

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DE UM PROCESSO DE COMBUSTÃO DE GÁS
TOTALFLEX PARA CALCINAÇÃO DA GIPSITA EM REGIÕES
REMOTAS**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

AUTOR: MARCELO EDUARDO ALVES OLINDA DE SOUZA
ORIENTADOR: PROF. DR. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA

RECIFE, DEZEMBRO DE 2006.

S72ge

Souza, Marcelo Eduardo Alves Olinda de

Estudo de um processo de combustão de gás totalflex para calcinação da Gipsita em regiões remotas / Marcelo Eduardo Alves Olinda de Souza. - Recife: O Autor, 2006.
vi, 87 f.; il., gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2006.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica. 2. Gesso. 3. Calcinação. 4. Combustão. 5. Gás natural e GLP I.
Título.
621 CDD (22.ed.)

“ESTUDO DE UM PROCESSO DE COMBUSTÃO DE GASES TOTALFLEX PARA
CALCINAÇÃO DA GIPSITA EM REGIÕES REMOTAS”.

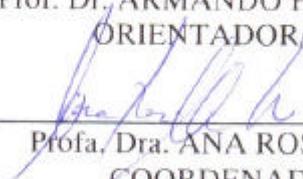
MARCELO EDUARDO ALVES OLINDA DE SOUZA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE



Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

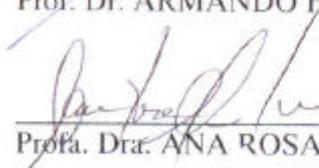


Profa. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO
COORDENADORA DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA (UFPE)



Profa. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO (UFPE)



Prof. Dr. DELSON TORIKAI (USP)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ser perseverante na busca do aprendizado e dos meus sonhos.

Aos meus pais, irmã e familiares, que mesmo longe, confiam, torcem e me incentivam nos estudos em todos os momentos da minha vida, principalmente, naqueles mais difíceis.

Aos meus tios Geraldo Olinda e Aparecida Olinda por ter dado a mim, minha irmã e alguns familiares todo o apoio para cursar uma universidade no Recife.

Ao professor Dr. Armando Hideki Shinohara, pela contribuição dedicada em minha orientação desde a iniciação científica até o atual momento de trabalho e aprendizado em que estou envolvido.

A todos os amigos da UFPE, pelo convívio diário que direta e indiretamente me ajudaram ao longo deste trabalho.

Ao termino desta dissertação de mestrado, agradeço àqueles que me apoiaram na realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica / UFPE por ter me aceitado para realizar o curso de mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq pela minha bolsa de iniciação científica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela minha bolsa de mestrado.

Aos projetos FVA/FINEP, PADCT/CNPq, PROCAD/CAPES.

Ao prof. Dário P. Ferraz pela assistência na montagem do sistema de combustão

À Josias Inojosa Filho, por ter me apoiado de forma significativa,

Ao Engenheiro Elétrico e estudante de doutorado Renato Wagner da Silva Barros.

Ao grupo de engenharia térmica (GET)/ DEMEC - UFPE, pela utilização do calorímetro.

RESUMO

A produção industrial de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) no Brasil é realizada pelo método de desidratação (calcinação) da gipsita natural ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), utilizando calor de queima essencialmente de combustíveis sólidos (lenha local, coque de petróleo) e líquidos (óleo BPF, óleo alternativo).

Aumento constante no preço da matriz energética tem motivado as calcinadoras buscarem combustíveis mais baratos. Por exemplo, em função do elevado custo de combustíveis de origem fósseis recentemente as calcinadoras estão utilizando lenha do Semi-Árido no sertão Nordestino brasileiro e contribuindo para o aumento da desertificação da região. O uso de combustíveis sólidos tais como coque de petróleo, resulta em emissão de gases nocivos que podem causar um grande impacto ambiental devido emissão de SO_x , NO_x .

Entretanto, devido ao envolvimento de vários parâmetros de calcinação, o controle é de alta complexidade, muitas vezes gerando produtos de qualidade não homogênea.

Foi realizado um estudo da viabilidade econômica e tecnológica para a combustão de gases (GN+GLP) visando à geração de calor em regiões remotas para a calcinação da gipsita para produção de gesso, calculando as propriedades térmicas da combustão da mistura do Gás Natural e GLP em diferentes proporções utilizando um software comercial *Acomb5* (IPT) e medição experimental de PCSs de combustíveis líquidos e sólidos utilizados no pólo gesseiro.

Estes resultados auxiliarão na redução do impacto ambiental minimizando o avanço da desertificação devido a derruba de árvores locais para queima visando à geração de calor, a queima dos gases em contato direto com o produto a aquecer decorrente de uma combustão limpa, com isto, não haveria contaminação do produto, gerando assim uma produção de gesso com qualidade controlada.

Palavras-chave: Engenharia Mecânica, Gesso, Calcinação, Combustão, Gás natural e GLP.

ABSTRACT

The industrial plaster production ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) in Brazil is carried through by the method of dehydration (calcination) of natural crude gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), using heat of burning essentially of solid fuels (firewood, oil coke) and liquids (oil BPF, alternative oil).

Constant increase in the price of the energy matrix has motivated the calcinadoras to search fuels cheaper. For example, in function of the raised fosseis fuel cost of origin recently the calcinadoras are using firewood of Semi-Árido in the hinterland Brazilian Northeastern and contributing for the increase of the desertificação of the region. The solid fuel use such as oil coke, results in emission of harmful gases that can cause a great ambient impact due emission of SO_x , NO_x .

However, had to the involvement of some parameters of calcination, the control is of high complexity, many times generating products of not homogeneous quality.

A study of the economic and technological viability for the combustion of gases was carried through (GN+GLP) aiming at to the generation of heat in remote regions for the calcination of crude gypsum for plaster production, calculating the thermal properties of the combustion of the mixture of Natural Gas and GLP in different ratios using a commercial software Acomb5 (IPT) and experimental measurement of PCSs of liquid and solid fuels used in the polar region plasterer.

These results will assist in the reduction of the ambient impact minimizing the advance of the desertificação due the falling of trees of local trees for burning aiming at to the heat generation, the burning of the gases in direct contact with the product to heat decurrent of a clean combustion, with this, would not have contamination of the product, thus generating a plaster production with controlled quality.

Key words: Mechanical Engineering, Plaster, Calcination, Combustion, Natural gas and LPG.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	01
2. FUNDAMENTOS.....	06
2.1 Fundamentos do Processo de Calcinação da Gipsita	06
2.2 Fundamentos da Combustão.....	09
2.2.1 Composição dos Combustíveis	10
2.2.2 Estequiometria da Combustão	14
2.2.3 Teoria da Combustão.....	15
2.2.4 Excesso de Ar	16
2.2.5 Coeficiente do Excesso de Ar.....	20
2.2.6 Limite de Inflamabilidade	21
2.2.7 Poder Calorífico.....	22
2.2.8 Temperatura de Chama	24
2.2.9 Poluentes Atmosféricos.....	26
3. CONCEITOS	27
3.1 Combustíveis	27
3.1.1 Combustíveis Líquidos	27
3.1.2 Combustíveis Sólidos	28
3.1.3 Combustíveis Gasosos	33
3.1.4 Gás Natural e GLP	33
3.1.5 Transporte dos Gases.....	38
3.1.6 Possibilidade de transferência de tecnologia para produzir GNL	40
3.1.7 Intercambiabilidade dos Gases Combustíveis	41
3.1.8 Velocidade de Chama:.....	42
3.2 Conceito dos Tipos de Fornos	47
3.2.1. Tipos de Fornos:	47
3.3 Conceito de Queimadores.....	52
3.3.1 Queimadores de Gases	53
3.4. Avaliação do Rendimento da Combustão	54
3.5 Cálculo da Proporção Teórica de Ar/Combustível.....	55
3.6 Característica do Queimador Utilizado	57
4. MATERIAIS E MÉTODOS	58
4.1. Calorímetro	58
4.1.1 Medição do PCS dos Combustíveis Sólidos, Líquidos no Calorímetro.	58
4.2. Amostras de Combustíveis	60
4.3 Programa Acomb	60
4.4 Processo de Combustão no Queimador e seus Componentes	63
4.5 Sistema de Regulação da Pressão.....	65
4.6 Controle da Mistura Ar-Gás.....	66
4.7 Software Labview.....	68

5. RESULTADO E DISCUSSÕES	72
5.1 Medição dos Valores do Poder Calorífico dos Combustíveis Sólidos e Líquidos no Calorímetro.	72
5.2. Estudo da Viabilidade Econômica do uso de Gás para Calcinação da Gipsita.....	72
5.3 Resultado dos Cálculos das Propriedades Térmicas da Mistura dos Combustíveis Gasoso pelo Programa Acomb	74
5.4 Diagrama Esquemático de um Processo de Combustão de Gases Totalflex para Geração de Calor para Calcinação da Gipsita.....	76
6. CONCLUSÃO	78
7. TRABALHOS FUTUROS	79
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
ANEXO 1.....	82
ANEXO 2.....	87

1. INTRODUÇÃO

A produção industrial de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) no Brasil é praticada pelo método de desidratação controlada de gipsita natural ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), utilizando calor oriundo da queima essencialmente de combustíveis sólidos e líquidos. A desidratação da gipsita é uma reação endotérmica, que ocorre acima de 106°C , quando a pressão de vapor da água de cristalização atinge a pressão ambiente. O consumo de energia teórico para a desidratação da gipsita é de 154.000 kcal/ton de gesso produzido (ITEP, 2006).

A Gipsita é um mineral abundante no Brasil de acordo com o Departamento de Produção Mineral-DNPM e Mineral Commodity Summaries-2006, o país tem reservas de 1.233.485.000 toneladas e apresentou a produção de 1.582.248 toneladas no ano de 2005. Este último teve um crescimento da ordem de 7% em relação a produção de Gipsita do ano anterior. Cerca de 98% das reservas brasileiras estão concentradas na Bahia (45%), Pará (32%) e Pernambuco (21%), ficando o restante distribuído, em ordem decrescente, entre o Maranhão, Ceará, Piauí, Tocantins e Amazonas. A porção das reservas que apresentam melhores condições de aproveitamento econômico estão situadas na Bacia do Araripe, região de fronteira dos Estados do Piauí, Ceará e Pernambuco, com destaque para as deste último. As reservas do Pará, controladas pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil) ainda estão sem concessão de lavra.

A produção de Gipsita provém dos Estados de Pernambuco (1.414.292 toneladas, 89,4% da produção nacional), Ceará (69.979 ton, 4,4%), Maranhão (52.869 ton, 3,3%), Amazonas (17.800 ton, 1,1%), Tocantins (16.830 ton, %) e Piauí (10.478 ton, 0,7%). As minas da Bahia continuam em fase de desenvolvimento e por isso não houve produção. Cinco empresas, operando em doze minas e distribuídas em quatro Estados, geraram o equivalente a 63% da produção nacional (ROM): Mineradora São Jorge S.A. (Grupo Laudenor Lins); Cia. de Cimento Portland Poty (Grupo Votorantim); Holcim Brasil S.A. (Grupo Holderbank); CBE - Companhia Brasileira de Equipamento e fábricas (Grupo Nassau) e Mineradora Rancharia Ltda /Supergesso S.A. Indústria e Comércio (Grupo Inojosa). (DNPM, 2006).

Através de um processo de calcinação em fornos tubular rotativos, forno marmitta e forno panela, dão-se origem ao gesso.

Ao final de 2005, existiam setenta e duas minas no país. Dentre estas, trinta e cinco em atividade e trinta e sete paralisadas. Neste mesmo ano, a produção nacional de gesso foi de 731.921 toneladas com crescimento de cerca de 14% em relação ao ano anterior. O Pólo Gesseiro do Araripe/PE que, além das quarenta e nove minas, abrange cerca de cem calcinadoras e aproximadamente trezentas pequenas unidades produtoras de artefatos, é também o principal produtor nacional de gesso, participando com 591.604 t (81% da produção nacional). Há produção também no Ceará (57.600 t, 8%), em São Paulo (36.997 t, 5%), no Rio de Janeiro (33.123 t, 5%), em Tocantins (12.118 t, 2%) e no Maranhão (480 t). Algumas fábricas de cimento das regiões sul e sudeste utilizam, como substituto da gipsita, o fosfogesso, que é gerado como subproduto no processo de obtenção do ácido fosfórico nas indústrias de fertilizantes fosfatados. (DNPM, 2006).

Atualmente no Pólo Gesseiro do Araripe-PE, a produção de gesso é realizada através de queima indireta e utilizando óleo BPF (Baixo Ponto de Fluidez); coque de petróleo; lenha (que geralmente é clandestina). Como resultado há emissões de gases, que causam um grande impacto ambiental e por falta de controle do processo de calcinação o produto final apresenta qualidade insatisfatória, deixando assim de adquirir competitividade para exportação (MOREIRA, 2005).

De 1999 até o atual momento, o Pólo Gesseiro vem enfrentando um grande problema: a volta da matriz energética para a lenha, devastando a mata nativa e provocando a desertificação (MOREIRA, 2005).

Em 2005 segundo o presidente do Sindusgesso da época, Laudenor Lins Júnior, até 1999 quase todas as empresas usavam óleo BPF, mas o óleo, como todos os derivados do petróleo, teve um aumento brutal de preço e o setor não conseguiu repassar a diferença para o preço final e com isso os produtores começaram a queimar lenha, ocasionando assim um dos principais problemas do setor (MOREIRA, 2005).

Segundo estudo da empresa Geophoto, contratada pela secretaria de ciência e tecnologia (SECTMA) do governo do estado, entre 1994 a 2004, houve um aumento de 186% no consumo de lenha da região. Apenas as calcinadoras de gesso são responsáveis pelo consumo de 92% da lenha utilizada. Atualmente, está se devastando 8818 hectares de terras por ano, sendo necessário buscar mata ilegal a até 40 quilômetros de distância e com um preço maior, proveniente do manejo florestal. Estima-se que 70% da madeira

consumida no local sejam de desmatamento ilegal. O reflorestamento é resposta de médio prazo e com isso é necessário incluir outras fontes energéticas para a produção de gesso (MOREIRA, 2005).

A melhor solução, segundo os empresários, seria a extensão de um gasoduto até Araripina, mas trata-se de uma obra com baixa viabilidade econômica, pois são quase 700 km de distância passando por regiões de menor potencial econômico (MOREIRA, 2005).

As deficiências da logística de transporte e a não disponibilidade de um energético que substitua a lenha na calcinação, continuam sendo os maiores empecilhos ao desenvolvimento do Pólo Gesseiro do Araripe-PE. Em termos de sustentabilidade, o Pólo apresenta vulnerabilidades que se estendem por toda a cadeia produtiva. Na mineração, a mitigação dos impactos ambientais gerados pelas cavas e pela disposição do capeamento estéril permanece carecendo de atenção e solução. Na atividade de calcinação, além da degradação ambiental provocada pela utilização da lenha, existem denúncias quanto à incidência de doenças do trabalho provocadas pela alta concentração de poeira no ambiente interno das calcinadoras. A fabricação de artefatos de gesso gera resíduos, cuja disposição incorreta provoca problemas ambientais (DNPM, 2006).

A utilização do gás natural está se intensificando e isto tem-se refletido nos preços. Houve um acréscimo de apenas 0,46% nas reservas provadas em 2005, enquanto a produção cresceu 2,19%. Com base em dados do Banco Mundial, o preço médio nos EUA e na Europa foi, nesta ordem, de US\$ 5,89 e US\$ 4,28 por milhão de btu em 2004 e US\$ 8,92 e US\$ 6,33 em 2005 (DNPM, 2006).

O Brasil, pelo critério utilizado no *BP Amoco Statistical Review of World Energy 2006*, detém, aproximadamente, 0,2% das reservas mundiais e produz 0,4% de todo o gás natural do mundo. Já a Bolívia e a Argentina, países dos quais importou em 2004 e 2005, possuem apenas 0,4% e 0,3% das reservas e 0,4% e 1,7% da produção, respectivamente (DNPM, 2006).

Aproximadamente 3/4 das reservas brasileiras estão situadas no oceano, sendo que pouco mais da metade do total encontra-se em águas profundas (*off-shore*). Ocorre predominantemente associadas ao petróleo, característica esta que vincula consideravelmente a oferta de gás à produção de óleo cru (DNPM, 2006).

A Produção Nacional de Gás Natural em barris equivalentes de petróleo (apurada pela ANP) foi de 107.512.273 em 2004 e de 112.124.438 em 2005, perfazendo um aumento de 4,29%.

Conforme dados da Petrobrás, o setor de gás natural no Brasil cresceu 1.790% entre 1980 e 2004, respondendo por 8,9% em 2004 e 9,3% em 2005 da matriz energética nacional. Estima-se que sua participação na matriz chegará a 12% em 2015 (DNPM, 2006).

Conforme o Plano de Negócios 2007-2011 aprovado pelo Conselho de Administração da Petrobrás, serão destinados US\$ 17,6 bilhões para o desenvolvimento da cadeia do gás natural brasileiro que, acompanhados de US\$ 4,5 bilhões oriundos de parceiros, configurarão uma inversão de US\$ 22,1 bilhões, montante 71% superior ao previsto no plano anterior à crise com a Bolívia em meados de 2006. Serão US\$ 7,5 bilhões somente no negócio de Gás e Energia, dos quais US\$ 6,5 bilhões aplicados na expansão da rede de gasodutos e na instalação de terminais de regaseificação de GNL. Aos atuais 8.860 km de dutos em operação, 4.160 km serão acrescentados (DNPM, 2006).

Prevê-se para 2008 a conclusão do Gasoduto Urucu-Manaus e do Gasene (que fará a interligação do Sudeste ao Nordeste). Este último será formado por trechos que vão de Cabiúnas (RJ) até Vitória (ES), de Vitória a Cacimbas (ES) e de Cacimbas ao município de Catu (BA), totalizando 1.215 quilômetros. Ainda sem data definida, a Petrobrás também pretende investir na malha de gasodutos do Sudeste, no Gasoduto Rio-Belo Horizonte (Gasbel), na malha do Nordeste e no trecho sul do Gasoduto Bolívia-Brasil (Gasbol) para abastecer a região Sul com o gás produzido no Sudeste (DNPM, 2006).

Os projetos de extração para a Bacia de Santos (SP), Espírito Santo e Campos (RJ) terão sua concretização antecipada pela Petrobrás com o intuito de elevar a participação da produção nacional na oferta para o mercado interno (DNPM, 2006).

Constata-se em vários países, inclusive no Brasil, uma ampliação da participação do gás natural na matriz energética como substituto de outros combustíveis fósseis nos últimos anos. Entretanto, seu preço tem se demonstrado menos sensível às alterações na demanda graças ao comportamento da oferta, atualmente mais elástica que a do petróleo (DNPM, 2006).

Em 2003, quando ainda havia a perspectiva de uma oferta de gás natural abundante e a preços relativamente baixos, a Petrobrás lançou o "Plano de Massificação do Uso do Gás

Natural" para estimular a demanda com respaldo nas importações da Bolívia e nas reservas do Nordeste, de Urucu (AM) e das Bacias de Campos (RJ) e Santos (SP), dando continuidade ao processo iniciado anos antes em função do Gasbol, cuja construção e a operação comercial tiveram início, respectivamente, em 1997 e 1999 (DNPM, 2006).

O impacto desta política pode ser mensurado pela majoração da participação deste insumo na matriz energética brasileira e pela crescente dependência do gás importado decorrente da lenta ampliação da produção nacional frente à pujante demanda interna (DNPM, 2006).

Algumas empresas do pólo começaram a experimentar o coque como fonte energética, mas o seu uso depende de filtros especiais para o controle de emissão de gases, o que representa mais custos. Como também é derivado do petróleo, o coque sofre a influência do câmbio e do preço internacional, o que pode dificultar a sua expansão como matriz energética substituta (MOREIRA, 2005).

Cada forno apresenta diferentes características de construção, condições de operação, assim como eficiência térmica para obter a mesma quantidade de gesso. Entretanto, devido ao envolvimento de vários parâmetros de calcinação, o controle é de alta complexidade, muitas vezes gera produtos de qualidade não homogênea.

A maioria dos fornos utilizados para produção de gesso é de baixa eficiência térmica e o controle dos principais parâmetros de calcinação, tais como temperatura e tempo de residência, são realizados manualmente. Como consequência, é produzido gesso de qualidade insatisfatória, deixando assim de adquirir competitividade para exportação.

Motivado em desenvolver uma tecnologia que contemple alta-eficiência, mínimo impacto ao ambiente, gere produtos de alta qualidade e custos relativamente baixos de algumas matrizes energéticas, fez-se um trabalho objetivando mostrar o resultado dos cálculos das propriedades térmicas da combustão, tais como poder calorífico do Gás Natural, GLP misturando Ar combustível em diferentes proporções. Para isto, foi utilizado o software Acomb5 do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo) que auxiliou nos cálculos da combustão, interagindo com os principais parâmetros da mistura gasosa.

Utilizou-se o software *LabVIEW* da *National Instruments*, instrumento mundialmente utilizado para a automação do processo, onde características como flexibilidade e

estabilidade são o grande diferencial, e o sistema escolhido foi o *Windows*. O ambiente virtual de programação do processo foram fatores decisivos na seleção da ferramenta para a automação e controle do processo de calcinação da Gipsita.

O presente trabalho tem por objetivo avaliar a possibilidade de alterar a mistura Ar – combustível através do computador monitorando a vazão de Ar, conseqüentemente a temperatura de queima. Em função disto, comparar os resultados obtidos no queimador e no programa Acomb5 para saber a melhor eficiência que se deve trabalhar com o combustível gasoso.

2. FUNDAMENTOS

O potencial energético constitui-se uma das principais bases do desenvolvimento econômico na sociedade atual. A intensificação da produção, a elevação do nível tecnológico, a melhora das condições de trabalho na indústria e na agricultura estão condicionadas pelo estado atual do potencial energético (VLASSOV, 2001). Os gastos com energia determinam a eficiência da produção. Quanto menor o gasto de energia para a produção de um produto, tanto mais automatizada e mecanizada a produção e tanto mais eficiente será a tecnologia de produção (VLASSOV, 2001). Com isso, o aumento do consumo de energia torna mais importante a eficiência de aproveitamento do combustível e

a diminuição de prejuízos provocados por impurezas produzidas na combustão (VLASSOV, 2001). O melhor aproveitamento de um combustível está diretamente relacionado à temperatura teórica de combustão, à determinação do excesso ótimo de ar na fornalha e ao controle de qualidade de combustão (VLASSOV, 2001).

2.1 FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE CALCINAÇÃO DA GIPSITA

O processo de produção de gesso compreende as seguintes operações:

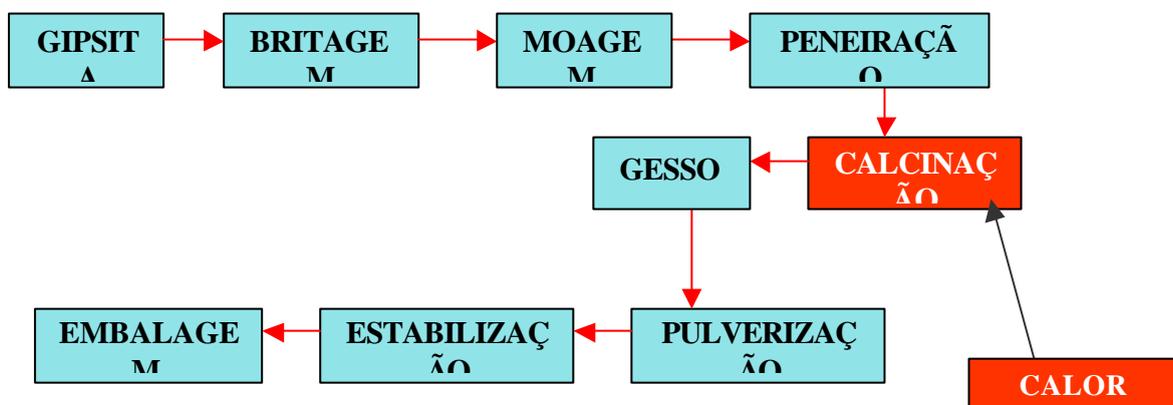
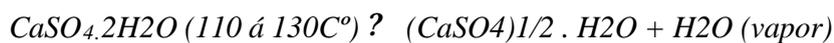


FIGURA 2.1: Fluxograma do processo de produção de gesso

☞☞ **GIPSITA** - É uma rocha de origem sedimentar (constituída essencialmente de sulfatos de cálcio di-hidrato, hemidrato e anidrita) e através da redução a pó e desidratação térmica dará origem ao gesso.

Reação de obtenção:



? $CaSO_4 \cdot 2H_2O$: Gipsita (sulfato de cálcio dihidratado)

? $(CaSO_4)_{1/2} H_2O$: Gesso comum (Sulfato de cálcio hemidratado)

A mineração da gipsita é feita a céu aberto, com bancadas variando em torno de 15m de espessura. Inicialmente os grandes blocos de gipsita passam por uma britagem preliminar na própria mineração, e depois uma britagem secundária na calcinadora (PERES et al., 2001). A mineração da gipsita, no Araripe, é realizada de forma semi-mecanizada, com a utilização de equipamentos como: rompedores hidráulicos, marteletes hidráulicos, tratores de esteira e etc. (PERES et al., 2001). Atualmente existem 18 minas que produzem cerca de 1,8 milhões de toneladas de minério por ano (PERES et al., 2001).

✂✂ **BRITAGEM** - Consiste na fragmentação de blocos do minério (matações) e normalmente são utilizados britadores de mandíbulas e rebitadores de martelo (PERES et al., 2001).

✂✂ **MOAGEM** - A depender do tipo de forno utilizado, a gipsita britada pode ser moída em moinhos de martelo antes de ser enviada para etapa seguinte (PERES et al., 2001).

✂✂ **PENEIRAÇÃO** - A depender da existência de plantas de calcinação, com fornos de tipos diferentes, a gipsita moída pode ser peneirada, em peneiras vibratórias, e separada em funções para usos específicos (PERES et al., 2001).

✂✂ **CALCINAÇÃO** - A operação de calcinação, na qual a gipsita se transforma em gesso (CaSO_4) pela ação do calor, pode ser realizada a pressão atmosférica, para obtenção do gesso- β (beta), ou em equipamentos fechados e sob pressão maior que a atmosférica, para obtenção do gesso- α (alfa) (PERES et al., 2001).

1) **Calcinação sob pressão atmosférica**

Esta calcinação é utilizada para a produção de gesso tipo β , normalmente realizada em fornos rotativos e tubulares com diâmetro na faixa de 1 a 3 m e comprimento na faixa de 12 a 20 m. A gipsita moída é introduzida logo após a câmara de combustão e transita pelo forno até a outra extremidade, onde é separada dos gases de combustão. Essas condições são utilizadas para a produção do gesso tipo β (PERES et al., 2001).

?? **Aquecimento Direto:** Quando os gases entram em contato com o minério

?? **Aquecimento Indireto:** Quando o fogo atinge um metal e esse transfere o calor para o minério.

?? **Produção Contínua:** Quando o processo funciona sem paradas

Ex: Fornos rotativo tubulares (produção de gesso- β).

?? **Produção por Bateladas:** Quando o processo é interrompido periodicamente

Ex: Forno panela, marmitta horizontal (rotativa), marmitta vertical (estática), barriga quente (produção de gesso-?).

