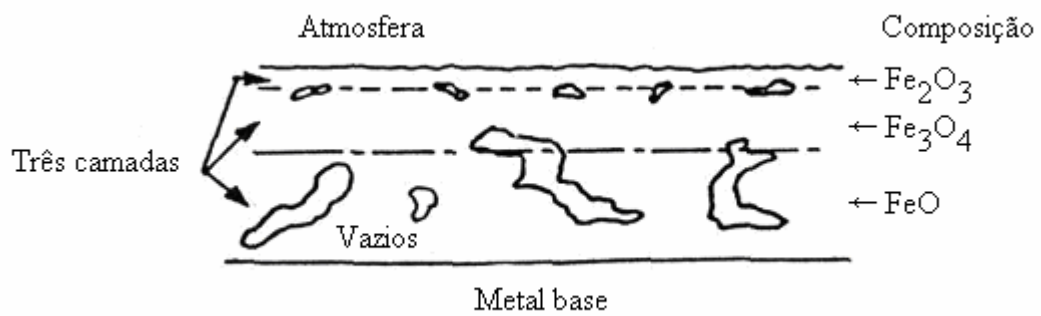


Figura 30 – Estrutura da carepa.

A wustita (FeO) é a camada mais interna e, portanto adjacente ao metal. Apresenta o menor teor de oxigênio, é formada a partir de 570°C e seu volume aumenta com o aumento da temperatura. A partir de 700°C , passa a ocupar cerca de 95% do volume da carepa. Seu ponto de fusão é relativamente baixo (1.370 a 1.425°C) quando comparado às outras fases da carepa e ao próprio aço. Seu baixo ponto de fusão acelera a formação de carepa e permite a penetração e oxidação nos contornos de grão reduzindo a qualidade da superfície. Contribui ainda negativamente para o aumento do consumo de combustível e na redução do lucro por perda de material e qualidade superficial inferior.

A magnetita (Fe_3O_4) é a camada intermediária da carepa. Em temperaturas abaixo de 500°C há somente magnetita e à medida que a temperatura aumenta a wustita toma seu lugar (Figura 31). Em temperaturas mais elevadas, a magnetita ocupa apenas 4% do volume da carepa. A magnetita é mais dura e abrasiva que wustita.

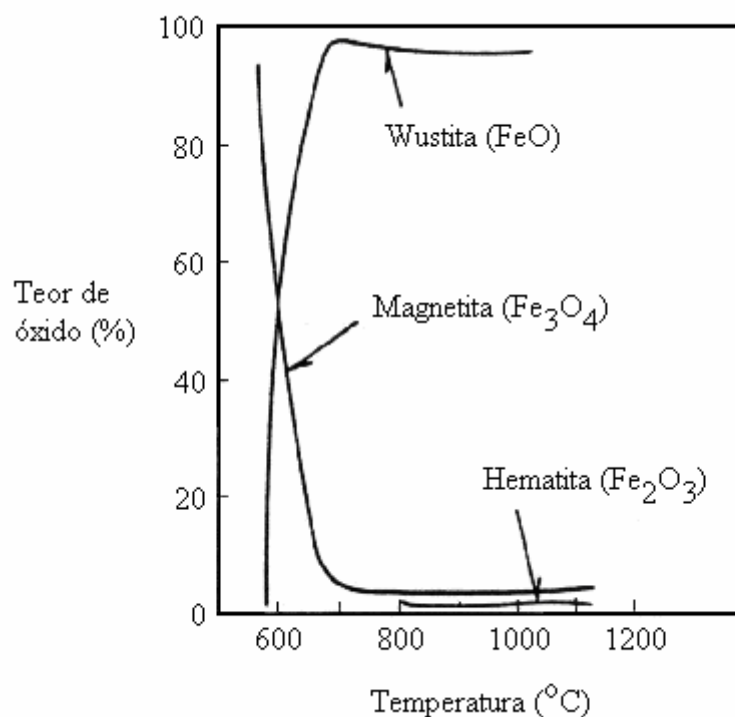


Figura 31 – Teores de óxidos de ferro em função da temperatura.

A hematita (Fe_2O_3) é a camada mais externa da carepa. É formada a temperaturas acima de 800°C e em temperaturas elevadas ocupa cerca de 1% do volume da carepa. Semelhante à magnetita, a hematita é dura e abrasiva.

Fornos a óleo ainda têm um agravante que é a presença de enxofre. A combustão do óleo produz dióxido de enxofre (SO_2), que reage com o aço e produz sulfetos líquidos (FeS) na carepa. O FeS intensifica a formação de carepa e promove a adesão desta na superfície metálica dificultando a remoção antes do forjamento (Birks, 1973).

O FeS forma-se a partir de atmosferas redutoras e cresce rapidamente, portanto para minimizar o efeito de adesão provocado pelo FeS é comum adotar uma atmosfera bastante oxidante nas zonas iniciais de enformamento.

A formação de carepa na superfície do material é função da temperatura da superfície (Figura 32), do tempo de aquecimento (Figura 33), da composição do aço, da atmosfera do

forno e do tipo e utilização do equipamento de aquecimento. Em geral a perda por oxidação (carepa) é de 1 a 3% (Cook e Rasmussen, 1970).

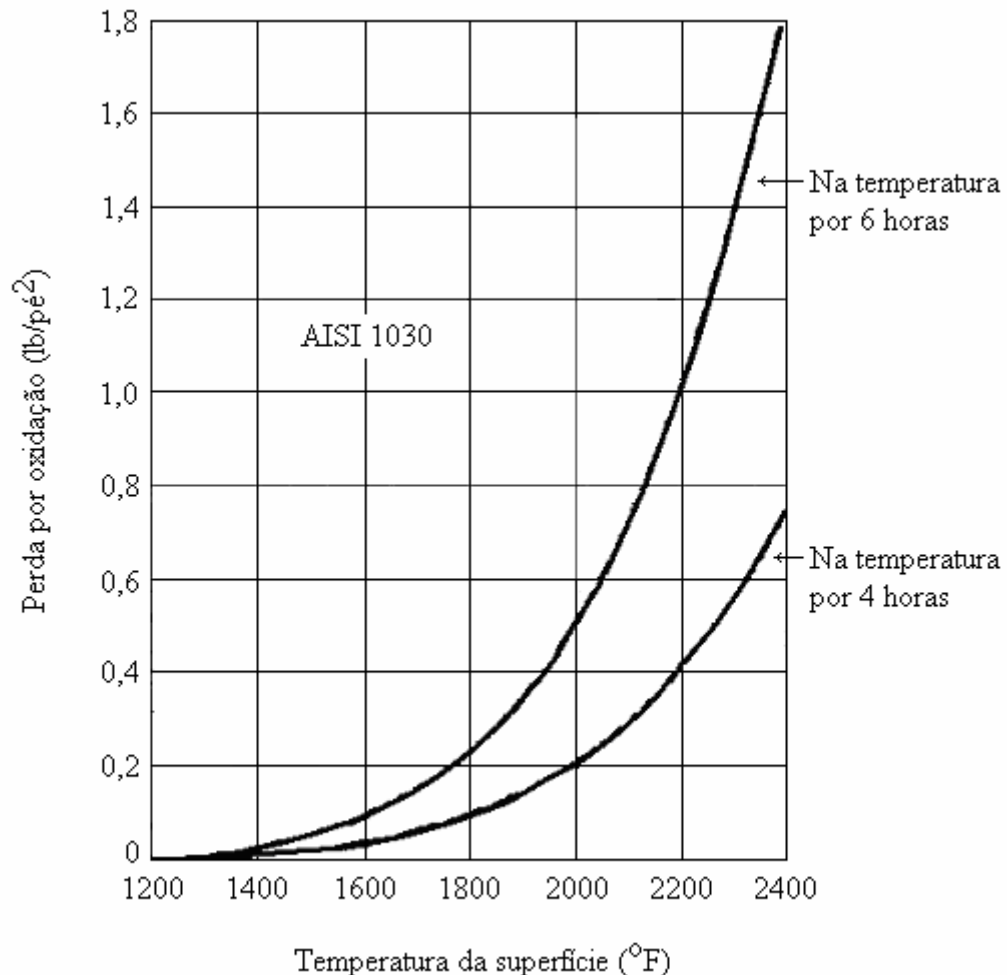


Figura 32 – Perda por oxidação em função da temperatura da superfície.

Fornos de combustão direta (queima direta na câmara de aquecimento) produzem atmosferas altamente oxidantes na câmara de aquecimento. A formação de carepa é resultante de um processo de difusão do oxigênio no metal. Um filme de óxido é formado na superfície do metal e progride através da difusão do oxigênio na interface metal – óxido. A carepa aumenta com o aumento da temperatura na superfície da peça, com o aumento do ciclo de aquecimento e com o aumento da porcentagem de oxigênio, dióxido de carbono e vapor de água.

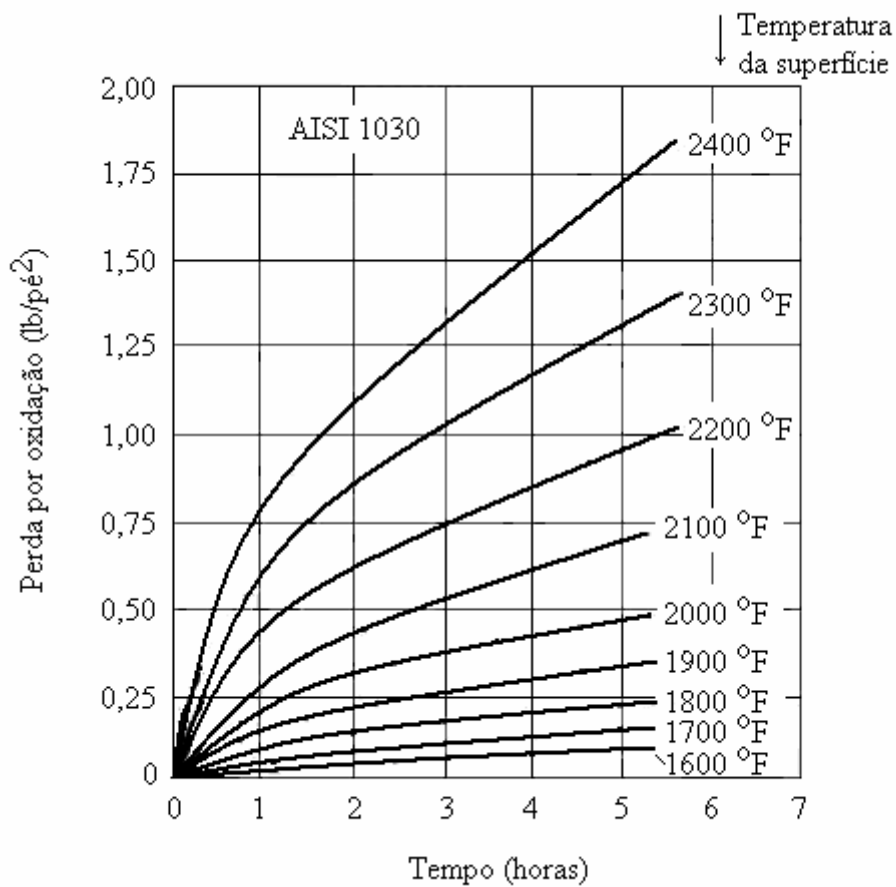


Figura 33 – Perda por oxidação em função do tempo.

O processo de difusão do oxigênio no metal é uma função do potencial de energia do sistema, caracterizado pela relação geral que é exponencial com a temperatura e parabólica com o tempo (Cook e Rasmussen, 1970):

$$M = a\sqrt{t} \exp(-bT), \quad (1)$$

onde M é a perda por oxidação, t é o tempo, T é a temperatura e a e b são constantes para cada tipo de aço.

2.6 Óleos combustíveis

Os óleos combustíveis (ou óleos escuros) são obtidos através de subprodutos de várias operações nas refinarias. Basicamente são formados pela adição de diluentes, ou óleos de corte, ao resíduo da destilação do petróleo (Garcia e Bernardes, 1992).

Esse resíduo pode ser o resíduo de vácuo (RESVAC) ou, se a refinaria efetua a desasfaltação a propano, o resíduo asfáltico (RASf). Pode-se, ainda, utilizar resíduos oriundos de processos de craqueamento térmico ou catalítico e de viscoredução (craqueamento em condições mais suaves).

Os óleos de corte também variam, podendo ser: a) óleo leve de reciclo (LCO), b) óleo diesel, c) gasóleo, d) querosene, e e) extratos aromáticos.

Os óleos combustíveis são compostos basicamente por hidrocarbonetos de peso molecular elevado, dos tipos parafínicos, naftênicos e aromáticos, podendo aparecer ainda as oleofinas. A proporção desses diferentes tipos varia de acordo com o campo de produção e ao longo do tempo em um mesmo campo. Além disso, aparecem derivados contendo enxofre, nitrogênio e metais como vanádio, níquel, sódio, ferro, etc. É importante observar que esta composição depende não só do petróleo que originou os óleos combustíveis, como também do tipo de processamento e misturas que estes sofreram nas refinarias.

Dessa forma nota-se que a composição química e a estrutura dos óleos combustíveis é bastante complexa. Porém, como elementos principais podem-se destacar o carbono (86,5%), o hidrogênio (10%), o nitrogênio (0,5%) e o enxofre (3%). A relação C/H está diretamente ligada com a demanda de ar necessária para a queima do óleo, bem como com o seu poder calorífico. Entretanto é importante conhecer a porcentagem de outros elementos tais como o sódio e o vanádio, pois embora presente em menores quantidades, após a combustão e em altas temperaturas, os complexos desses elementos podem se depositar na superfície dos equipamentos, provocando corrosão e perda de eficiência. Os óleos Tipo A apresentam teores médios de vanádio de 200 ppm e de sódio de 20 ppm (Garcia e Bernardes, 1992).

Dos produtos formados na combustão, três são extremamente corrosivos: trióxido de enxofre, pentóxido de vanádio e o pirovanadato de sódio.

O enxofre, além de agir como contaminante em processos de produção de cimento, cal, vidro e em processos de tratamento térmico, também exerce papel na corrosão de equipamentos. A Tabela 4 mostra os compostos corrosivos de enxofre.

Tabela 4 – Compostos corrosivos de enxofre.

R-S	Tiofenos
R-SH	Mercaptanos
R-S-R	Sulfetos
R-S-S-R	Di-sulfetos

Durante a queima dos compostos de enxofre, forma-se o SO₂ que, solubilizado em água, transforma-se em ácido sulfuroso (H₂SO₃), que é fraco e instável. Este por sua vez pode reagir com bases, resultando em sulfitos que são compostos mais estáveis.



O ácido sulfuroso aquecido decompõe-se desprendendo novamente o SO₂. Dessa forma, a simples lavagem dos gases não absorve o SO₂ uma vez que a própria temperatura dos gases se encarrega do aquecimento, impedindo dessa forma que o gás permaneça em solução.



