

N. CLASS. M 621.194
CUTTER. 5 586 P
ANO/EDIÇÃO 2015

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS - UNIS
ENGENHARIA MECÂNICA
JEFERSON PINTO DA SILVA

PROJETO DE UMA CALDEIRA

Varginha
2015

JEFERSON PINTO DA SILVA

PROJETO DE UMA CALDEIRA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel, sob orientação do Prof. Luiz Carlos Vieira Guedes.

Aprovado em / /

OBS:

Obrigado Senhor por Ser Meu Criador, esse trabalho dedico aos acessos pela vida, Meus Pais, Minhas Irmãs pelas suas doçuras proporcionadas ao longo da vida e a minha Paixão, Meu Filho chamado Murilo.

RESUMO

À primeira instância, caldeira é um tipo de equipamento específico e de informações limitadas ao que tange no seu projeto. Começou a emergir quando a crise do petróleo aconteceu na década de 70. Suas fontes começaram a ser mais difundidas no Brasil, pois o petróleo era sua principal fonte energética. Isso alastrou no exterior também.

Essa informação empolgou todo o profissional do ramo e a disposição de informações como entidades normativas a ser difundido sem restrições.

A intenção deste trabalho é mostrar as premissas no que diz respeito ao cálculo de uma caldeira, não só com objetivo de trabalho para apresentação de conclusão de curso, mas, com efeito de construir um equipamento num futuro próspero.

O óleo combustível que é produzido com o refino do petróleo é a principal fonte calorífica desse trabalho, pois ser o principal incentivo à produção das caldeiras e geradores de vapor. Se falando de outras fontes de energia como lenha, gás natural, carvão mineral já aumentaram consideravelmente seu consumo em relação à década mencionada.

A tendência manteve em todos os países industrializados, as razões pelas quais das facilidades na condução e operação das caldeiras a óleo, por fatores ecológicos imprescindíveis. O acesso ao combustível é seguro no que diz respeito a fornecimento, as redes asseguram seu fornecimento.

Os construtores de caldeiras devem continuar a fabricação do equipamento na queima de óleo, a mudança de combustível ainda é remota se tratando de fornecimento contínuo do combustível. Ainda não há garantia maior de fornecimento ao usuário.

A atenção está voltada as novas fontes de energia, os projetos específicos para queima de novas formas de geração de vapor já estão no mercado e só não estão superando derivados do petróleo por ser fonte de energia localizada (disponível em determinada região). Dentre elas estão o bagaço de cana, cavacos de lenha, borra de café, lixos urbanos, cascas de frutas; qualquer fonte que possa gerar calor.

O trabalho é de muita complexidade e a fonte para tal elaboração foi de difícil acesso. Agradeço a todos que direta ou indiretamente colaboraram para o feito, indicaram fontes de cálculos, empresas colaboradoras, amigos, parentes, normas, tabelas, fotografias; e sua paciência.

ABSTRACT

At first instance, the boiler is a specific type of equipment and information limited to the terms in your project. Began to emerge when the oil crisis happened in the 70s its sources began to be more widespread in Brazil, as oil was the main energy source. This spread overseas as well.

This information wowed any professional branch and the provision of information to regulatory bodies to be distributed without restriction.

The intent of this paper is to show the premises with regard to the calculation of a boiler, not only in order to work for course completion presentation, but co purpose of building a machine in a prosperous future.

Fuel oil that is produced with the oil refining is the main heat source of this work, therefore be the main incentive the production of boilers and steam generators. If talking about other energy sources such as wood, natural gas, coal have already significantly increased their consumption in relation to the mentioned decade.

The trend continued in all industrialized countries, the reasons why the facilities in the conduct and operation of oil boilers, for essential ecological factors. The access to the fuel is safe as regards the supply networks ensures its supply.

The builders of boilers must continue to manufacture equipment in oil burning; fuel switching is even remotely the case of continuous fuel supply. There is no greater assurance of supply to the user.

The attention is the new energy sources, the specific projects for burning new forms of steam generation already on the market and are not only overcoming petroleum to be localized energy source (available in a given region). These include sugarcane bagasse, wood chips, coffee grounds, municipal waste, fruit peels; any source that can generate heat.