2) Calcinação sob pressão maior que a atmosférica

No Brasil, a exemplo da Europa e dos Estados Unidos, se utiliza o processo autoclavado com injeção de vapor e um outro processo mais moderno, que consiste na desidratação da gipsita em meio aquoso, permitindo com isso a produção de gesso com formato pré-definido. Essas condições são utilizadas para produzir o gesso-? (PERES et al., 2001).

- Aquecimento Direto com um fluido térmico (água/vapor)
- Altoclave - aquecimento direto com vapor (produção do gesso-?)
- Reator - aquecimento direto com água (produção do gesso-?)

PULVERIZAÇÃO - O gesso, depois de calcinado, é normalmente moído em moinho de martelo, moagem fina especificada pelas normas da ABNT (PERES et al., 2001).

ESTABILIZAÇÃO - A depender das condições de calcinação, o gesso pode passar por um período de ensilamento (armazenado em depósito) ou estabilização com a finalidade de obter homogeneidade na composição final (PERES et al., 2001).

EMBALAGEM - O gesso é normalmente embalado em sacos contendo 20, 40,1000 kg ou outras embalagens predefinidas (PERES et al., 2001).

A TABELA 2.1 mostra que a calcinação da Gipsita sob diversas temperaturas permite a obtenção de produtos diferenciados.

TABELA 2.1 :Característica do gesso em função da temperatura de aquecimento

TEMP. DE CALCINAÇÃO	PROCESSO	PROD. OBTIDO / APLIC
110 - 150 °C	A gipsita perde uma parte da água combinada para se transformar em Hemidrato de cálcio ($CaSO_4 \cdot 1/2 H_2O$).	Gesso para fundição
170 - 250 °C	O Hemidrato de cálcio se transforma em anidrita ($CaSO_4$) instável e muito ávido por água.	Anidrita ativa ou solúvel. Utilizado para elaboração de mistura de gesso rápido para diminuir o tempo de pega.
170 - 300 °C	Nessa faixa de temperatura obtém a anidrita, totalmente desidratada e com o tempo de pega muito longo.	Anidrita insolúvel. Visa a produção de Gesso para revestimento.
600 – 900 °C	A essa temperatura obtém um produto, $CaSO_4$ inerte e que não apresenta o fenômeno da pega.	_____

Fonte: O Gesso - Produção e Utilização na Construção Civil (2001).

2.2 FUNDAMENTOS DA COMBUSTÃO

Combustível é toda substância capaz de reagir com o oxigênio do ar atmosférico, liberando energia térmica (calor) e luz. E combustão é a reação rápida entre o oxigênio e os constituintes de um combustível (VLASSOV, 2001; GARCIA, 2002). Porém, este fenômeno envolve reações bastante complexas de vários estágios dependendo de vários fatores: combustível e sua composição, grau de mistura com o oxigênio que é influenciado pela geometria do queimador e da câmara de combustão, bem como a temperatura que a mistura está submetida. O conjunto destes fatores define a maior ou menor eficiência de queima assim como o maior ou menor prejuízo para o meio ambiente (VLASSOV, 2001; GARCIA, 2002).

Na combustão o objetivo é obter o máximo possível de calor. Não basta, porém que o rendimento calorífico atenda às necessidades requeridas, é preciso que isto seja feito de forma econômica. A fim de maximizar-se o rendimento da combustão, deve-se obter o

melhor aproveitamento possível do potencial energético do combustível, através de alguns fatores operacionais, como:

- Proporcionar uma perfeita mistura ar-combustível.

A íntima mistura do combustível com o ar aumenta a superfície de contato entre ambos e têm influência decisiva na velocidade de combustão. Quanto mais íntima a união dos elementos, melhor a combustão (BIZZO, 2003).

2.2.1 Composição dos Combustíveis

Os combustíveis industriais apresentam em sua composição alguns dos seguintes elementos ou compostos: Hidrogênio (H), Carbono (C), Enxofre (S), Oxigênio (O), Nitrogênio (N), Água (H₂O), assim como alguns elementos incombustíveis: Cinzas (Z) (VLASSOV, 2001; BIZZO, 2003).

O Carbono e Hidrogênio são os elementos que mais contribuem para o poder calorífico dos combustíveis, sendo que o enxofre participa em pequena parcela (CETEC, 1988; BIZZO, 2003). Dentre eles, o carbono é o elemento mais importante, pois tem maior poder calorífico (VLASSOV, 2001).

Para a queima desses combustíveis é necessária a utilização do oxigênio, geralmente fornecido pelo ar atmosférico. O oxigênio está geralmente presente em combustíveis vegetais, sendo que sua presença diminui o poder calorífico dos combustíveis, bem como as exigências teóricas de ar de combustão (BIZZO, 2003).

Embora o enxofre seja também combustível, ele traz conseqüências prejudiciais ao meio ambiente e aos equipamentos, já que seus produtos de combustão, SO₂ e SO₃, em presença de umidade formam ácido sulfúrico, que irá atacar as partes mais frias da instalação. H₂SO₄ é o principal causador de "chuva ácida", com conseqüências desastrosas ao meio ambiente (BIZZO, 2003). Se a atmosfera da combustão for redutora, pode haver formação de H₂S, ou outros compostos, que são perigosos e produzem mau cheiro (BIZZO, 2003). O enxofre nos combustíveis líquidos é encontrado na forma de mercaptanas (um radical R-S-H) ou também na forma de dissulfetos (radicais R-S-R) (BIZZO, 2003).

O Nitrogênio é responsável pela formação de diversos óxidos: N₂O, NO e NO₂, que são compostos de alta irritabilidade para as mucosas além de reagirem com o ozônio da atmosfera (O₃). Outros elementos ocorrem eventualmente nos combustíveis em

concentrações muito pequenas, porém de efeitos não menos importantes. Os metais são mais frequentes: Níquel, Vanádio, Cálcio, Sódio, Potássio e Manganês (BIZZO, 2003).

O vanádio forma um óxido: V_2O_5 , que é catalisador da reação de formação de ácido sulfúrico, agravando as consequências de corrosão com combustíveis que contenham enxofre. Sódio e potássio (metais alcalinos) contribuem para a corrosão a baixa temperatura, formando compostos de baixo ponto de fusão, podendo inclusive atacar materiais refratários (BIZZO, 2003).

A água é normalmente encontrada em todos os combustíveis, principalmente nos combustíveis sólidos, na forma de umidade, e traz duas consequências: diminuição do poder calorífico e aumento da temperatura do ponto de orvalho do ácido sulfúrico, aumentando os problemas de corrosão (BIZZO, 2003).

As condições ideais da combustão são aquelas em que o excesso de ar de combustão é o mínimo necessário para garantir a queima completa do combustível. Assim, a eficiência de combustão é maximizada, reduzindo a formação dos produtos da combustão: CO_2 , H_2O , SO_x e NO_x (CÓRNER, 2006).

Dada a análise elementar de um combustível em termos de C, H, O, S, etc., é possível calcular-se o requisito teórico de ar e a quantidade e composição dos produtos de combustão (BIZZO, 2003).

A combustão do combustível pode ser completa ou incompleta. Materiais ou compostos são considerados combustíveis industriais quando sua oxidação pode ser feita com liberação de energia suficiente para aproveitamento industrial (BIZZO, 2003).

A combustão completa ocorre quando na fornalha há o oxigênio do ar na quantidade suficiente para a oxidação completa de todos os elementos combustíveis (VLASSOV, 2001).

Neste caso, no processo de combustão na câmara de combustão, os elementos químicos combustíveis do combustível (carbono C; hidrogênio H; enxofre S) reagem com o oxigênio do ar formando o CO_2 (dióxido de carbono), H_2O (vapor da água), SO_2 (dióxido de enxofre) e o N_2 (nitrogênio) do ar, que é considerado um gás inerte e com isto, não participa das reações químicas (VLASSOV, 2001).

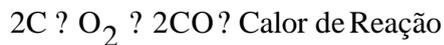
A combustão consiste no seguinte processo:

TABELA 2.2: Reação de combustão

Reações	Produto	Calor liberado por kmol de elemento queimado (kJ/kmol)
$C + O_2$	CO_2	393.500
$H_2 + 1/2 O_2$	H_2O	241.800
$S + O_2$	SO_2	29.300

Fonte: Bizzo, 2003.

Quando há uma quantidade de ar menor que a necessária, a combustão é dita incompleta. Neste caso o hidrogênio e o enxofre são os elementos mais ativos que o carbono. A falta do ar influi sobre a reação da queima do carbono e nos produtos da combustão aparecerá CO (monóxido de carbono) nas reações químicas (VLASSOV, 2001):



O monóxido de carbono CO é um gás combustível, pois ao reagir com o oxigênio do ar pode liberar calor, porém o aproveitamento do combustível e conseqüentemente o rendimento do equipamento irão diminuir. Além disto, o monóxido de carbono é um gás tóxico e provoca a poluição do meio ambiente (VLASSOV, 2001).

1) Teores de CO_2 e O_2

Para obter-se uma alta eficiência da combustão será muito importante minimizar as perdas de calor. Um dos meios de se controlar a combustão é através da análise dos gases da chaminé, utilizando-se aparelhos medidores dos percentuais de CO_2 e O_2 denominados Bacharach, Fyrite, Brigon, Orsat, etc.

Para diminuir as perdas de calor, o teor de CO_2 deve ser alto. Mas nem sempre um teor de CO_2 alto significa bom rendimento, portanto o ideal para combustões mais efetivas é a análise do percentual de outro gás, embora a medição de apenas um já é indicativo da qualidade da queima, principalmente se aliarmos a isto outras características como a cor da fumaça da chaminé e da chama. Após a obtenção dos valores medidos, deve-se compará-los com os considerados ideais e proceder às correções necessárias (FIEP, 2006).

TABELA 2.3: Teor de CO_2 e O_2

Combustível	Teor CO_2 (%)	Teor O_2 (%)
Óleo combustível	13 - 14	3 - 3,5
Lenha	12 - 13	6 - 7

Gás Natural	10,5 - 11	1 - 2
--------------------	------------------	--------------

Fonte: FIEP, 2006.

Valores baixos de CO₂ significam excesso exagerado de ar (também conhecido como mistura pobre) no processo de combustão, e pode ser causado por atomização imperfeita, tiragem excessiva ou entrada falsa de ar na fornalha (FIEP, 2006).

A avaliação da combustão também pode ser feita através da diferenciação da coloração da chama e da fumaça da chaminé. Apesar de não ser um controle muito preciso e que apresenta variações nas colorações. Dependendo do tipo de combustível queimado ele poderá fornecer indicações do tipo de queima apresentada. De um modo geral, essas colorações são as seguintes:

TABELA 2.4: Cor da Fumaça da Chaminé e da Chama.

	Óleo Combustível		Gás Natural	
	Fumaça	Chama	Fumaça	Chama
Ideal	Leve névoa cinza clara	Laranja-Amarelada	Azulada, Quase invisível	Azul celeste
Excesso exagerado Ar (Mistura Pobre)	Branca, volumosa	Amarela Brilhante	Branca	Azul clara
Falta de Ar (Mistura Pobre)	Escura, Preta	Amarela Avermelhada	Escura, Preta	Azul Amarelada

Fonte: FIEP, 2006.

2) Fuligem

Outro indicador utilizado para avaliar a combustão é a medição do índice de fuligem. Fuligem são partículas de combustíveis não completamente queimadas nos gases de exaustão.

A presença da fuligem acumulada em superfícies de troca de calor diminui a troca térmica e provoca o aumento no consumo de combustível, além de aumentar a poluição do ar quando descarregada pela chaminé (FIEP, 2006).

O método mais empregado para verificar a quantidade de fuligem em uma combustão é através do “Teste de Fumaça” ou “Smoke Test”, onde se utiliza uma bomba de

amostragem para captar uma amostra gasosa o qual irá atravessar um papel filtro que posteriormente será comparado com uma escala padrão (FIEP, 2006).

A escala de comparação do índice de fuligem possui 10 manchas (que correspondem ao nível de material particulado), indo do branco (excesso de ar) ao negro (falta de ar). Esse método é padronizado pelas normas ASTM e DIN para controle da combustão de óleos combustíveis e carvões. O índice de fuligem não deve ultrapassar a 3.

Uma fuligem excessiva pode ter como causas: falta de ar, temperatura e pressão inadequada do óleo, pressão inadequada do fluido atomizante e bico do queimador sujo (FIEP, 2006). (Escrever o significado das siglas)

3) Temperatura dos Gases da Chaminé

A fim de obtermos informação sobre a forma pela qual a transferência de calor se processa no interior de um equipamento térmico, medimos a temperatura dos gases na chaminé com um termômetro situado em sua base (FIEP, 2006).

Temperaturas muito altas são indicativas de perdas de calor e combustível, podendo indicar que as superfícies de troca estão sujas ou se está trabalhando com excesso de ar. Entretanto, para queima de óleo combustível e carvão (que contém enxofre em sua composição) a temperatura de saída dos gases não deve ser inferior ao ponto de orvalho do enxofre para evitar danos com corrosão (essa temperatura não deve ser inferior a 200°C) (FIEP, 2006).

Atualmente o combustível orgânico é o mais usado na indústria podendo ser classificado em combustíveis naturais (fósseis), os quais são extraídos da natureza e utilizados nestas condições como o gás natural, por exemplo, e os combustíveis artificiais que são obtidos por processos tecnológicos como o GLP (VLASSOV, 2001).

Do ponto de vista de origem, os combustíveis podem ser classificados como: fósseis (não renováveis) e vegetais (renováveis), representados pela TABELA 2.5 abaixo (BIZZO, 2003).

TABELA 2.5: Classificação dos combustíveis

Origem	Combustível Sólido	Derivado
FÓSSEIS	Petróleo	GLP Gasolina Óleo Diesel Óleo Combustível Óleo Resíduo
	Gás Natural	
	Fleto Retornado Carvão Mineral	Gases manufacturados
VEGETAIS	Carvão-de-liquor	Bagaço de cana Alcool Etílico
	Lenha	Carvão Vegetal Gases manufacturados Metano
	Resíduos Vegetais	Bicxão

Fonte: Bizzo, 2003

2.2.2 Estequiometria da Combustão

A maioria dos processos industriais de combustão utiliza o ar ambiente como fonte de fornecimento de oxigênio para a combustão. O conhecimento das necessidades de ar para combustão, bem como da composição e volume dos produtos de combustão é fundamental para o projeto e controle de equipamentos de combustão (BIZZO, 2003).

O ar atmosférico apresenta 20,9% de Oxigênio, 78,1% de Nitrogênio, 0,9% de Argônio e 0,1% de outros gases em sua composição volumétrica. Mas para fins práticos o ar atmosférico apresenta uma mistura de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio em sua composição volumétrica ou 23% de oxigênio e 77% de nitrogênio em sua composição mássica para uma temperatura de 25 °C e pressão de 1atm (BIZZO, 2003).

A composição do combustível pode ser indicada por análise química em que é determinada a composição elementar, ou seja, os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, enxofre, nitrogênio, umidade e resíduo fixo, no caso de combustíveis sólidos e líquidos, e os teores de monóxido de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e hidrocarbonetos no caso dos combustíveis gasosos (CETEC, 1988). A análise dos combustíveis sólidos e

líquidos fornece as porcentagens em peso dos constituintes, enquanto que as análises dos combustíveis gasosos fornecem as porcentagens em volume (CETEC, 1988).

A utilização de combustíveis líquidos e gasosos em vez de combustíveis sólidos melhora as condições de trabalho e higiene, reduz o custo do equipamento e aumenta o rendimento de geradores de vapor e fornos (VLASSOV, 2001). Porém, os combustíveis líquidos do petróleo utilizados nas indústrias, como os óleos combustíveis pesados, contribuem para a deterioração do meio ambiente devido à dificuldade de se manter as condições ideais para atomização (divisão do fluxo em partículas menores), presença de elementos como o enxofre e alguns metais em pequenas porcentagens como o vanádio, níquel, sódio e ferro (CÓRNER, 2006).

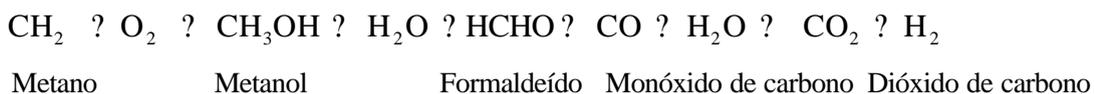
As vantagens de se utilizar os combustíveis gasosos em relação aos outros tipos de combustíveis, são as facilidades que eles têm para queimar, já que não há necessidade de atomização e misturam-se facilmente com o ar, podendo queimar em grandes quantidades e com ausência de cinzas. Além de boa economia no processo de combustão do gás combustível, há facilidade de controle na manutenção dos equipamentos e de transporte.

2.2.3 Teoria da Combustão

Há três teorias para explicar a combustão de hidrocarbonetos:

Teoria da hidroxilação:

Aplicado à queima de hidrocarbonetos gasosos estabelece que quando o hidrocarboneto queima, há primeiramente uma adição ou associação de oxigênio à molécula de hidrocarboneto, produzindo compostos hidroxilados instáveis, que por sua vez, se transformam em aldeídos, os quais se rompem e se oxidam até se ter formaldeído e em seguida é oxidado a CO e água e o CO posteriormente a CO₂. As reações podem ser representadas, para a queima do metano, na seguinte seqüência (GARCIA, 2002):

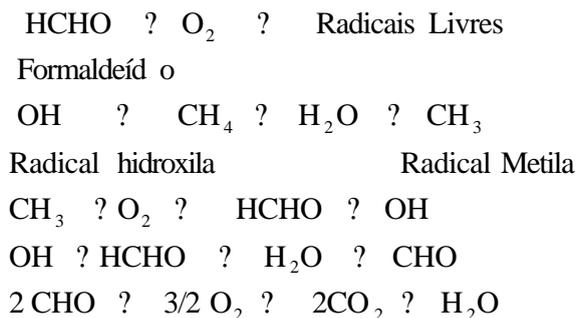


Teoria da Formação de Radicais Livres

É a teoria mais aceita para a queima de hidrocarbonetos gasosos, pois se estabelecem na queima do metano. As reações em cadeia são iniciadas em velocidades

proporcionais à concentração de formaldeído e este, por sua vez, sofre um aumento gradual até que um valor estacionário seja atingido, quando então, a velocidade de sua formação fica igual a velocidade de sua destruição (GARCIA, 2002):

O mecanismo da queima pode ser representado da seguinte forma:



O ponto de ataque do oxigênio no hidrocarboneto é considerado ser sempre nos átomos de hidrogênio, sejam eles primários secundários ou terciários.

Teoria do Craqueamento

Ocorre normalmente ao se queimar hidrocarbonetos mais pesados, de cadeia mais longa, como os óleos combustíveis, por exemplo, aplica-se nos casos em que não há tempo suficiente para estabelecer uma boa mistura entre o ar e o combustível e, ao mesmo tempo, a taxa de combustível for muito alta, não formando compostos hidroxilados e a alta temperatura a que o combustível é submetido provoca a quebra das moléculas do hidrocarboneto em carbono e hidrogênio que reagem separadamente com o oxigênio.

2.2.4 Excesso de Ar

O excesso de ar é a quantidade de ar adicionado, além da estequiométrica, que se introduz nos queimadores, de modo a garantir toda a queima do combustível deixando teores desprezíveis de monóxido de carbono e carbono livre nos gases de combustão. O excesso de ar mínimo necessário depende de vários fatores, dentre os quais o combustível utilizado, pressão disponível do lado do ar e projeto do queimador são as mais importantes (GARCIA, 2002).

O consumo real de ar de queima depende do excesso de ar usado no queimador, uma vez que nunca se usa a quantidade estequiométrica e sim em excesso, de modo a garantir a queima completa nas condições reais de mistura ar-combustível, temperatura e de tempos de residência da mistura na zona de combustão (GARCIA, 2002).

- Ar para a Combustão

Conhecendo-se a composição do combustível e com base na estequiometria da reação, consegue-se calcular o ar necessário para a queima do combustível.

A quantidade de ar que fornece o oxigênio, teoricamente suficiente para a combustão completa

do combustível, é chamada de "ar teórico" ou "ar estequiométrico".

Na prática, sabe-se que é muito difícil obter uma boa combustão apenas com o ar estequiométrico. Se utilizarmos somente o "ar teórico", há grande probabilidade do combustível não queimar totalmente (haverá formação de CO ao invés de CO₂) e conseqüentemente a quantidade de calor liberada será menor (FIEP, 2006).

Para se garantir a combustão completa recorre-se a uma quantidade adicional de ar além do estequiométrico, garantindo desse modo que as moléculas de combustível encontrem o número apropriado de moléculas de oxigênio para completar a combustão (FIEP, 2006).

O excesso de ar proporciona uma melhor mistura entre o combustível e o oxidante, mas deve ser criteriosamente controlado durante o processo de combustão. Deveremos conhecer a quantidade ideal mínima possível de excesso a ser introduzida na queima, pois o ar que não participa da combustão tende a esfriar a chama, sem contribuir para a reação. Quanto maior o excesso de ar, maior o volume de gases nos produtos de combustão e conseqüentemente maior a perda de calor pela chaminé, influenciando negativamente na eficiência da combustão.

Entretanto as perdas por excesso de ar aumentam em proporção muito menor que as perdas com combustível não queimado. Assim, nos processos de combustão industrial sempre se trabalha com excesso de ar (FIEP, 2006).

A FIGURA 2.1 apresenta uma relação entre a vazão de ar para a combustão e as perdas de calor nos gases de exaustão da caldeira. Pode-se observar que caminhando-se da esquerda para a direita, passa-se de uma zona onde as perdas de energia se dão através de

combustíveis não queimados para outra onde estas perdas ocorrem por excesso de ar. Existe, entretanto, na transição entre as duas curvas, uma zona de máxima eficiência de operação, ou seja, onde as perdas são mínimas. A largura desta faixa de perdas mínimas depende das particularidades da instalação, do tipo de queimadores e do combustível (FIEP, 2006).

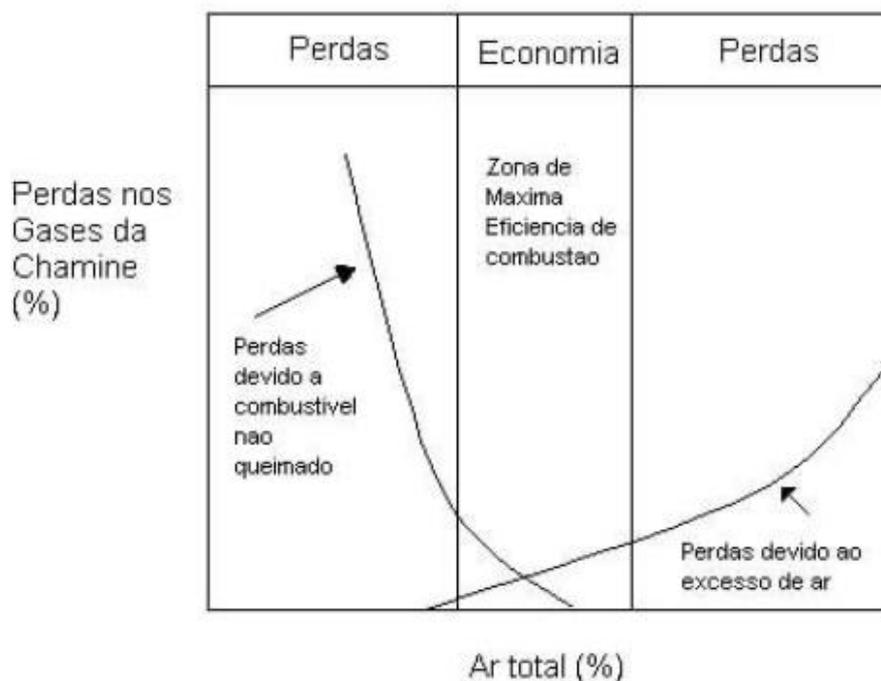


FIGURA 2.1: Quantidade de Ar X Perdas de gases

O teor de excesso de ar a ser utilizado varia de acordo com o tipo de combustível a ser queimado e também com o equipamento de queima, sendo menor para combustíveis gasosos e maiores para combustíveis líquidos e sólidos (FIEP, 2006).

Os excessos de ar a serem adotados irão depender dos modelos de queimadores usados, bem como dos combustíveis considerados. Em termos gerais, pode-se dizer que os gases queimam com excessos de ar variando de 0 a 10%, os combustíveis líquidos variam de 0 a 18% e os combustíveis sólidos com 12 a 50% de excesso (GARCIA, 2002).

Como dito anteriormente, para deter-se uma queima completa do combustível, há necessidade de se introduzir um excesso de ar. A quantidade desse excesso depende de vários fatores, mas apresentamos a seguir os valores comumente utilizados para os combustíveis mais comuns (FIEP, 2006):

TABELA 2.6: Variação do excesso de ar

COMBUSTÍVEIS	EXCESSO DE AR (%)
SÓLIDOS	12 a 50
LÍQUIDOS	0 a 18
GÁSOSO	0 a 10

FONTE: Combustíveis e Combustão Industrial, GARCIA, 2002.

O acompanhamento do excesso de ar é feito por meio de analisadores de oxigênio nos gases de combustão ou por meio de análise de Orsat nas instalações mais simples (GARCIA, 2002).

Deve-se sempre procurar operar os queimadores com o menor excesso de ar de combustão possível para garantir a queima completa reduzindo a formação dos produtos da combustão: CO_2 , H_2O , SO_x e NO_x . O uso de excessos de ar muito alto eleva os custos de operação, devido a necessidade de se ter de aquecer este excesso até a temperatura de saída dos gases de combustão. Além disso, quanto maior o excesso de ar, maior será também a emissão de NO_x , pois terá que aquecer este excesso até a temperatura de saída dos gases de combustão (GARCIA, 2002).

A distribuição homogênea do ar em volta de um queimador e de forma equalitária para todos os queimadores de um mesmo forno, é fundamental para se evitar má queima ou excessos de ar em uns e falta em outros. Para isto, devem-se usar baixas velocidades de escoamento de ar na entrada de cada queimador e nos dutos e plenum de ar dos fornos. Por outro lado, na saída do queimador deve-se ter alta turbulência, de forma a se ter grande eficiência da mistura ar-combustível, minimizando-se assim a exigência de excesso de ar e promovendo-se uma queima com chama mais curta. Entretanto, a turbulência na saída do queimador também não pode ser excessiva, pois, se for o caso, poderia haver apagamento da chama (GARCIA, 2002).

A formação de produtos da combustão e da quantidade do calor liberado na câmara de combustão dependem da quantidade do ar disponível na câmara de combustão. A quantidade mínima de ar necessária para a combustão é descrita pela equação 2.1 (VLASSOV, 2001).

Volume de ar teórico calculado em metros cúbicos de ar para um metro cúbico de gás

$$V_{ar}^0 = 0,046[0,5 C^t + 0,5 H_2 + 1,5 H_2S + (m + n/4) C_m + H_n + O_2], m^3/m^3$$

$$V_{ar}^0 = 0,0889(C^t + 0,375S^t) + 0,265H^t + 0,0333O^t, m^3/kg \text{ para } t = 0^\circ C$$

Quantidade de ar em quilogramas;

$$L_{ar} = V_{ar} \cdot \rho_{ar} \quad (2.1)$$

Onde:

L_{ar} = massa do ar em kg/m³ (combustível gasoso) ou em kg/kg (combustível sólido e líquido);

V_{ar} = ar teórico necessário em m³/m³ (combustível gasoso) ou m³/kg (combustível sólido e líquido)

$$\rho_{ar} = 1,294 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidade do ar a pressão } p=1\text{bar e } t=0^\circ C)$$

Há formulas empíricas que fornecem valores aproximados para os volumes de ar, teórico em função do poder calorífico inferior do combustível (PCI) do combustível.