Em chaminés metálicas expostas ao vento, muito altas e sem revestimento anticorrosivo, há condensação do vapor d'água nas regiões menos quentes com absorção de SO₂. O H₂SO₃ formado pode atacar o metal da parede da chaminé, formando sulfito, que fica em solução na água condensada. Essa solução escorre pelo interior da chaminé até que, numa região mais quente, evapora resultando em um resíduo sólido. Esse resíduo vai se acumulando até o estrangulamento total da passagem.

O SO₂ pode reagir com o O₂ resultando o trióxido de enxofre, SO₃, mas para isso é necessário excesso de ar e a presença de um catalisador. Os óxidos de vanádio (V₂O₃, V₂O₄, V₂O₅), geralmente presentes nos gases de combustão, atuam como catalisadores dessa reação.

O próprio refratário dos fornos e o óxido de ferro existente também atuam como catalisadores. Nem todo SO₂ se transforma em SO₃; em média, apenas 0,01% se converte. Essa quantidade aumenta com a variação da temperatura, da pressão, do excesso de O₂, da umidade e da atividade do catalisador.

Ao reagir com a água, o trióxido de enxofre resulta em ácido sulfúrico (H₂SO₄), de acordo com:



O ácido sulfúrico no estado gasoso causa pouca corrosão, mas, se condensar, seus efeitos são desastrosos. O ponto de orvalho do ácido sulfúrico é mais elevado que o ponto de condensação da água e é fortemente afetado pela relação entre pressão de vapor do ácido e a da água na combustão. Geralmente essa relação se situa entre 10⁻⁶ e 10⁻⁸, o que acarreta um ponto de orvalho do H₂SO₄ entre 50 e 115°C acima do ponto de condensação da água.

Para minimizar o efeito da corrosão pela condensação do ácido sulfúrico nas regiões menos quentes dos equipamentos, deve-se evitar o resfriamento excessivo dos gases de exaustão. Os recuperadores de calor sofrem com ataques de corrosão, pois resfriam os gases de exaustão permitindo a condensação de ácido sulfúrico.

Normalmente, em processos de reaquecimento há o contato dos gases de combustão com a matéria processada (combustão direta). Nesses casos, o SO₂ atua como contaminante e pode reagir com o metal da superfície ou difundir para o interior. Em alguns casos, o uso de combustíveis de baixo teor de enxofre (abaixo de 0,5%) faz-se necessário.

Além da corrosão nos equipamentos e da contaminação, existe ainda o problema ambiental, uma vez que as reações (3) e (4) também são responsáveis pelo fenômeno conhecido como “chuva ácida”.

A escolha do óleo pesado como combustível deve-se ao fato de seu baixo custo e de seu alto poder calorífico. Maior poder calorífico significa maior quantidade de calor liberado por unidade de massa de óleo combustível.

Para proporcionar uma boa atomização e, conseqüentemente, uma boa queima, os óleos devem ser aquecidos para que tenham uma viscosidade compatível com o sistema de atomização dos queimadores. A faixa usual para queimadores com atomização a ar é de 32 a 45 cSt.

Os óleos pesados são classificados em dois grupos: o grupo A é o de óleos de altos teores de enxofre (1 a 5,5% S) e o grupo B é o de óleos de baixo teores de enxofre (menores ou iguais a 1%). Cada grupo se divide em 9 tipos de óleo, de acordo com suas viscosidades. Apesar de haver 9 tipos de óleos, nem todas as refinarias dispõem de todos os tipos. A tendência atual é de reduzir os tipos de óleo para 4 tipos apenas: 1, 2, 3 ou 4 e 7 (Tabela 5).

Tabela 5 – Tipos de óleos, poder calorífico inferior e temperatura de queima.

Tipo de óleo	PCI (kcal/kg)	Temperatura de queima (°C)
1A	9.650	113 a 124
2A	9.550	120 a 131
3A	9.500	136 a 143
4A	9.450	152 a 165
7A	9.400	190 a 200

A viscosidade afeta diretamente a qualidade de queima do óleo combustível. Viscosidade menor representa uma atomização mais fácil, acarretando uma queima mais eficiente. Viscosidade alta demais impede uma boa atomização produzindo gotas grandes demais para a queima completa, formando resíduos nos queimadores, gerando fuligem e provocando instabilidade da queima. A BR fornece os dados de viscosidade em centistokes (cSt) para cada lote de óleo fornecido determinados pelo método ASTM D-445.

Capítulo 3

O Forno Estudado

3.1 Características do equipamento

O forno estudado pertence à MWL BRASIL, de Caçapava, SP, e foi construído em 1958. Originalmente dispunha de quatro queimadores instalados no teto do forno. Mais tarde, por volta de 1980, foi modificado para receber 28 queimadores menores e dispostos radialmente na parede externa (Figura 34).



Figura 34 – Vista lateral do forno de soleira rotativa.

Para adequar às condições de aquecimento (temperatura e velocidade de aquecimento), o forno foi dividido virtualmente em 4 zonas. Cada uma caracteriza-se por uma faixa de controle de temperatura que permite o aquecimento adequado do material a ser forjado. As duas zonas iniciais são as de aquecimento até a temperatura de forjamento e as duas finais são as de encharque (equalização de temperatura da superfície ao núcleo do bloco de aço).

Esse forno alimenta uma linha de forjamento de rodas composta por uma prensa de 6.000 tf (Figura 35), um laminador de oito rolos (Figura 36) e uma prensa de 1.560 tf (Figura

37). Atualmente a capacidade de produção é limitada pelo sistema de aquecimento (12 toneladas por hora) e pelas fossas de resfriamento controlado (Figura 38).



Figura 35 – Prensa de 6.000 tf.

Por necessidade de redução de custo de produção, procurou-se uma alternativa que não envolvesse grandes investimentos e produzisse uma economia de pelo menos 5% no sistema de forjamento. A solução encontrada foi a substituição do óleo por outro de menor valor. Em abril de 2002, iniciou-se a substituição do óleo 2A pelo 3A, após estudo de viabilidade técnica e econômica. O estudo técnico realizado em conjunto com a BR Distribuidora envolveu apenas o aspecto de queima e geração de calor, sem se preocupar com outras variáveis como o nível de emissões.



Figura 36 – Laminador.



Figura 37 – Prensa de 1.560 tf.



Figura 38 – Fossa de resfriamento controlado.

Apesar da redução no desembolso, houve uma série de problemas operacionais que afetaram a produção e o resultado financeiro não foi perceptível.

Havia a necessidade de encontrar urgentemente as causas do problema. Apesar do controle dos queimadores ser manual e depender do operador, pode-se observar certa instabilidade da chama principalmente nas zonas 1 e 2. Para iniciar a busca, foi feito um levantamento completo das características do sistema de combustão. Todos os itens foram listados como segue nas Tabelas 6 a 9.

O combustível era o óleo 3A, com as seguintes características:

- Temperatura de armazenamento: 70 °C;
- Viscosidade cinemática (a 70 °C): 867 cSt;
- Temperatura de queima: 145 °C;

- Viscosidade cinemática (145 °C): 22 cSt.

O levantamento mostrou que as vazões dos sopradores e das bombas de óleo eram suficientes para manter constante e uniforme a queima. Restou então o sistema de aquecimento de óleo que aparentemente atendia às necessidades.

Tabela 6 – Dados básicos dos aquecedores da linha de alimentação de óleo pesado.

Aquecedores elétricos							
Aquecedor	Potência (W)	Tensão (V)	Área de troca (cm²)	Taxa dissipação (W/cm²)	Dados resistência		
					Comprimento (mm)	Diâmetro (mm)	Nº pernas
Principal	36.000	220	21.101	1,71	1.600	14	30
A	4.500	220	2321	1,94	560	11	12
B	4.500	220	2321	1,94	560	11	12
C	4.500	220	2321	1,94	560	11	12
D	4.500	220	2321	1,94	560	11	12
E	4.500	220	2321	1,94	560	11	12
F	4.500	220	2321	1,94	560	11	12
G	4.500	220	2321	1,94	560	11	12
H	4.500	220	2321	1,94	560	11	12
I	4.500	220	2321	1,94	560	11	12
J	4.500	220	2321	1,94	560	11	12
Tanque	18.000	380	5109	3,52	1.130	12	12

Tabela 7 – Dados básicos dos sopradores do sistema de combustão.

Sopradores			
Marca / Modelo		Siel ECS.1/133.1050	Capacidade (m ³ /h)
Quantidade		1 + 1	
Pressão trabalho (mmca)	Atual	1.050	7.980

Tabela 8 – Dados básicos das bombas de alimentação de óleo pesado.

Bombas			
Marca / Modelo		Viking HL 32 D	Capacidade total (GPM / m ³ /h)
Quantidade		1 + 1	
Pressão trabalho (bar)	Atual	7	16 / 3,63

Tabela 9 – Dados básicos dos queimadores do sistema de combustão.

Queimadores			
Marca / Modelo		IPEM 50/25	Capacidade total (kcal/h)
Quantidade		28	
Vazão máxima total (l/h)	Atual	644	6.396.208

O aquecedor central é o elemento principal do sistema de aquecimento de óleo, mas era dotado de apenas 36 kW de potência. A potência necessária era desconhecida e dependia do tipo de óleo utilizado. A BR Distribuidora então forneceu a equação simplificada para o cálculo da potência requerida, em kW:

$$Q = m [A (T_2 - T_1) + B/2 (T_2^2 - T_1^2)], \quad (2)$$

onde m é a vazão mássica no sistema e A e B são constantes, cujos valores são $A = 1,6506$ e $B = 0,00332$ (Garcia e Bernardes, 1992).

Utilizando a vazão máxima nos queimadores ($0,644 \text{ m}^3/\text{h}$) e as temperaturas de saída $T_2 = 120^\circ\text{C}$ e de entrada $T_1 = 60^\circ\text{C}$, calculou-se a potência necessária: $52,23 \text{ kW}$.

Outro fator importante é a taxa de dissipação das resistências. A resistência utilizada nesse aquecedor tinha taxa de dissipação de $1,7 \text{ W/cm}^2$, que é ligeiramente superior ao recomendado ($1,5 \text{ W/cm}^2$).

A partir desses fatos, optou-se pela revisão do sistema de aquecimento de óleo e pelo estudo dos efeitos da viscosidade no sistema de combustão.

3.2 Níveis de emissões

Também eram desconhecidos os níveis de emissão de gases, mas não ignorados. Até esse momento, o forno era controlado apenas visualmente. A referência adotada pelos operadores para controle do forno era apenas a temperatura indicada pelos termopares, auxiliada pela aparência da chama. Os recursos de análise de atmosfera eram mal utilizados (análise de Orsat), uma vez que os resultados eram sempre idênticos, dando a impressão de serem produzidos no papel e não resultantes de análise.

Algumas análises de atmosfera solicitadas à Ecofuel estavam em andamento, mas ainda sem objetivo determinado. Essas análises iniciais indicaram uma grande variação e que possivelmente eram resultantes de um total descontrole no sistema de combustão (Figuras 39 a 42).

Com o nível de conhecimento da equipe não foi possível estabelecer critérios para análise, mesmo com alguns resultados já em mãos. As medições eram aleatórias, em horários diferentes e em condições de operação diferentes. O aparelho utilizado não registrava continuamente, ou seja, só se registrava o valor após a estabilização dos níveis de gases indicados.

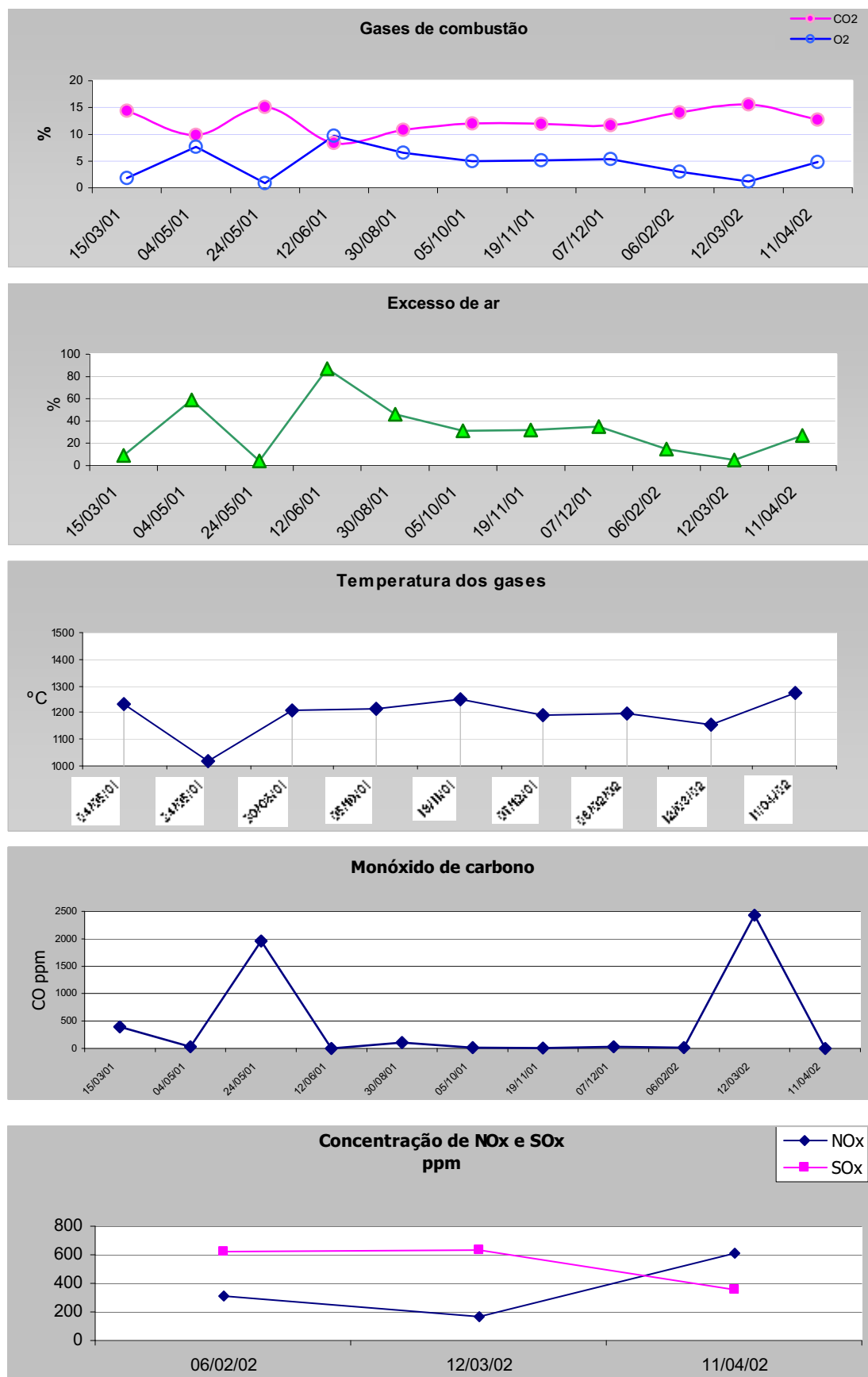


Figura 39 – Parâmetros de combustão do forno rotativo, zona 1.