The work is of great complexity and the source for this development was difficult to access. I thank everyone who directly or indirectly contributed to the achievement; they indicated sources of calculations, collaborating companies, friends, relatives, standards, tables, photographs; and your patience.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caldeira Flamotubular	13
Figura 2 - Caldeira Aquotubular	14
Figura 3 - Caldeira Aquotubular	14

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de Detonabilidade	19
Tabela 2 – Temperatura Adiabática Ideal dos Gases Combustíveis Usuais	20
Tabela 3 – Temperatura de Ignição Espontânea	21
Tabela 4 – Variação da Densidade de Dois Óleos Combustíveis com a Temperatura	23
Tabela 5 – Condutividade Térmica dos Óleos Combustíveis	23
Tabela 6 - Condutividade Térmica dos Gases	24
Tabela 7 – Poder Calorífico dos Elementos e Gases	26
Tabela 8 – Comparação Entre os Valores de PCI Obtidos com Diferentes Métodos	27
Tabela 9 – Valores Experimentais do Fator de Excesso de Ar	32
Tabela 10 – Peso e Volume Molares de Substâncias	34
Tabela 11 – Coeficiente de Dilatação Média dos Gases entre 0 e 100°C	47
Tabela 12 – Propriedade dos Gases Perfeitos	48
Tabela 13 – Peso e Volume Específicos de Alguns Gases	50
Tabela 14 – Calores Específicos à Pressão Constante de Vários Gases Perfeitos	52
Tabela 15 – Calor Específico Médio dos Gases	53

LISTA DE ÁBACOS

Ábaco 1 – Temperatura de Combustão Teórica	20
Ábaco 2 – Excesso de Ar	21
Ábaco 3 – Poder Calorífico Superior em Função da Densidade	22
Ábaco 4 – Calor Específico de Óleos Combustíveis de Viscosidade Diversas	24
Ábaco 5 – Calor Específico Médio dos Gases	25
Ábaco 6 – Poder Calorífico dos Óleos Combustíveis em Função da Relação C/H e da Densidade	27
Ábaco 7 – Volumes de Ar e Gases da Combustão na Queima de Combustíveis Sólidos em Função do PCI	39
Ábaco 8 – Volumes de Ar e Gases da Combustão na Queima de Combustíveis Líquidos	40
Ábaco 9 – Volumes de Ar e Gases da Combustão na Queima de Combustíveis Gasosos	41
Ábaco 10 – Volume de Ar e Gases de Combustão da Lenha de Composição Definida com Avaliação de Água e CO ₂ Contido nos Gases	42
Ábaco 11 – Determinação do Volume de Ar/Gases Formados na Queima de Combustíveis Sólidos e Líquidos em Função do PCI	43
Ábaco 12 – Apresenta os Valores da Combustão do Lixo Urbano em Função do PCI	44
Ábaco 13 – Determinação do Peso dos Gases e do Vapor de Água Formados na Queima de Combustíveis Sólidos e Líquidos em Função de “n”	45
Ábaco 14 – Entalpia dos Gases em kcal/Nm ³	56
Ábaco 15 – Entalpia dos Gases em kcal/Nm ³	57
Ábaco 16 – Entalpia do Ar e do Gás de Combustão (20~135°C)	58
Ábaco 17 – Entalpia do Ar e do Gás de Combustão (290~560°C)	59