Para combustíveis sólidos o PCI é descrito pela equação 2.2:

$$V_{ar} = \frac{1,01 \cdot PCI}{1000} + 0,5 \text{ Nm}^3 / \text{kg} \quad (2.2)$$

Para combustíveis líquidos:

$$V_{ar} = \frac{0,85 \cdot PCI}{1000} + 2 \text{ Nm}^3 / \text{kg} \quad (2.3)$$

Para combustíveis gasosos com PCI maior ou igual a 3000 kcal/m³:

$$V_{ar} = \frac{1,09 \cdot PCI}{1000} \cdot 0,25 \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (2.4)$$

Para combustíveis gasosos com PCI menor a 3000 kcal/m³:

$$V_{ar}^t = \frac{0,875 \cdot PCI}{1000} \text{ Nm}^3/\text{kg} \quad (2.5)$$

2.2.5 Coeficiente do Excesso de Ar

Para ter uma boa queima e uma combustão completa, é necessário fornecer na câmara de combustão, quantidade de ar maior que a teoricamente necessária, já que sempre haverá um local do volume da câmara de combustão com ar em excesso e outro com falta de ar provocando neste local queima incompleta (VLASSOV, 2001).

$$\alpha = \frac{V_{ar}}{V_{ar}^0} \quad (2.6)$$

Onde:

α = coeficiente do excesso de ar;

V_{ar} = volume real do ar na câmara de combustão em m³/m³ ou m³/kg

O excesso de ar reduz a temperatura teórica (e real) dos gases, diminui a troca de calor no forno, aumenta a perda de calor com os gases de escape, o que faz diminuir o rendimento do forno (VLASSOV, 2001). O coeficiente de excesso de ar na saída do forno varia de 1,2 a 1,35 (VLASSOV, 2001).

Os valores recomendados de α para os combustíveis gasosos são de 1,05 a 1,15, enquanto em óleos combustíveis varia 1,15 a 1,3 (KITAEV, 1970). O coeficiente do excesso de ar do gás natural liquefeito é de 1,05 - 1,1 (REZNIKOV, 1981).

2.2.6 Limite de Inflamabilidade

A menor concentração de gás ou vapor combustível em ar que consegue estabelecer uma combustão auto-sustentada, é chamada de limite inferior de inflamabilidade e a maior concentração de gás ou de vapor combustível que consegue manter a combustão, sem a contribuição de uma fonte externa de calor, é chamada de limite superior de inflamabilidade (GARCIA, 2002).

O gás ou vapor combustível misturado com o ar não entra em combustão se sua concentração for muito baixa ou muito alta, ou seja, se a mistura combustível-ar está muito pobre (abaixo do limite inferior de inflamabilidade) ou muito rica (acima do limite superior de inflamabilidade) não ocorre a queima. A queima só acontece se a mistura combustível-comburente estiver dentro da faixa delimitada pelos dois limites citados (VLASSOV, 2001 & GARCIA, 2002). A energia liberada pela reação de queima é mínima nas concentrações próximas aos limites de inflamabilidade e máxima na composição estequiométrica (GARCIA, 2002). Os limites de inflamabilidade são determinados a 20°C e 100kPa (1,02 kgf/cm²).

TABELA 2.7: Limites de inflamabilidade de substâncias

Substância	Limite de inflamabilidade (% de vol. de gás no ar)	
	Inferior	Superior
Metano	5,0	15,0
Etano	3,0	12,5
Propano	2,1	10,1
n-butano	1,86	8,41
GLP	1,8 - 2,8 (*)	8,4 - 9,5 (*)
Gás Natural	3,1	19,6

Fonte: Gas Engineers Handbook, 1985.

(*) Varia segundo a composição

Os limites de inflamabilidade são influenciados pela temperatura, pressão, geometria e tamanho do vaso de contenção, teor inerte na mistura, presença de partículas finas de metais e da estrutura molecular do combustível (GARCIA, 2002).

2.2.7 Poder Calorífico

O poder calorífico é definido como a quantidade de energia liberada pela combustão completa, estequiometricamente, de uma unidade de massa ou de volume de uma substância combustível. Devido a formação de água (H₂O) nos produtos da combustão são, definidos dois valores de poder calorífico para as substância combustíveis. O Poder Calorífico Superior (PCS) é a energia liberada pela combustão com a água (H₂O) dos produtos da combustão em estado líquido e o Poder Calorífico Inferior (PCI) é a energia liberada pela combustão com a água (H₂O) dos produtos da combustão em estado vapor. Normalmente o poder calorífico inferior é o mais usado, uma vez que, na maioria dos processos industriais, os gases de combustão são liberados a temperatura alta, onde a água nela contida se encontra na fase gasosa (GARCIA, 2002).

A diferença entre o PCS e o PCI está na quantidade de calor latente que o vapor de água nos produtos da combustão possui sendo fornecida pelo combustível e que não será aproveitada, ou seja, na entalpia de vaporização da água formada pela queima do hidrogênio contido no combustível e da água já contida no combustível como umidade do mesmo (VLASSOV, 2001 & GARCIA, 2002).

O poder calorífico pode ser determinado de duas formas. A primeira, o poder calorífico superior, é determinado experimentalmente em laboratório usando uma bomba calorimétrica (VLASSOV, 2001). Com o poder calorífico superior definido, calcula-se o poder calorífico inferior através da seguinte relação:

$$PCI = PCS - 2440 (9H + u) \quad (2.7)$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior, kJ/kg em base seca;

PCS = poder calorífico superior, kJ/kg;

H = teor de hidrogênio do combustível, kg/kg em base seca;

u = teor de umidade do combustível, kg de água/kg de combustível seco.

TABELA 2.8: Poderes Caloríficos dos Gases Combustíveis

GÁS	kcal/Nm ³		kcal/kg	
	PCS	PCI	PCS	PCI
Hidrogênio	3050	2570	33889	28555
Metano	9530	8570	13284	11946
Etano	16700	15300	12400	11350
Eteno ou etileno	15100	14200	12020	11270
Gás natural de Campos	10060	9090	16206	14642
Gás natural de Santos	10687	9672	15955	14440
Gás natural da Bolívia	9958	8993	16494	14896
Propano	24200	22250	12030	11080
Propeno ou propileno	22400	20900	11700	10940
n-Butano	31900	29400	11830	10930
iso-Butano	31700	29200	11810	10900
Buteno-1	29900	27900	11580	10830
iso-Pentano (líquido)	-	-	11600	10730
GLP (médio)	28000	25775	11920	10997
Acetileno	13980	13490	11932	11514
Monóxido de carbono	3014	3014	2411	2411

Fonte: CÔRNER, 2006.

Outra forma, é calcular o poder calorífico inferior através da fórmula empírica obtida com base em experiências (VLASSOV, 2001).

O do poder calorífico inferior para combustíveis líquidos e sólidos é determinado de acordo com a seguinte fórmula de D.I.Mendelev:

$$PCI = 339C + 1030H - 109(O - S) - 25W, \text{ kJ/kg} \quad (2.8)$$

Onde:

C, H, O, S e W – São percentagens dos elementos e da umidade na massa de trabalho do combustível e os coeficientes numéricos não são poderes caloríficos dos elementos químicos (VLASSOV, 2001).

O poder calorífico inferior para combustíveis gasosos é determinado de acordo com a seguinte fórmula:

$$PCI = 108H + 126CO + 234H_2S + 358CH_4 + 591C_2H_4 + 638C_2H_6 + 860C_3H_6 + 913C_3H_8 + 1135C_4H_8 + 1187C_4H_{10} + 1461C_5H_{12} + 1403C_6H_6, \text{ kJ/m}^3 \quad (2.9)$$

Onde:

Os coeficientes numéricos são poderes caloríficos dos gases correspondentes divididos por cem, em kJ/m^3 (VLASSOV, 2001).

2.2.8 Temperatura de Chama

Calcula-se a temperatura teórica de chama ou temperatura teórica de combustão, como preferem alguns autores, considerando que todo o calor resultante da combustão é transformado em entalpia dos produtos de combustão (GARCIA, 2002). Por isso, chama-se temperatura adiabática de chama, já que neste cálculo não há nenhuma perda de calor para o meio ambiente ou mesmo por dissociação do combustível (VLASSOV, 2001 & GARCIA, 2002).

Cálculo da temperatura de chama por um balanço de energia:

$$T_{\text{chama}} - T_{\text{ar}} = m_c \cdot PCI / (m_g \cdot Cp_g) \quad (2.10)$$

Onde:

T_{chama} = temperatura de chama, K;

T_{ar} = temperatura de entrada do ar de combustão, K;

PCI = poder calorífico inferior, kJ/kg;

m_c = massa do combustível queimado, kg/s;

m_g = massa dos gases de combustão, kg/s;

C_{p_g} = calor específico dos gases de combustão, kJ/(kg.K).

A temperatura de chama pode ser útil na comparação entre combustíveis para uma dada necessidade de calor e temperatura (GARCIA, 2002). Pode haver combustível de médio poder calorífico com temperatura de chama maior que de um combustível de alto poder calorífico. Com isto, mostra-se que a análise pura e simples dos poderes caloríficos não retrata o desempenho do combustível (GARCIA, 2002).

TABELA 2.9: Temperaturas Adiabáticas de Chama, em °C.

GÁS a 20°C	COMBURENTE a 20°C	
	Ar Atmosférico (°C)	Oxigênio (°C)
Metano	1957	2810
Etano	1960	-
Propano	1980	2820
Butano	1970	-
Hidrogênio	2045	2660
Acetileno	2400	3100

Fonte: CÔRNER, 2006.

A temperatura adiabática de chama é uma abstração, pois nenhum processo real pode ser adiabático. Além disso, a dissociação dos gases começa a se fazer sentir em temperaturas acima de 2.273 °C, e o calor desprendido tende a ser menor que o calculado. De qualquer maneira, o cálculo pode ser útil para efeito de comparação de potenciais de combustíveis para uma dada necessidade de calor e temperatura. Observa-se que no cálculo

da massa de gases produzidos, está implícita a relação ar/combustível, pois os produtos de combustão correspondem à soma das massas do ar de combustão e do combustível consumido no processo. A temperatura adiabática de chama pode ser então calculada para uma massa unitária de combustível, desde que se estabeleça a relação ar/combustível (BIZZO, 2003).

De modo inverso, conhecida a temperatura de saída dos gases de combustão, é possível calcular o calor recebido pelo processo de combustão, o qual será a diferença entre a entalpia dos gases à temperatura adiabática de chama e entalpia de saída dos produtos de combustão:

$$Q = m_C \text{ PCI} - m_g C_{p_s} (T_{s_g} - T_{ar}) \quad (2.11)$$

Onde:

Q: calor recebido pela fornalha (kJ/s);

T_{s_g}: Temperatura de saída dos gases de combustão na fornalha (K).

2.2.9 Poluentes Atmosféricos

Os poluentes possíveis de serem formados durante a queima de qualquer combustível orgânico, são os materiais particulados (fumaça, fuligem e cinzas), óxidos de enxofre (SO₂ e SO₃), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂) e óxido de nitrogênio (NO, N₂O e NO₂) em quantidades que dependem dos combustíveis e das características do queimador usado, assim como do estado de conservação e condições de operação deste equipamento (GARCIA, 2002).

O enxofre é um elemento comum da crosta da terra e existe em forma de sólido livre, sulfatos de metal como PbS, ZnS e FeS₂, sulfatos não-metálicos como BaSO₄ e CaSO₄·2H₂O (gipsita ou gesso) e em outras formas, estando presente também em moléculas orgânicas em substâncias como ovos e cabelos.

Um dos materiais mais familiares contendo enxofre é o gesso usado em construção civil e na fabricação de placas de gesso.

Na combustão do carvão, o dióxido de enxofre (SO₂) é formado e sai do forno junto com o gás de combustão. Dióxido de enxofre na atmosfera causa dificuldades de respiração, doenças respiratórias, agravamento de doenças cardiovasculares e reage com

água e diversos outros compostos químicos no ar, formando neblina química e ácido sulfúrico (H_2SO_4) que é um dos agentes da chuva ácida. O ácido sulfúrico é levado pelo vento a grandes distâncias das fontes, causando danos ambientais em grandes áreas. Chuvas ácidas acidificam lagoas, rios, florestas e a terra, causando a morte de peixes, árvores e plantas, e danificam prédios e monumentos.

Enxofre é capturado na forma de gipsita e retido. A taxa de remoção é de 50-90%.

Os principais efeitos dos combustíveis e produtos de sua combustão no meio ambiente são os seguintes:

1. Chuva ácida, causada pela formação de SO_2 , SO_3 , CO_2 , N_2O e $\text{NO} \Rightarrow \text{NO}_2$;
2. Aquecimento global, causado pelo efeito estufa oriunda do CO_2 , N_2O e CH_4 (metano não-queimado);
3. Neblina que irrita os olhos, causada pela foto oxidação dos vapores dos hidrocarbonetos não-queimados em presença de NO_2 e da luz solar;
4. Toxidez, causada pelo CO , SO_2 , SO_3 , NO_2 e vapores de hidrocarbonetos não-queimados;
5. Aumento de material particulado na atmosfera devido à emissão de fuligem (carbono não-queimado).

3. CONCEITOS

3.1 Combustíveis

Combustíveis para utilização em energia e aquecimento industrial apresentam características importantes, tais como: baixo custo por conteúdo energético, disponibilidade, facilidade de transporte e armazenamento, possibilidade de utilização dentro de tecnologias disponíveis, baixo custo operacional e de investimento, etc. Durante muitos anos, os derivados de petróleo preencheram a maioria destas características e se tornaram o tipo mais utilizado de combustível industrial. Nas décadas recentes, outros tipos de combustíveis têm sido utilizados e pesquisados, principalmente aqueles que produzem menor impacto ambiental que os combustíveis fósseis (BIZZO, 2003).

3.1.1 Combustíveis Líquidos

Os combustíveis líquidos são amplamente utilizados na indústria pelas facilidades de armazenamento, operação e transporte, e os derivados de petróleo praticamente estão presentes na maioria das aplicações (BIZZO, 2003).

Outro combustível muito difundido e muito utilizado é o óleo BPF. Esse combustível é uma borra do Petróleo e apresenta-se em diversas formas. O mais utilizado aqui na região é o BPF 1A. Aqui, precisamos de cuidados especiais desde o armazenamento até o uso no queimador.

O tanque de armazenamento do óleo BPF necessita ser pintado na cor preta, para absorver o calor emitido pelos raios solares e dessa forma seu transporte ser mais fácil. Há ocasiões que ainda precisa do uso de serpentinas de vapor no interior do tanque, para facilitar o transporte, pois sua viscosidade é muito alta em temperatura ambiente (PINTO, 2002).

O custo de estocar o óleo BPF é alto, já que, necessita de um tanque primário, de um tanque secundário (esse com resistência elétrica), de bombas de engrenagem para o recalque dele e de uma rede de vapor completa (PINTO, 2002).

O uso desse óleo requer um aquecimento preliminar até 120° C, para reduzir sua viscosidade e assim se conseguir uma névoa durante a queima, para que haja uma combustão sem dificuldades. É um produto que também polui o ambiente (PINTO, 2002).

O BPF contém em média de 4,5 a 5 % de S, que por combustão produz de 9 a 10% de SO₂, que sob a ação catalítica do vanádio contido no próprio óleo e a umidade do ar pode produzir SO₃ e H₂SO₄ (ITEP, 1981)

3.1.2 Combustíveis Sólidos

LENHA

A lenha é provavelmente o energético mais antigo usado pelo homem e continua tendo grande importância na Matriz Energética Brasileira, participando com cerca de 10% da produção de energia primária. A lenha pode ser de origem nativa ou de reflorestamento. Seus principais constituintes são a celulose (41-49%) a hemicelulose (15-27%) e a lignina (18-24%), e seu poder calorífico inferior médio é de 4.200 kcal/kg (17,57 MJ/kg).

TABELA 3.1: Poder calorífico da lenha em função da umidade

Umidade (%) Massa	Poder calorífico inferior (kcal/kg)
0	4756
10	4221
20	3687
30	3153
40	2619
50	2085
60	1551
68	1124

Fonte: Combustíveis e Combustão Industrial (GARCIA, 2002).

TABELA 3.2: Temperatura teórica de combustão

Umidade (%) Massa	Temperatura de Combustão (°C)
0	1620
10	1580
20	1540
30	1590
40	1420
50	1320
60	1190
70	990

Fonte: Combustíveis e Combustão Industrial, (GARCIA, 2002).

A lenha tem recebido a denominação de energia dos pobres por ser parte significativa da base energética dos países em desenvolvimento, chegando a representar até 95% da fonte de energia em vários países. Nos países industrializados, a contribuição da lenha chega no máximo a 4%.

Os combustíveis sólidos podem ser encontrados na forma natural e artificial:

?? Naturais: madeira, resíduo de colheita ou processo, bagaço de cana, casca de arroz, casca de árvore, casca de castanha, carvão mineral, turfa e etc.

?? Artificiais: carvão vegetal (destilação seca da madeira), coque de carvão (destilação seca do carvão mineral), coque de petróleo (resíduo do processamento do petróleo), briquetes (carvão de pequena granulometria misturado com aglutinantes).

A madeira ou lenha ainda desempenha um papel importante na matriz energética brasileira, seja como combustível doméstico, como matéria prima para a produção de carvão vegetal ou como combustível em alguns setores industriais, por exemplo, fornos de calcinação de cimento e gesso. É caracterizada por ter baixo teor de cinzas, ausência total de enxofre e umidade variável, a qual depende do tempo e método de armazenagem. A lenha quando cortada possui por volta de 50% de umidade. Estocada ao ar livre, em toras empilhadas, atinge a umidade de equilíbrio dentro de 3 a 6 meses, a qual, dependendo da umidade relativa do ar é por volta de 15 a 25%. A análise elementar da lenha varia pouco com o tipo de árvore, e isto é uma regra geral para todo material celulósico. Algumas propriedades são apresentadas nas tabelas a seguir. O poder calorífico inferior vai depender muito do teor de umidade. A variação do PCS quanto ao tipo de madeira também não é muito grande (BIZZO, 2003).

A lenha é constituída, aproximadamente, de 50% de C, 43% de O₂ e 6% de H e 0,2 % de N e 0,2 de enxofre BIZZO (2003). É volumosa e apresenta baixo poder calorífico (Medida da quantidade de energia térmica liberada pela combustão da unidade de peso de um combustível) se comparada a outros combustíveis, como podemos ver na TABELA 3.3 a seguir:

TABELA 3.3: Poder Calorífico

COMBUSTÍVEL	PODER CALORÍFICO(kcal/kg)
Carvão Vegetal	7100
Lignito	4000
Madeira/Lenha	3500
Madeira/Lenha Seca	4700
Óleo Combustível	9800
Parafina	10400

Fonte: CÓRNER, 2006.

TABELA 3.4: Umidade

MATERIAL	UMIDADE (%)
Lenha verde	40 a 50
Lenha utilizada na fornalha	38 a 40
Lenha seca ao Ar	Até 20

Fonte: CÓRNER, 2006.

O volume de madeira empilhada nas dimensões 1m x 1m x 1m chama-se estéreo (st). (PAREYN e RIEGELHAUPT, 1998), estimou em 340 kg o peso de um estéreo de lenha. O peso do estéreo está relacionado com a diversidade de espécies, dimensões das toras, teores de umidade, entre outras possíveis variáveis que influenciaram os resultados (PERES, 2006).

Na queima direta como combustível industrial, são necessários 14m³ de boa lenha para substituir uma tonelada de óleo combustível BPF, porém, quando se pensar em transformar equipamentos projetados para queimar óleo BPF, é interessante verificar a eficiência máxima que os equipamentos terão com o novo combustível. Isso deve ser considerado no cálculo final, além do poder calorífico do combustível substituto (LADISLAU, 1997).

Vantagens da lenha:

- ✍✍É o combustível mais barato;
- ✍✍Não exige mão-de-obra qualificada;
- ✍✍Armazenamento em espaço livre e aberto;
- ✍✍Baixo teor de enxofre;

Desvantagens da lenha:

- ✍✍Exige grande quantidade de mão-de-obra;
- ✍✍Planejamento e organização ligada a sua exploração (regulamentos do código florestal)
- ✍✍Poder calorífico inferior
- ✍✍Não proporcionam temperatura de combustão tão alta como os óleos e certos gases combustíveis.

COQUE VERDE DE PETRÓLEO (CVP):

Essa corrida ao Petrocoque iniciou-se com a Indústria Cimenteira. As indústrias de Cal, principalmente no Pólo de Araripina, já estão fazendo uso desse combustível.

A forma e a cor do coque dão indicação de sua qualidade. Quando os pedaços são muito compridos, isto é, a seção transversal é muito pequena em relação ao comprimento, pode-se concluir que a mistura de carvão era rica em matérias voláteis e foi aquecida muito rapidamente. Enquanto as extremidades que estavam em contato com as paredes aquecidas da câmara de coqueificação, têm aspecto de "couve-flor", possuem poros menores e sua cor é prateada, a parte perto do centro do forno é quase preta, com poros grandes e irregulares e, às vezes, com aspecto esponjoso devido à curta exposição à temperatura elevada e que não permitiu o escape dos gases. Para as operações de redução de minérios de ferro (alto-forno) o coque que deve ter resistência mecânica e granulometria convenientes para o processo.

Coque verde é composto de carbono fixo (90 á 95%) e algumas moléculas de hidrocarbonetos de alto peso molecular (material volátil).

O Petrocoque requer uma instalação mais requintada e mais sofisticada. Seu uso só é justificado para grandes consumidores. É um combustível bastante perigoso (autoinflamável) e requer muitos cuidados (PINTO, 2002).

Os cuidados iniciam-se no momento da estocagem até o ponto de consumo. A estocagem exige um galpão coberto, pois a falta desse, quando chove, a água infiltra-se no Petrocoque e forma então um caldo chamado lixívia. Esse caldo se infiltra no terreno e pode atingir o lençol freático. É necessário que o piso seja cimentado. A estocagem tem que ser em pilha e a altura máxima permitida são de 3 metros. O armazenamento tem que ser com uma máquina Pá Carregadeira e não pode haver bolsa de ar em seu interior. A própria máquina é quem faz a compactação do produto (PINTO, 2002).

O trator remove o produto e abastece uma tremonha (moega), que por sua vez descarrega sobre uma correia transportadora. Esse produto passa por um britador primário e em seguida, vai para um moinho de bolas com duas câmaras. Após a moagem, ele é transportado para um silo e de lá através de válvulas dosadoras, alimenta-se o queimador (no caso é um queimador especial). Para se ter uma idéia do perigo todos os ventiladores tem um revestimento interno de alumínio, para evitar o aparecimento de fagulhas, através de algum atrito metálico. A instalação requer ainda um Filtro de desempoeiramento, de mangas especiais. Essas mangas têm que ser resistentes a fogo. O manuseio do Petrocoque, principalmente quando ele está no estado de pó, requer máscaras especiais. É grande a facilidade de impregnação na pele e nos órgãos internos. Para se ter uma idéia, depois de impregnado na pele o pó do Petrocoque só sai com detergente de cozinha. Um incêndio com o pó do Petrocoque é muito perigoso. As fagulhas da queima durante o dia são imperceptíveis por causa da claridade. À noite é possível ver diversos pontos de fagulhas (PINTO, 2002).

Dos elementos presentes no coque, o enxofre é o que mais merece atenção, na medida em que é altamente prejudicial às qualidades do aço. Deste modo, é preocupação constante da coqueria manter níveis de enxofre sob rígido controle, o que é feito principalmente através de verificação do teor deste elemento nos carvões comprados.

São classificados pela natureza da carga, como:

☞ *Coque Chumbinho (Shot Coke):* Apresentam altos teores de enxofre e metais provenientes de cargas ricas em asfaltenos – resíduos de vácuo ou RASF. A olho nu, apresentam forma esférica de várias dimensões.

☞☞**Coque Esponja:** Carga ainda contém asfaltenos, resinas, e heteroátomos. Resíduo de vácuo com médios teores de enxofre, asfatenos e metais. Apresenta pequenos poros e paredes.

☞☞**Coque Esponja:** Carga apresenta menores teores de impurezas do tipo asfaltenos, enxofre, resinas e heteroátomos. Camadas mais alinhadas. Poros em forma de elipses.

☞☞**Coque Agulha:** Classificado como material anisotrópico, carga aromática, óleo decantado, contém baixa presença de asfaltenos, resinas e metais.

O Carvão Mineral é resultante da deteriorização de materiais vegetais. É a matéria prima para fabricação do coque para processos de redução, embora nem todos os carvões minerais transformam-se em coque.

3.1.3 Combustíveis Gasosos

Os combustíveis gasosos têm aumentado sua aplicabilidade na indústria nacional, respondendo a demanda por fontes de energia mais limpas e eficientes. Os gases são mais fáceis de entrarem em combustão e com uma velocidade de propagação muito alta chegando a explosão (a depender da pressão, temperatura, dosagem do ar e composição dos gases) (ITEP, 2006). A limitação de seu crescimento está na disponibilidade e distância dos centros consumidores pela sua maior dificuldade de transportes. Gás Liquefeito de Petróleo é importante combustível, tanto de aplicação industrial como doméstica. Gás Natural tem sido explorado recentemente, porém, deve ser transportado por gasodutos, o que dificulta sua maior utilização, dada a necessidade de investimento em infra-estrutura. Outros gases, tais como, os gases manufaturados de nafta são produzidos e distribuídos localmente por rede de tubulações, além de gases residuais de refinaria, que tem aproveitamento restrito as proximidades desta (BIZZO, 2003).

3.1.4 Gás Natural e GLP

Os combustíveis gasosos têm aumentado sua aplicabilidade na indústria nacional, respondendo a demanda por fontes de energia mais limpas e eficientes. A limitação de seu crescimento está na disponibilidade e distância dos centros consumidores pela sua maior dificuldade de transportes (BIZZO, 2003).

Os combustíveis gasosos são usualmente misturas de gases que podem ser identificados individualmente (BIZZO, 2003). Os combustíveis utilizados no experimento é o Gás Natural que é constituído predominantemente de gás metano CH_4 (80 a 90%), etano C_2H_6 (5 a 10%), pequenas quantidades de hidrocarbonetos mais pesados como o propano C_3H_8 , butano C_4H_{10} e outros gases freqüentemente representado pela formula C_mH_n (1 a 6%). Além disto, há pequenas quantidades de gás carbônico CO_2 (0,1 a 0,2 %) e nitrogênio N_2 (1 a 4 %). A composição de um gás pode variar em pequenas quantidades de um local de extração a outro. Já o GLP é constituído por uma mistura de hidrocarbonetos composto de três e quatro átomos de carbono. Para efeitos práticos de combustão, pode ser considerado como uma mistura em partes iguais de 50% de propano e 50% de Butano (VLASSOV, 2001 e GARCIA, 2002).