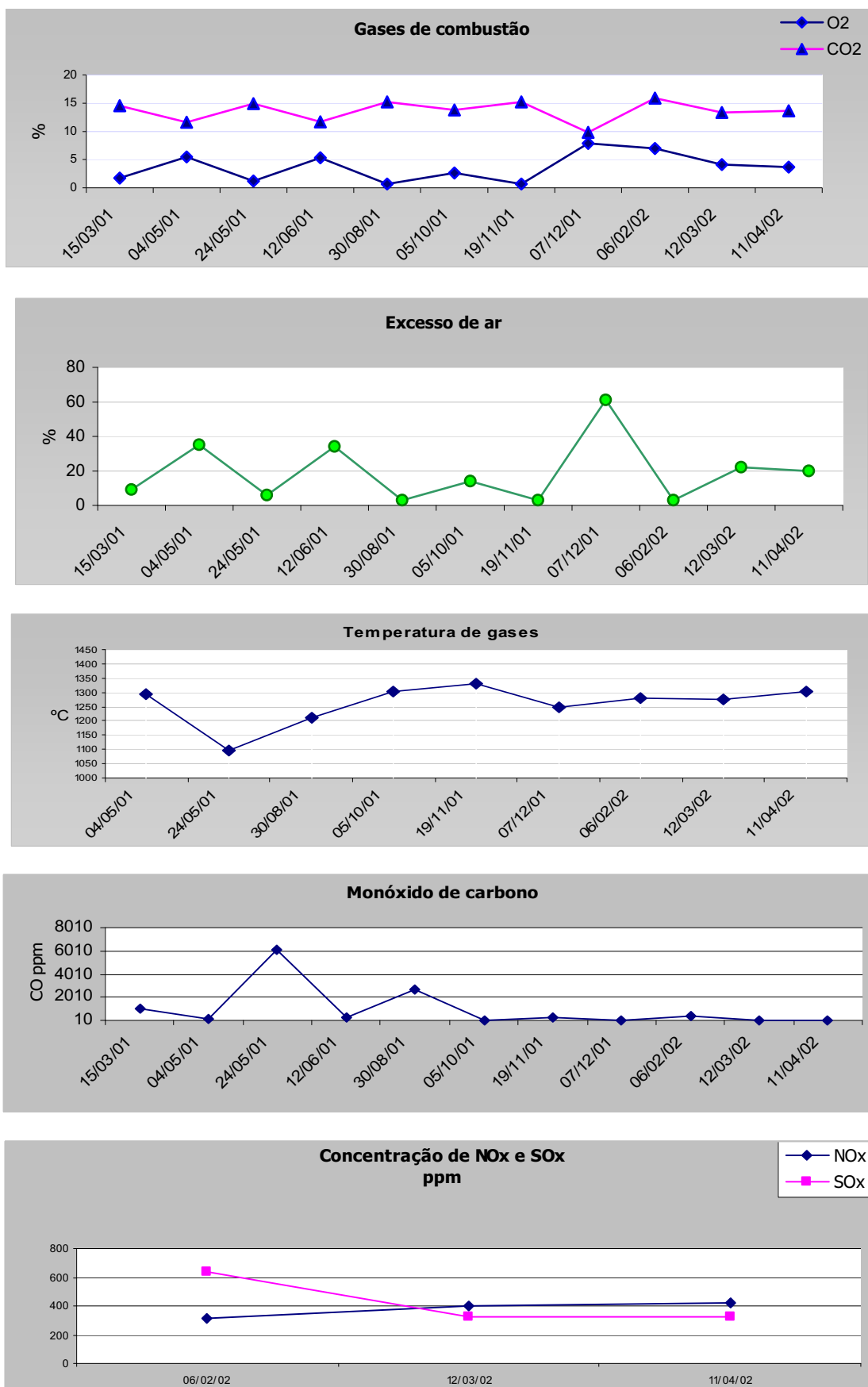


Figura 40 – Parâmetros de combustão do forno rotativo, zona 2.

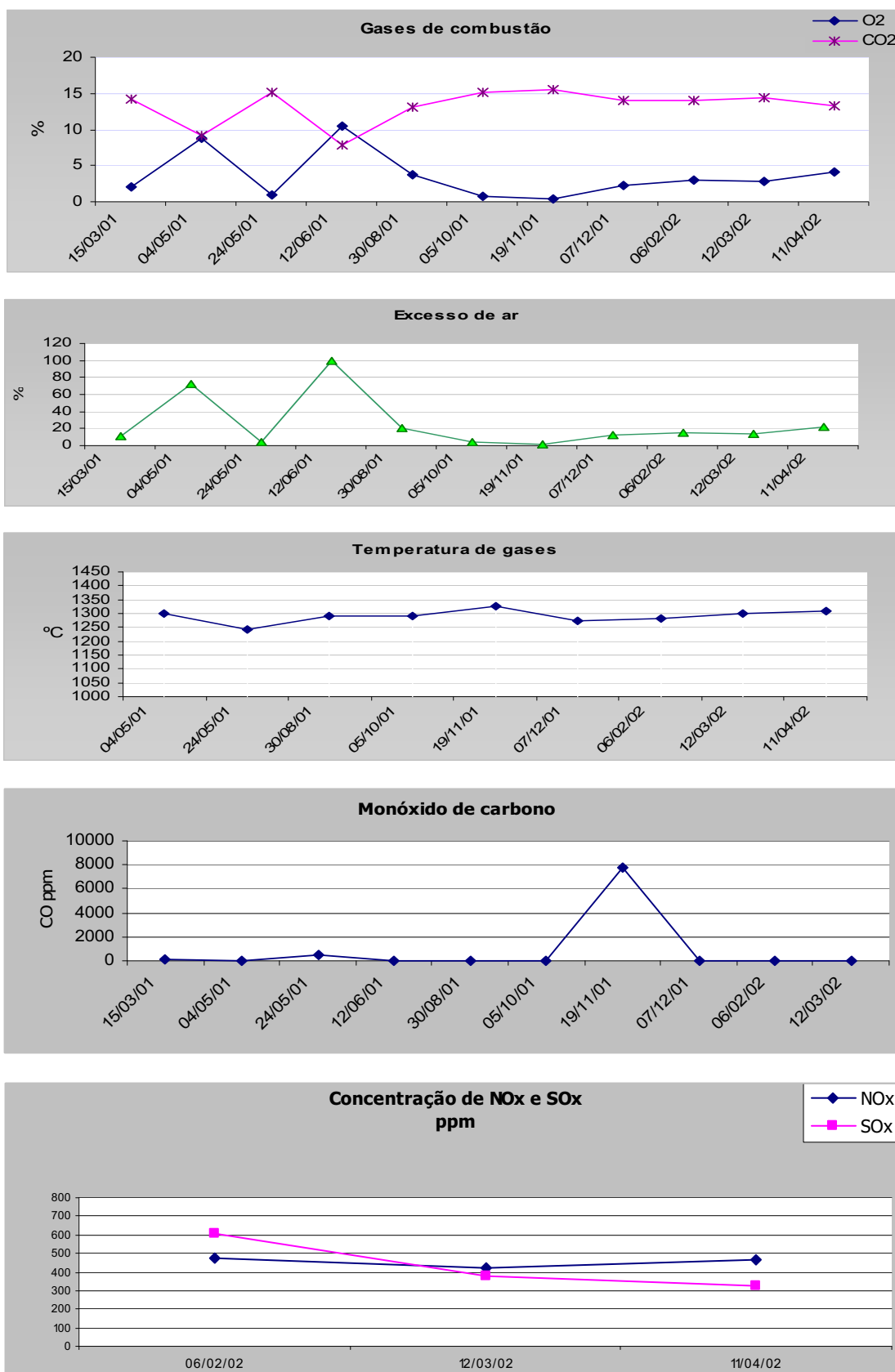


Figura 41 – Parâmetros de combustão do forno rotativo, zona 3.

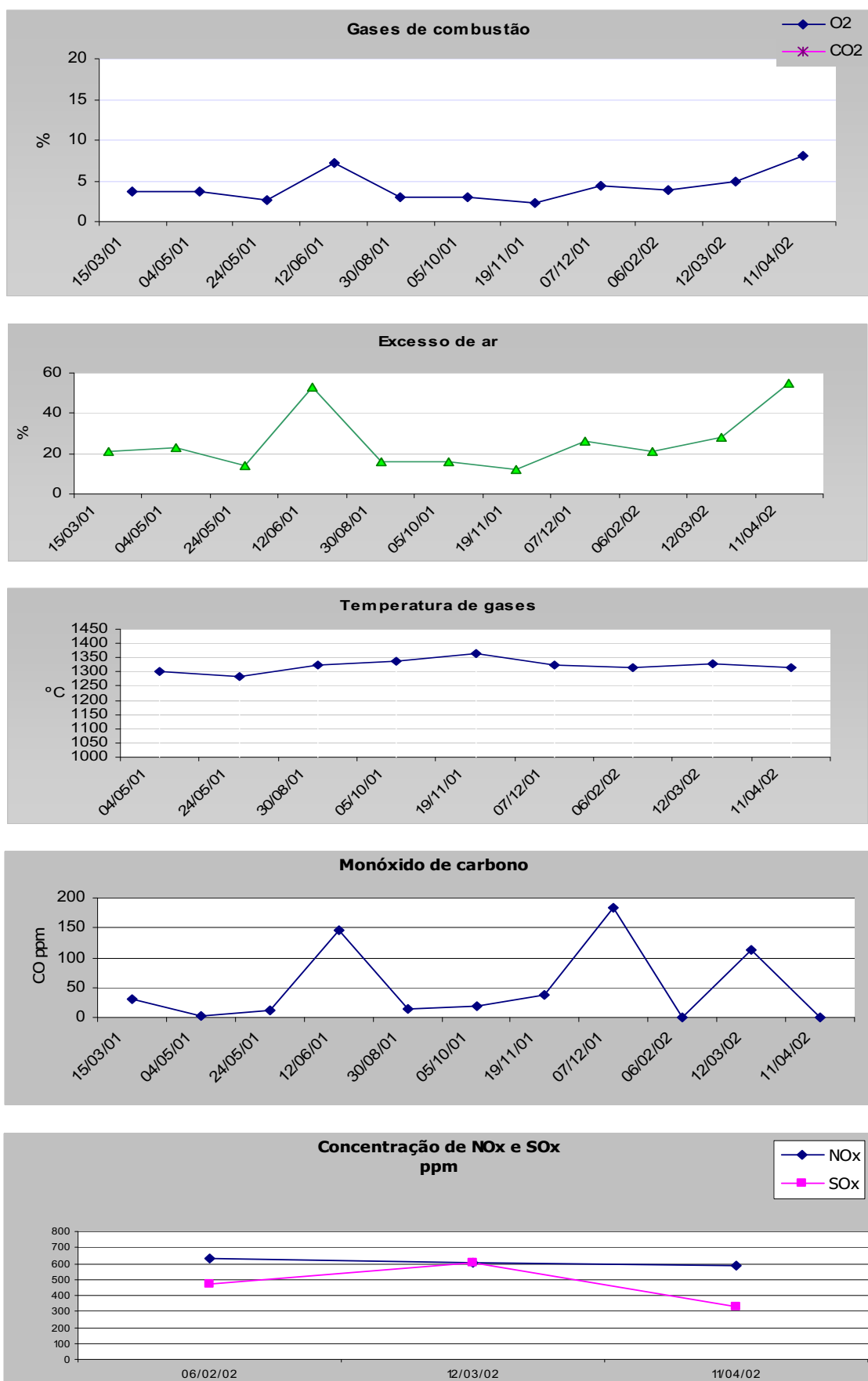


Figura 42 – Parâmetros de combustão do forno rotativo, zona 4.

Para melhorar as condições operacionais seria necessário aprofundar os conhecimentos teóricos para então determinar quais as necessidades. O primeiro passo foi procurar conhecimento específico em combustão através de cursos e troca de informações com pessoal especializado. A seguir, buscou-se ajuda junto ao fornecedor de combustível que disponibilizou mais material referente à combustão e ao óleo ultra viscoso.

A partir dessa base estabeleceu-se o tipo de análise, o horário específico, as condições operacionais do forno e a periodicidade das análises uma vez que seriam realizadas pela Ecofuel.

Capítulo 4

Descrição da Metodologia

4.1 Preliminares

Sistemas de combustão são bastante susceptíveis a falhas e funcionamento irregular quando as condições operacionais não são adequadas ao tipo de combustível e às condições da câmara de combustão. No caso deste trabalho, o sistema de combustão estudado fornece calor para um forno de reaquecimento de soleira rotativa de 14 m de diâmetro que abastece uma linha de forjamento de rodas ferroviárias. De construção bastante antiga e com os componentes bastante desgastados, o forno apresentava funcionamento irregular, conforme as análises em realizadas (Figuras 39 a 42).

4.2 Primeira etapa

A primeira etapa envolveu a equipe de manutenção que revisou todos os componentes do sistema de combustão. Antes das modificações necessárias, o sistema dispunha dos seguintes componentes:

- 2 tanques de armazenamento de 150 m³ cada;
- 2 resistências blindadas de 18 kW cada;
- 2 termostatos com indicadores;
- 2 bombas de engrenagem marca Hero para 15 gl/min;
- 10 aquecedores de 4,5 kW cada;
- 1 aquecedor principal de 36 kW;
- 28 filtros Y com filtro metálico;
- 28 termostatos para temperaturas até 200 °C;

- 28 queimadores, marca Klockner, modelo Ipem 50/25;
- 2 sopradores, marca Siel, de capacidade de sopro para 7.980 m³/h cada, movidos por motores de 50 cv.

A operação desse forno é totalmente manual e todas as regulagens são executadas pelos operadores do forno, que são denominados “forneiros”. Todas as condições operacionais eram desfavoráveis a um bom funcionamento, desde a idade e o estado de conservação dos equipamentos até a operação toda manual e dependente do operador.

Mesmo com a revisão geral, o forno ainda continuava funcionando irregularmente, fato constatado pelos forneiros.

Apesar do pouco treinamento dos forneiros (formados basicamente a partir de treinamento operacional de forneiros anteriores), eram as únicas pessoas disponíveis para tal operação. Todos os trabalhos foram executados com o auxílio desses funcionários.

4.3 Segunda etapa

A segunda etapa envolveu os fornecedores que se dispuseram a auxiliar no desenvolvimento dos trabalhos. Inicialmente a Ecofuel, fornecedora do aditivo para óleo pesado XP3, disponibilizou uma equipe de análise de atmosfera para acompanhar o andamento dos experimentos. A MWL não dispunha de equipamento de análise de atmosfera, e a oferta da Ecofuel foi aceita. A partir desse momento e até a aquisição do equipamento próprio, as análises foram executadas pela Ecofuel.

O equipamento utilizado para essas análises era um analisador marca Bacharach, modelo 300. A faixa de trabalho para esse modelo é:

- Monóxido de carbono: 0 a 3.700 ppm;
- Oxigênio: 0,1 a 23,5%;

- $\text{NO}_x = 0$ a 1.999 ppm;
- $\text{SO}_2 = 0$ a 1.999 ppm.