Ábaco 18 – Entalpia do Ar e do Gás de Combustão (530~1010°C)	60
Ábaco 19 – Entalpia do Ar e do Gás de Combustão (980~1260°C)	61
Ábaco 20 – Entalpia do Ar e do Gás de Combustão (1095~1650°C)	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1 Definições.....	12
2.2 Tipos Fundamentais de Geradores de Vapor de Água.....	13
2.3 Componentes Clássicos.....	14
2.4 Seleção do Gerador de Vapor.....	15
2.5 Características e Performance.....	15
2.5.1 Superfície de Aquecimento.....	15
2.5.2 Produção Normal de Vapor.....	16
2.5.3 Produção Máxima Contínua de Vapor.....	16
2.5.4 Produção de Picos.....	16
2.5.5 Qualidade do Vapor.....	16
2.5.6 Temperatura do Vapor.....	16
2.5.7 Pressão de Trabalho.....	16
2.5.8 Pressão de Construção.....	16
2.5.9 Pressão de Prova.....	17
2.5.10 Eficiência Térmica.....	17
2.5.11 Perdas.....	17
3 CAPACIDADE DE UM GERADOR DE VAPOR.....	17
4 COMBUSTÍVEIS.....	18
4.1 Definição.....	18
4.2 Classificação.....	18
5 PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS.....	18
5.1 Propriedades.....	18
5.2 Ponto de Fulgor.....	28
5.3 Resíduo Carbono.....	29
5.4 Viscosidade.....	29
6 PROCESSOS DE COMBUSTÃO.....	29
6.1 A Combustão.....	29
6.2 Tipos de Chamas.....	30
6.3 Queima dos Combustíveis.....	30

6.4 Velocidade de Propagação da Chama.....	31
6.5 Temperatura da Chama.....	31
6.6 Comburente.....	31
6.7 Volume de Ar Real.....	32
6.8 Ar Primário e Ar Secundário.....	32
7 CÁLCULOS DE COMBUSTÃO.....	33
7.1 Reações de Combustão.....	34
7.2 Peso e Volume Teóricos de Ar.....	36
7.3 Peso e Volume de Ar Real.....	37
7.4 Peso e Volume dos Gases de Combustão.....	37
7.5 Volume dos Gases de Combustão na Queima de Combustíveis Gasosos.....	38
7.6 Fórmulas e Ábacos Práticos.....	38
8 PROPRIEDADES DOS GASES.....	45
8.1 Cálculo de Volume de Ar Real e Temperatura de Saída dos Gases.....	46
8 CONCLUSÃO.....	63
9 BIBLIOGRAFIA.....	63

1 INTRODUÇÃO

A atividade de gerenciamento das unidades industriais nos dias de hoje é altamente afetada pelo gerenciamento dos riscos inerentes ao processo produtivo. A evolução desta atividade associada à ocorrência de acidentes industriais de elevada intensidade promoveram o desenvolvimento da segurança do processo dentro das empresas operadoras de processos contendo equipamentos dotados de energia acumulada como as caldeiras, vasos de pressão e fornos.

O risco tolerável já é um parâmetro estabelecido por dispositivo legal em vários estados brasileiros tais como São Paulo, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul e Bahia de forma que projetos destes equipamentos devem ser submetidos a análises quantitativas de risco para determinar a sua conformidade.

Caldeiras, vasos de pressão e fornos são equipamentos que manuseiam um elevado grau de energia que se liberadas inadequadamente apresentam um potencial para acidentes catastróficos. Portanto estes equipamentos exigem especial atenção quanto ao grau de confiabilidade necessária para as barreiras de segurança representadas por requisitos de projeto, operação dentro dos níveis de projeto e manutenção para assegurar o grau de segurança implícito no projeto.

No Brasil há um conjunto de dispositivos, de observância obrigatória, que por pertencerem a Consolidação das Leis do Trabalho - CLT constituem-se em normas a serem obedecidas por todos os empregadores denominadas de Normas Regulamentadoras.

Nos dias de hoje temos instrumentos normativos representados pelas normas ANSI/ISA – 84.00.01 “Functional safety: Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector” [1] e IEC 61511 – “Functional safety – Safety instrumented systems for the process industry sector – Part 3: Guidance for the determination of the required safety integrity level” [2] que orientam sobre a gestão do intertravamento em indústria de processo e que seriam muito úteis na atualização das normas regulamentadoras citadas neste artigo.

O processo de combustão é responsável por mais de 85% da energia utilizada pelo homem e está presente em quase todos os setores da sociedade em qualquer parte do mundo.