A diferença entre o Gás Natural e o GLP está relacionada com a composição, densidade, poder calorífico de acordo com a TABELA 3.8 e quantidade de produtos de combustão gerados.

TABELA 3.8: Principais propriedades do GN e GLP (T=20°C e P = 1 atm).

	GN	GLP
ORIGEM	Reservatório de Petróleo e de Gás não associado	Destilação e Petróleo e processamento de Gás Natural
PESO MOLECULAR	17 a 21 g/mol	44 a 56 g/mol
PODER CALORÍFICO SUPERIOR (MÉDIO)	9.400 kcal/m ³	28.000 kcal/m ³
PODER CALORÍFICO INFERIOR (MÉDIO)	8500kcal/m ³	25.775 kcal/m ³

DENSIDADE RELATIVA (MÉDIA)	0,63 kg/m ³	1,75 kg/m ³
MASSA ESPECÍFICA	0,78 kg/m ³	2,03 kg/m ³
PRINCIPAIS COMPONENTES	Metano (89,4 %) Etano (8,03 %) Outros (2,57 %)	Propano (50 %) Butano (50 %)
PRINCIPAIS UTILIZAÇÕES	Residencial Comercial e automotivo (Combustível) Industrial (Combustível, Petroquímica e siderúrgica)	Industrial, Residencial e Comercial (Combustível)
PRESSÃO DE ARMAZENAMENTO	200 kgf/cm ²	15 kgf/cm ²

Fontes: ANP; COPERGÁS ; GASENERGIA

As propriedades do Gás Natural e GLP variam em pequenas quantidades. Algumas literaturas não especificam a composição do GLP devido ao fato do mesmo ser produzido em refinaria e com isto há uma mistura resultante de várias correntes de várias unidades de processo contendo C₃ e C₄. (GARCIA, 2002). Entretanto, com grandes variações na composição química o poder calorífico do GLP não varia muito (GARCIA, 2002).

Uma grande vantagem do GLP e do gás natural em relação aos óleos combustíveis, é a possibilidade de queimar esses gases em contato direto com o produto a aquecer decorrente de uma combustão limpa. E com isto, não haveria contaminação do produto. Porém, o mesmo processo não é possível de ser feito com óleo combustível. Assim, a conversão de óleos combustíveis por GLP e GN, permite a eliminação das superfícies de troca térmica por condução, aumentando significativamente a eficiência energética do processo e reduzindo o consumo específico de combustível na faixa de 20 a 30%. Conseqüentemente haverá também redução das emissões de CO₂, contribuindo para a redução do efeito estufa. Essa otimização da eficiência energética freqüentemente possibilita o aumento da produtividade do equipamento térmico. Outras vantagens dos

gases combustíveis são as possibilidades de controlar a atmosfera do equipamento térmico e de proporcionar uma fina regulagem de temperatura. O GLP e o gás natural tornam possíveis ainda a geração de atmosferas neutras ou redutoras com ausência de fuligem, o que é impossível quando utilizamos óleos combustíveis. Essas características permitem a proteção contra a oxidação (CÓRNER, 2006).

Além disso, o baixo nível de excesso de ar de combustão sem, entretanto formar produtos da combustão incompleta, contribuirá significativamente para a redução da formação de NO_x e em particular do NO_2 , como indica o quadro abaixo (CÓRNER, 2006).

TABELA 3.9: Emissões de NO_2 oriundas de combustíveis

Fontes	10^6 t NO_2	ano %
Queima de carvão	26,9	50,8
Queima de óleos combustíveis	14,1	26,7
Queima de gasolina	7,5	14,2
Queima de gás natural	2,1	4,0
Queima de outros combustíveis	1,6	3,0
Refino do petróleo	0,7	1,3
Total	52,9	100,0

Fonte: CÓRNER, 2006.

Outra vantagem para o meio ambiente é a menor geração de CO_2 por caloria de gás queimado, devido à relação carbono / hidrogênio ser maior nos óleos do que nos gases combustíveis, além de serem praticamente isentos de enxofre. Conforme mostra o quadro a seguir (CÓRNER, 2006).

TABELA 3.10: Emissões de CO_2 e SO_2

Combustível	%C	$\text{Nm}^3 \text{CO}_2/10^6$ kcal	%S	$\text{Nm}^3 \text{SO}_2/10^6$ kcal
Óleo residual baixo S	87,0	165,0	1,0	1,0
Querosene	87,5	165,9	0,1	0,1
Óleo residual alto S	84,4	159,9	4,0	3,1
Óleo diesel	86,3	159,0	1,0	1,0

GLP	82,2	144,0	aprox. 0	aprox. 0
Gás natural	75,7	105,0	aprox. 0	aprox. 0

Fonte: CÓRNER, 2006.

Nota (*): As eficiências de combustão não foram consideradas, pois são particulares a cada caso.

O GLP e o gás natural proporcionam ainda uma alta confiabilidade operacional, evitando paradas para manutenção e suas conseqüências como perdas de produção, resfriamento e reaquecimento improdutivo (CÓRNER, 2006).

Outro fato que, às vezes, gera polêmica quando se discute a substituição do óleo por gás combustível, é o problema da radiação da chama. Não há dúvida que a chama oriunda da queima de óleo seja mais radiante que a chama dos gases combustíveis. Porém, na maioria dos processos não são constatados problemas com a transferência de calor global. A menor liberação de energia na fase radiativa pode ser compensada na fase convectiva do processo, exigindo às vezes alguns ajustes no equipamento (CÓRNER, 2006).

O gás natural e o GLP praticamente não apresentam emissões de fuligem e de SO₂, sendo baixas às emissões de CO₂, de CO e de NO_x, colaborando assim, para a redução da chuva ácida, do efeito estufa, dos gases tóxicos na atmosfera e do material particulado em suspensão. Além disto, economizam a energia elétrica dos usuários, dispensando o bombeio de combustíveis líquidos e o aquecimento necessário à utilização de óleos residuais (CÓRNER, 2006). A TABELA 3.10 mostra as emissões de CO₂ e SO₂ para os principais combustíveis industriais, expressas em metros cúbicos por milhão de quilocalorias queimadas, sendo fácil perceberem as vantagens do GLP e do gás natural em relação aos demais combustíveis (CÓRNER, 2006). As eficiências de combustão não foram consideradas, pois são particulares a cada caso, porém, com gás natural e GLP, a tendência é que as eficiências sejam um pouco mais elevadas em relação às mesmas condições com óleos combustíveis. Isso fará com que os resultados se tornem ainda mais favoráveis à utilização desses gases combustíveis (CÓRNER, 2006).

A proporção máxima de CO₂ nos produtos de combustão será encontrada quando a relação ar/combustível for estequiométrica. Na figura 3.1, observa-se que em relações

abaixo da estequiométrica, o teor de CO_2 também cai, porém, há o aparecimento de monóxido de carbono (BIZZO, 2003).

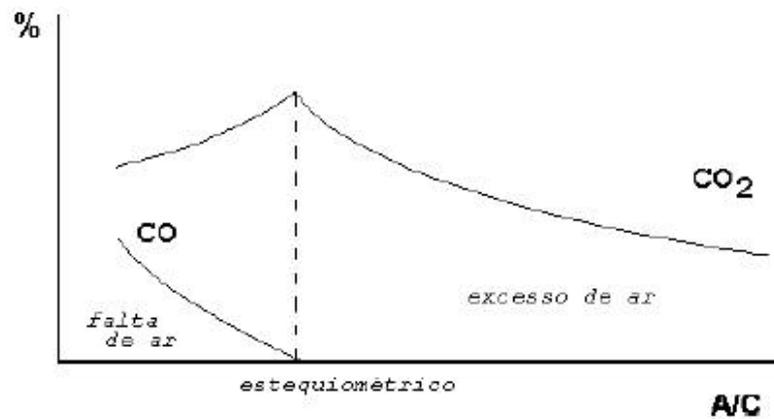


FIGURA 3.1: Teor de CO_2 no gás de exaustão (BIZZO, 2003)

Na prática, as concentrações de CO_2 devem ser mais baixas que a estequiométrica pela necessidade de se usar ar em excesso, a fim de se atingir a combustão completa. A quantidade de excesso de ar necessária decresce com o aumento da capacidade e com o rendimento maior no equipamento de combustão. Valores típicos são:

Gases: 0 a 10%

Líquidos: 2 a 30%

Sólidos: > 50%

Um gráfico com o conteúdo de CO_2 no gás de combustão e com a relação ar/combustível vai mostrar um pico teórico na condição estequiométrica, daí a importância deste item para o rendimento total e como uma indicação das condições de operação. Quando é fornecido ar em excesso, o ar excedente passa através do sistema, inalterado. Isto é uma extensão do cálculo acima para uma mistura gasosa e será apreciado através de um exame do seguinte exemplo de análise de gás.

3.1.5 Transporte dos Gases

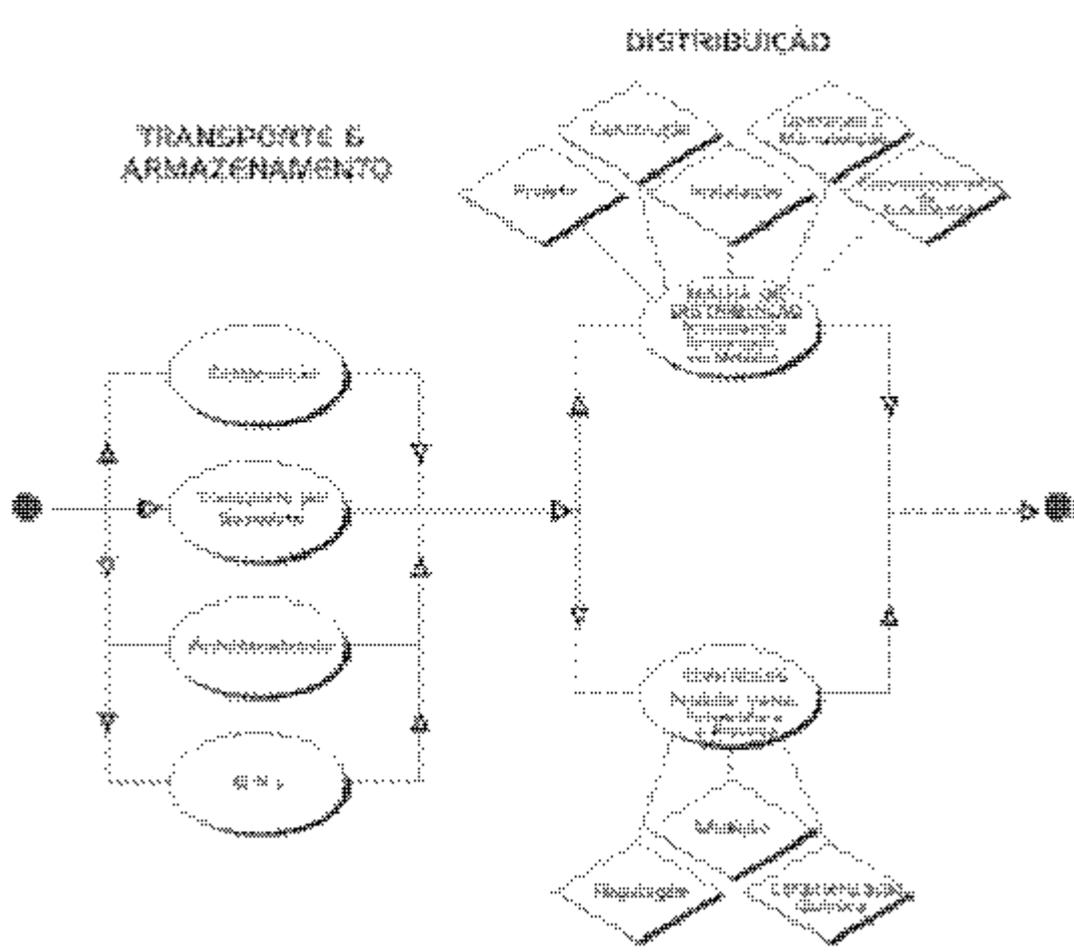


FIGURA 3.2: Fluxograma de transporte, armazenamento e distribuição de Gás Natural (CTGÁS, 2006).

A interiorização do gás natural é uma das diretrizes do Governo de Pernambuco voltada para o desenvolvimento e para a geração de renda do Estado no abastecimento dos setores industrial e automotivo. Em parceria com a Companhia Pernambucana de Gás – COPERGÁS, o projeto completo ligará a Capital ao Sertão Pernambucano somando 1.079 km de tubulação. O projeto está dividido em quatro fases, e a previsão de conclusão será em longo prazo.



FIGURA 3.3: Projeto de interiorização do Gás Natural em Pernambuco (COPERGÁS)

O Gás Natural e GLP podem ser transportados por gasodutos ou a granel através de caminhões tanques, contendo um cilindro ou vários cilindros de alta pressão, para deslocarem do centro de abastecimento a diferentes regiões do país onde não há rede de gasodutos. O GLP a granel é transportado liquefeito em 85% do seu volume e os 15% restantes do volume é transportado em estado de vapor. O GLP em estado líquido é transformando em vapor à medida que são utilizados pelo queimador a gás. Já o Gás Natural pode ser transportado liquefeito (GNL) ou comprimido (GNC). O GNC é indicado para ser transportado a uma distância de até 150 km e o GNL é indicado até 900 km dos centros de produção.

Segundo VLASSOV, 2001, uma particularidade muito importante dos fluidos gasosos está relacionado à sua compressibilidade, ou seja, a capacidade que eles têm de mudar de volume sob a variação de pressão.

O gás natural tem as propriedades do metano já que este gás é predominante em sua composição. Em condições normais o Gás Natural ($\rho_{GN} = 0,63 \text{ kg/m}^3$) é duas vezes mais leve que o Ar ($\rho_{ar} = 1,294 \text{ kg/m}^3$ para $p=1\text{bar}$ e $t=0^\circ\text{C}$) acumulando na parte superior do ambiente e a pressão atmosférica e a temperatura de -162°C passa para o estado líquido diminuindo o seu volume 600 vezes (VLASSOV, 2001). Por isso segundo VLASSOV o Gás natural no seu estado líquido tem a perspectiva de ser um bom combustível para os vários ramos da indústria e para o transporte.

O GLP é liquefeito a uma temperatura ambiente mediante a aplicação de pressão na faixa de 600 kPa a 1200 kPa (6 a 12 kgf/cm²) (GARCIA, 2002).

A White Martins em parceria com a Petrobrás, criou a Gaslocal que é uma empresa de produção e distribuição de GNL. A princípio, a primeira planta foi implantada em Paulínia/SP e está atendendo até uma distância de 900 quilômetros. Por enquanto não há planta ou previsão de instalação no NO/NE que possa atender ao município de Araripina PE.

As carretas e cestas de cilindros de GN não atendem a grandes distâncias, seu potencial de atendimento é de um raio de até 300 km a partir da unidade de compressão.

3.1.6 Possibilidade de transferência de tecnologia para produzir GNL

A Economia do GNL

A opção pelo GNL se dá quando as reservas e os mercados de gás natural são distantes uns dos outros. O produto, quando liquefeito, ocupa um volume 600 vezes menor do que em condições normais de temperatura e pressão. É isso que torna o GNL economicamente viável para transporte, mas é necessário que haja um fluxo constante de suprimento para viabilizar o projeto.

Como o empreendimento envolve grandes volumes de capital e sua amortização requer longa duração, as reservas e o mercado consumidor são garantidos em contratos de longo prazo.

Redução de Custos do GNL

O maior desafio na indústria de GNL são seus custos. Na mesma equivalência energética, o gás natural é muito mais caro de se transportar do que o petróleo. A alternativa mais prática de transporte desse gás sem a utilização de dutos é sua conversão em líquido.

Os custos de cada elemento da cadeia de GNL variam, em função do tipo das reservas de gás natural, a localização do campo, a tecnologia utilizada e a distância entre os centros produtores e os mercados consumidores. A planta de liquefação (considerando-se o

número e o tamanho dos trens) e os terminais de regaseificação têm participação preponderante na composição dos custos.

Um grande número de inovações na construção de plantas de GNL, transporte e infra-estrutura de suporte contribuiu para uma redução significativa dos custos nos últimos anos. Custos de liquefação e transporte reduziram-se em até 40% nas duas últimas décadas. O preço de novos metaneiros caiu 50% durante a última década, e os custos de regaseificação tornaram-se 20% mais baixos.

3.1.7 Intercambiabilidade dos Gases Combustíveis

Quando determinado gás combustível pode ser substituído por outro gás de diferentes características, e as características da chama são satisfatórias após a substituição do combustível, usando-se o mesmo queimador sem a necessidade de ajustes no mesmo, diz-se que esses gases são intercambiáveis (GARCIA, 2002; IPT, 2004).

GARCIA, afirma que as características satisfatórias de chama estão relacionadas com a sua estabilidade sem apresentar descolamento, retomo da chama ou pontas amarelas. A combustão também deve ser higiênica sem emissões inaceitáveis de monóxido de carbono ou fuligem e os fluxos de energia térmica proporcionados pelo queimador devem ser próximos para ambos os gases, assim como, o sistema de ignição e de controle da queima devem operar bem com os dois gases (GARCIA, 2002).

Em outros termos, GARCIA diz que um ponto dentro da zona de chama estável, como função da aeração primária e taxa de alimentação de gás, pode ser estabelecido para qualquer dado queimador aerado. Estes limites de chama irão variar em função da composição do gás suprido (GARCIA, 2002).

Tanto o gás de referência para o qual o queimador foi construído quanto o gás substituído devem ter as vazões de ar primário e de gás dentro dos limites de chama do queimador, para que os dois gases em pauta sejam considerados intercambiáveis (GARCIA, 2002).

Na literatura há vários métodos analíticos para cálculo da intercambiabilidade de gases e cada método se baseou em uma série de pesquisa práticas, feitas para determinados

tipos de gases e para alguns queimadores padronizados (GARCIA, 2002).

Deve-se procurar escolher o método mais adequado aos tipos de gases que se quer estudar a cada momento, sendo o ideal, muitas vezes, usar mais de um método analítico, já que, normalmente os gases objetos da análise que se quer fazer são bem diferentes daqueles usados no desenvolvimento dos métodos (GARCIA, 2002).

O parâmetro mais importante para análise da Intercambiabilidade de combustíveis gasosos é o índice de wobble pela equação 3.1 (IPT, 2004).

$$W \propto \text{PCI}/d^{1/2} \quad (3.1)$$

Onde:

PCI – Entalpia de reação volumétrico (J/m^3)

d – densidade relativa do ar

Este método é muito usado na Europa, em conjunto com um fator de velocidade e chama medido ou calculado, e o considerando com um índice geral básico que se deve sempre ser considerado, até mesmo como base, para qualquer gás e antes de se partir para qualquer outro método analítico mais complexo (Garcia, 2002).

Índice de Wobbe para família de gases:

☒☒ Gases Manufaturados, oriundos do carvão ou de hidrocarbonetos líquidos;

Índice de Wobbe; $19 < W < 39 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$

☒☒ Gases Naturais ou Manufaturados de mesma composição;

Índice de Wobbe; $39 < W < 59 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$

☒☒ Gases liquefeitos de petróleo;

Índice de Wobbe; $75 < W < 92 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$

3.1.8 Velocidade de Chama:

É a velocidade de uma frente de chama de uma mistura ar/combustível, efetuada sob determinadas condições. O conhecimento de parâmetros de velocidade de chama é útil também para a intercambiabilidade dos gases, no sentido de se garantir a estabilidade e combustão em queimadores. Dois fenômenos podem ocorrer em queimadores de gás que é o descolamento da chama, quando a velocidade da mistura não queimada é maior que a

velocidade de chama; e o retorno de chama, quando a velocidade de chama é maior que a velocidade da mistura ar/combustível (BIZZO, 2003).

Ambos podem trazer conseqüências desastrosas aos equipamentos e um queimador de gás deve ser projetado para determinadas faixas de velocidades de chama para se garantir a estabilidade (BIZZO, 2003).

Diversos métodos existem para a medição de velocidade de chama, porém nenhum destes reproduz com exatidão uma situação operacional. A velocidade de chama varia com a temperatura da mistura, a relação ar/combustível e com o padrão de fluxo, se laminar ou turbulento. As medidas de velocidade de chama em laboratório são feitas quase sempre nos regimes laminares, mas a maioria dos equipamentos industriais opera com combustão turbulenta. De qualquer maneira, o conhecimento da velocidade de chama em laboratório dá uma medida qualitativa do combustível. A fim de se utilizar este conceito o índice de Weaver, dá uma medida da velocidade de chama em relação ao hidrogênio, adotado como gás padrão. O índice de Weaver é definido como :

$$S = \frac{F_{H_2}}{F_{gás}} \quad (3.2)$$

Uma mistura de gases tem seu índice de Weaver calculada da seguinte forma:

$$S = \frac{aF_a + bF_b + L + iF_i}{A + 5z - 18,8Q + 1}$$

onde: F_i : coeficiente de velocidade chama (3.3)
 a, b, \dots, i : frações molares dos constituintes
 A : relação ar/combustível volumétrica e estequiométrica da
 mistura
 z : fração molar dos inertes no combustível
 Q : fração molar do oxigênio no combustível

Os queimadores atmosféricos (inspiradores de ar primário) e alguns sistemas de combustão requerem os índices de desprendimento e retorno da chama, índice de ponta amarelas, índice de aeração e etc. (IPT, 2004).

Gás Natural (GN)

VANTAGENS OPERACIONAIS DO GÁS NATURAL

- ☒☒ Combustão completa;
- ☒☒ Reduz o tempo e o número de paradas para manutenção;
- ☒☒ Aumenta a disponibilidade e vida útil dos equipamentos;
- ☒☒ Proporciona elevado rendimento térmico;
- ☒☒ Composição química constante isenta de compostos pesados;
- ☒☒ Atende às variações abruptas de vazão e dispensa aquecimento;
- ☒☒ Não se acumula no ambiente, é mais leve do que o ar;
- ☒☒ Maior segurança operacional.

VANTAGENS AMBIENTAIS E SEGURANÇA

- ☒☒ Não apresenta restrições ambientais;
- ☒☒ Dispensa equipamentos de controle de emissões;
- ☒☒ Praticamente elimina a emissão de compostos de enxofre;
- ☒☒ Não emite cinzas;
- ☒☒ Reduz sensivelmente a emissão de particulados;
- ☒☒ Dispensa a manipulação de produtos químicos perigosos;
- ☒☒ Não utiliza água adicional, como nos lavadores de gases;
- ☒☒ Elimina a necessidade de tratamento de efluentes dos produtos da queima;
- ☒☒ Não depende de desmatamento/reflorestamento;
- ☒☒ Melhora a qualidade do ar nas grandes cidades com menor;
- ☒☒ Emissão de CO₂ (efeito estufa).

VANTAGENS QUANTO A QUALIDADE

- ☒☒ O calor do energético queimado se aplica diretamente ao produto, com formatos de chamas adequados a cada aplicação;
- ☒☒ Evitam-se impurezas e o depósito de compostos contaminadores;
- ☒☒ A coloração não se altera;
- ☒☒ Curvas de temperatura ideais com estabilidade de chama;
- ☒☒ Garantia do padrão de qualidade;
- ☒☒ Maior competitividade nos mercados mais nobres;

VANTAGENS MACROECONÔMICA

- ☒☒ Diversificação da matriz energética;
- ☒☒ Fontes de importação regional;
- ☒☒ Disponibilidade ampla, crescente e dispersa redução do uso do transporte rodoviário-ferroviário;
- ☒☒ Atração de capitais de riscos externos;
- ☒☒ Melhoria do rendimento energético;
- ☒☒ Maior competitividade das indústrias;
- ☒☒ Geração de energia elétrica junto aos centros de consumo.

VANTAGENS AMBIENTAIS DE SEGURANÇA

- ☒☒ Baixíssima presença de contaminantes;
- ☒☒ Combustão mais limpa;
- ☒☒ Não-emissão de particulares (cinzas);
- ☒☒ Não exige tratamento dos gases de combustão;
- ☒☒ Rápida dispersão de vazamentos.

VANTAGENS DIRETAS DO USUÁRIO

- ☒☒ Fácil adaptação das instalações existentes;
- ☒☒ Menor investimento em armazenamento/uso de espaço;
- ☒☒ Menor corrosão dos equipamentos e menor custo de manutenção;
- ☒☒ Menor custo de manuseio de combustível;
- ☒☒ Menor custo das instalações;
- ☒☒ Combustão facilmente regulável;
- ☒☒ Elevado rendimento energético;
- ☒☒ Admite grande variação do fluxo;
- ☒☒ Menores prêmios de seguro;
- ☒☒ Custo bastante competitivo com outras alternativas.

Benefícios do gás natural

Evitar investimentos em equipamentos de controle ambiental, eliminando a emissão de poluentes na atmosfera (particulados e SOx).

Redução de custos:

- ☞☞Melhoria da eficiência da combustão;
- ☞☞Redução das interferências da manutenção no processo e equipamentos (chaminé, exaustores e etc.).
- ☞☞Aumento da vida útil do revestimento refratário dos fornos;
- ☞☞Viabiliza a automação de fornos;
- ☞☞Melhoria da qualidade do produto;
- ☞☞Redução de 40% no consumo de combustível;
- ☞☞Maior limpeza nas áreas dos fornos;

Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)

O Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), popularmente conhecido como gás de cozinha é uma mistura de propano e butano, dois hidrocarbonetos existentes no petróleo (VLASSOV, 2001; GARCIA, 2002).

Quando submetido a pressões relativamente baixas, como o próprio nome diz, ele se torna líquido, forma em que é engarrafado nos botijões e nos tanques. Em contato com o ar ele assume o estado gasoso e é aí que o utilizamos (MINASGÁS, 2006).

O GLP é mais pesado que o ar. Em caso de vazamento, tende a se acumular próximo ao chão, por isso não deve ser colocado próximo a ralos para evitar seu acúmulo na tubulação. O GLP é inodoro. O odor característico que percebemos quando há um vazamento de gás é de uma substância chamada "etil mercapta", adicionada nas Refinarias a fim de facilitar sua detecção e aumentar a segurança de sua utilização (MINASGÁS, 2006).

Benefícios e qualidades - A utilização do GLP como alternativa energética traz uma infinidade de benefícios ao consumidor e para a própria natureza: possui alto poder calorífico; é fácil de transportar, permitindo inclusive, que seja utilizado em regiões mais remotas; apresenta menor toxidez; não produz cheiro após a queima, nem resíduos de

metais pesados. Além disso, podem ser largamente utilizados na elaboração de alimentos em função de suas características não contaminantes e limpeza de sua combustão, substituindo os fornos à lenha ou óleo. Além disso, o GLP é econômico: permite uma redução acentuada nos custos de manutenção dos equipamentos; menor desgaste e corrosão nos equipamentos industriais.

Como combustível para motores, o GLP contribui para prolongar a vida e aumentar a eficiência do motor, reduzindo a manutenção e gastos com óleos lubrificantes e a substituição de velas (MINASGÁS, 2006).

A utilização do GLP como alternativa energética também apresenta como benefício a facilidade no transporte, manuseio e em sua armazenagem.

3.2 CONCEITO DOS TIPOS DE FORNOS

3.2.1. Tipos de Fornos:

FORNO TIPO PANELA - Esse tipo de forno existe em grande quantidade, no Araripe, normalmente utiliza a lenha como combustível (PERES et al., 2001).