Os níveis de precisão das análises são dados para as condições de 20°C de temperatura ambiente e 45% de umidade relativa do ar:

- Monóxido de carbono: $\pm 5\%$ da leitura ou ± 10 ppm;
- Oxigênio: $\pm 0,6\%$;
- NO_x : $\pm 5\%$ da leitura ou ± 10 ppm;
- SO_2 : $\pm 5\%$ da leitura ou ± 10 ppm.

A BR Distribuidora forneceu literatura de óleos ultra-viscosos, propriedades e certificados de análises dos óleos pesados. Forneceu ainda uma planilha automática de especificação de temperatura em função da viscosidade desejada.

4.4 Terceira etapa

A próxima etapa, a terceira, foi calcular as vazões necessárias de ar e combustível. Felizmente todos os dados estavam disponíveis nos manuais dos equipamentos.

No caso do ar, fornecido pelo soprador de marca Siel, modelo ECS.1/133.1050, os dados utilizados estavam registrados na placa de identificação do equipamento, pois no manual os dados estavam incompletos e a empresa não respondeu à solicitação via e-mail. Os dados da bomba de combustível foram encontrados no manual e correspondiam aos dados encontrados na placa de identificação afixada no equipamento. Os dados dos queimadores também estavam corretos no manual.

Queimadores:

- Ar necessário: $23 \text{ l óleo/h} \times 12 \text{ m}^3 \text{ ar/l óleo} = 276 \text{ m}^3/\text{h}$ por queimador; os 28 queimadores consomem $7.728 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Óleo necessário: 23 l/h ; os 28 queimadores consomem $644 \text{ l/h} = 0,644 \text{ m}^3/\text{h}$.

Soprador:

- Ar fornecido: $7.980 \text{ m}^3/\text{h}$.

Bomba de óleo:

- Óleo fornecido: $15 \text{ gl/min} \times 3,78541 \text{ l/gl} \times 60 \text{ min/h} = 3.406,9 \text{ l/h} = 3,41 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tanto o soprador quanto a bomba estavam corretamente dimensionados, apesar do soprador operar teoricamente no limite superior.

As variações que seriam feitas nas vazões do soprador e da bomba não foram consideradas uma vez que o sistema trabalhava em plena capacidade.

O soprador é do tipo centrífugo e pelas características construtivas, quando não há vazão não há fornecimento.

Quanto à bomba, o sistema dispõe sistema de retorno onde todo óleo que é enviado aos queimadores e não queima retorna ao tanque de armazenamento.

Os desenhos esquemáticos da distribuição do ar e do sistema de alimentação de óleo encontram-se nas Figuras 43 a 45. As Figuras 46 e 47 mostram esquemas do queimador. As Tabelas 10 a 12 apresentam características do óleo combustível.

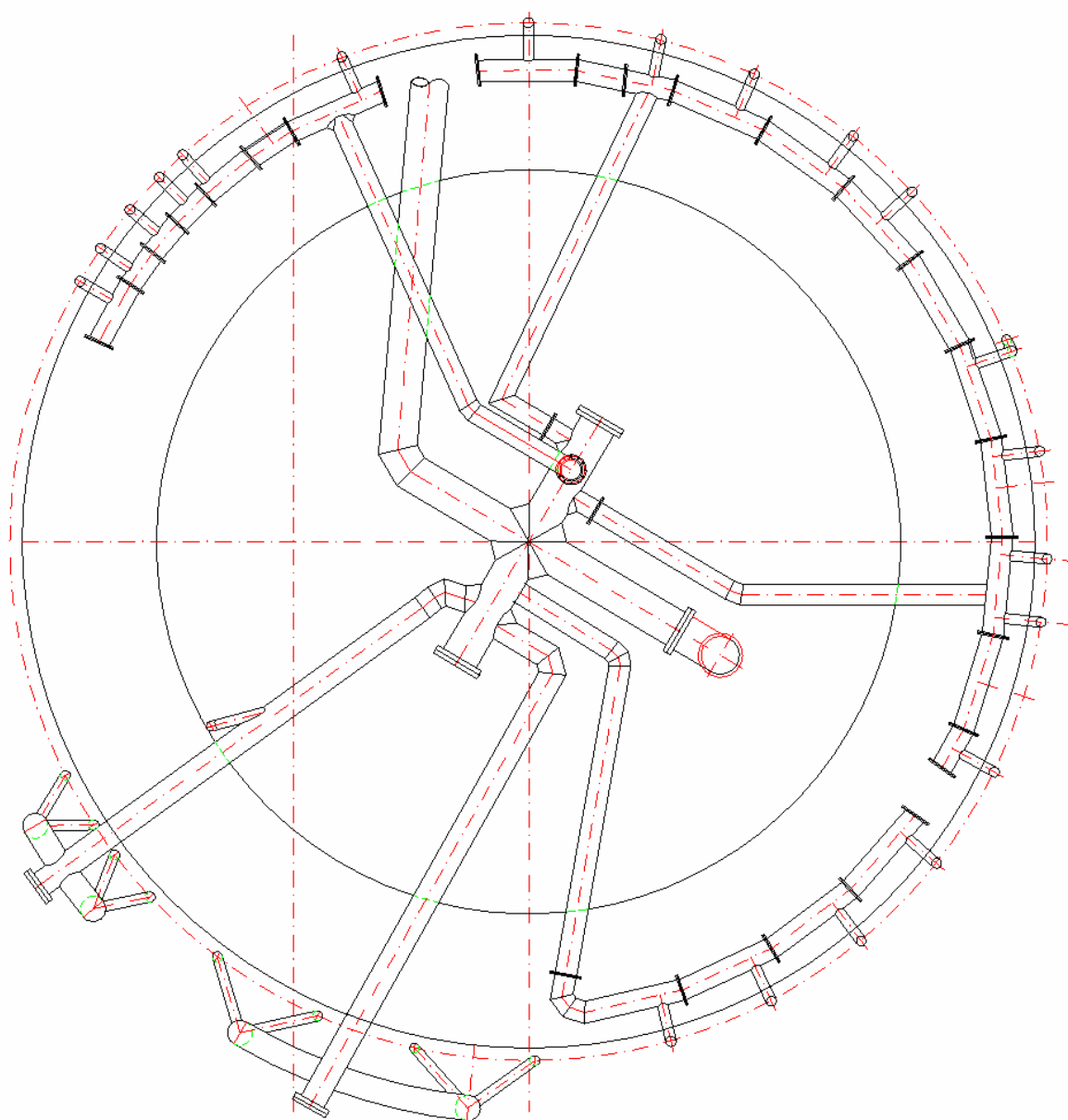


Figura 43 – Sistema de distribuição de ar.

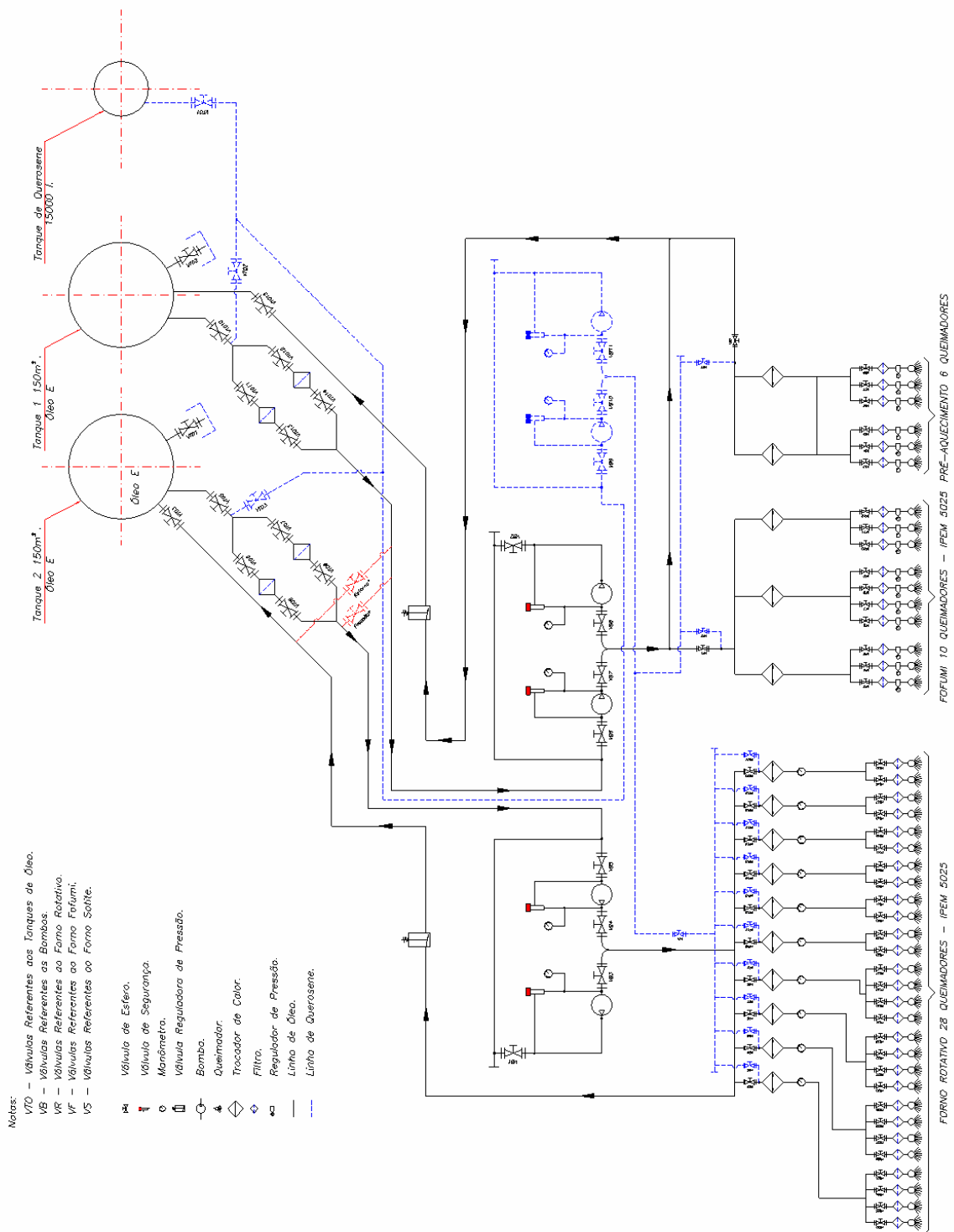


Figura 44 – Esquema geral de distribuição de óleo.

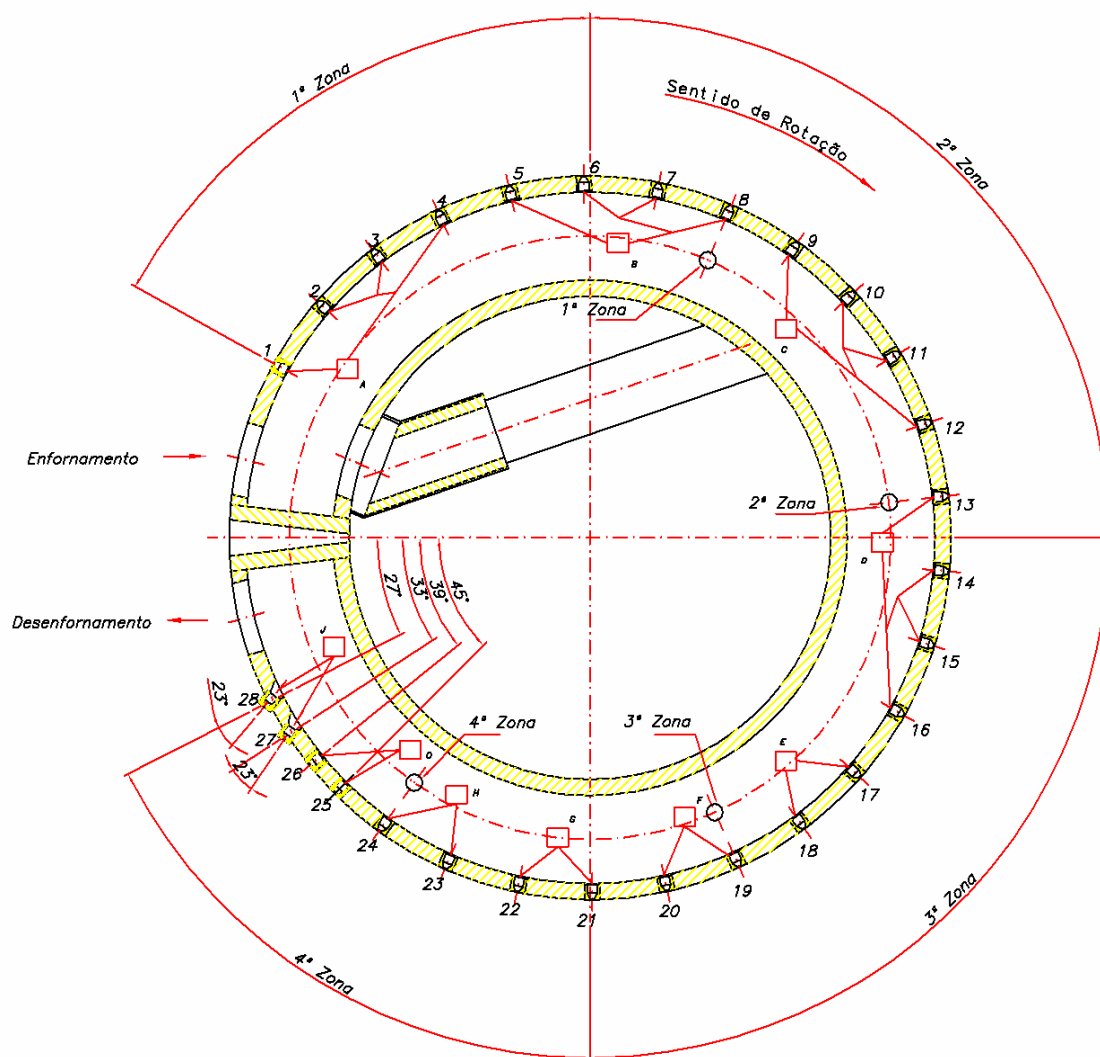


Figura 45 – Disposição geral dos queimadores antes das modificações.