No Brasil, estima-se que 80% da energia utilizada sejam oriundas da queima de derivados do petróleo, gás natural, carvão mineral, lenha, carvão vegetal e resíduos agroindustriais, ou seja, por processos de combustão. A desvantagem da utilização destes processos é a poluição do ar, tema que tem sido extensivamente pesquisado nas últimas décadas e caracteriza-se como um fator de grande importância na busca da preservação do

meio ambiente e na implementação de um desenvolvimento sustentável, pois seus efeitos afetam de diversas formas a saúde humana, os ecossistemas e os materiais. O primeiro passo para aproveitar melhor esta forma de conversão de energia é conhecer como o processo de combustão acontece, quais as variáveis podem ser alteradas visando maior eficiência e redução na emissão de poluentes.

Esse trabalho foi desenvolvido com este objetivo e para alcançá-lo desenvolveu-se um modelo para gerenciamento de combustão utilizando planilhas eletrônicas. Para construção do modelo utilizou-se uma equação de balanço estequiométrico e admitido alguns poluentes com sendo resultado do processo de combustão. Com isto foi possível balancear a equação utilizando o %O₂ e CH₄ como dados de entrada e determinar pelo balanço o restante dos produtos. Com os resultados obtidos pelo balanço estequiométrico foi possível calcular as perdas de energia da caldeira. Com todos estes resultados na planilha realizou-se alterações sucessivas em parâmetros de entrada e foram plotados alguns gráficos de resultados.

Por isso o projeto visa o desenvolvimento da caldeira com queima de óleo combustível pesado, é um dos principais tópicos com sujeito e predicado do desenvolvimento do trabalho futuro.

O projeto foi calculado para óleo combustível e gás natural, todas as empresas que se encontram em ambiente que não há combustível disponível; sobra de processo como algumas bio-massas, gases combustíveis, lixos, cavacos de madeira, licor preto de fábrica de celulose ou combustíveis diversos, tenha que adquirir o óleo para a queima por ser abundante, o emprego dessa caldeira é adequado para o para tal finalidade. Sem contar que o espaço que ocupa é mínimo e sua logística é flácida.

Calcular, projetar e fabricar a caldeira conforme necessidade, desde as informações preliminares e provar com seu funcionamento que o projeto é equivalente. A construção da caldeira cai acontecer futuramente.

Atingir na queima as propriedades dos combustíveis; através dos cálculos realizados fazer os testes dos processos de combustão; dimensionar caldeiras não somente para combustíveis líquidos e gasosos, mas, também para sólidos; fazer que efetivamente perdas e rendimentos possam ser comparados na prática, máximo aproveitamento do calor da fonte de energia; projetar tanto caldeiras flamotubulares quanto aquatubulares; definir todos os possíveis periféricos do equipamento; aprofundamento nos controles das suas emissões atmosféricas; conhecer sua instrumentação; aplicação da água na caldeira; treinamento para recepção, ensaio e operação das caldeiras; construção geral; e normas de fabricação e operação do equipamento.

Utilizando uma caldeira, são várias as formas de agregar valores tanto do aspecto social como industrial para a comunidade. No âmbito empregatício, uma caldeira dependendo do seu tamanho e aplicação gera muitos empregos, tanto na fase de seu projeto e construção como na sua fase de operação; é um equipamento seguro, porém, hostil; toda sua fase requer treinamento, existem normas e leis que abrangem sua funcionalidade.

A forma de geração de energia mais barato que existe, consome muitas vezes sobras; de colheitas, processos industriais, cortes de madeiras, cortes de papéis, lixo orgânicos; imensos que geram uma energia final com um payback de curto prazo. Aplicação onde é que haja fonte de energias para gerar calor/vapor é muito cogitado para ser ter uma caldeira.

Este trabalho será feito através de pesquisas sobre geradores de vapor em sites, livros e informações de terceiros como empresas e pessoas que trabalham ou trabalharam no ramo, onde será buscado o máximo de informações para se chegar num resultado claro e bem embasado.

Após o estudo de caldeiras, estaremos vendo o modelo que utiliza queimadores com combustíveis líquidos e gasosos.