As características desse tipo de forno comparado com outros da região:

- ?? A possibilidade de operação sem instrumento para controle de temperatura;
- ?? A possibilidade de obtenção de praticamente todos os tipos de gesso ?;
- ?? A simplicidade de manutenção;
- ?? Baixo custo de reposição.

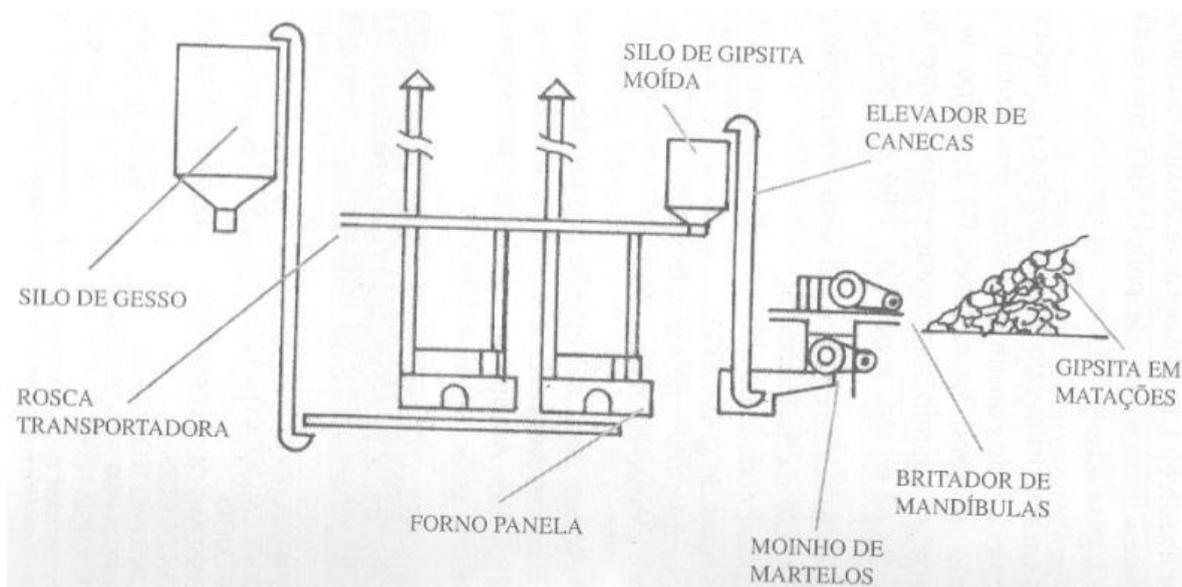


FIGURA 3.2: Forno Tipo Panela (PERES et. al, 2001).

TABELA 3.9: Produção de gesso em forno tipo panela

	Unidade	Lenha
Consumo de combustível	Kg/Ton	525,00
PCI	Kcal/Kg	3131,20
Consumo de calorías por tonelada de gesso	Kcal/Ton	1.643.800,00
Consumo teórico de energia por tonelada de gesso	Kcal/Ton	154.000,00
Eficiência térmica	%	9,4
Capacidade produtiva	t/h	0,1 - 0,2

Fonte: O Gesso: Produção e utilização na construção civil, 2001.

***Obs: Lenha densidade volumétrica = 350 kg/St; umidade = 20ppt.**

FORNO TIPO MARMITA - Esse tipo de forno é vertical e foi introduzido na região com o apoio do ITEP (Instituto Tecnológico de Pernambuco) há 10 anos. Uma parte desse tipo de forno opera atualmente com óleo BPF (óleo preto); entretanto alguns ainda utilizam à lenha como combustível (PERES et al., 2001).

As suas vantagens em relação a outros modelos:

- ?? Aumento de produtividade - utilizam menos operários por tonelada de gesso produzida;
- ?? Permite uma maior uniformidade - produz de uma só vez o que produziria cerca de cinco fornos tipo panela e o pó liberado durante a calcinação é normalmente retido no aerociclone diminuindo assim, a poluição do ambiente de trabalho.
- ?? Maior rendimento do combustível - consome uma quantidade menor de lenha por tonelada de gesso produzida

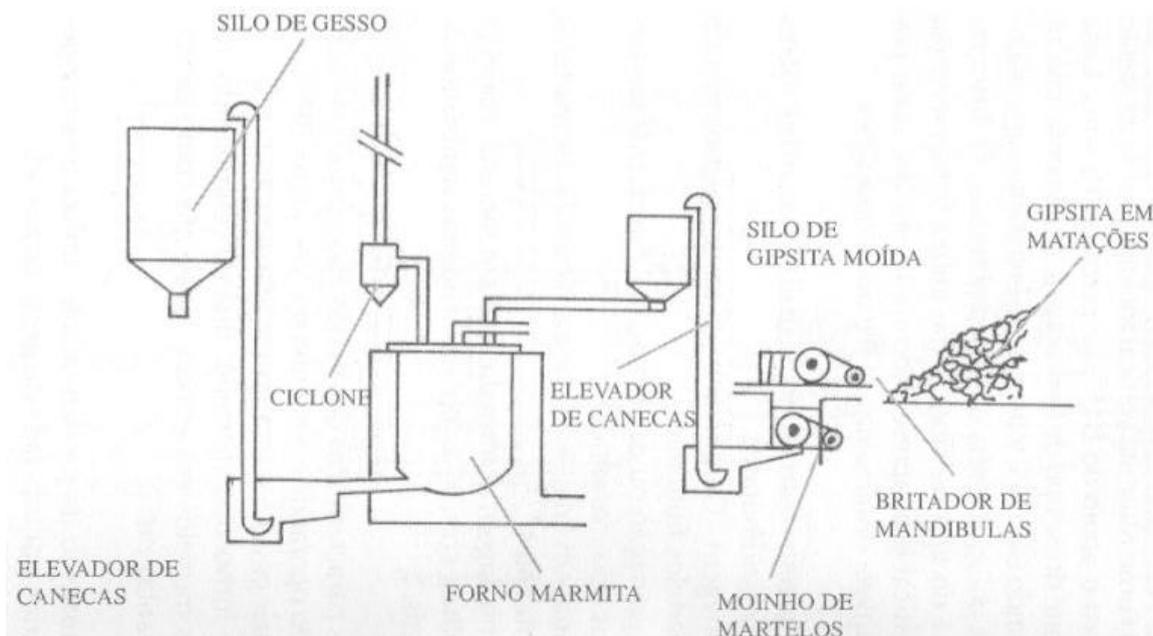


FIGURA 3.3: Forno Tipo Marmita (PERES et. al, 2001).

TABELA 3.10 Produção de gesso em forno tipo marmita

	Unidade	Lenha	Óleo
Consumo de combustível	Kg/Ton	350	45
PCI	Kcal/Kg	3131,20	9500
Consumo de calorías por tonelada de gesso	Kcal/Ton	1.095.950,00	439.650,00

Consumo teórico de energia por tonelada de gesso	Kcal/Ton	154.000	154.000,00
Eficiência térmica	%	14,0	35,0

Fonte: O Gesso: Produção e utilização na construção civil, 2001

***Obs: Lenha densidade volumétrica = 350 kg/St; umidade = 20 ppt;**

Óleo preto (BPF) Densidade = 0,974 kg/ litro; enxofre =4,8 pp

FORNO ROTATIVO TUBULAR - Algumas empresas utilizam o BPF e lenhas como combustíveis. Já outras utilizam forno rotativo acoplado a gaseificadores de carvão e lenha (PERES et al., 2001).

As vantagens do forno rotativo são:

- ?? Produção contínua - facilita a obtenção de um gesso com características uniformes;
- ?? Maior rendimento térmico - por utilizar o aquecimento direto (contato chama com minério), pode ser facilmente isolável;
- ?? Fornalha independente - Essa independência permite que se façam as manutenções necessárias com pequenas paradas;
- ?? Facilidade de Automação - Por ser um processo contínuo, pode ser automatizado com conseqüentes ganhos de qualidade e diminuição de custos;

Processo contínuo de produção de gesso:

- ?? Largamente utilizada no Pólo Gesseiro de Araripina - PE e no exterior;
- ?? Há variedades de modelamento matemático para simular fornos;
- ?? Os rotativos estão disponíveis para estimar o desempenho do forno;
- ?? Permite monitorar de forma contínua a temperatura interna, composição dos gases de emissão: NO_x, SO₂, CO, CO₂, O₂;
- ?? Amostras podem ser retiradas do forno em intervalos desejados para análise;
- ?? A cinética de processamento de gesso pode ser determinada para uma variedade de taxa de aquecimento, tempo de residência;
- ?? Permite também simular tratamento térmico de vários tipos de materiais sólidos, estudo de dioxinas, queima de cimentos.

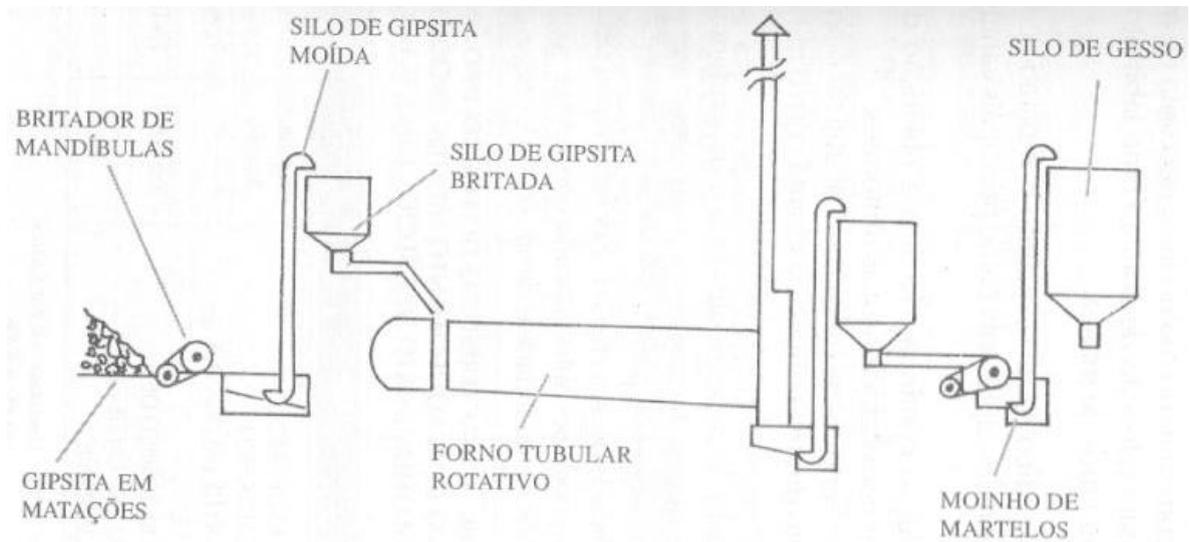


FIGURA 3.4: Forno Tipo Rotativo (PERES et. al, 2001).

TABELA 3.11: Produção de gesso em forno tipo rotativo

	Unidade	Óleo
Consumo de combustível	Kg/Ton	35
PCI	Kcal/Kg	9500
Consumo de calorías por tonelada de gesso	Kcal/Ton	332.320,00
Consumo teórico de energia por tonelada de gesso	Kcal/Ton	154.000,00
Eficiência térmica	%	46,3

Fonte: O Gesso: Produção e utilização na construção civil, 2001.

***Obs: Óleo preto (BPF) Densidade = 0,974 kg/ litro; enxofre = 4,8 pp.**

FORNO ARAMIR – É um forno rotativo que tem a capacidade de produzir em média 200 toneladas de gesso por dia. O equipamento para nosso estudo tem 2 tubos concêntricos, projetado para a produção contínua de gesso puro ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) e de uma mistura de gesso e anidrita (CaSO_4), podendo os dois produtos serem produzidos ao mesmo tempo.

Características / Estrutura

?? Corpo tubular cilíndrico giratório, com extremo posterior solidário com outro corpo tubular cilíndrico externo;

?? Processo contínuo.

Alimentação

?? Aberturas de entrada distribuídas em anel Circular.

Mecanismos de transporte de Matéria-Prima

?? Aletas Contínua (longitudinal ou inclinada);

?? Paletas sobresalientes.

Vantagem

Devido a sua estrutura e funcionalidade permite durante o curso de matéria-prima em tratamento, em um mesmo ciclo de produção, obter gessos de distintas classes e em proporções facilmente reguláveis.

?? É dividido em 2 partes estrutura fixa e móvel;

?? A estrutura fixa concentra o maior peso do forno;

?? Forno de alta eficiência para calcinação Gipsita;

?? Alimentação contínua;

?? Gesso beta e a Anidrita;

?? Queimador utilizando gás natural.

Parâmetros Para Projetar Um Forno Rotativo

?? Tempo de residência da gipsita no forno;

?? Transferência de calor da queima do gás para a parede interna do forno;

?? Rotação do forno (parede interna);

?? Comprimento do forno.

Com relação às características de cada tipo de forno pode se dizer:

?? No forno rotativo o controle no tempo de pega do gesso depende da distribuição granulométrica do material;

?? O consumo de combustível está associado aos projetos de cada forno;

?? No forno tipo panela devido à baixa qualidade e inadequação dos materiais utilizados na fabricação, torna o equipamento barato, mas pouco durável.

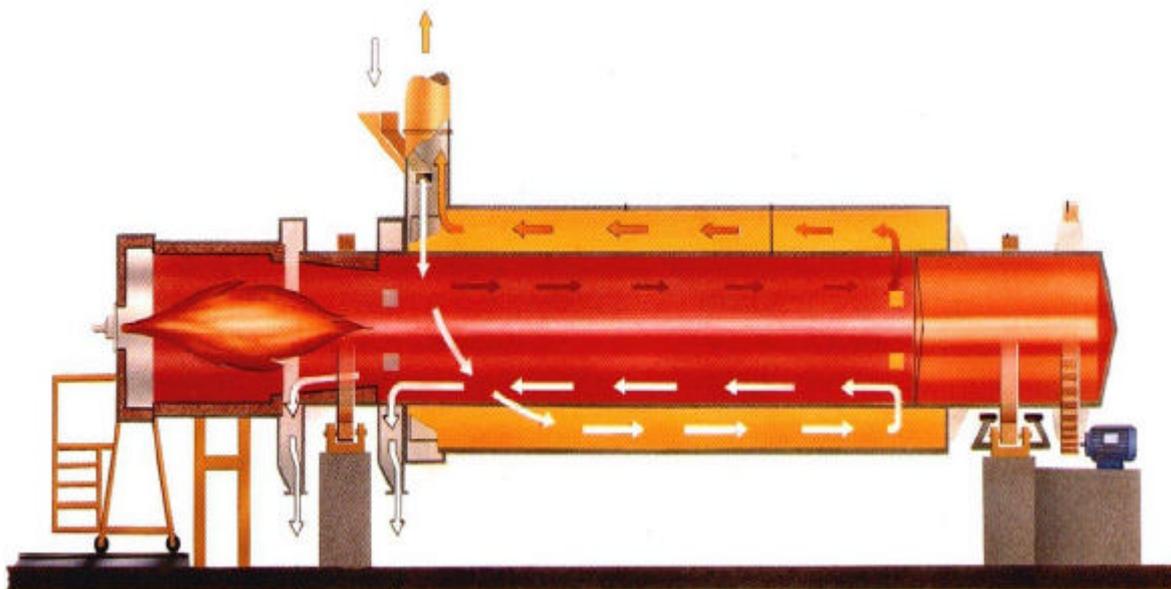


FIGURA 3.5: Forno Tipo Aramir (PERES et. al, 2001).

TABELA 3.12: Produção de gesso no forno Aramir rotativo

	Unidade	GN
Consumo de combustível	Kg/Ton	29
PCI	Kcal/Kg	8.500
Consumo de calorías por tonelada de gesso	Kcal/Ton	200.000,00
Consumo teórico de energia por tonelada de gesso	Kcal/Ton	154.000,00
Eficiência térmica	%	77,00

Fonte: Monterde, 2006.

3.3 CONCEITO DE QUEIMADORES

Queimador ou maçarico é o equipamento que processa e queima o combustível em uma fornalha, seja este combustível gás, líquido ou sólido (GARCIA, 2002).

A principal função de um queimador é promover uma mistura eficiente entre o Ar e o combustível, em proporções que estejam dentro do limite de flamabilidade para a ignição e para a queima estável e bem conformada (GARCIA, 2002). O queimador deve também garantir que não haverá retorno de chama e nem seu descolamento. Assim como a razão de redução da queima (razão entre a liberação máxima e mínima de calor); facilidade de operação; nível de ruído; emissão de SOx e NOx e de particulados e baixa necessidade de

manutenção (GARCIA, 2002). Os queimadores convencionais de óleos ou de gás, normalmente apresentam níveis relativamente altos de emissão de NO_x para o meio-ambiente (GARCIA, 2002). E este teor de NO_x nos gases de combustão é função do teor de nitrogênio do combustível, excesso de ar, temperatura da fornalha e escoamento dos gases dentro da chama (GARCIA, 2002).

Qualquer combustível pode ser queimado em várias fornalhas e em várias condições, e esta última para saber escolher corretamente para serem aplicadas na prática é necessário conhecer os tipos de fornalhas existentes, as particularidades de organização do processo de combustão e suas perspectivas de desenvolvimento (VLASSOV, 2001). O controle do processo de combustão depende fundamentalmente do funcionamento dos queimadores, pois estes são responsáveis pela formação da mistura combustível, pelo fornecimento dela à fornalha e pela constituição da forma e dimensão da chama (VLASSOV, 2001).

A construção dos queimadores depende de vários fatores dentre eles os principais são: o consumo de combustível com o ar; pressões disponíveis do combustível e do ar na entrada do queimador, das temperaturas destes, e o comprimento necessário da chama (VLASSOV, 2001). O comprimento da chama é determinado experimentalmente pelo fabricante variando de $\pm 0,5\text{m}$ até alguns metros, podendo alterar este valor variando a turbulência do fluxo da mistura, temperatura na câmara, consumo de combustível-ar, uso de combustível de maior poder calorífico, pré-aquecimento do ar e do combustível gasoso (VLASSOV, 2001).

No projeto e/ou na seleção do queimador é fundamental estabelecer ou verificar os parâmetros do excesso de ar para a combustão, liberação de calor do queimador e pressão disponível do combustível (VLASSOV, 2001).

Os queimadores de combustíveis gasosos podem ser divididos em aspirantes, em que a maior parte do ar de combustão é aspirado pela expansão do gás combustível num venturi, onde se misturam o ar e o gás combustível. O ar primário é função apenas da vazão do gás combustível. Os queimadores aspirantes são de chama curta, baixa capacidade e baixa razão de redução da queima. Já os queimadores de queima direta, o gás é injetado puro, diretamente na zona de combustão através de bicos com furos de pequeno diâmetro apresentando baixo nível de ruído, chamas longas e elevada razão de redução de queima.

Porém, os queimadores de queima direta requerem ajustes frequentes, já que a vazão do ar é função da tiragem e da posição das variólas (GARCIA, 2002).

3.3.1 Queimadores de Gases

Os gases podem ser classificados em termos de velocidade da chama e do índice de Wobbe para propósitos de projeto do queimador. O índice de Wobbe é uma medida de energia do gás que passa através de um determinado orifício com uma determinada queda de pressão. Os gases combustíveis são frequentemente divididos em três grupos :

TABELA 3.13 - Grupos de índice de Wobbe

GRUPO	ÍNDICE DE WOBBE	VELOCIDADE DE CHAMA	A/C (VOL)	EXEMPLO
1	24,4 - 28,8	Alta	3~4	Gás de Rua
2	48,2 - 53,2	Baixa	7~8,5	Gás Natural
3	72,6 - 87,6	Baixa	~25	GLP

Fonte : FEM/UNICAMP

Além desses gases distribuídos, existem os gases de baixo poder calorífico (gás de gasogênio) que são produzidos e queimados no mesmo local. Estes podem ser produzidos para utilização num processo perto do local de produção, ou serem produtos secundários de outros processos como, por exemplo, o gás de alto forno ou gás de forno de coque. Os gases de baixo poder calorífico tem uma grande relação de volume/energia para serem economicamente distribuídos. O gás do gasogênio caiu em desuso na década de 50 e nas últimas décadas voltou com um papel maior em alguns países, incluindo o Brasil. Por causa da grande disponibilidade de gás natural, há uma tendência mundial em deslocar-se os gases do grupo 1 para o grupo 2. Devido aos altos índices de Wobbe, a capacidade de um sistema de distribuição em unidades de calor é aumentada através da mudança de gases do grupo 1 para o grupo 2. Onde o gás natural não é disponível há tendência de produzir gases baseados em metano, extraídos do carvão ou do óleo.

O metano tem uma razão ar de combustão/volume combustível cerca de duas vezes a do gás de carvão. Assim, o gás vai precisar de uma velocidade maior para arrastar seu ar de combustão do que aquela exigida pelo gás de carvão.

No caso de GLP a velocidade de chama é semelhante à do metano, mas o poder calorífico por volume e a razão ar/combustível por volume serão maiores.

3.4. AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DA COMBUSTÃO

A quantidade teórica de ar (ou oxigênio) para combustão completa e a composição estequiométrica dos produtos combustíveis são calculados e comparados com a composição real obtida pela análise dos gases de combustão (BIZZO, 2003). Com isto pode verificar se a quantidade de calor está sendo desperdiçada em aquecer quantidades excessivas de gases de combustão, ou seja, se está sendo usado mais ar que o necessário (BIZZO, 2003). Na prática, um pequeno excesso sobre o ar estequiométrico é necessário para assegurar uma completa combustão (BIZZO, 2003).

Pode verificar também se parte do combustível está escapando da região de combustão sem estar completamente queimado. Isto é demonstrado pela presença de CO, fuligem, combustível não queimado e possivelmente hidrogênio nos produtos combustíveis (BIZZO, 2003).

A análise dos gases de combustão ou de gases perdidos dos processos de combustão é comumente relatada em base seca de volume, isto é, sem referência à água no gás (BIZZO, 2003).

Um combustível específico requer uma quantidade específica de ar para a combustão completa teórica, com alguma quantidade adicional para atingir praticamente a combustão completa. Abaixo desta quantidade prática, que é uma função do tipo de combustível, do rendimento do queimador e das condições de combustão, é desperdiçado combustível e esta condição pode ser reconhecida pelo aparecimento de quantidades excessivas de monóxido de carbono no gás de combustão, um pouco antes da produção da fumaça preta (fuligem). Acima desta quantidade, o calor é perdido juntamente com quantidades excessivas de ar para combustão. Ao interpretar a análise do gás de combustão pode levar, por exemplo, à descoberta de deficiências no processo de combustão, vazamento no forno ou no sistema condutor e inconsistências na análise e especificação do combustível (BIZZO, 2003).

Uma vez que, segundo a Lei de Avogadro, o kg/mol e o volume são numericamente parâmetros permutáveis sob condições adequadas, a determinação das proporções de ar/combustível está encaminhada a partir dos produtos da análise teórica do gás de combustão. A qualificação teórica está assinalada aqui porque, devido a pontos práticos observados anteriormente, algumas diferenças podem ser encontradas entre a análise real

do gás e a proposta nas mesmas condições iniciais. Então, a análise teórica indica a situação ideal, e quanto mais perto a análise prática estiver desta tanto melhor. Para qualquer instalação que utiliza combustível, a experiência vai ditar o limite desta aproximação. Para combustíveis gasosos, a estimativa da análise do gás de combustão é um cálculo feito diretamente em base volumétrica (BIZZO, 2003).

3.5 CÁLCULO DA PROPORÇÃO TEÓRICA DE AR/COMBUSTÍVEL

Na combustão o objetivo é obter o máximo possível de calor. Não basta, porém que o rendimento calorífico atenda às necessidades requeridas, é preciso que isto seja feito de forma econômica. A fim de maximizar se o rendimento da combustão deve-se obter o melhor aproveitamento possível do potencial energético do combustível através de alguns fatores operacionais, como:

- Regular a relação ar-combustível;
- Proporcionar uma perfeita mistura ar-combustível.

A íntima mistura do combustível com o ar aumenta a superfície de contato entre ambos e têm influência decisiva na velocidade de combustão. Quanto mais íntima a união dos elementos, melhor a combustão. (FIEP, 2006).

- Ar para a Combustão

Conhecendo-se a composição do combustível e com base na estequiometria da reação, consegue-se calcular o ar necessário para a queima do combustível. Para se garantir a combustão completa recorre-se a uma quantidade adicional de ar além do estequiométrico, garantindo desse modo que as moléculas de combustível encontrem o número apropriado de moléculas de oxigênio para completar a combustão. Essa quantidade de ar adicional utilizada é chamada de excesso de ar. O excesso de ar é a quantidade de ar fornecida além da teórica (FIEP, 2006).

O excesso de ar proporciona uma melhor mistura entre o combustível e o oxidante, mas deve ser criteriosamente controlado durante o processo de combustão. Deveremos conhecer a quantidade ideal mínima possível de excesso a ser introduzida na queima, pois o ar que não participa da combustão tende a esfriar a chama, sem contribuir para a reação. Quanto maior o excesso de ar, maior o volume de gases nos produtos de combustão e

conseqüentemente maior a perda de calor pela chaminé, influenciando negativamente na eficiência da combustão (FIEP, 2006).

Entretanto as perdas por excesso de ar aumentam em proporção muito menor que as perdas com combustível não queimado. Assim, nos processos de combustão industrial sempre se trabalha com excesso de ar (FIEP, 2006).

O teor de excesso de ar a ser utilizado varia de acordo com o tipo de combustível a ser queimado e também com o equipamento de queima, sendo menor para combustível gasoso e maior para combustíveis líquidos e sólidos (FIEP, 2006).

Qualquer combustível convencional requer, de acordo com sua composição, uma quantidade específica e calculável de oxigênio, portanto de ar, uma vez que este é o agente comum de fornecimento para atingir teoricamente uma reação completa. Menos do que essa quantidade vai produzir combustão incompleta, ou seja, perda de calor potencial. Mais do que essa quantidade, gera perdas excessivas de gás de combustão e da temperatura (BIZZO, 2003).

3.6 CARACTERÍSTICA DO QUEIMADOR UTILIZADO

Um queimador é um equipamento que mediante o processo de combustão, tem por fim realizar a transformação de energia química de um combustível em calor. O combustível pode ser líquido, gasoso ou sólido. Para além de providenciar o calor no dispositivo de aquecimento, controlar também a temperatura de saída e pressão. É essencial que a queima de combustível seja eficiente para que o consumo de combustível seja reduzido. Para além destas funções, o queimador tem também um papel preponderante na estabilização de chama, promovendo a Recirculação (interna ou externa) dos gases da chama de modo a aquecer a mistura Ar/Combustível, Turbulência da mistura, Atomização (Pulverização) correta de combustível (IST, 1999).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. CALORÍMETRO

O calor de combustão de uma substância é determinado utilizando-se uma bomba calorimétrica. Neste aparelho a combustão ocorre a volume constante, de modo que a quantidade de calor, Q , recebida pelo conjunto que forma o calorímetro é igual em módulo à variação de energia interna do sistema reacional (COSTA, 2003).

De fato, se o sistema reacional e o calorímetro estão isolados adiabaticamente,

$$n \cdot DU = - Q = - C \cdot DT \quad , \quad (4.1)$$

onde:

n é o número de mols do reagente.

DU é a variação da energia interna do sistema reacional por mol de reagente.