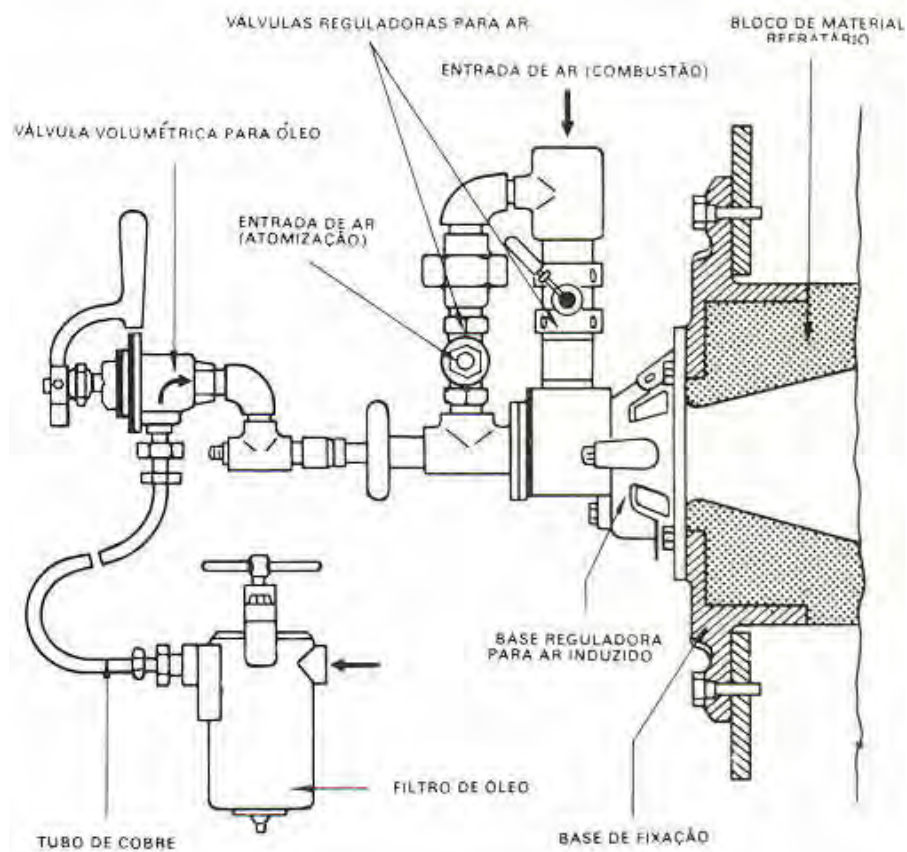


Figura 46 – Disposição geral do queimador Ipem 50/25 na lateral do forno.

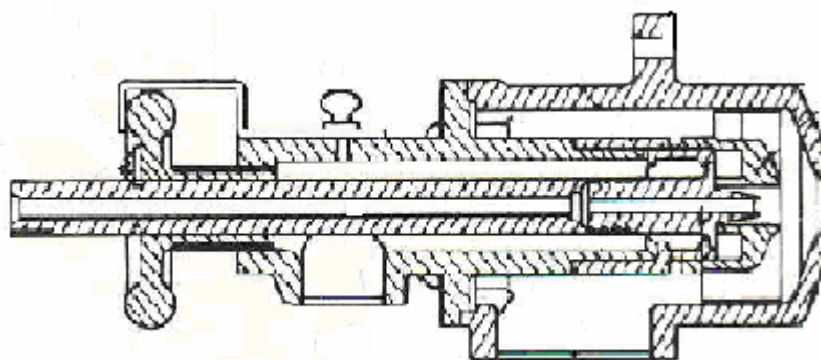


Figura 47 – Vista em corte do queimador Ipem 50/25.

Tabela 10 – Especificação do óleo 3A (Fonte BR Distribuidora).

MEP - Manual de Especificação de Produtos

OC 3A

Outras denominações:	óleo combustível 3A [b]
Código do produto:	6AD
Última atualização:	08/07/2004 - 13:15

Característica	Unidade	Método(s)		Limites	
		nacional	estrangeiro	mín.	máx.
Ponto de fulgor	°C	MB 48	ASTM D93	66	-
Teor de enxofre	% massa	MB 902	ASTM D1552 D2622 D 4294	-	2,5 [c]
Água e sedimentos [a] -	% vol	MB 37 e MB 294	ASTM D95 e D473	-	2,0
Viscosidade Saybolt Furol a 50 °C ou	SSF	MB 326	ASTM D88	-	2400 [d]
Viscosidade cinemática a 60 °C	cSt	NBR 10441 NBR 5847	ASTM D445/ D2171	-	2300 [d]
Viscosidade cinemática a 98,9 °C	cSt	NBR 10441 NBR 5847	ASTM D445	anotar	anotar
Vanádio	mg/kg		ASTM D5863 D5708	-	200
Densidade 20/4°C		NBR 7148 NBR	ASTM D1298 D4052	anotar	anotar

Tabela 11 – Tabela comparativa de óleos tipo A (fonte BR Distribuidora).

Comparativos técnicos-comerciais entre Óleos Combustíveis

	Características	Unidades	Métodos ASTM D-	Tipos de óleos Combustíveis				
				A1	A2	3A	4A	8A
Esp.D.N.C	Ponto de Fulgor, min.	°C	93	66	66	66	66	66
Esp.D.N.C	Ponto de Fluidez, °C, min.	°C	97	15	15	15	15	15
Esp.D.N.C	Teor de Enxofre, Máximo	%, peso	1552	5,00	5,50	5,50	5,50	5,50
Esp.D.N.C	Água e Sedimentos, Máximo	%, volume	95/473	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Esp.D.N.C	Viscosidade, à 50°C, Máximo	SSF	88	600	900	2.400	10.000	>300000
Esp.D.N.C	Viscosidade cinemática, 37,8 °C, Máximo	cSt	445	-	-	-	-	-
Esp.D.N.C	Viscosidade cinemática, 60 °C, Máximo	cSt	445	620	960	2.300	-	-
Esp.D.N.C	Cinzas, Máximo	-	-	-	-	-	-	-
ANÁLISE ELEMENTAR								
Calculado	Carbono	% massa	-	88,50%	88,58%	88,65%	88,73%	89,01%
Calculado	Hidrogênio	% massa	-	9,00%	8,92%	8,85%	8,77%	8,49%
Calculado	Relação CARBONO/HIDROGÊNIO	-	-	9,8	9,9	10,0	10,1	10,5
Calculado	Enxofre	% massa	1552	0,99%	0,95%	0,95%	0,95%	0,90%
Calculado	Cinzas+Umidade	% massa	482	0,17%	0,17%	0,17%	0,17%	0,16%
Val.Médios	Teor de Vanádio (obs.:3)	ppm	-	200	200	200	200	170
Val.Médios	Teor de Sódio (obs.:3)	ppm	-	20	20	20	20	10
Val.Médios	Teor de Níquel (obs.:3)	ppm	-	55	55	55	55	50
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS								
Estatística	Ponto de Fulgor, média	°C	93	105	105	110	110	120
Estatística	Densidade 20/4 C	-	70	1,0300	1,0350	1,0400	1,0450	1,0540
Calculado	Densidade 60/60 F	-	-	1,0337	1,0387	1,0437	1,0486	1,0576
Calculado	Grav API	-	Fórmula	5	5	4	3	1
Calculado	PCI	kcal/kg	Fórmula	9.599	9.574	9.550	9.526	9.433
Calculado	PCS	kcal/kg	Fórmula	10.051	10.023	9.994	9.966	9.860
CONTROLE DE COMBUSTÃO								
Dado	Temperatura de queima	°C	445	120	135	145	165	205
Dado	Temperatura de Armazenamento	°C	445	60	67	78	93	129
Calculado	Viscosidade de queima	cSt	445	37,43	34,61	36,23	33,28	35,30
Calculado	Viscosidade de Armazenamento	cSt	445	618,42	617,26	612,30	617,41	627,24
Calculado	Teor de CO2 máximo (estequiometria)	% volume	Fórmula	16,81%	16,84%	16,87%	16,90%	17,02%
Calculado	Vol Teórico de Oxigênio	Nm³/kg	Fórmula	2,157	2,154	2,151	2,148	2,137
Calculado	Vol Teórico do Ar de Combustão	Nm³/kg	Fórmula	10,270	10,255	10,242	10,229	10,177
Calculado	Porcentagem de O2 no ar	%	Fórmula	21,00	21,00	21,00	21,00	21,00
Calculado	Vol T. dos Gases Secos	Nm³/kg	Fórmula	9,760	9,750	9,741	9,732	9,696
Calculado	Vol T. dos Gases Umidos	Nm³/kg	Fórmula	10,764	10,745	10,728	10,711	10,643
Calculado	Emissão de Dióxido de Enxofre (SO2)	gr SO2 / Gcal	Fórmula	1.970	1.994	1.990	1.995	1.908
Imposto	Emissão Permitida pela CETESB	gr SO2 / Gcal	Dado	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000

Tabela 12 – Tabela de viscosidade em função da temperatura (Fonte BR Distribuidora).

Variação da "Viscosidade x Temperatura" dos OC's (viscosidade em cSt)							
ÓLEOS COMBUSTÍVEIS COMERCIALIZADOS NO E.S.PAULO							
Temp.	°C	OC-A1/B1	OC-A2/B2	OC-3A	OC-4A	OC-7A	OC-8A
0		355.901	513.255	-	-	-	-
5		163.454	241.006	-	-	-	-
10		79.711	119.661	504.037	-	-	-
15		41.046	62.508	239.838	-	-	-
20		22.208	34.201	120.421	816.676	-	-
25		12.569	19.522	63.500	383.641	-	-
30		7.412	11.582	35.019	190.118	-	-
35		4.537	7.120	20.120	98.936	-	-
40		2.875	4.522	12.003	53.844	-	-
45		1.879	2.959	7.411	30.532	-	-
50		1.265	1.990	4.724	17.978	811.484	-
55		873,6	1.373	3.100	10.960	404.619	-
60		618,4	969,3	2.090	6.898	211.103	-
65		447,7	699,4	1.444	4.471	114.836	773.923
70		330,8	514,8	1.021	2.978	64.922	405.314
75		249,2	386,0	737,3	2.034	38.032	220.832
80		191,0	294,4	543,0	1.422	23.025	124.806
85		148,8	228,1	407,3	1.015	14.370	72.971
90		117,7	179,4	310,6	739,9	9.225	44.028
95		94,43	143,0	240,7	549,2	6.079	27.354
100		76,73	115,5	189,2	414,7	4.105	17.463
105		63,11	94,38	150,8	318,2	2.835	11.434
110		52,48	77,98	121,7	247,8	1.999	7.665
115		44,11	65,10	99,35	195,7	1.438	5.252
120		37,43	54,88	82,02	156,6	1.053	3.674
125		32,05	46,68	68,41	126,8	784,7	2.619
130		27,68	40,04	57,61	103,8	594,0	1.901
135		24,10	34,61	48,95	85,91	456,4	1.403
140		21,13	30,15	41,95	71,80	355,5	1.052
145		18,66	26,44	36,23	60,57	280,6	800,7
150		16,58	23,34	31,52	51,54	224,2	617,7
155		14,82	20,74	27,62	44,22	181,1	482,8
160		13,33	18,52	24,36	38,22	148,0	381,9
165		12,05	16,64	21,61	33,28	122,1	305,6
170		10,95	15,02	19,29	29,17	101,7	247,2
175		9,995	13,63	17,30	25,73	85,44	201,9
180		9,164	12,42	15,61	22,84	72,40	166,6
185		8,438	11,36	14,14	20,38	61,84	138,6
190		7,800	10,44	12,87	18,29	53,21	116,4
195		7,236	9,63	11,77	16,49	46,11	98,47
200		6,737	8,917	10,80	14,94	40,22	83,95
205		6,293	8,282	9,956	13,59	35,30	72,08
210		5,897	7,718	9,207	12,42	31,17	62,31
215		5,541	7,214	8,544	11,40	27,67	54,21
220		5,222	6,762	7,955	10,50	24,70	47,45
225		4,934	6,356	7,429	9,703	22,15	41,77
230		4,673	5,990	6,958	8,999	19,97	36,97
235		4,437	5,659	6,534	8,373	18,07	32,89
240		4,222	5,359	6,153	7,814	16,43	29,40
245		4,026	5,086	5,808	7,313	15,00	26,41
250		3,847	4,837	5,496	6,863	13,74	23,82
255		3,682	4,609	5,211	6,458	12,64	21,58
		Armazenagem					
		Queima					

4.5 Quarta etapa

Como não havia problemas de vazão, estudaram-se as características do óleo para verificar se atendia às condições ideais para esse tipo de queimador. A partir dos dados de catálogo dos queimadores e das especificações e análises do óleo que estava sendo queimado, pôde-se observar que, apesar regulagem dos termostatos estarem corretas, o óleo não era atomizado de maneira uniforme.

A temperatura de queima, conforme as especificações da BR, para o óleo 3A é de 145°C. Todas as condições estavam ajustadas conforme as especificações. Restou então tentar ajustar o sistema para viscosidade menor, ou seja, aumentando a temperatura no aquecedor.

Esse ajuste foi feito e não surtiu efeito, o sistema continuava operando irregularmente. Chegou-se à conclusão que a causa provável do funcionamento irregular estava ligada ao sistema de aquecimento.

Todas as ligações foram vistoriadas, os painéis e cabos conferidos, mas nada foi encontrado. Com o sistema desligado para verificação da situação interna do aquecedor observou-se que estava tudo em ordem. Era esperada uma grande impregnação de carvão ao redor da resistência devido ao craqueamento do óleo, mas isso não ocorreu.

A partir de então testou se a formulação fornecida pela BR Distribuidora que fornecia a quantidade de calor necessária a ser gerada pelo aquecedor para atingir a viscosidade correta levando em consideração as características do óleo e a taxa de dissipação das resistências. Esta formulação já foi apresentada no capítulo 3, e é reproduzida aqui para facilidade de seguir a argumentação:

$$Q = m [A (T_2 - T_1) + B/2 (T_2^2 - T_1^2)], \quad (2)$$

onde m é a vazão mássica no sistema e A e B são constantes, cujos valores são $A = 1,6506$ e $B = 0,00332$ (Garcia e Bernardes, 1992).

As temperaturas de entrada e saída eram $T_1 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T_2 = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ e vazão de óleo era $m = 0,644\text{ m}^3/\text{h}$. Assim:

$$Q = 0,644 \times [1,6506 (120 - 60) + (120^2 - 60^2)] = 52,23\text{ kW}.$$

$$Q = 52,23\text{ kW}.$$

O aquecedor existente dispunha de apenas 36 kW de potência. Como nem todo óleo entra em contato com a resistência e o tempo de residência no aquecedor é baixo, o óleo saía heterogêneo quanto à sua viscosidade, fazendo com que em alguns momentos o queimador funcionasse fora das condições de atomização.

O problema foi resolvido com a aquisição de um aquecedor complementar para ser ligado em série.

A partir da correção os queimadores tornaram-se estáveis e mais fáceis de controlar, segundo os forneiros.

Os resultados dessa correção puderam ser observados pela menor variação da temperatura durante o processo de forjamento, uma menor incidência de formação de borra de óleo nos blocos difusores dos queimadores e nas paredes do forno opostas aos queimadores.

Observou-se ainda a menor formação de carepa nos blocos de aço a serem forjados e um número menor de intervenções para correção dimensional na linha de forjamento.

4.6 Quinta etapa

A quinta etapa foi a aquisição do equipamento próprio para realizar as análises e não depender mais de terceiros.

4.7 Sexta etapa

A sexta etapa foi a obtenção dos dados após a adequação do sistema de combustão. O equipamento adquirido era um analisador Ecil Green Line 8000. A faixa de trabalho para esse modelo é:

- Monóxido de carbono: 0 a 8.000 ppm;
- Oxigênio: 0,1 a 25,0%;
- NO_x: 0 a 4.000 ppm;
- SO₂: 0 a 4.000 ppm.