E por ultimo analisar o estudo de caso da empresa em questão, onde existente uma caldeira com combustível hidrogênio, analisar custos da caldeira, viabilidade de instalação, consumo de combustível sem esquecer-se do meio ambiente.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Definições

As caldeiras a vapor são equipamentos para produção e acumulação de vapor sob pressão e superior à pressão atmosférica, adaptável à utilização de qualquer fonte de energia (as mais usuais são carvão gás natural e óleo), utilizando-se os refervedores e equipamentos similares em unidades de processo.

São classificadas em três as categorias as caldeiras:

- a) Categoria "A", pressão de operação é igual ou superior a 1960 kPa (19,98 kgf/cm²);
- b) Categoria "C", pressão de operação é igual ou inferior a 588 kPa (5,99 kgf/cm²); seu volume interno é igual ou inferior a 100 litros,
- c) Categoria "B", todas as caldeiras que não enquadram nas categorias anteriores.

Risco grave e iminente se faltar alguns itens que se segue:

- a) Válvula de segurança ajustada na PMTA;
- b) Instrumento com indicação do vapor acumulado;
- c) Injetor ou outro meio de alimentação de água;
- d) Sistema de drenagem rápida de água; e
- e) Sistema de indicação para controle do nível de água.

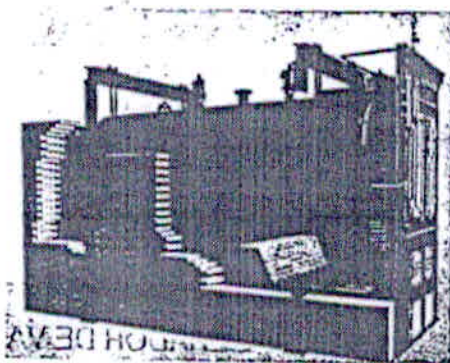
Enfim, as caldeiras ou geradores de vapor, são equipamentos destinados a transformar água em vapor. Essa energia necessária à operação, o fornecimento de calor sensível à água para alcançar a temperatura de ebulição com mais o calor latente vaporiza a água e mais o calor de superaquecimento para transformá-la em vapor superaquecido, é dada pela queima de um combustível.

2.2 Tipos Fundamentais de Geradores de Vapor de Água

No caso destacamos um primeiro tipo que são as flamotubulares, os gases quentes gerado pela combustão passam por dentro de tubos, pela superfície externa do tubo encontra-se a água a ser transferido o calor para seu aquecimento e subsequência de evaporação. A montagem dos tubos são de maneira semelhante à dos permutadores de calor através de feixes, podendo existir por meio do projeto um ou mais passes dos gases quentes. Seu emprego é limitado à pequenas capacidades, vapor saturado e de baixa pressão.

Descrevendo sobre a Flamotubular, os gases de combustão que percorrem dentro dos tubos transferindo esse calor as paredes dos mesmos que, por condução chega até à água.

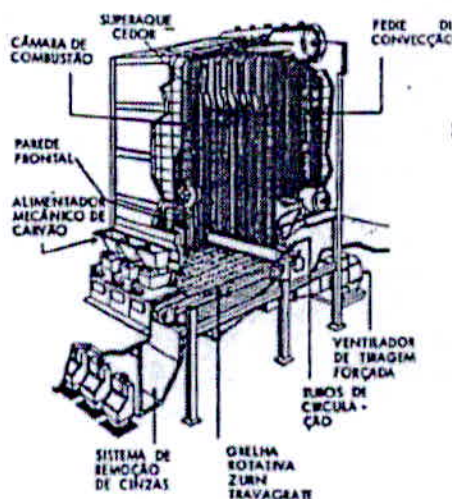
Figura 1 – Caldeira Flamotubular



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

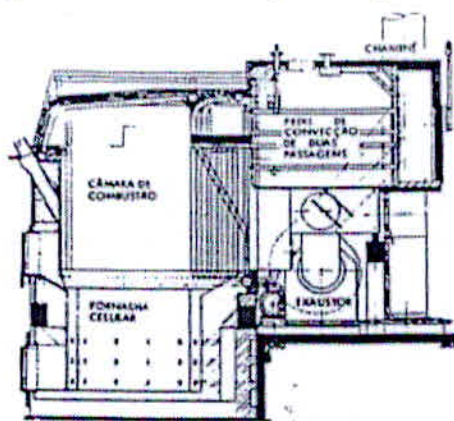
Aquatubulares cabe ao segundo tipo, o mais empregado, como seu nome já diz, circulação de água por dentro dos tubos e os gases quentes envolvendo-os na superfície externa. Usados em instalações de maior porte e com obtenção de vapor superaquecido (seco).