C é a capacidade calorífica do calorímetro.

DT a sua elevação de temperatura.

Quando DU for expressa por massa de reagente utiliza-se o valor da massa de reagente, m, na equação acima.

A partir do valor de ΔU pode-se calcular o valor da variação da entalpia correspondente, ΔH , a partir da equação.

$$\Delta H = \Delta U + \Delta(PV) = \Delta U + \Delta n_g R T \quad (4.2)$$

Onde:

Δn_g é a variação de número de mols na fase gasosa do sistema durante a combustão.

R é a constante universal dos gases.

T a temperatura absoluta.

4.1.1 Medição do PCS dos Combustíveis Sólidos, Líquidos no Calorímetro.

As medidas do poder calorífico foram realizadas no Grupo de Engenharia Térmica (GET)/UFPE utilizando um calorímetro modelo AK 2000 Basic.

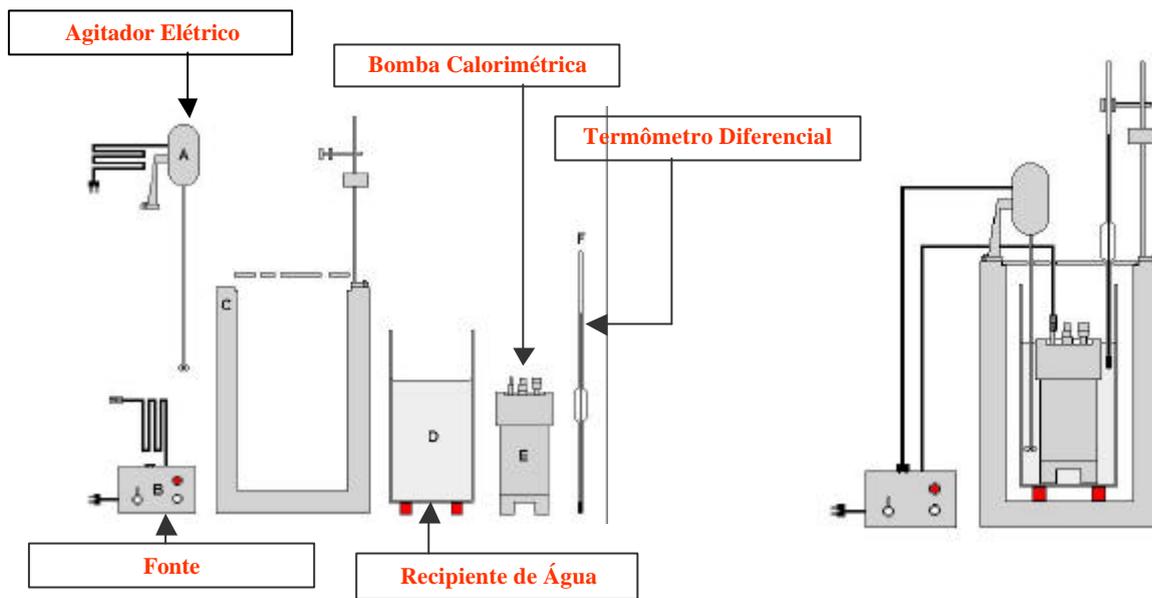


FIGURA 4.1: Componentes do Calorímetro

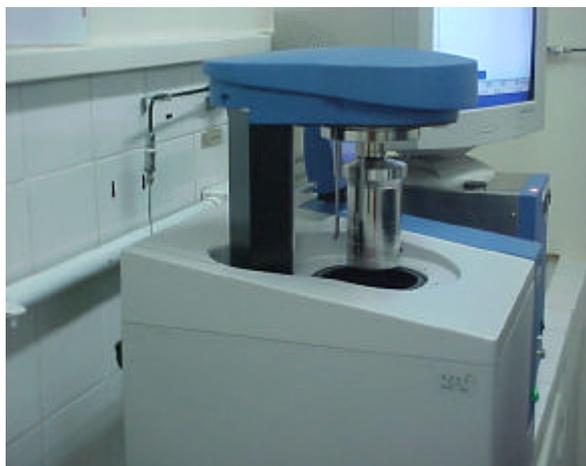


FIGURA 4.2: Calorímetro utilizado no GET/UFPE, modelo IKA - C 2000 BASIC.

4.2. AMOSTRAS DE COMBUSTÍVEIS

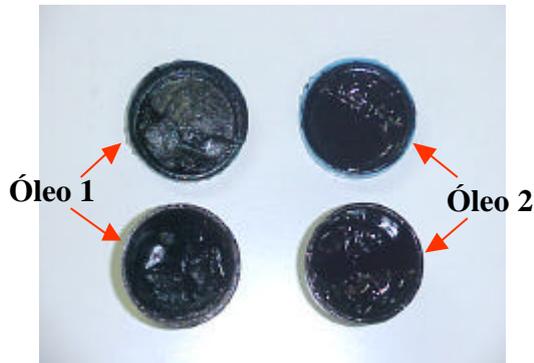


FIGURA 4.3: ÓLEO

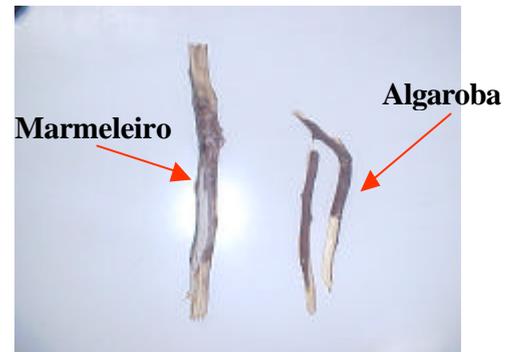


FIGURA 4.4: LENHA

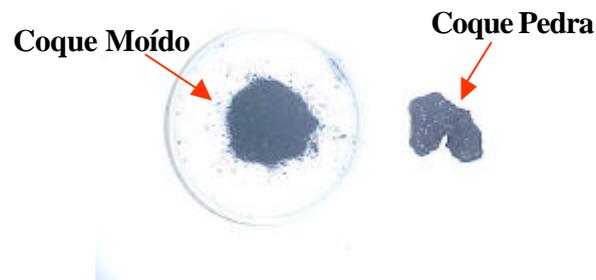


FIGURA 4.5: COQUE

4.3 PROGRAMA ACOMB

Determinação da Análise Teórica do Gás de Combustão

Uma vez que, segundo a Lei de Avogadro, o Kgmol e o volume são numericamente parâmetros permutáveis sob condições adequadas, a determinação das proporções de ar/combustível está encaminhada a partir dos produtos da análise teórica do gás de combustão. A qualificação teórica está assinalada aqui porque, devido a pontos práticos observados anteriormente, algumas diferenças podem ser encontradas entre a análise real do gás e a proposta nas mesmas condições iniciais. Então, a análise teórica indica a situação

ideal, e quanto mais perto a análise prática estiver desta tanto melhor. Para qualquer instalação que utiliza combustível, a experiência vai ditar o limite desta aproximação. Para combustíveis gasosos, a estimativa da análise do gás de combustão é um cálculo feito diretamente em base volumétrica.

O aplicativo AComb foi desenvolvido para auxiliar nos cálculos rotineiros relativos à combustão industrial de líquidos, sólidos, gases ou de suas misturas. Permitindo calcular o excesso de ar de combustão, teor máximo de CO₂, massa de ar estequiométrico, temperatura dos gases de combustão, composição e vazão mássica e volumétrica dos gases de combustão tanto em base seca como em base úmida, poder calorífico, densidade, massa molecular, calor específico, índice de Wobbe, combustível equivalente de uma mistura de combustíveis, dentre outras. O software trata do cálculo de parâmetros e caracterização de três correntes da reação de combustão: Ar (Denominado de Comburente, Ar de Combustão e Ar Primário), Combustível e Gases de combustão (Denominado de Gás de Chaminé e Gás de Combustão) demonstrados na figura (IPT, 2003).

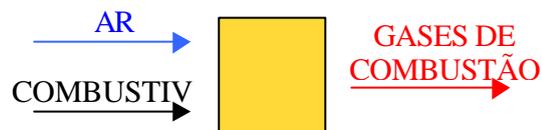


FIGURA 4.2: Correntes da reação de combustão

O AComb sempre trabalha com uma mistura de combustível. A dificuldade de se trabalhar com misturas de combustíveis, principalmente quando se trata de misturas de óleos e combustíveis gasosos, é a caracterização de ambos. Os óleos combustíveis são caracterizados pela análise elementar que é composição mássica de H, C, N, S e Z; umidade; temperatura e poder calorífico (fornecido como dados de entrada). Os combustíveis gasosos são caracterizados pelos teores volumétricos dos componentes dos hidrocarbonetos, temperatura, pressão e poder calorífico (o programa calcula através do banco de dados interno). É necessário, portanto, normalizar a caracterização dos combustíveis para se trabalhar com suas misturas. O AComb resolve esta questão criando um combustível equivalente que resulte na mesma combustão, ou seja, os mesmos gases de combustão à mesma temperatura (IPT, 2003).

O AComb não trata de nenhum equipamento ou operação unitária e com isso não calcula eficiências. A temperatura dos gases é arbitrária e depende de qual processo se está estudando e em função da temperatura o programa calcula a entalpia e a potência desta corrente (IPT, 2003). Uma das mais importantes funções do AComb é o cálculo do excesso de ar em função da temperatura adiabática dos gases de combustão. Dado um combustível, e sua temperatura, e supondo desprezível a troca de calor com o ambiente, é possível determinar a temperatura dos gases de combustão, em função do excesso de ar através do balanço de energia entre os insumos e produtos da combustão.

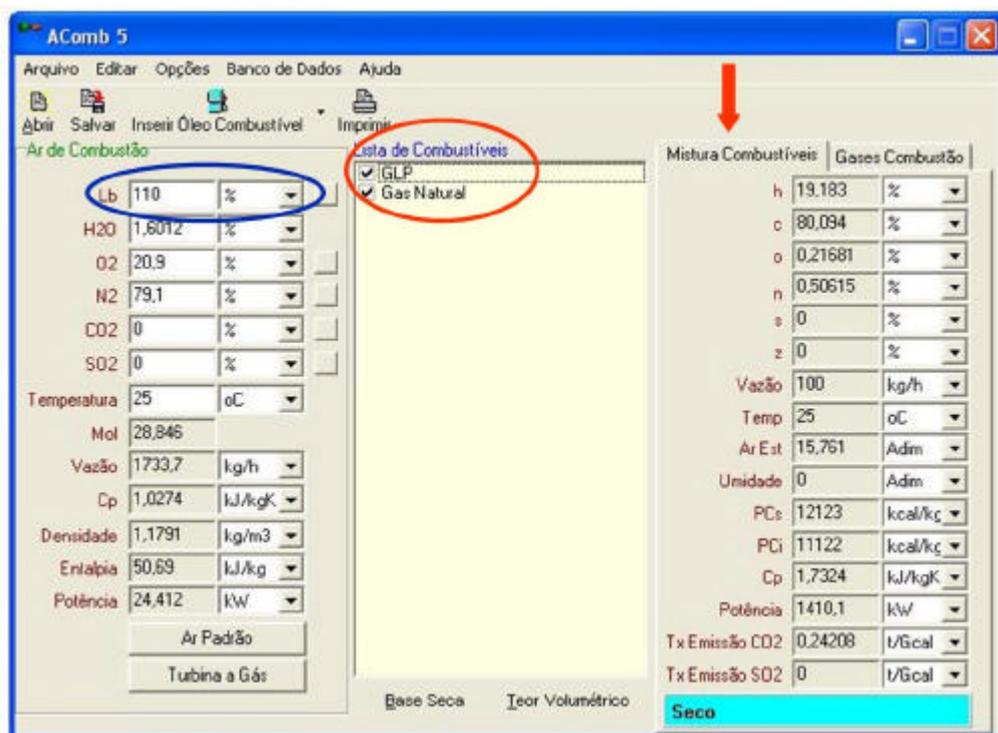


FIGURA 4.3: Janela do Principal do programa AComb5 – Dados da Mistura de combustível.

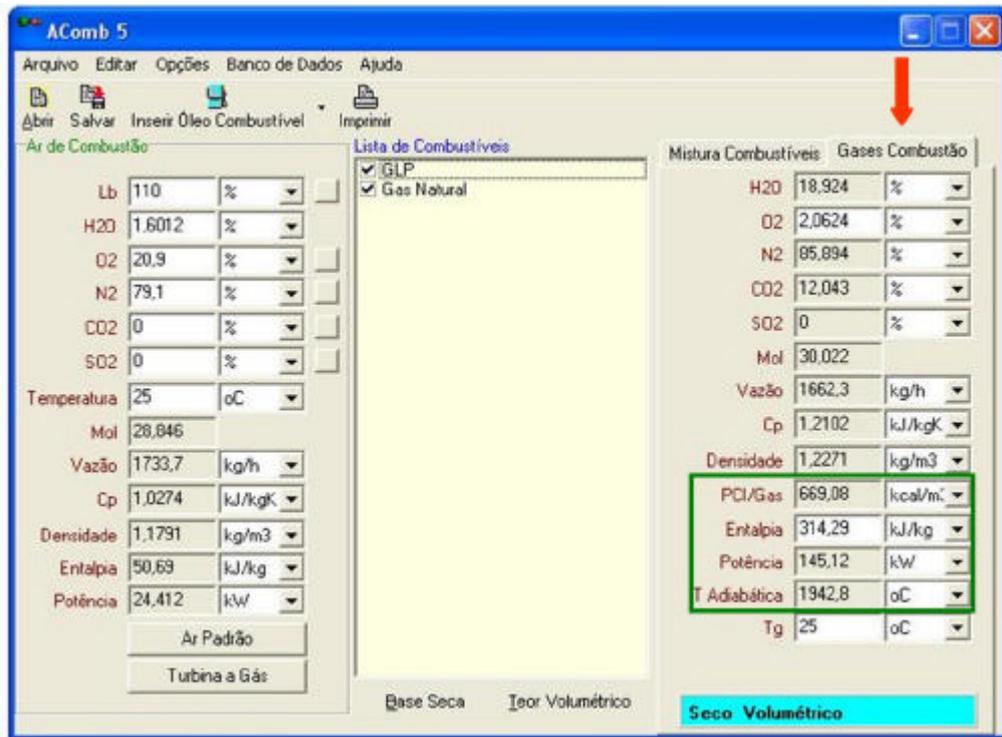
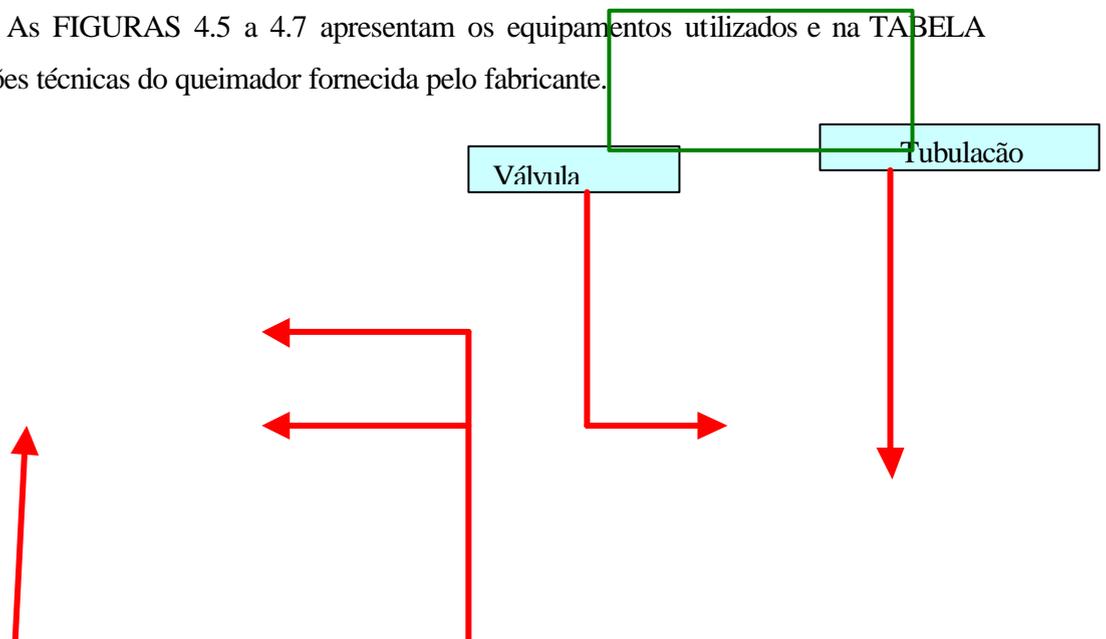


FIGURA 4.4: Janela do programa AComb5 – Dados dos Gases de combustão

4.4 PROCESSO DE COMBUSTÃO NO QUEIMADOR E SEUS COMPONENTES

No Laboratório de tecnologia e geociência do departamento de engenharia mecânica da Universidade Federal de Pernambuco (DEMEC/UFPE), foi utilizado um queimador Wheishaupt modelo WG 30 á gás, para um estudo experimental das propriedades do gás natural variando as proporções de ar-combustível na mistura. O queimador foi montado em um suporte metálico móvel com um reservatório de gás natural veicular com alguns componentes que são os mesmos utilizados nas conversões dos automóveis para o uso do referido gás. As FIGURAS 4.5 a 4.7 apresentam os equipamentos utilizados e na TABELA 4.1 informações técnicas do queimador fornecida pelo fabricante.



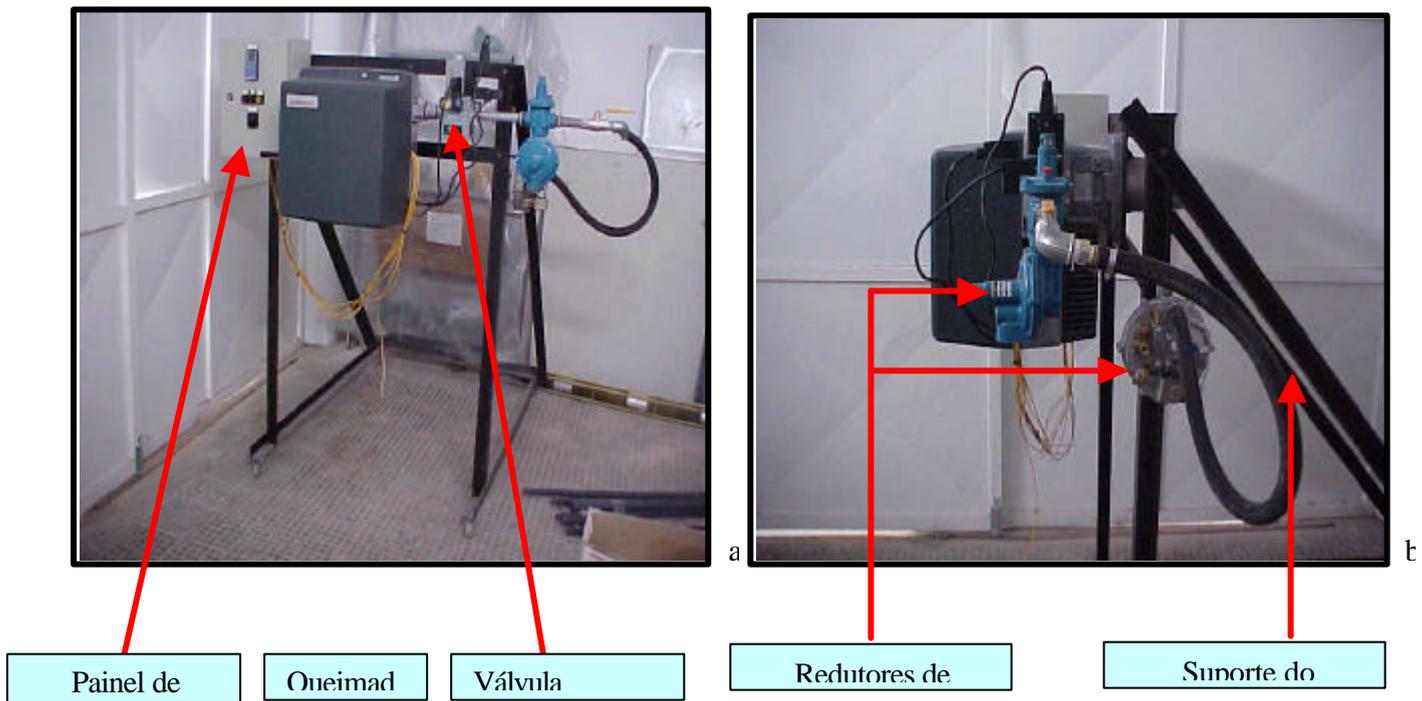


FIGURA 4.5 - Esquema físico do sistema do funcionamento do queimador mod. WG

30

TABELA 4.1 – Característica do queimador a gás modelo WG 30.

Potência Mínima	40 Kw
Potência Máxima	350kW
Regulagem	Modulante
Consumo de Gás	4,04 a 35,4 Nm³/h
Tensão de Comando	220V-60Hz
Tensão Motriz	220V-1Ø + 60Hz
Temperatura de Trabalho	180 °C

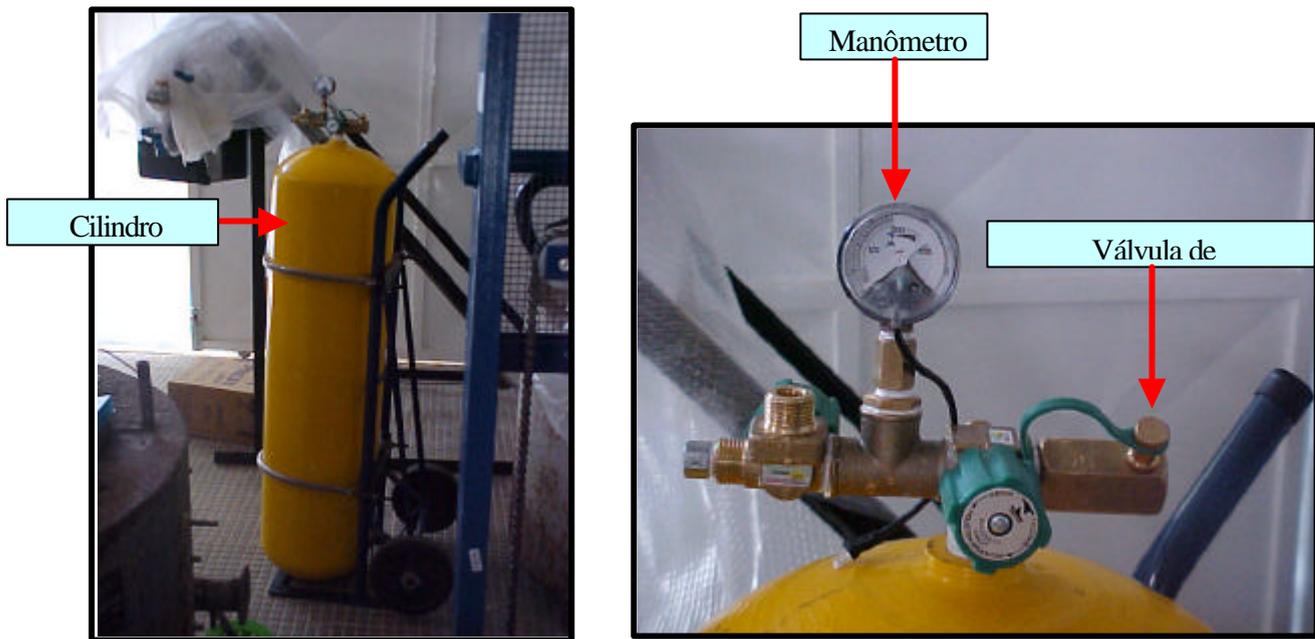


FIGURA 4.6 – Cilindro de Abastecimento



FIGURA 4.7 - Esquema físico do Queimador e do Cilindro de GNV

4.5 SISTEMA REGULAÇÃO DA PRESSÃO

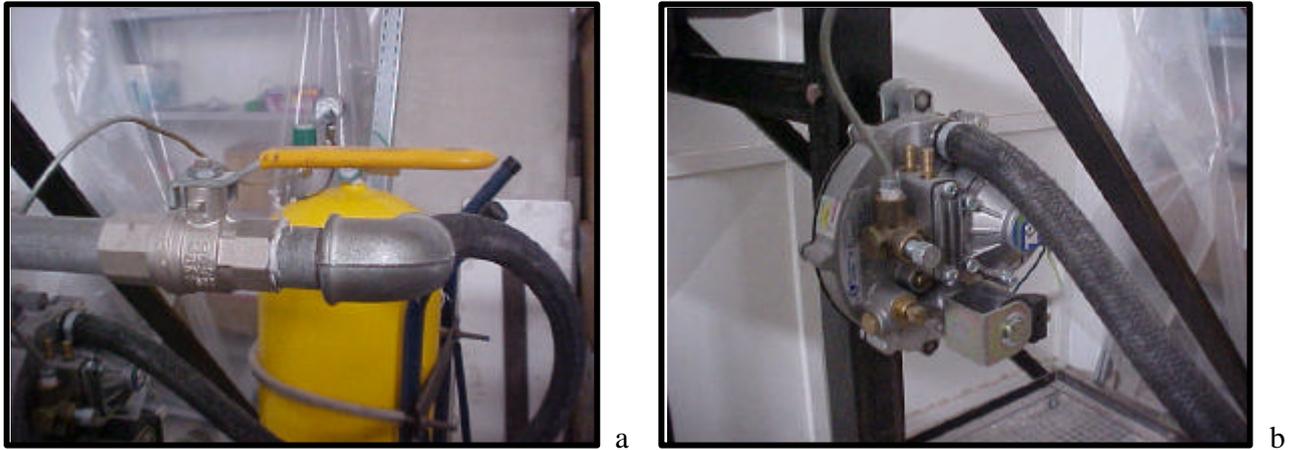


FIGURA 4.8; a - Válvula principal; b - Regulador de pressão.

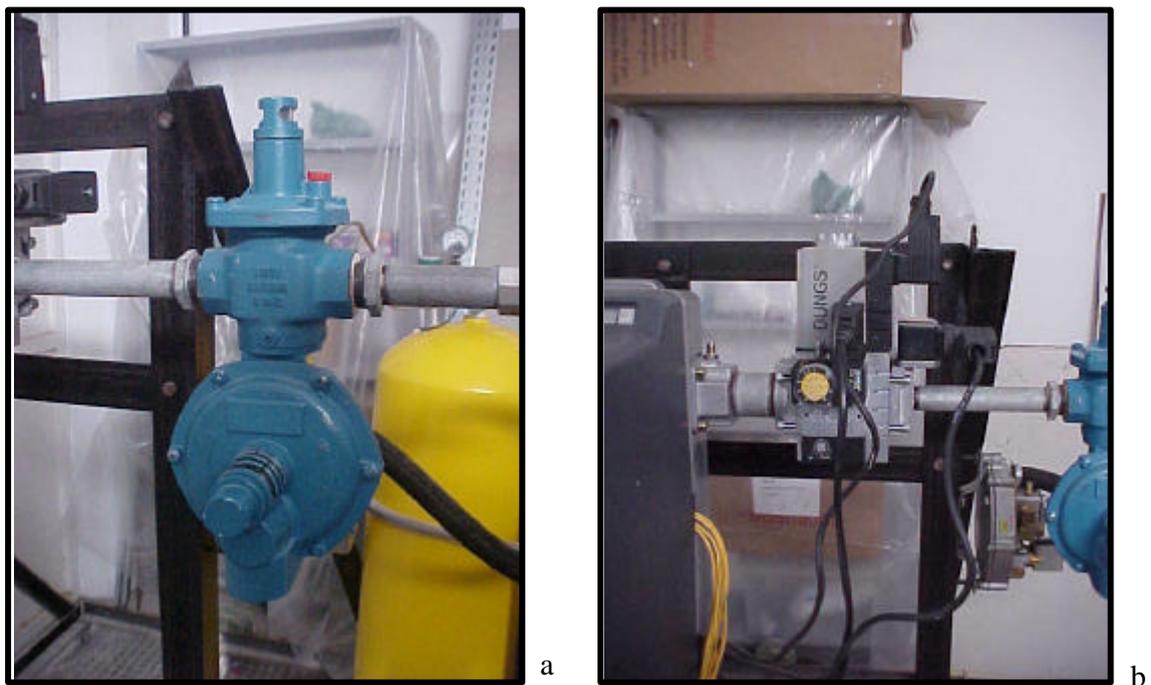


FIGURA 4.9; a - Redutor de Pressão Secundário; b - Controlador de pressão eletrônico.