Os níveis de precisão das análises são dados para as condições de -5°C a 40°C de temperatura ambiente:

- Monóxido de carbono: ± 10 ppm;
- Oxigênio: $\pm 0,1\%$;
- NO_x: ± 10 ppm;
- SO₂: ± 10 ppm

4.8 Sétima etapa

A sétima etapa foi a de tabulação e análise dos dados. Houve dificuldades nessa etapa pela falta de referência em fornos desse tipo. Os dados aproveitados foram suficientes para mostrar o resultado do ajuste no sistema de combustão na atmosfera do forno.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

5.1 Preliminares

Os resultados das análises foram selecionados e então dispostos em forma de gráficos. Os dados obtidos foram suficientes para confirmar a condição experimental pretendida.

A menor objetividade no início do trabalho não impediu que os resultados fossem alcançados apesar de se imaginar que esses dados seriam apenas dados de referência. Por desconhecer as necessidades e os pontos representativos, todas as condições possíveis foram analisadas.

A partir desses dados foram estabelecidos os pontos e quais as condições operacionais do forno que seriam observadas.

A baixa memória de massa do equipamento utilizado pela Ecofuel não permitia acumular dados por período, só conseguia armazenar um dado específico. Após consenso decidiu-se que o melhor dado em uma análise, nas condições de operação, era o ponto em que havia a estabilização da medida. Isso foi considerado como se fosse a média das várias leituras obtidas na análise. Uma média global de todas as análises era então passada ao relatório de análises. Um exemplo de relatório da Ecofuel está na Tabela 13.

As análises após os ajustes foram realizadas com o equipamento novo adquirido. A grande memória de massa para armazenar registros permitiu análises contínuas a cada etapa. As análises perdidas tinham o mesmo comportamento das obtidas e arquivadas. A Tabela 14 apresenta dados do analisador novo, copiados e prontos para a geração do gráfico.

Os registros foram transferidos do analisador para um microcomputador, os dados que interessam foram copiados para uma planilha Excel e, então, trabalhados para gerar os gráficos.

Tabela 13 – Relatório de análise da Ecofuel.

3º Amostragem - As Duas Portas Fechadas													
Data	Horário	O2 %				CO2 %				Excesso de Ar (%)			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
30/04/02	11:00 as 12:00	9,1	5,7	4,9	5,9	9,6	12,0	12,6	11,9	69	33	27	35
20/05/02	11:00 as 12:00	4,2	0,3	3,7	6,3	13,2	16,3	13,6	11,5	23	1	20	40
08/08/02	11:00 as 12:00	1,2	1,8	5,3	6,2	15,6	15,1	12,3	11,6	5	8	31	39
28/08/02	11:00 as 12:00	5,1	7,4	5,4	7,5	12,5	10,7	12,2	10,6	30	51	32	52
02/03/03	11:00 as 12:00	5,4	6,5	7,9	10,0	11,7	10,8	9,8	8,2	35	45	61	92
22/05/03	10:45 as 12:00	2,1	0,7	5,8	6,1	14,8	15,9	11,9	11,7	10	2	35	38
26/06/03	11:00 as 12:00	0,6	0,6	1,5	2,0	16,0	16,0	15,3	14,9	2	2	7	9
28/07/03	11:00 as 12:00	0,7	0,3	6,8	4,0	15,9	16,3	11,1	13,3	3	1	45	22
31/10/03	11:00 as 12:00	1,3	0,4	0,7	2,9	15,5	16,2	15,9	14,2	6	1	3	15
23/01/04	11:00 as 12:00	3,6	2,8	3,8	4,8	13,7	14,3	13,5	12,7	19	14	20	27
09/02/04	11:00 as 12:00	0,4	0,4	3,0	0,7	16,2	16,2	14,1	15,9	1	1	15	3
30/03/04	11:00 as 12:00	0,8	0,8	2,0	3,9	15,9	15,9	14,9	13,4	3	3	9	21
23/04/04	13:30		1,4	2,3			15,4	14,7			6	11	
Data	Horário	CO (ppm)				NOx(ppm)				SOx(ppm)			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
30/04/02	11:00 as 12:00	0	0	0	0	586	645	645	680	308	335	333	308
20/05/02	11:00 as 12:00	1	3459	40	19	429	158	410	470	161	663	429	327
08/08/02	11:00 as 12:00	578	263	4	1	462	414	616	616	308	304	616	308
28/08/02	11:00 as 12:00	0	0	0	0	115	93	115	37	225	225	308	225
02/03/03	11:00 as 12:00	564	53	389	45	424	455	454	417				
22/05/03	10:45 as 12:00	1327	3418	190	141	546	6	430	583	631	178	0	0
26/06/03	11:00 as 12:00	144	6	23	0	234	357	334	430	232	183	0	78
28/07/03	11:00 as 12:00	29	745	19	0	154	213	390	636	46	55	219	0
31/10/03	11:00 as 12:00	58	856	554	4	496	130	354	554	0	1299	354	194
23/01/04	11:00 as 12:00	52	472	29	14	265	195	491	554	1455	1736	395	252
09/02/04	11:00 as 12:00	585	46	7	0	95	285	485	485	2466	663	375	740
30/03/04	11:00 as 12:00	3130	3324	945	0	160	187	504	524	448	590	795	505
23/04/04	13:30		52	0			509	612			77	246	

Muitas formas de gráfico foram testadas, mas a que mais se ajustou às análises foi a de dispersão por permitir uma visualização imediata da situação estudada em relação a uma referência já estabelecida.

Neste trabalho, a análise principal estava centrada no comportamento do CO₂ em relação ao O₂ e sua relação com o CO remanescente. O comportamento esperado para a melhora no sistema de combustão é o deslocamento da curva em direção ao eixo horizontal e a redução da relação CO/CO₂, que indicam a redução na emissão de CO₂ e no consumo de combustível.

A escolha das zonas 2 e 3 do forno rotativo ocorreu em função da menor interferência da abertura das portas durante a operação de forjamento. Essa condição tornou possível comparar os resultados em qualquer horário ou condição de trabalho.

Tabela 14 – Dados do analisador novo, copiados e prontos para a geração do gráfico.

Concentrções das Espécies							
O2 [%]	CO [ppm]	NO [ppm]	SO2 [ppm]	CO2 [%]	NO*10 [ppm]	SO2*10 [ppm]	CO2/CO
4,3	19	637	124	12,5	6370	1240	6578,95
4,3	18	634	130	12,5	6340	1300	6944,44
4,1	15	632	131	12,6	6320	1310	8400,00
4	13	633	132	12,7	6330	1320	9769,23
3,9	13	632	134	12,8	6320	1340	9846,15
3,8	12	629	133	12,8	6290	1330	10666,67
3,6	12	635	132	13	6350	1320	10833,33
3,4	10	610	127	13,1	6100	1270	13100,00
2,8	12	531	125	13,6	5310	1250	11333,33
2,3	16	405	125	14	4050	1250	8750,00
2,7	16	386	121	13,7	3860	1210	8562,50
3,7	8	411	114	12,9	4110	1140	16125,00
4,8	5	438	105	12,1	4380	1050	24200,00
4,6	4	460	103	12,3	4600	1030	30750,00
4,1	4	510	102	12,7	5100	1020	31750,00
2,9	4	505	104	13,5	5050	1040	33750,00
2,2	6	457	111	14,1	4570	1110	23500,00
2	9	405	113	14,2	4050	1130	15777,78
1,8	11	355	119	14,3	3550	1190	13000,00
1,6	18	296	120	14,5	2960	1200	8055,56
1,2	50	266	125	14,8	2660	1250	2960,00
1,1	45	279	128	14,9	2790	1280	3311,11
1,2	43	277	128	14,8	2770	1280	3441,86
1,2	104	269	130	14,8	2690	1300	1423,08
0,9	669	240	134	15	2400	1340	224,22
0,6	3401	181	132	15,2	1810	1320	44,69
0,6	5280	138	130	15,3	1380	1300	28,98
0,4	13010	37	151	15,4	370	1510	11,84
0,4	17691	0	464	15,4	0	4640	8,70
0,2	17690	0	810	15,5	0	8100	8,76
0,2	17689	0	992	15,6	0	9920	8,82
0,1	17689	0	1082	15,6	0	10820	8,82
0	17687	0	1099	15,7	0	10990	8,88
0	17685	0	1071	15,7	0	10710	8,88
0	17683	0	1019	15,7	0	10190	8,88
0	17679	0	996	15,7	0	9960	8,88
0	17679	0	1008	15,7	0	10080	8,88
0	17678	0	1017	15,7	0	10170	8,88
0	17673	0	1022	15,7	0	10220	8,88
0	17671	0	1018	15,7	0	10180	8,88
0	17669	0	988	15,7	0	9880	8,89
0	17669	0	954	15,7	0	9540	8,89
0	17665	0	922	15,7	0	9220	8,89
0	17663	0	886	15,7	0	8860	8,89
0	17661	0	847	15,7	0	8470	8,89
0	17661	0	819	15,7	0	8190	8,89
0	17659	0	797	15,7	0	7970	8,89
0	17659	0	768	15,7	0	7680	8,89
0	17659	0	726	15,7	0	7260	8,89
0	17658	0	684	15,7	0	6840	8,89
0	17657	0	646	15,7	0	6460	8,89
0	17655	0	614	15,7	0	6140	8,89

As análises preliminares indicavam uma variação que dificilmente poderia ser trabalhada (Figura 48). Uma vez acertada a condição em que seriam feitas as análises de atmosfera, a situação se tornou mais estável e os resultados passíveis de trabalho.

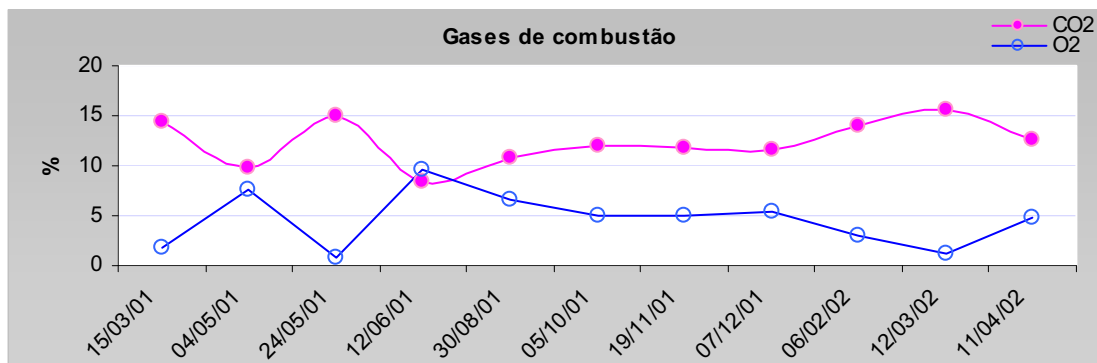


Figura 48 – Resultados da análise preliminar.

5.2 Análise qualitativa

As modificações executadas no sistema de combustão melhoraram a operação do forno, mas não pudemos quantificá-las. Um conjunto de efeitos percebidos pelos operadores da linha de produção e pelos mecânicos da manutenção indica a melhora efetiva do sistema:

- Melhora no desempenho da linha de forjamento abastecida por esse forno (redução de defeitos superficiais e sub-superficiais, redução no número de ajustes dimensionais durante o período de forjamento, melhora no encharque dos blocos, melhora no puncionamento do cubo da roda).
- Menor formação de carepa (menor espessura).
- Melhora na descarepação (a carepa passou a soltar com mais facilidade).
- Menor formação de borra nos blocos refratários dos queimadores.
- Menor formação de borra aderida à parede oposta ao queimador.
- Respostas mais rápidas nos ajustes de temperatura.
- Regulagens dos queimadores mais fáceis.
- Menor oscilação na temperatura do forno.
- Redução de manutenção nos queimadores.
- Redução do número de quebras dos pinos de segurança do laminador.

5.3 Análise de resultados

As Figuras 49 e 50 apresentam as curvas da concentração de CO_2 em função da concentração de O_2 para as zonas 2 e 3, considerando o sistema não corrigido. As Figuras 51 e 52 apresentam as mesmas curvas para o sistema corrigido.

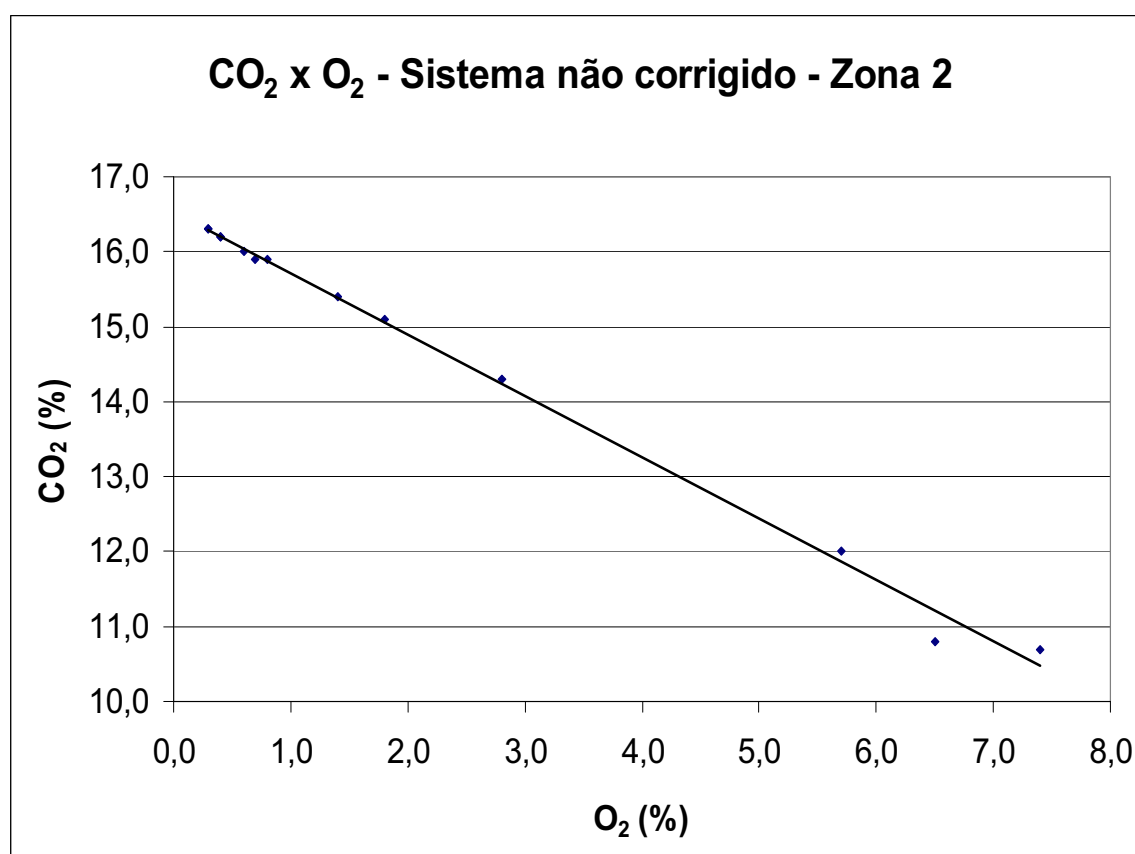


Figura 49 – Concentração de CO_2 como função da concentração de O_2 , na zona 2 do forno rotativo, para o sistema não corrigido.