Figura 2 – Caldeira Aquotubular



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Figura 3 – Caldeira Aquo - Fogotubular



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

2.3 Componentes Clássicos

Para caldeiras flamobutulares, intuito desse trabalho, compõe-se os geradores de vapor por cinzeiros, fornalhas com grelhas ou queimadores a óleo, câmara de combustão, caldeira, pré-aquecedor, economizador, canais de gases e chaminé.

Não serão detalhados nesse trabalho.

2.4 Seleção do Gerador de Vapor

Principalmente deve ser considerado:

- a) Disponibilidade Energética
- b) Característica da Energia
- c) Pressão e Temperatura do Vapor
- d) Eficiência Térmica Desejável
- e) Custo de Instalação, Operação e Manutenção
- f) Espaço Disponível
- g) Amortização do Investimento

2.5 Características e Performance

Os importantes são:

- a) Superfície de Aquecimento
- b) Produção Normal de Vapor
- c) Produção Máxima Contínua de Vapor
- d) Produção de Picos
- e) Qualidade do Vapor
- f) Pressão de Trabalho
- g) Pressão de Construção
- h) Pressão de Prova
- i) Eficiência Térmica
- j) Perdas

2.5.1 Superfície de Aquecimento

De um lado superfície metálica em contato contém água e vapor, do outro, gases e calor radiante.

2.5.2 Produção Normal de Vapor

Em condições normais de temperatura e pressão, é a quantidade de vapor que descarrega na válvula de saída principal.

2.5.3 Produção Máxima Contínua de Vapor

Produção máxima do gerador e cerca de 10% a mais da normal.

2.5.4 Produção de Picos

Essa é a descarga de vapor em curtos espaços de tempo em geradores em caldeiras flamotubulares não são mencionadas.

2.5.5 Qualidade do Vapor

Vapor vem na qualidade saturado ou superaquecido, sequencialmente, com umidade ou seco.

2.5.6 Temperatura do Vapor

Trata-se da posição pré-fixada do vapor saturado e superaquecido. (Tabelado).

2.5.7 Pressão de Trabalho

Pressão que o equipamento opera.

2.5.8 Pressão de Construção

Isso é determinado conforme a pressão máxima de trabalho dos acessórios projetados para o equipamento, são iguais.

2.5.9 Pressão de Prova

Seja no campo ou nas instalações do fabricante, o teste deve ser documentado e realizado, a cada ano depois de sua construção conforme vigência trabalhista de segurança.

2.5.10 Eficiência Térmica

Está diretamente ligada ao PCI do combustível em porcentagem, a quantidade de calor que foi transferido à água para transformação em vapor chamado de calor útil.

2.5.11 Perdas

O conhecimento é adquirido mais com prática que propriamente teórico, empiricamente dado de projeto e não divulgado em um memorial de cálculo ou qualquer documento da caldeira. Quando falamos de combustíveis sólidos, esse dado deve ser estudado pelo alto teor de cinzas. Comportamento pelo qual engloba perdas de irradiação, nas cinzas, do calor sensível, combustível não queimado.

A maior porção das perdas do calor, muito dinheiro é remetido à perda de dinheiro todos os dias. Este é um bom indicador da eficiência da caldeira. A temperatura na chaminé é a temperatura dos gases de combustão (seco ou úmido) deixando a caldeira e refletindo diretamente na energia que não se transferiu do combustível para o vapor ou água quente. Vale salientar a perda por convecção e radiação.