- ?? A válvula Principal é responsável pelo abastecimento ou bloqueio do gás do cilindro para o queimador.
- ?? O regulador de pressão é responsável por reduzir a pressão de 200 bar para 2 bar.
- ?? O Redutor de pressão secundário é responsável por reduzir a pressão de 2 bar para 500 mbar e equilibra oscilações de pressão de gás da rede de abastecimento.
- ?? O controlador de pressão eletrônico é composto pelo pressostato de gás e válvula magnética dupla. O controlador dosa a quantidade de combustível para o queimador.

4.6 CONTROLE DA MISTURA AR-GÁS

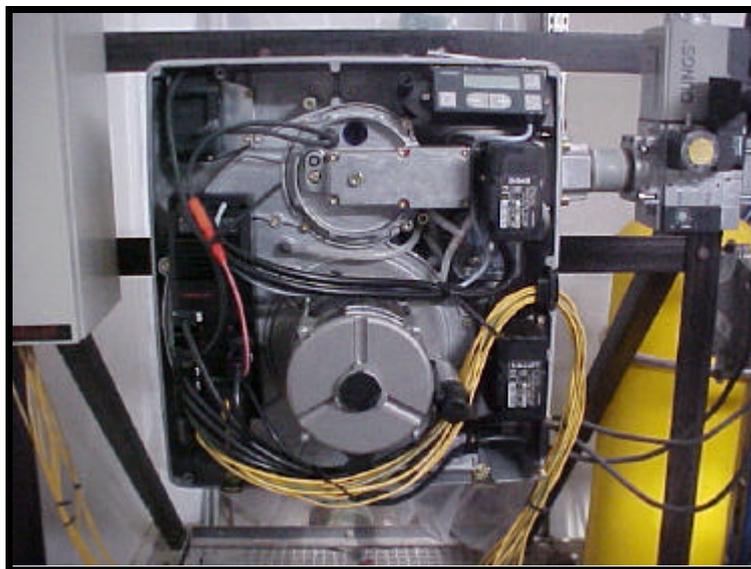


FIGURA 4.10 - Foto Interna do Queimador

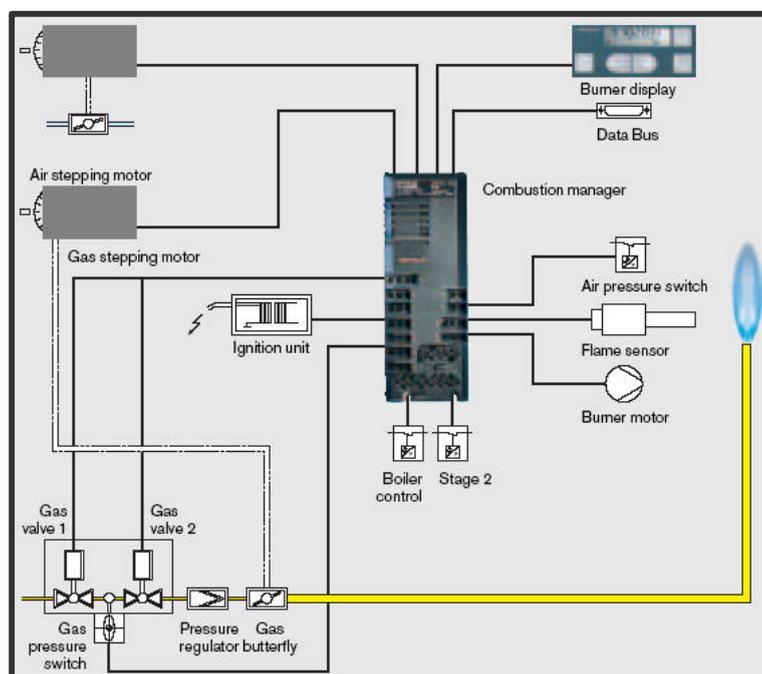


FIGURA 4.11 - Processo de controle da combustão

Gestor de Combustão – Dirige e controla todas as funções do queimador através do microprocessador e o controle de vedação integrado através das válvulas magnéticas. Os dados do funcionamento do queimador são visualizados no Mostrador de Controle LCD. No mostrador estão localizadas as teclas de comando, onde há ligação de dados BUS (eBUS) para os ajustes necessários.

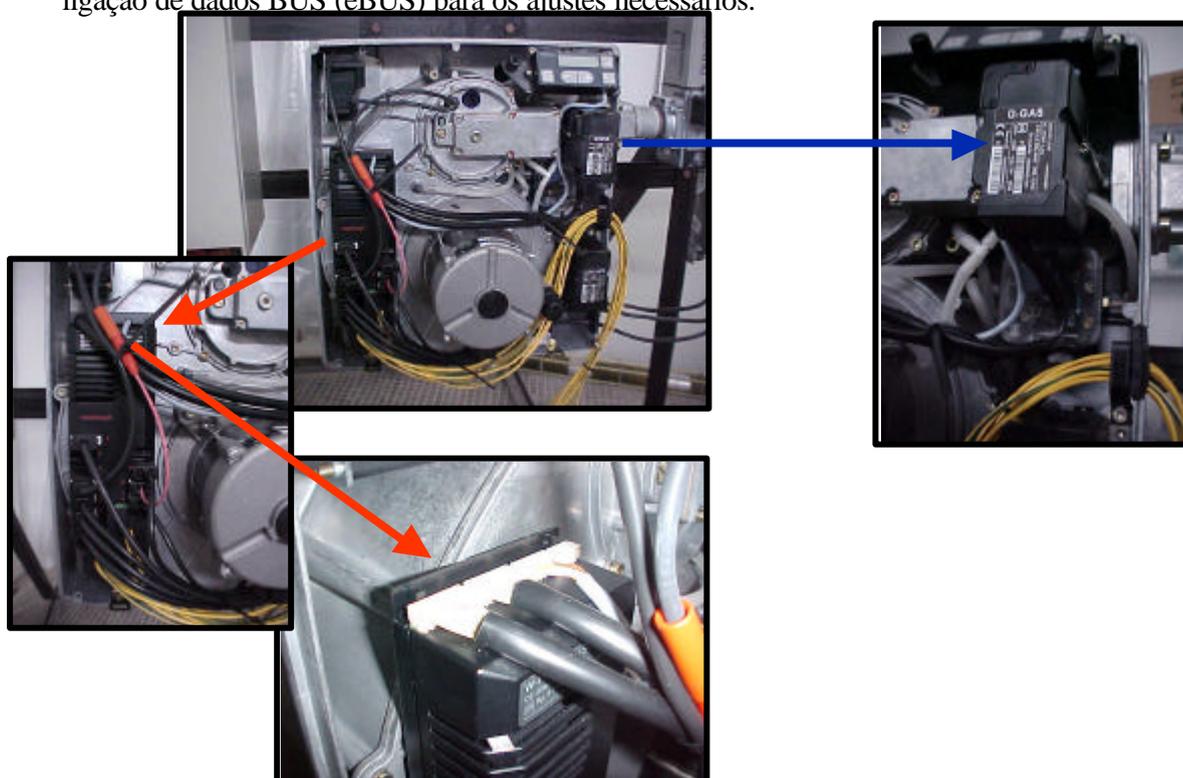


FIGURA 4.12 - Gestor de combustão WF 20 e conectores de controle



a

b

FIGURA 4.13 – a - Painel de Controle; b - Visor de controle LCD

4.7 SOFTWARE LABVIEW

LabVIEW (laboratory virtual instruments engineering workbench) é uma “linguagem gráfica de programação” desenvolvida pela National Instruments.

O LabVIEW é diferente das usuais linguagens de programação em aspecto importante: ao invés de utilizar linhas de código (linguagem texto), ele utiliza uma linguagem gráfica conhecida como linguagem G, simplificando o desenvolvimento do programa, e mostrando imediatamente ao usuário quando um erro foi cometido, permitindo ao usuário observar o que o programa está fazendo literalmente.

Os programas de LabVIEW são chamados de VIRTUAL INSTRUMENTS (VIs) porque a aparência e as operações simulam instrumentos reais. Os sistemas permitem a realização de testes totalmente automatizados, reduzindo a necessidade de acompanhamento do ensaio por parte do usuário, podendo este dedicar maior tempo à análise dos resultados do ensaio.

Tem que se fornecer um conjunto de especificações consistentes para o software LabVIEW e é preciso ajustar o equipamento em um ponto de partida adequado. Caso contrário o equipamento apresentará resultados inconsistentes.

O sistema operacional LabVIEW tem como função oferecer um suporte estável para o funcionamento do *software* e para aplicações que requerem performances determinísticas em tempo real e que não podem ser realizadas por um sistema operacional comum.

Funcionamento – O funcionamento do sistema pode ser descrito da seguinte forma: coleta do sinal, adequação do sinal para ser digitalizada, digitalização do sinal, software para o gerenciamento do ensaio e coleta de dados.



FIGURA 4.14 - Sistema de Funcionamento da Aquisição de dados

Os componentes do sistema de aquisição de dados da FIGURA 1 são descritos abaixo:

Transdutor (ou conversor): Converte uma grandeza física (temperatura, força, pressão, etc.) em elétrica (V, mV, A, frequência, etc.).

Atuadores: Dispositivo para ativar equipamentos de controle, usando pneumática, hidráulica ou elétrica. Ex.: Atuador de válvula.

Condicionadores de sinal: Asseguram a qualidade do sinal antes da conversão A/D, amplificando, filtrando, linearizando. Ex.: Amplificadores, filtros, etc.

Placas de aquisição e controle: Realizam a conversão do sinal analógico para digital (A/D), ou o contrário (D/A). O sinal analógico é um sinal de medida e converte a digital para que possa ser interpretado pelo computador.

Software: Responsável por todas as funções do sistema de testes, interface com o usuário, armazenamento e análise dos dados, é o que permite o uso do PC como instrumento.

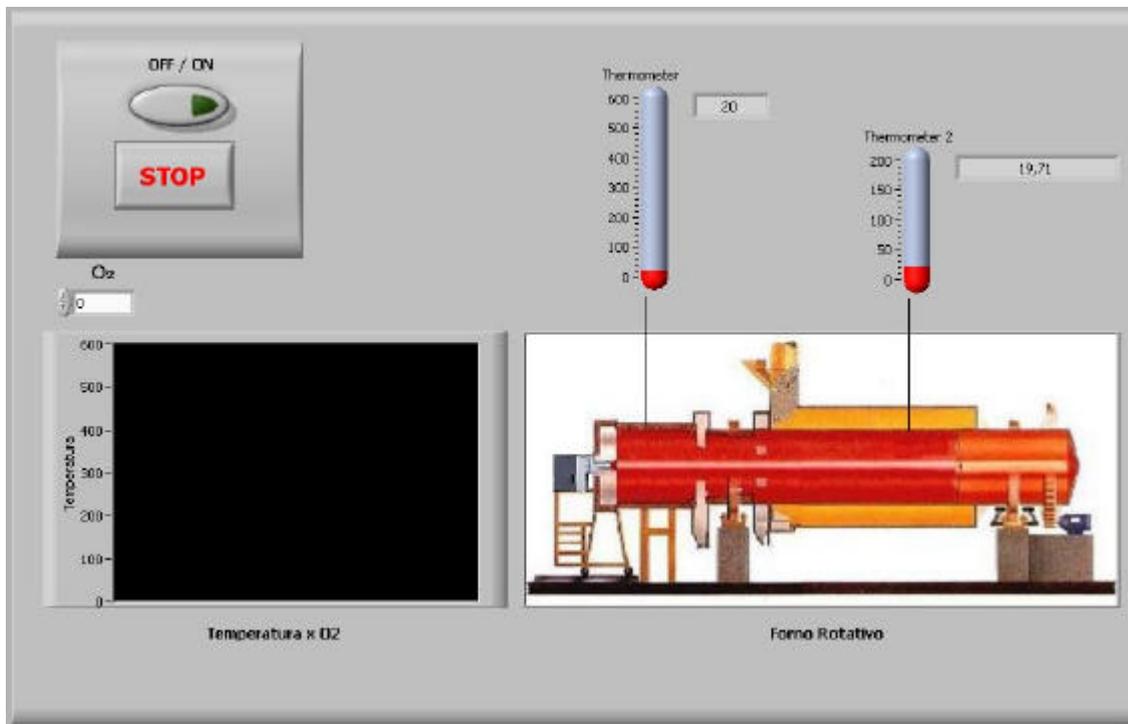


FIGURA 4.15 – Painel Frontal montado em LabVIEW para controle do processo Calcinação (Desativado -OFF)

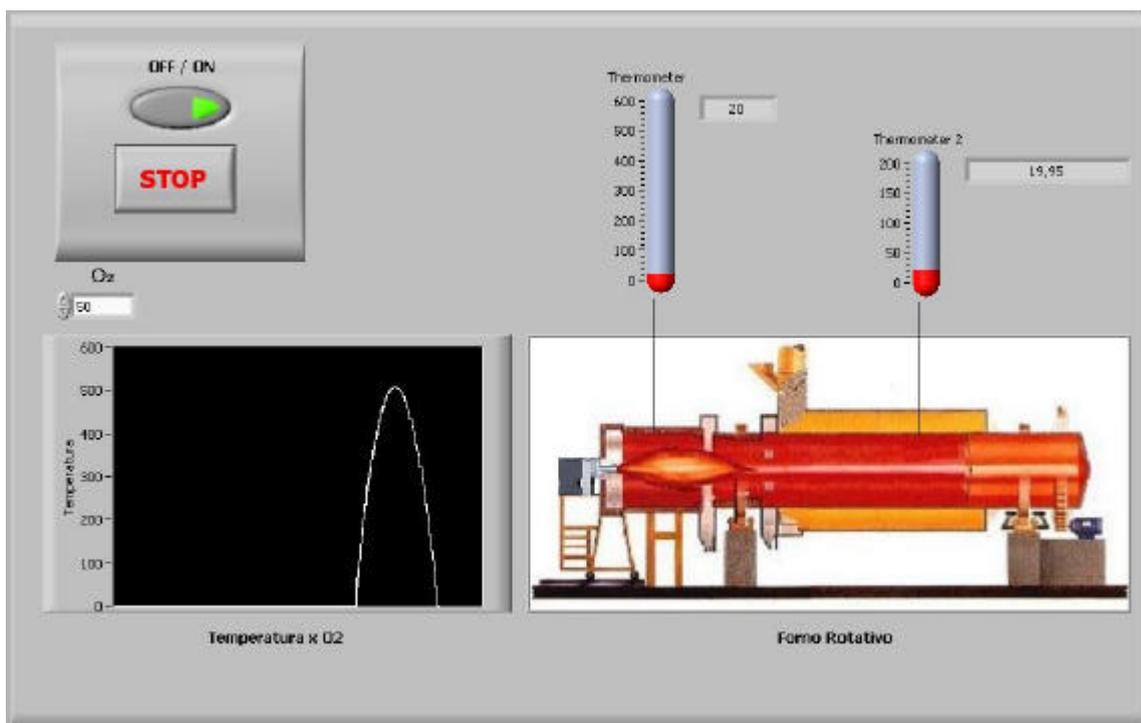


FIGURA 4.16 – Painel Frontal montado em LabVIEW para controle do processo de Calcinação(Ativado - ON)

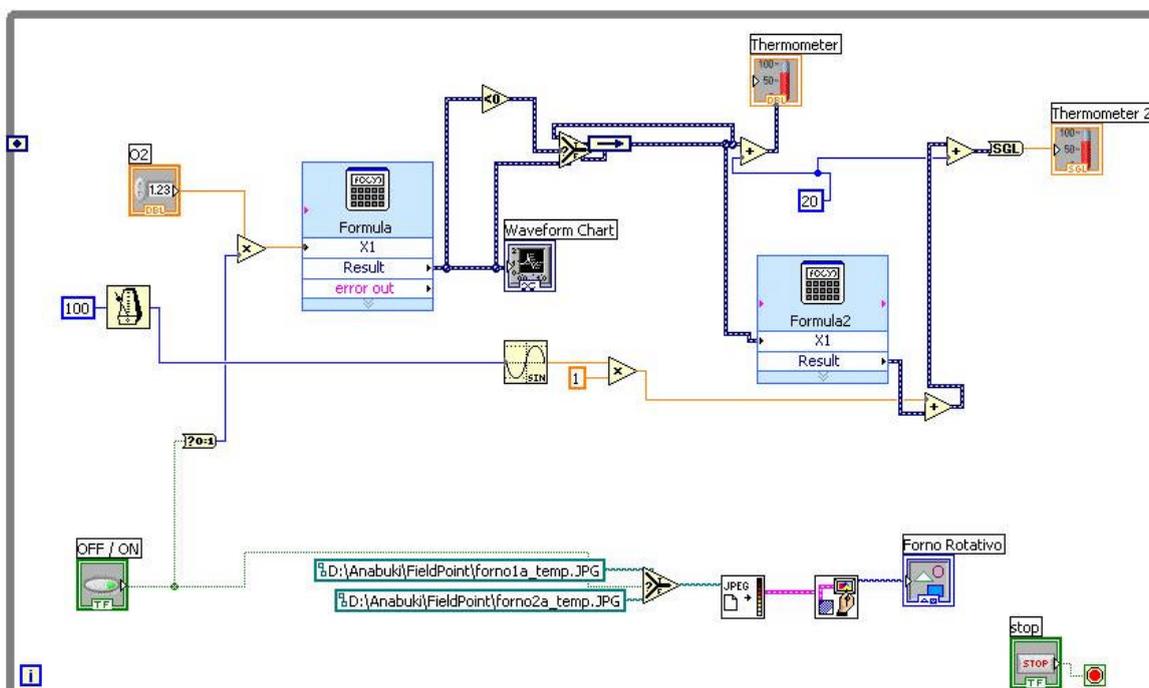


FIGURA 4.17 – Programação no Diagrama de Blocos montado em LabVIEW para o controle do processo de Calcinação

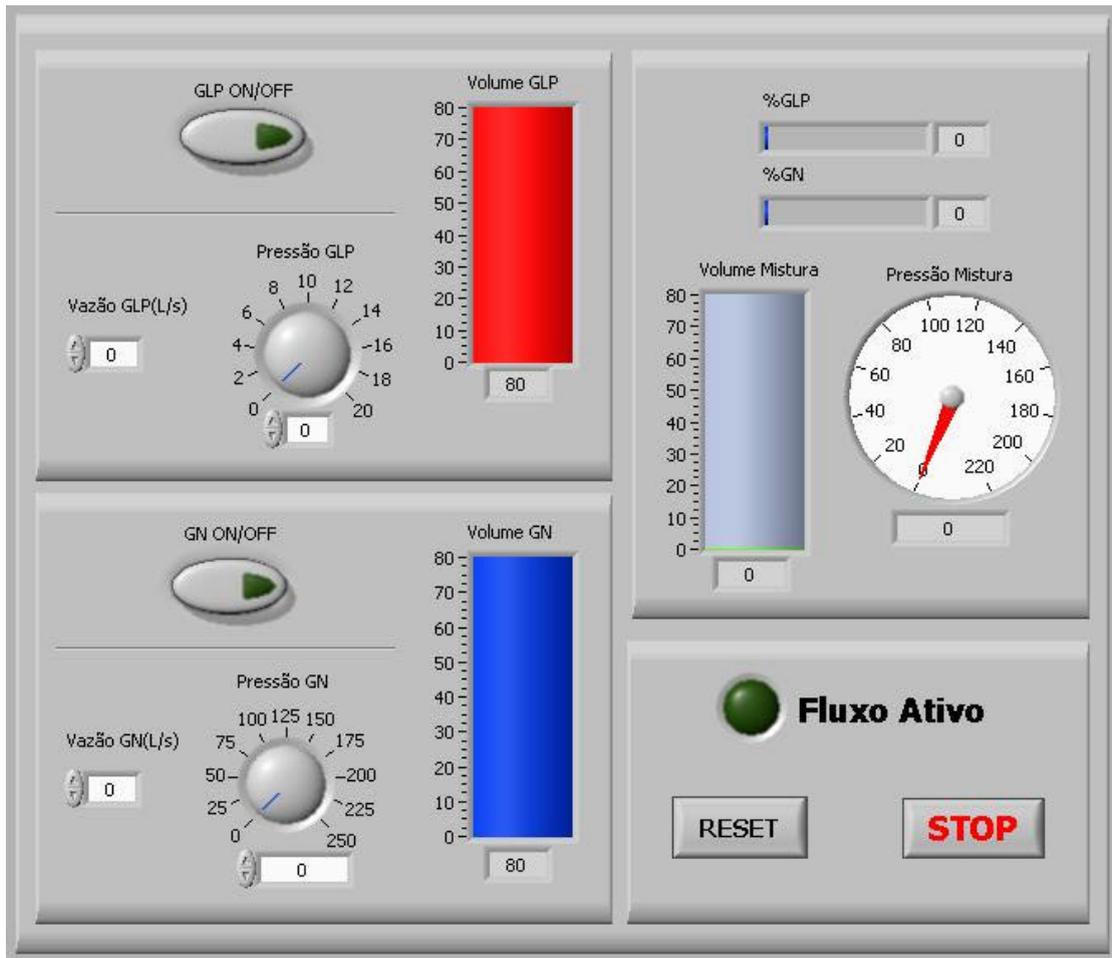


FIGURA 4.18 – Painel Frontal montado em LabVIEW para a mistura de combustíveis

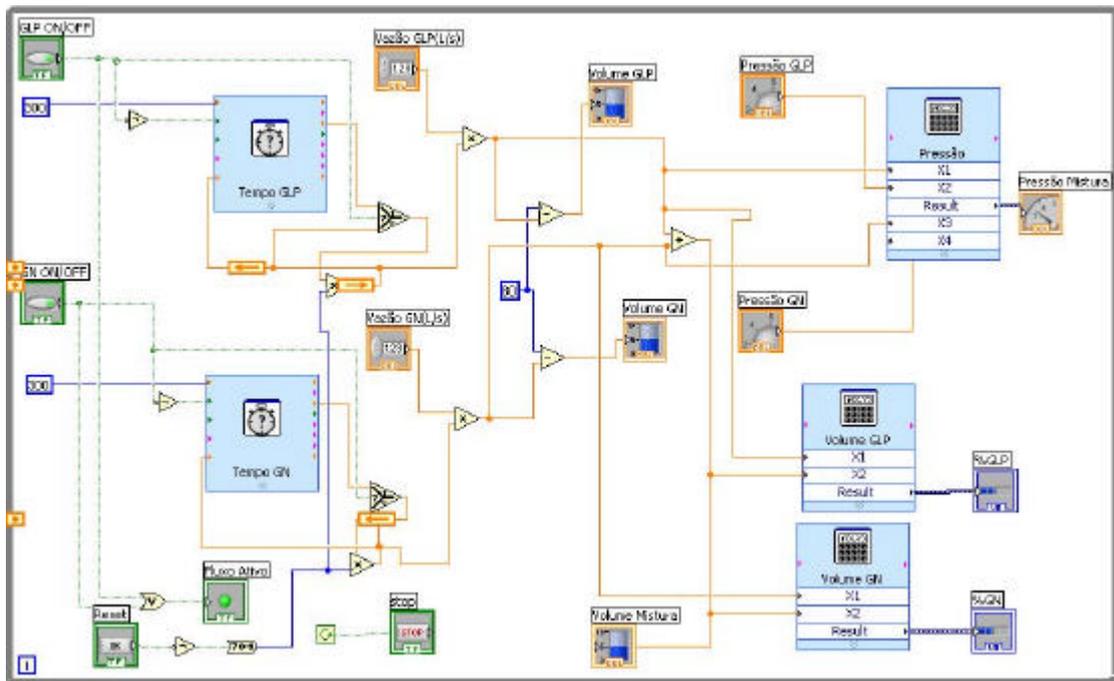


FIGURA 4.19 – Diagrama de Blocos para a mistura de combustíveis

5. RESULTADO E DISCUSSÕES

5.1 MEDIÇÃO DOS VALORES DO PODER CALORÍFICO DOS COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS E LÍQUIDOS NO CALORÍMETRO.



**PESAGEM DAS AMOSTRAS NA
BALANCA ANALÍTICA**



**INSERINDO DADOS DAS
AMOSTRAS NO**



**AMOSTRAS INSERIDAS NA
BOMBA CALORIMÉTRICA**



ENSAIO NO CALORÍMETRO

FIGURA 5.1 - Procedimento para a medição do PCS

5.2. ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO USO DE GÁS PARA CALCINAÇÃO DA GIPSITA

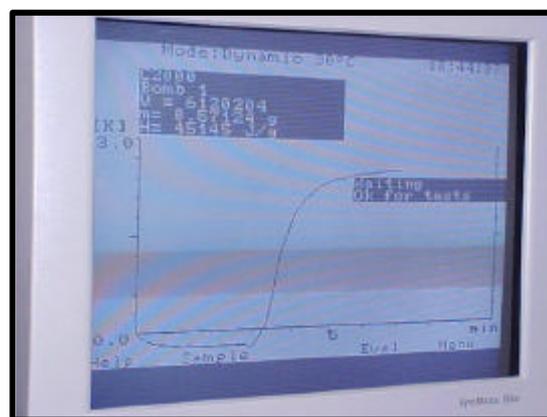
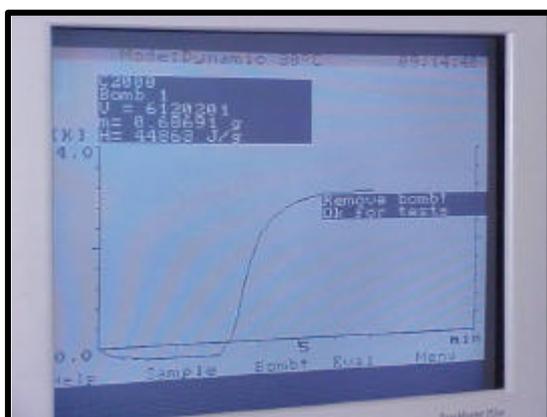


FIGURA 5.2 - Dados experimentais dos PCS das amostras de combustíveis utilizados na calcinação de Gipsita.