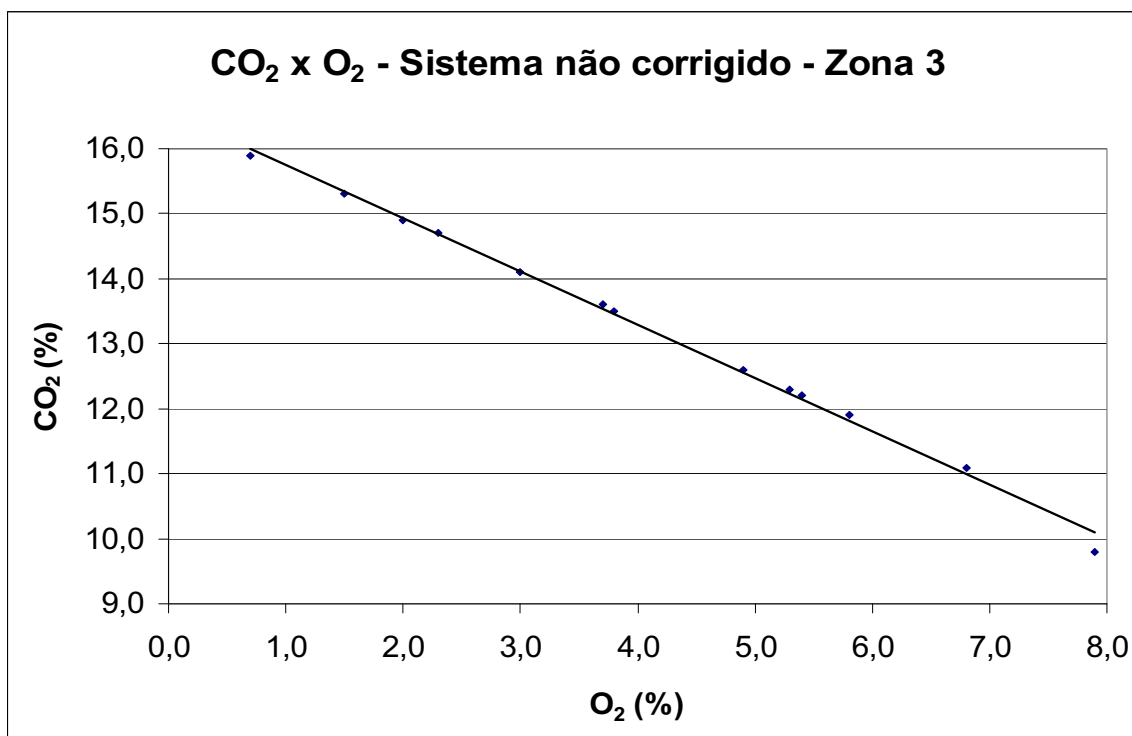


Figura 50 – Concentração de CO₂ como função da concentração de O₂, na zona 3 do forno rotativo, para o sistema não corrigido.

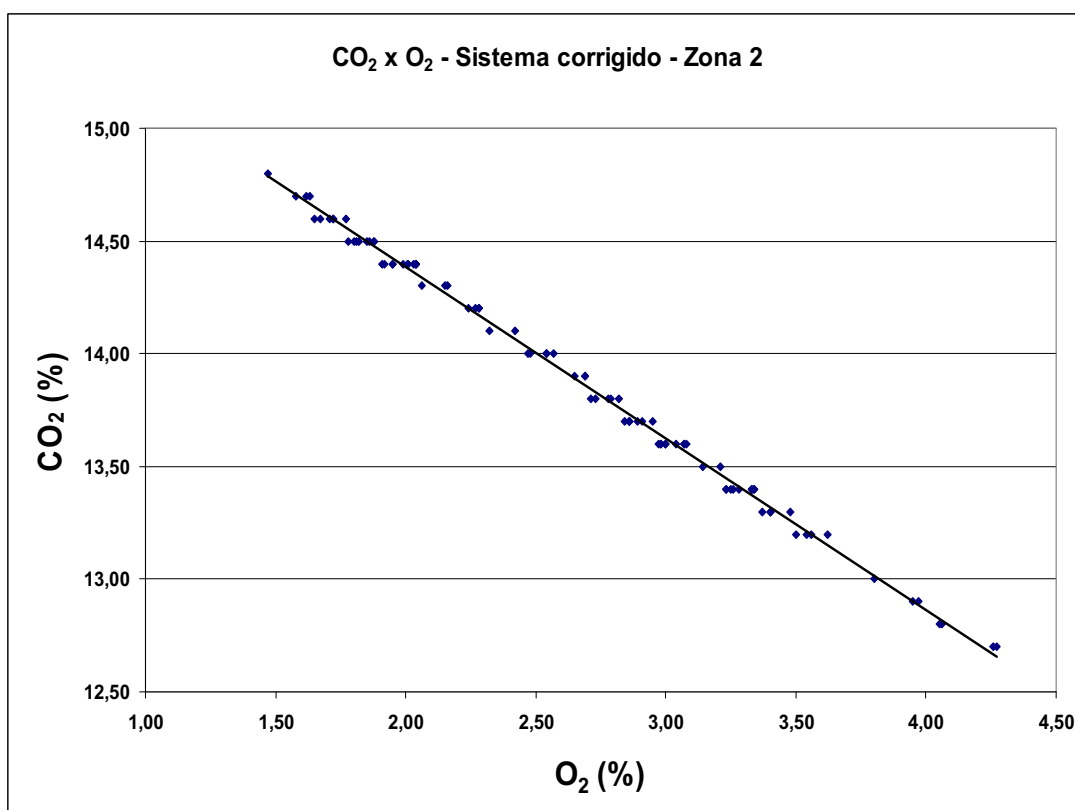


Figura 51 – Concentração de CO₂ como função da concentração de O₂, na zona 2 do forno rotativo, para o sistema corrigido.

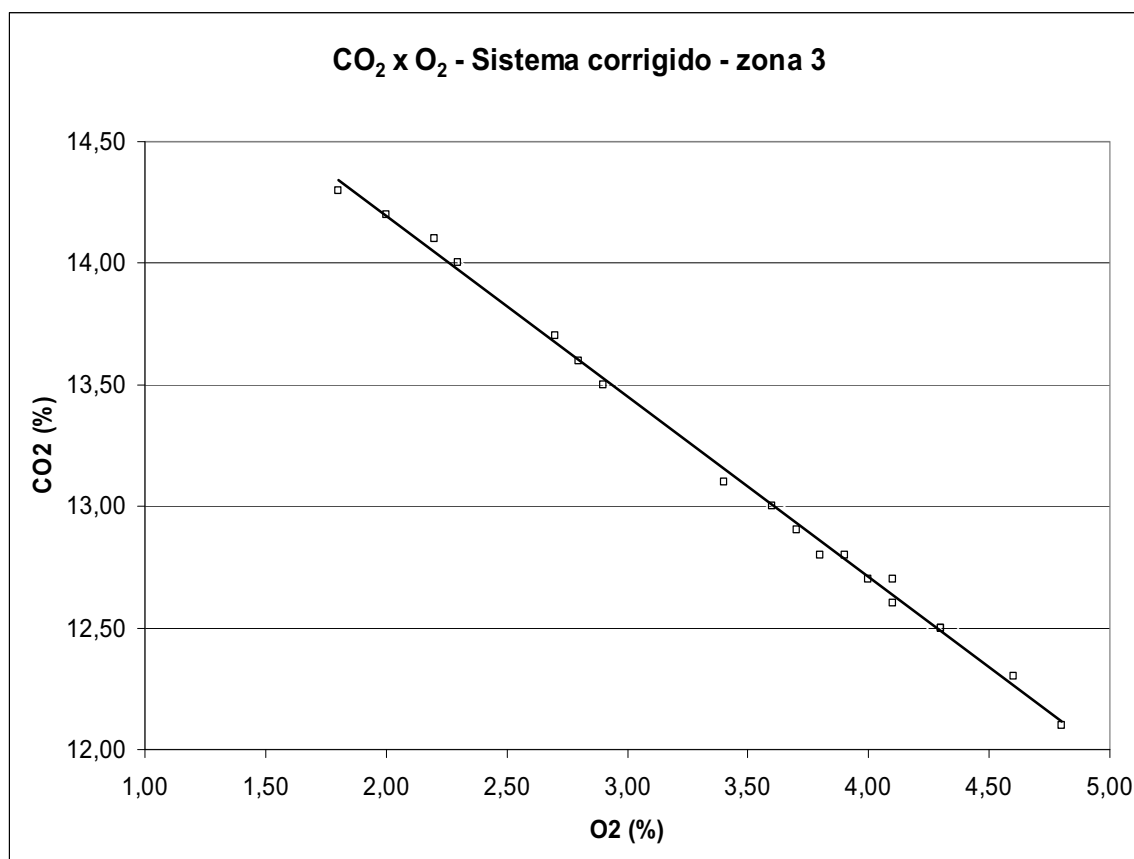


Figura 52 – Concentração de CO₂ como função da concentração de O₂, na zona 3 do forno rotativo, para o sistema corrigido.

Os gráficos dispostos separadamente (Figuras 49 a 52) dificultam a análise. A sobreposição das curvas foi um artifício utilizado para facilitar a visualização dos resultados (Figuras 53 e 54). Nesta condição a visualização do efeito das modificações realizadas no sistema de combustão pode ser observada com mais facilidade.

A melhora sensível das condições de queima do combustível e o aumento do rendimento térmico do sistema ajustado permitiram a redução no consumo de óleo e, conseqüentemente, a emissão de uma quantidade menor de CO₂.

A Figura 55 apresenta os dados da zona 3 como função do tempo, para ilustrar outra forma de apresentação.

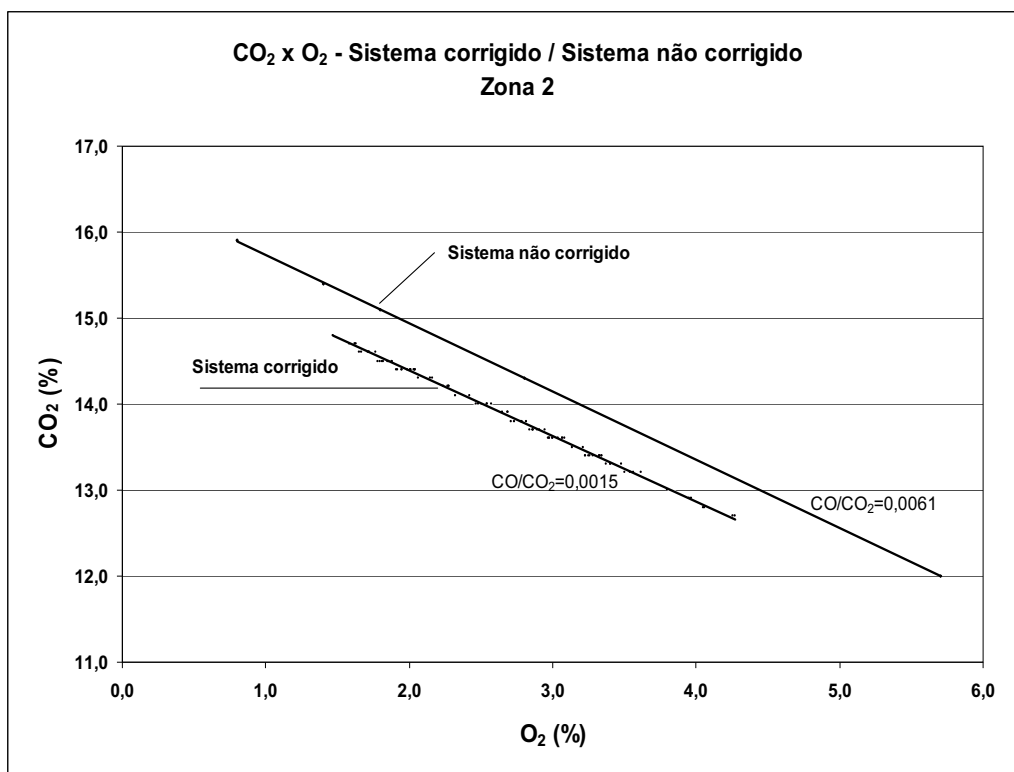


Figura 53 – Concentração de CO₂ como função da concentração de O₂ para a zona 2 do forno rotativo, com as duas condições sobrepostas.

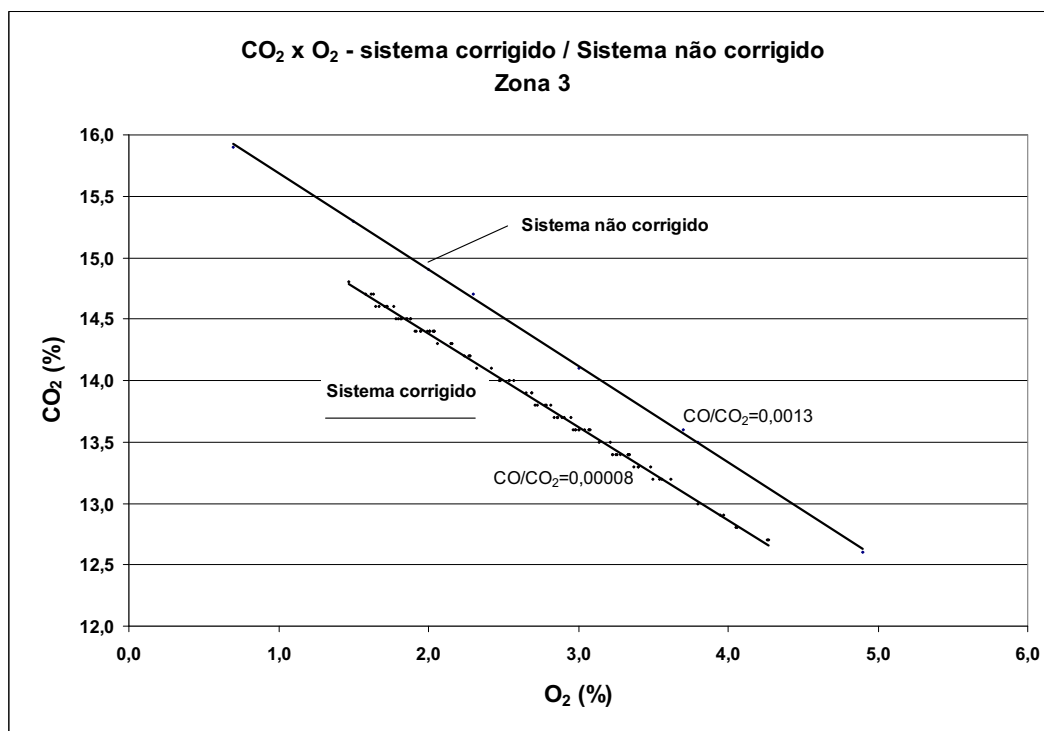


Figura 54 – Concentração de CO₂ como função da concentração de O₂ para a zona 3 do forno rotativo, com as duas condições sobrepostas.