3 CAPACIDADE DE UM GERADOR DE VAPOR

A capacidade é dado que normalmente se exprime na unidade hora, KJ/h ou KW/h. No Brasil utilizamos o Kg/h, podemos utilizar todas essas unidades, vai de cada região e depois converter conforme necessidade.

Formas antigas como HP e BHP também ainda são muito presentes.

Notificando a A.S.M.E., define-se o BHP (energia contida em 34,5lbs de vapor à 212°F). Com essa intuição a superfície de aquecimento foi descrito ao BHP também, 16kg de vapor/BHP ou 17kg de vapor/m² de superfície de aquecimento.

Adotado pelo trabalho, kg vapor/h ou t vapor/h. Conforme S.I.

4 COMBUSTÍVEIS

4.1 Definição

Nas formas gasosa, líquida ou gasosa em reação ao comburente oxigênio, por escorvamento, resulta-se em energia (luminosa e calorífica). A relação combustível, calor e ar compõem a combustão.

4.2 Classificação

Na atualidade a acessibilidade a diversos tipos de combustíveis torna viável sua utilização. Classificamos 3 classes de combustíveis:

- a) Combustíveis Fósseis;
- b) Bio-Combustíveis; e
- c) Combustíveis Nucleares.

Podendo ser artificiais ou naturais, os combustíveis são sobras de algum processo industrial ou extraídas da natureza; nos estados sólido, líquido ou gasoso.

Os naturais fósseis mais importantes e utilizados são, o carvão mineral, gás natural, petróleo, xisto e turfa. O de procedência natural renovável mais difundido é a lenha. Dentre os artificiais renováveis estão o bagaço de cana, cavacos e serragem de madeira, carvão vegetal, borra de café e licor preto.

5 PROPRIEDADES DOS COMBUSTÍVEIS

As propriedades dos combustíveis são padronizadas e tabeladas por fornecedores afim de garantir o cálculo do gerador. Na prática deve ser conferido a eficiência do gerador de vapor para garantir sua performance, o processo de queima pode não acontecer conforme o projeto.

5.1 Propriedades

Os combustíveis podem apresentar propriedades comuns entre si e também específicas para determinados tipos. Por exemplo poder calorífico é propriedade comum e moabilidade específica de carvão.

Vale destacar propriedades comuns:

a) Limites de Inflamação

São três os fatores que influenciam para tal feito; Limite de inflamação, Limite de Temperatura e Limite de Pressão. Essas características não deixam que prossiga o processo de combustão.

Para os três limites em questão existe valores para combustíveis pré-fixados e denominados limite superior e inferior da inflamação.

b) Limites de Detonabilidade

As misturas ar-combustível, todas sem exceção, existem sue limite de detonabilidade. É uma reação instantânea a velocidade supersônica e descrita em porcentagem da mistura combustível/comburente, que é submetida a ignição acontecendo um choque com velocidade constante em todas direções.

Combustíveis líquidos e sólidos podem ser pulverizados para facilitar a detonação.

Tabela 1 – Limites de Detonabilidade

Mistura	Limite Inferior (%)	Limite Superior (%)
$H_2 + Ar$	18,3	59,0
$CO + H_2 + Ar$	19,0	59,0
$C_2H_2 + Ar$	4,2	50,0