TABELA 5.1: PCS dos Combustíveis utilizados para a calcinação da gipsita

TIPO DE COMBUSTÍVEL	Nº. AMOSTRA	Nº. AMOSTRA CALORIMETRO	PESO(g)	PODER CALORÍF. (J/g)
COQUE	C-1	6120104	0,27030	34.954
COQUE	C-2	6120105	0,25665	35.037
COQUE MOÍDO	C-3	6120403	0,63967	34.231
MADEIRA (Algaroba)	A-1	6120106	0,18994	17.972
MADEIRA (Algaroba)	A-2	6120107	0,19344	18.002
MADEIRA (Algaroba)	A-3	6120401	0,03705	23.898
MADEIRA (Marmeleiro)	M-1	6120202	0,18869	18.321
MADEIRA (Marmeleiro)	M-2	6120203	0,14209	18.484
MADEIRA (Marmeleiro)	M-3	6120402	0,06696	20.596
ÓLEO F8	O-1	6120201	0,68691	44.863
ÓLEO F8	O-2	6120204	0,57124	45.145
ÓLEO T4	O-3	6120205	0,58682	25.132
ÓLEO T4	O-4	6120206	0,65384	27.011

TABELA 5.2: Propriedades do GN e do GLP

	GÁS NATURAL	GLP
ORIGEM	Reservatório de Petróleo e de Gás não associado	Destilação e Petróleo e processamento de GN
PESO MOLECULAR	17 a 21 g/mol	44 a 56 g/mol
PCS (MÉDIO)	9.400 kcal/m ³	28.000 kcal/m ³
PCI (MÉDIO)	8500 kcal/m ³	25.775 kcal/m ³
DENSIDADE RELATIVA (MEDIA)	0,63 kg/m ³	1,75 kg/m ³
MASSA ESPECÍFICA	0,72 kg/m ³	2,03 kg/m ³
PRINCIPAIS COMPONENTES	Metano (89,4%) Etano (7,86%) Outros (2,71%)	Propano (50%) Butano (50%)

PRINCIPAIS UTILIZAÇÕES	Residencial Comercial e automotivo (Combustível) Industrial (Combustível, Petroquímica e siderúrgica)	Industrial, Residencial e Comercial (Combustível)
PRESSÃO DE ARMAZENAMENTO	200 kgf/cm²	15 kgf/cm²

TABELA 5.3. Potência térmica e consumo de combustíveis para a produção de gesso

Combustível	PCI (Médio)	PCS (Médio)	Unid.	Consumo (Média)	Custo (R\$)	Custo/ton (R\$)
LENHA	2500	3.000	Kcal / Kg	0,8 m³ / Ton ou 300 Kg / Ton	10,00 m³ ou 340 kg	8,00
GLP	<i>10.997</i>	<i>11.920</i>	<i>Kcal / Kg</i>	21 Kg / Ton	2,69 kg	56,49
	<i>25.775</i>	<i>28.000</i>	<i>Kcal / m³</i>			
GN	<i>11.476</i>		<i>Kcal / Kg</i>	29 Kg / Ton	0,63 kg ou 1,40 m³	18,27
	<i>8.500</i>	<i>9.400</i>	<i>Kcal / m³</i>			
BPF	9.500	10.110	Kcal / Kg	36 Kg / Ton	1,50 kg	54,00
ÓLEO OA 1	9.600	10.800	Kcal / Kg	30 Kg / Ton	0,70 kg	21,00
COQUE	7.200	8.500	Kcal / Kg	35 kg / Ton	0,30 kg	10,50
ENG.ELÉT	860	—	Kcal / Kw	—	0,18/1,40 kW/h	—

FONTE: COSTA, Fernando; ITEP (2006) Acompanhamento da operação do Forno Marmita Rotativa de Prod. de 5 Ton / Bat ou 150 Ton/dia.

5.3 RESULTADO DOS CÁLCULOS DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DA MISTURA DOS COMBUSTÍVEIS GASOSO PELO PROGAMA ACOMB

A TABELA apresenta os valores referentes as propriedades da mistura do Gás Natural e do GLP em diferentes proporções. Estes valores foram obtidos considerando as condições normais de temperatura e pressão (CNTp) em que a temperatura é igual a 25° e a pressão é igual a 1 atm. A composição do Gás Natural está representada na TABELA 5.1 e do GLP na TABELA 5.2.

TABELA 5.1: Composição do GN:

GÁS NATURAL		
FÓRMULA	NOME	TEOR MOLA (%)
CH ₄	METANO	100,00

Fonte: IPT

TABELA 5.2: Composição do GLP:

GÁS GLP		
FÓRMULA	NOME	TEOR MOLA (%)
C ₃ H ₈	PROPANO	50,00
C ₄ H ₁₀	N-BUTANO	50,00

Fonte: IPT

TABELA 5.2: Resultado do poder calorífico da mistura de GN + GLP

COMBUSTÍVEL		PODER CALORÍFICO			
GN (%)	GLP (%)	PCS (kcal/kg)	PCI (kcal/kg)	PCS (kcal/m ³)	PCI (kcal/m ³)
100	0	12.701	11.476	9.144,72	8.262,72
75	25	12.508	11.358	13.289,75	12.067,88
50	50	12.316	11.240	17.303,98	15.792,2
25	75	12.123	11.122	21.184,94	19.435,7
0	100	11.930	11.004	24.933,7	22.998,36

TABELA 5.3: Densidade do GN e GLP

Combustível	GN	GLP
Densidade relativa (media)	0,72 kg/m ³	2,09 kg/m ³

Transformando de kcal/kg em kcal/ m³:

$$PC(kcal/ m^3) = D(kg/m^3) \times PC (kcal/kg)$$

(5.1)

Onde:

PC =Poder calorífico (Superior ou Inferior)

D = Densidade

Quando temos, por exemplo, a mistura na proporção GN (75%) + GLP (25%) em teores mássicos no Acomb o poder calorífico da mistura em (kcal/ m³) será:

$$PC_{Mistura} (kcal/m^3) = 0,75 \times D(kg/m^3)_{GN} \times PC (kcal/kg) + 0,25 \times D(kg/m^3)_{GLP} \times PC (kcal/kg)$$

$$PC_{Mistura} (kcal/ m^3) = 0,75 \times 0,72 \times 12.508 + 0,25 \times 2,09 \times 12.508$$

$$PC_{Mistura} (kcal/ m^3) = 13.289,75(kcal/ m^3)$$

Este cálculo no programa não é válido para teores volumétricos. Só é válido somente para teores mássicos.

Nota-se que o PCS ou PCI em kcal/m³ aumenta com o aumento da proporção de GLP. Diferente quando está em kcal/kg, pois eles têm densidades diferentes (devido às diferentes massas moleculares: CH₄ = 16 e GLP = 51).

TABELA 5.4: Potência térmica e consumo de combustíveis para a produção de gesso

ITEM	TIPOS DE FORNOS	COMBUSTÍVEL	ENERGIA CONSUMIDA (KCAL/TON)	EFICIÊNCIA TERMICA
01	PANELA	Lenha	1.643.800,00	9,4 % (*)
02	MARMITA	Lenha	1.095.950,00	14,0 % (*)
		Óleo BPF	439.650,00	35,0 % (*)
03	ROTATIVO	Óleo BPF	332.320,00	46,3 % (*)
04	ROTATIVO TUBULAR DUPLO	Gás Natural	200.000,00	77,0 % (**)

FONTE: (*) ITEP (2001); (**) MONTERDE (2006)

*Obs.: A energia teórica para a desidratação da gipsita é de 154.000,00 kcal/t.

5.4 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM PROCESSO DE COMBUSTÃO DE GASES TOTALFLEX PARA GERAÇÃO DE CALOR PARA CALCINAÇÃO DA GIPSITA

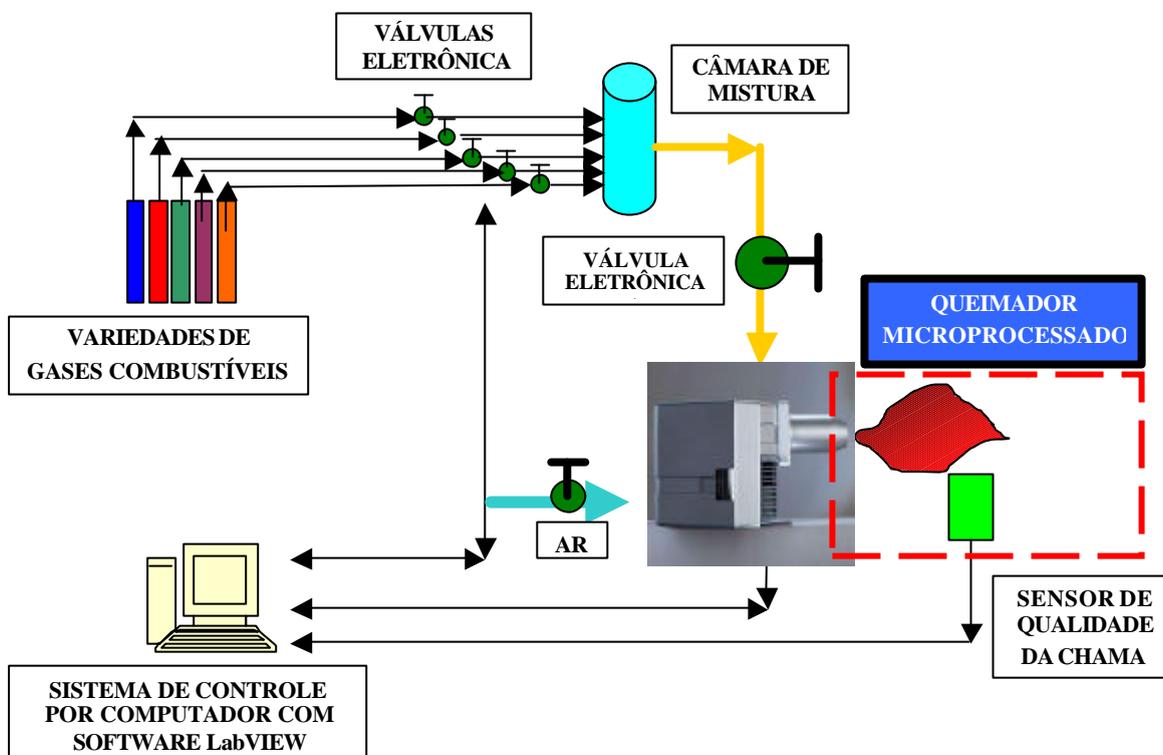


FIGURA 5.1: Esquema de controle da Mistura de combustíveis

Passos para a mistura do combustível: controle eletrônico de saída dos combustíveis, utilizando válvulas eletrônicas e programa com interface (LabView + Fieldpoint). Avaliação do gás contido no terceiro cilindro por software através de medição de temperatura e pressão.

6. CONCLUSÃO

Embora a possibilidade de ter gasoduto até o Pólo Gesseiro do Araripe em médio prazo seja bastante remota, a utilização de forno de calcinação de alta eficiência, por exemplo, forno tubular duplo, e transporte de gás a granel, pode ser uma solução imediata, reduzindo o impacto ambiental, minimizando o avanço da desertificação devido a derrubada de árvores locais para queima, visando a geração de calor, evitando mudança freqüente de matrizes energéticas e também da necessidade de ajustes das condições ótimas de calcinação.

7. TRABALHOS FUTUROS

- ✍ Utilizar o queimador totalflex microprocessado variando a proporção da mistura de combustíveis.
- ✍ Realizar estudos com o forno rotativo tubular duplo de queima direta para a calcinação da gipsita.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PERES, L.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V.A., **O Gesso: Produção e Utilização na Construção Civil**. Recife: Editora Bagaço, p.21-39, 2001.

GARCIA, R.; **Combustíveis e Combustão Industrial**. Rio de Janeiro; editora Interciência LTDA, 2002.

VLASSOV, D. **Combustíveis, Combustão e Câmara de Combustão**. Curitiba; editora da UFPR, 2001.

LAWN, C.J.; **Principles of Combustion Engineering for boilers**, Academis Press, 1987.

FAULKNER, E.; **Guide to Efficient Burner Operation: Gas, Oil, Dual Fuel**, The Farmount Press, 1981.

PERAY, K. E.; **The Rotary Cement Kiln**: New York; Chemical Publishing Co., Inc. 1986

BIZZO, W. A.; **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor**, São Paulo; UNICAMP, 2003

CAETANO, J.P.; JESUS, J.R.; ALVES, P.A.; DIAS, V. F.; **Sistema de Monitorização Contínua de Emissões Gasosas**. INESC, Lisboa, Portugal.

LADISLAU, A.; **Curso de Energia Fontes Alternativas**. Recife; UPE, 1997.

PIRES, C.W.; **Gesso na Construção Civil**. Recife; UPE, 2002.

CÓRNER, F.; **Conservação de energia fóssil em processos industriais**. Disponível em: <<http://www.krona.srv.br>>. Acesso em 16 de Maio de 2006.

SOARES, D.G. et al; **Rendimento de dois tipos de fornos de carvoejamento no sertão Pernambucano: Estudo de caso. Publicação Aceita no Quadro do Boletim Técnico Projeto GEF Caatinga**. Recife, 2004.

PÓLO volta a usar lenha e amplia devastação. **Jornal do Commercio**, Recife, 26 Jun. 2005. Economia.

DNPM/MME; **Sumário Mineral**. Brasília, 2006.200p.

MINASGÁS; **Equivalencia Economica do BPF e do GLP**. Recife, 2001.

IPT.; **ACom5: Guia do Usuário e Referência**, v. 5.02, São Paulo,2003.

IPT.; **Apresentação: ACom5 Combustão Industrial**, v. 5.02, São Paulo,2003

NATIONAL INSTRUMENTS; **Fieldpoint Operating Instructions**,Texas,USA, 2003.

NATIONAL INSTRUMENTS;**LabVIEW Graphical Programming and Virtual Instrumentation**. Disponível em:< <http://www.natinst.com/labview/what.html>> Acesso em: 24 de abril de 2004

PROMECA.;**Técnicas Experimentais**. Rio Grande do Sul; UFRGS 1996.

SEN - MME.; **Balanco Energético Nacional** - Publicado em 2000, referente ao ano base de 1999.

MINISTRY OF POWER.; **The Efficient Use of Fuel**. London. Her Majesty's Stationery Office. 1958. 888 p.

NORTH AMERICAN MFG. CO.; **Combustion Handbook**. Vol. 1. Third Edition. Cleveland. 1986. 332 p.

AGA .; **AGA Gas Handbook**. Kersti Ahlberg. Lidingö, Sweden. 1985. 582 p.

ITEP.; **Revista Pernambucana de Tecnologia**. Recife:v.2, n.3.,p.106, 1982.

WEISHUAPT.; Manual do Queimador a gás. Modelo WG 30, Alemanha, 2004.

CETEC.; **Teoria Simplificada da Combustão**. Belo Horizonte, 1988.

Homepages Consultadas:

[http:// www.petrobras.com.br](http://www.petrobras.com.br)>. Acesso em: 10 de março de 2004

[http:// www.combustionsystems.com](http://www.combustionsystems.com)>.Acesso em: 10 de março de 2004

[http:// www.ind-comb.comm](http://www.ind-comb.comm) >. Acesso em: 12 de abril de 2004

[http:// www.snyderspecialtysupply.com](http://www.snyderspecialtysupply.com) >. Acesso em: 10 de abril de 2004

[http:// www.weishaupt.de](http://www.weishaupt.de) e www.weishaupt-corp.com >. Acesso em: 10 de Março de 2004

[http:// www.cuenod.com](http://www.cuenod.com) e www.cuenod.it >. Acesso em: 10 de Dezembro de 2003

[http:// www.saacke.de](http://www.saacke.de) >. Acesso em: 15 de abril de 2004

[http:// www.elco-kloeckner.de](http://www.elco-kloeckner.de) >. Acesso em: 19 de abril de 2004

[http:// www.bentone.com](http://www.bentone.com) >. Acesso em: 10 de Abril de 2004

[http:// www.rayburner.com](http://www.rayburner.com) >. Acesso em: 10 de Abril de 2004

[http:// www.oilon.com](http://www.oilon.com) >. Acesso em: 20 de Fevereiro de 2004

[http:// www.natinst.com/](http://www.natinst.com/) >. Acesso em: 20 de Fevereiro de 2004

<http://infoener.iee.usp.br/cenbio/biomassa.htm>>. Acesso em: 1 de Novembro de 2006

http://alfa.ist.utl.pt/~lroriz/MyPage/et_T34.htm>. Acesso em: 12 de Julho de 2005

http://alfa.ist.utl.pt/~lroriz/MyPage/et_T11.htm>. Acesso em: 12 de Julho de 2005

ANEXO 1

SIMULAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES DE PRODUÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE GLP COMO COMBUSTÍVEL GERADOR DE CALOR PARA O PROCESSO DE SECAGEM DE GIPSITA.

Em meados de 2001, no pólo gesseiro do Araripe, foram realizados testes de análise do processo de produção de gesso com a utilização do GLP, verificando as características do processo, condições das instalações gerais dos equipamentos e método de produção.

Com base nos dados e observações levantadas foi feito uma análise do processo de produção de gesso com a utilização do GLP e a verificação dos eventuais pontos, onde é possível se obter melhorias no rendimento total do processo.

O processo de combustão usando GLP como combustível torna possível um maior controle do processo, com maiores possibilidades de automação e acompanhamento das temperaturas ponto a ponto, permitindo realizar ajustes contínuos, análises e respostas imediatas às variações das temperaturas internas.

A queima a gás traz significativas vantagens em relação à queima com outros combustíveis, tanto nos aspectos relativos à limpeza dos gases após a combustão, como na uniformidade da distribuição do calor interno, na eficiência de combustão e rendimento térmico, no controle da atmosfera interna do forno nos casos de queima direta, e ainda torna a automação e controle do processo mais eficiente e facilmente aplicável.

A utilização de qualquer combustível em processos industriais exige a sua armazenagem, operação de abastecimento e transporte, sendo este manipulado por sistemas auxiliares. No caso do óleo combustível, requer sistemas compostos por bombas, válvulas, mangotes, além do sistema de aquecimento, para efetuar estas etapas e a operação de alimentação de combustível do processo.

O aquecimento prolongado do óleo combustível (BPF) em temperatura elevada tanto no transporte quanto no armazenamento e distribuição, acarreta no mesmo uma carbonização, principalmente nos locais de aquecimento diminuindo o poder calorífico e o rendimento e provoca a evaporação das frações leves que eleva a viscosidade do óleo

combustível (BPF) restante. Além disto, a carbonização aumenta a manutenção dos equipamentos e a geração de fuligem na queima.

A perda total resultante deste processamento é estimada em 7% do óleo combustível (BPF) manipulado, significando que apenas 93% do poder calorífico do combustível comprado é efetivamente aproveitado no processo.

O GLP por sua vez não apresenta perdas. Seu estado liquefeito permite fácil estocagem, transporte e abastecimento, sendo desnecessária a utilização de equipamentos de transporte, tais como bombas e compressores. Além disso, a combustão é facilmente controlada, resultando numa queima homogênea com pequeno excesso de ar e elevado aproveitamento do poder calorífico do combustível.

EQUIVALÊNCIA BPF X GLP

Avaliação econômica comparativa:

COMBUSTÍVEL	PCI (kcal / kg)	PREÇO (06/01)
ÓLEO BPF	9.500	0,484
GÁS GLP	11.800	0,730
Energia disponível Com 1 kg de GLP Com Equivalência BPF		0,498

Fonte: Minasgás (2001)

Porém, a existência das perdas no processo de manipulação equivale a uma redução no PCI do óleo combustível (BPF).

COMBUSTÍVEL	PCI (kcal / kg)	PREÇO (06/01)
ÓLEO BPF	8.200	0,484
GÁS GLP	11.800	0,730

Fonte: Minasgás (2001)

Isto significa dizer que cada 1(un) kg de óleo combustível (BPF) adquirido disponibiliza apenas 8.200 kcal/kg.

Verificado o poder calorífico inferior de 1 kg de óleo combustível (BPF) pode se determinar à relação entre a energia contida nele e em 1 kg de óleo combustível (BPF) não equivalente a 1 kg de GLP.

Considerando os valores de PCI verifica-se a relação entre a energia disponível e o preço para 1kg de óleo combustível (BPF) e 1kg de óleo combustível (BPF) não equivalente à 1kg de GLP.

Com base na relação de custo do Óleo Combustível (BPF) acima, a disponibilização de 11.800 kcal (energia disponível em 1 kg de GLP) deveria custar:

$$C = \frac{11.800}{8.200} \times 0,4840 = \text{R\$ } 0,6964/\text{kg} \quad \text{Óleo combustível (BPF) equivalente}$$

Isto significa dizer que esta relação de custo demonstra que 1 kg de óleo combustível (BPF) equivale (I) que fornece a mesma energia útil que 1 kg de GLP poderia custar até R\$ 0,6964.

A combustão do GLP em seu estado gasoso oferece maior eficiência para o processo de conversão do calor que a queima do óleo combustível (BPF).

A avaliação do aumento de eficiência no aproveitamento da energia contida no combustível, resultante da substituição de óleo combustível (BPF) por GLP, foi efetuada de forma conservadora devido ao fato de utilizar-se dos dados da publicação da FIESP, os quais são inquestionáveis onde os índices de rendimento do processo de conversão de energia são 75% e 80% para o óleo combustível (BPF) e para o GLP, respectivamente.

Com o objetivo de evidenciar a análise, foi feito à obtenção do coeficiente de rendimento ajustado.

$$\eta_{\text{BPF}} = 0,75$$

$$\eta_{\text{GLP}} = 0,80$$

$\eta_{\text{Eq}} = \eta_{\text{GLP}}/\eta_{\text{BPF}} = 1,067$ conclui-se que o aumento da eficiência do processo de conversão de energia obtido com a substituição do óleo combustível de baixo ponto de fluidez pelo gasoso será no mínimo de 6,7%.

Exemplo:

Supondo uma instalação padrão com consumo médio de potência elétrica de 170.000W trabalhando 24h em 30dias por mês tem se:

$$170.000 \text{ W} \times 24(\text{horas/dia}) \times 30(\text{dias/mês}) = 122.400 / \text{Kwh mês}$$

Considerando o preço da energia elétrica industrial de 0,04843 / kWh indicando um gasto mensal com energia para a manipulação do óleo combustível (BPF)

$$T = 122.400(\text{kWh/mês}) \times 0,04843 \sim 6000,00 \text{ R\$/mês}$$

Na instalação do GLP não necessita de energia adicional para a sua operação.

Custo de manutenção dos queimadores a óleo combustível (BPF)

Os queimadores de óleo combustível (BPF) necessitam de manutenção periódica para garantir a atomização do combustível e operação adequada dos sistemas de alimentação do combustível.

De forma geral o valor médio mensal para a manutenção de um queimador a óleo é de aproximadamente R\$ 1600,00 incluindo peças e mão de obra.

Já o GLP é um combustível limpo e não exige manutenção custosa nos queimadores.

Do ponto de vista energético conclui-se que para 1 ton de GLP é necessário 1,267 ton de Óleo combustível(BPF).

Para o caso em estudo tem-se:

Combustível	Quantidade	Preço	Custo (R\$/mês)
GLP	315 ton. /mês	960,00 R\$ ton	302.400,00
Custo Total			302.400,00

Isto representa um valor por 1 ton de GLP igual a R\$ 960,00. Gerando uma economia na ordem de R\$ 27.933,96. Nestes dados é acrescido ainda a redução dos custos referentes a limpezas, aferição e desgaste dos equipamentos do sistema e dos custos das paradas programadas para a manutenção e interrupção da produção.

Os ganhos relacionados aos produtos está relacionado a maior produção com menor contaminação do produto final, eliminação do odor e preservação do meio ambiente.

Avaliação Comparativa entre BPF x GLP

Para produzir 1 ton de gesso com queima indireta:

Produção diária da fábrica (ton. /dia) = 150.

Produção mensal da fábrica em 30 dias (ton/mês) = 4500

BPF	QUANT.	Custo	
Quantidade de BPF (Kg) p/ 1ton de gesso	29 kg		11,6498
Energia elétrica em equip. p/bombeio (KW)	60 kW		
Consumo de Energia elétrica p/1 ton. (KW)	9,6 Kw/ton		
Preço da energia fora de ponta	0,0363 R\$/Kwh	21 horas	45,766
Preço da energia horário de ponta	0,345 R\$/Kwh	3 horas	62,2404
Custo da energia elétrica p/ queimar óleo BPF		R\$/150 ton	108,007
		R\$/1ton	0,720
Manutenção do sistema da Queima R\$		(R\$/mês)	1580
		(R\$/dia)	52,666
		(R\$/ton)	0,3511
Custo total para queimar BPF/ton de gesso beta			12,721

GLP	QUANT	CUSTO
Quantidade de GLP (Kg) p/ 1 ton de gesso	21,8	
Custo total para queima de GLP por tonelada de Gesso beta		13,208
Redução do Custo pelo aumento da produtividade (6,7%)		12,323

Obs:

Testes realizados com 3 carretas R\$ 45.990,00 preço unid. ± 15.330,00

Gastos mensais de ± 200.000,000 (13,05 carretas)

Preços:

?? Normal: 0,73 / kg (setenta e três centavos por quilo de gás)

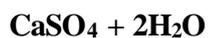
?? P/ Teste: 0,50 / kg

Queima direta: consumo 19 a 21 kg/gás por Ton. de Gesso

Queimadores setpoint

ANEXO 2

3. CÁLCULO DO DIMENSIONAMENTO DO QUEIMADOR WEISHAAPT



$$\text{Ca} = 40 \times 1 = 40$$

$$\text{S} = 32 \times 1 = 32$$

$$\text{O} = 16 \times 4 = 64$$

$$\text{H} = 1 \times 4 = 4$$

$$\text{Soma} = 140 \text{g/mol}$$

QUANTIDADE DE GIPSITA: $340 \text{ kg/h} = 340 \times 10^3 \text{ g/h}$

Energia: 100Kj/mol

$$100 \text{Kj}/140 \text{g}$$

$$340 \times 10^3 \text{ g/h} \times 100 \text{Kj}/140 \text{g} = 2,428 \times 10^5 \text{ kj/h}$$

Eficiência: 80%

$$1 \text{j} = 4,18 \text{cal}$$

$$1 \text{Kcal} = 1 \text{Kw}/860$$

$$2,428 \times 10^5 \text{ kj/h} / 4,18 = 0,5808 \text{Kcal/h}$$

$$0,5808/860 = 6,75 \times 10^{-4} = 67,5 \text{kW/h}$$

$$67,5 \text{kW/h}/0,8 = 84,375 \text{kW/h}$$

Dados:

?? Temperatura de entrada: $T_1 = 30 \text{ à } 45^\circ\text{C}$.

?? Temperatura de saída: $T_2 = 150 \text{ à } 180^\circ\text{C}$ (Gesso Hemidrato)
 $T_2' = 300^\circ\text{C}$. (Gesso Anidrita)

?? Calor específico da gipsita: $C_p = 1090 \text{J.kg/K}$ (300K e $\sim 100 \text{Kpa}$)

?? Umidade de entrada: 40 a 50%

?? Umidade de saída: 10 a 20%

Tipo de queimador:

?? Fabricante: Weishaupt do Brasil Indústria e Comércio Ltda

?? Série B e W.

?? Tipo WG

?? Combustível N(gás natural), S(gás de rua) e F(gás GLP)

?? Capacidade: 10 -550 kW