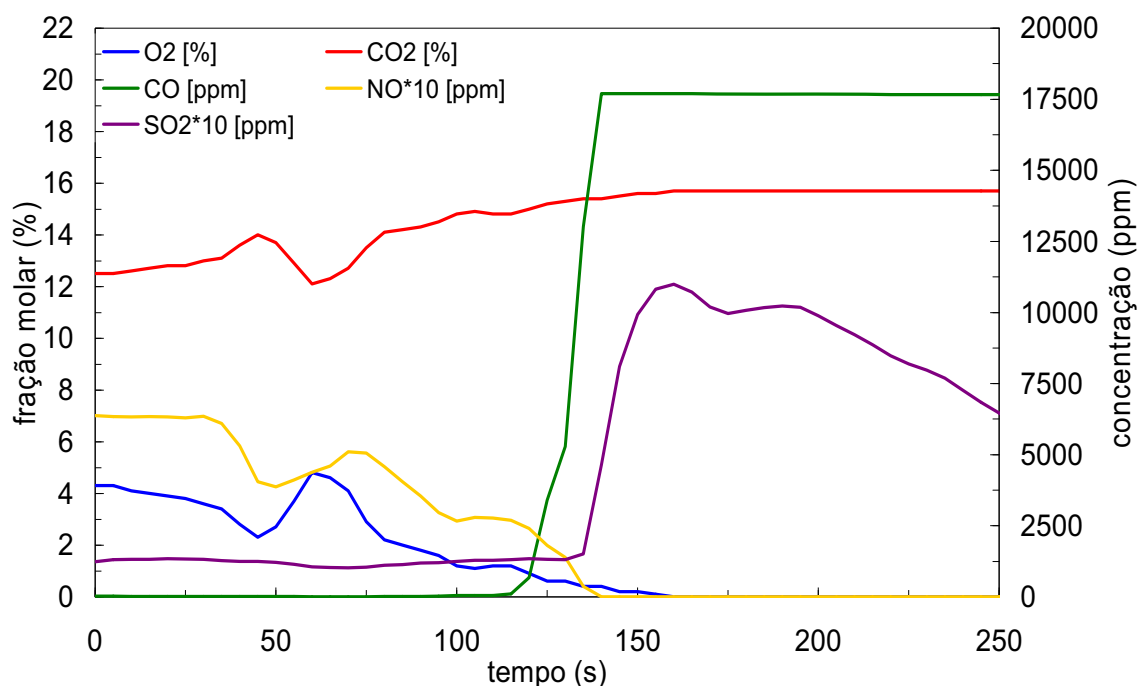
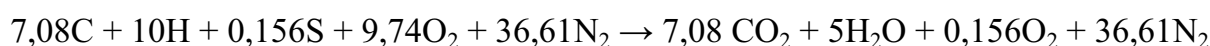
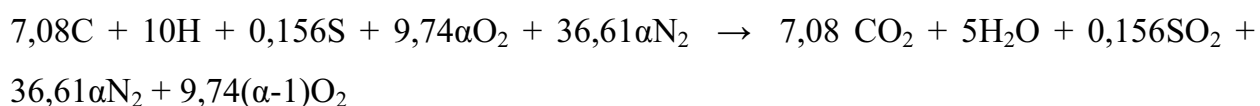


Figura 55 – Concentrações como função do tempo, para a zona 3 do forno rotativo.

O óleo combustível pesado utilizado apresenta em sua composição química aproximadamente 85% de C, 10% de H e 5% de S, em massa, e seu poder calorífico inferior (PCI) é de 9.550 kcal/kg. Para uma reação de combustão estequiométrica de 100 g de combustível, consideram-se 7,08 mols de C ($= 85/12$), 10 mols de H ($= 10/1$) e 0,156 mols de S ($= 5/32$), de tal maneira que:



No sistema de combustão ar/óleo pesado faz-se necessário uma quantidade adicional de ar (excesso de ar) para ajustar a combustão. Para um excesso de ar normalizado, α , tem-se:



Para calcular a concentração de oxigênio nos produtos adota-se o índice em base seca, pois as análises de atmosfera obtidas no experimento foram sempre nessa forma.

$$[O_2]_{BS} = \frac{9,74(\alpha - 1)}{7,08 + 0,156 + 36,61\alpha + 9,74(\alpha - 1)}$$

O sistema do forno estudado opera com 20% de excesso de ar. Para esse valor de excesso de ar tem-se:

$$[O_2]_{BS} = \frac{9,74(1,20 - 1)}{7,08 + 0,156 + (36,61 * 1,20) + 9,74(1,20 - 1)} = \frac{1,95}{7,08 + 0,156 + 49,93 + 1,95}$$

$$[O_2]_{BS} = \frac{1,95}{59,12} = 0,033$$

$$[O_2]_{BS} = 3,3\%$$

Este valor foi colocado na Figura 56, que mostra os valores de CO₂ para os sistemas corrigido e não corrigido.

$$[CO_2]_{Corrigido} = 13,4\%$$

$$[CO_2]_{N\tilde{a}oCorrigido} = 13,9\%$$

Houve uma redução de 0,5% na concentração de CO₂ nos gases de combustão após a correção do sistema de combustão.

O forno estudado consome cerca de 7.200 toneladas de óleo 3A por ano. Para efeito de cálculo de “Créditos de Carbono” e segundo o Guia para Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), Volume 2, Capítulo 2, o volume de CO₂ emitido em um sistema de combustão pode ser calculado da seguinte forma:

$$Emiss\tilde{a}o_{GEE,comb.}(tCO_2) = Consumo_{comb.} * Fator.Emiss\tilde{a}o_{comb.}(tCO_2 / tcomb.)$$

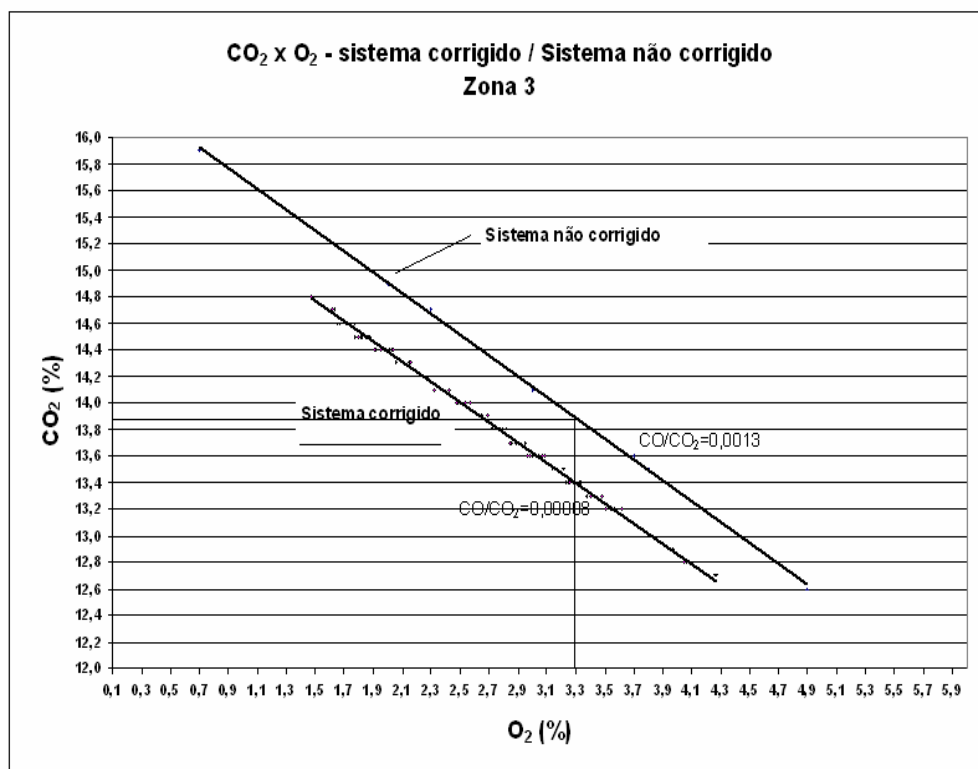


Figura 56 – Valores de CO₂ para o excesso de ar de 20% nos sistemas corrigido e não corrigido.

Para o óleo pesado utilizado no forno em questão, o valor do fator de emissão tem que ser calculado a partir dos seguintes dados:

BEN 2005 – Capítulo 9 – Anexo E

- Densidade do óleo: 1.000 kg/m³ (Tabela E.8 – pág 133);
- PCI: 9.590 kcal/kg (Tabela E-8 – pág 133);
- Coeficiente de equivalência médio: 40,15 TJ/kt (Tabela E.7 – pág 132).

IPCC 2006 – Volume 2 – Capítulo 2

- Fator de emissão de CO₂: 77,40 tCO₂/TJ (Tabela 2.3 – pág. 2.18).

Assim:

$$FatorEmissão(tCO_2 / t_{\text{óleo}}) = \frac{Coef.Equivalência.Médio(TJ / kt) * Fator.Emissão.Carbono(tCO_2 / TJ)}{1000}$$

$$FatorEmissão_{\text{óleo}} = \frac{40,15(TJ / kt) * 77,40(tCO_2 / TJ)}{1000}$$

$$FatorEmissão_{\text{óleo}} = 3,1076(tCO_2 / t_{\text{óleo}})$$

Portanto, o forno em questão emite anualmente:

$$Emissão_{GEE, comb.} = 7.200(t_{\text{óleo}} / ano) * 3,1076(tCO_2 / t_{\text{óleo}})$$

$$Emissão_{GEE, comb.} = 22.374,72(tCO_2 / ano)$$

O sistema corrigido apresentou uma redução de 0,5% na concentração de CO₂ nos gases de combustão, o que equivale a uma redução de 3,6% na emissão total de CO₂.

Se a correção no sistema de combustão for mantida, a emissão de CO₂ poderá ser reduzida em 805,49 t/ano. Os Créditos de Carbono equivalentes à essa redução de emissão podem atingir valores de 17 Euros a tonelada (jan/2008), ou seja, 13.693 Euros/ano.

O valor total investido na solução do problema de queima irregular não atingiu R\$ 10.000,00. O valor anual que pode ser obtido em função dos certificados de redução de emissão relativos à redução atingida supera o valor investido e pode ser recuperado em apenas 3 meses.

Em termos gerais esses créditos podem gerar um contrato de cerca de R\$ 300.000,00 em 7 anos e renovável por mais um período equivalente.

Capítulo 6

Conclusões e Recomendações para Trabalhos Futuros

Muitas situações adversas influenciaram o desempenho do forno estudado antes da verificação inicial e após o início dos trabalhos.

Apesar de todas as adversidades o estudo mostrou resultado positivo em relação ao proposto. As correções no sistema de combustão surtiram efeito e confirmaram a expectativa de que poderia haver redução de emissão de CO₂, em decorrência da redução de consumo com a otimização da operação do sistema.

Considerando como representativos os resultados demonstrados pelas análises realizadas pode-se concluir que:

- O objetivo principal desse trabalho que é o estudo do sistema de combustão visando redução de emissões gasosas e possibilidade de geração de Créditos de Carbono através da otimização desse sistema foi plenamente atingido. Os resultados mostraram melhora traduzida pelas análises de atmosfera com redução de 0,5% na concentração de CO₂ nos gases de combustão e a possibilidade de geração de créditos equivalentes a 13.693 Euros por ano e que equivale a um contrato de 7 anos no valor aproximado de R\$ 300.000,00.

Pelo descrito anteriormente, muitos trabalhos ainda precisam ser realizados para complementação do estudo desse forno.

Fica como recomendação para trabalhos futuros a execução desses trabalhos e que podem ser realizados a longo prazo, mas não devem ser deixados de lado para que não se percam ao longo do tempo.

Referências

BEN, Balanço Energético Nacional, 2005.

Birks, N., High Temperature Corrosion in Complex Atmospheres, *Chemical Metallurgy of Iron and Steel*, Iron and Steel Publication 146, 402-411, 1973.

Carvalho, J.A.; Lacava, P.T., *Emissões em Processos de Combustão*, Editora da UNESP, 2003.

Cook, E.A.; Rasmussen, K.E., Scale-free Heating of Slabs and Billets, in *Iron and Steel Engineer*, Pittsburgh, Pensylvania, 1970.

El-Mahallawy, F.; El-Din Habik, S., *Fundamentals and Technology of Combustion*, Elsevier Science Ltd., 2002.

Garcia, R.; Bernardes, H.J., *Manual de Utilização de Óleos Ultra Viscosos*, BR Distribuidora, 1992.

Geller, H.; Schaeffer, R.; Szklo, A.; Tolmasquim, M., Policies for Advancing Energy Use in Brazil, *Energy Policy*, 32, 1437-1450, 2004.

IPCC, *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*, Volume 2 – Energy, Chapter 2 - Stationary Combustion (<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.htm>), 2006.

Lacava, P.T., Investigação Experimental do Enriquecimento do Ar na Incineração de Resíduos Aquosos, *Tese de Doutorado*, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2000.

Lankford, W.T., The Making, Shaping and Treating of Steel, in *Heating Steel for Hot Working*, Association of Iron and Steel Engineers, Pittsburg, Pensylvania, 1985.

Lopez, J.L.; Mandujano, C., Estimation of the Impact in the Air Quality by Use of Clean Fuels (Fuel Oil Versus Natural Gas), *Catalysis Today*, 106, 176-179, 2005.

Lora, E.E.S., *Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte*, Editora Interciência, 2ª Ed., 2002.

Paz, E.P., Substituição do Diesel Usado nos Queimadores Industriais por Álcool Combustível, *Tese de Doutorado*, Universidade Estadual Paulista – Campus de Guaratinguetá, 2007.

Richels, R.; Edmonds, J., The Economics of Stabilizing Atmospheric CO₂, *Energy Policy*, 23(4-5), 373-378, 1995.

Roberts, W., *Hot Rolling of Steel*, Marcel Dekker, Inc, New York, 1983.

Rosa, L.P.; Ribeiro, S.K.; Muylaert, M.S.; Campos, C.P., Comments on the Brazilian Proposal and Contributions to Global Temperature Increase with Different Climate Responses – CO₂ Emissions Due to Fossil Fuel, CO₂ Emissions Due to Land Use Change, *Energy Policy*, 32, 1499-1510, 2004.

Rubin, E.S.; Taylor, M.R.; Yeh, S.; Hounshell, D.A., Learning Curves for Environmental Technology and Their Importance for Climate Policy Analysis, *Energy*, 29, 1551-1559, 2004.

Szklo, A.S.; Schaeffer, R.; Schuller, M.E.; Chandler, W., Brazilian Energy Policies Side-effects on CO₂ Emissions Reduction, *Energy Policy*, 33, 349-364, 2005.

Turns, S.R., *An Introduction to Combustion – Concepts and Applications*, McGraw-Hill, 2000.

Valverde, L.J.A.; Webster, M.D., Stabilizing Atmospheric CO₂ Concentrations: Technical, Political and Economic Dimensions, *Energy Policy*, 27, 613-622, 1999.