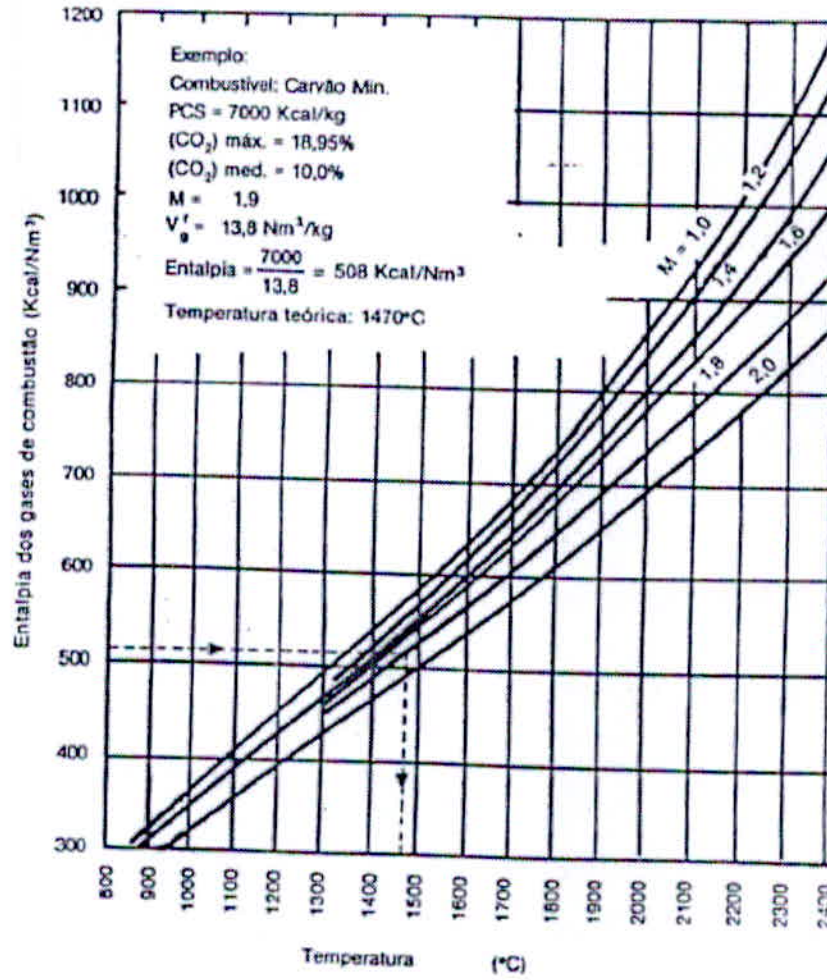
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

c) Temperatura da Chama

Determinada em cálculo estequiométrico quando o sistema é isolado, Temperatura Teórica ou Temperatura Adiabática Ideal, conhecendo sua análise elementar e entalpia.

Sua unidade em graus centígrados, a temperatura da chama inúmera fatores como a concepção dos sistemas de combustão, excesso de ar do combustível, da sua granulometria ou estado de pulverização, do processo de mistura dentre outros.

Ábaco 1 – Temperatura de Combustão Teórica



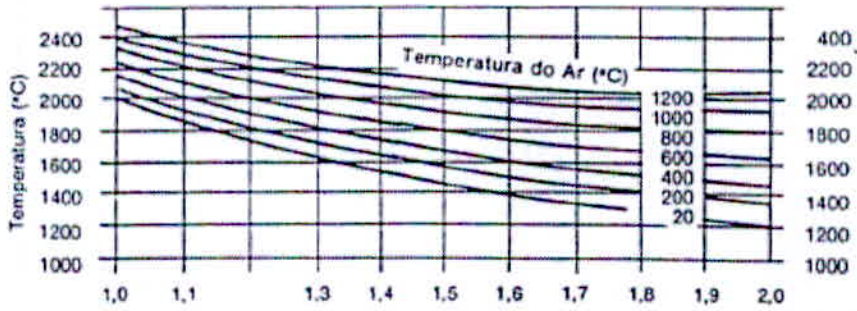
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Tabela 2 – Temperatura Adiabática Ideal dos Gases Combustíveis Usuais

Combustível	Temperatura °C	
	com dissociação	sem dissociação
CO	2410	2150
CH ₄	2050	1950
Etano	2130	2000
Propano	2170	2040
Butano	2210	2060
Gás de Alto Forno	1290	1290
Gás de Água	2200	2040
Gás de Cidade	2120	2000

Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 2 – Excesso de Ar



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

d) Temperatura de Ignição Espontânea

Essa temperatura pode ser atingida sem escorvamento, com presença de comburente elevando-se uma determinada temperatura pode acontecer a ignição. Comum em combustíveis que ficam expostos como o bagaço de cana, o carvão mineral e vegetal.

Tabela 3 – Temperatura de Ignição Espontânea

Combustível	Temperatura °C
Metano	632
Etano	472
Propano	504
Butano	431
Álcool Metílico	470
Álcool Etílico	392

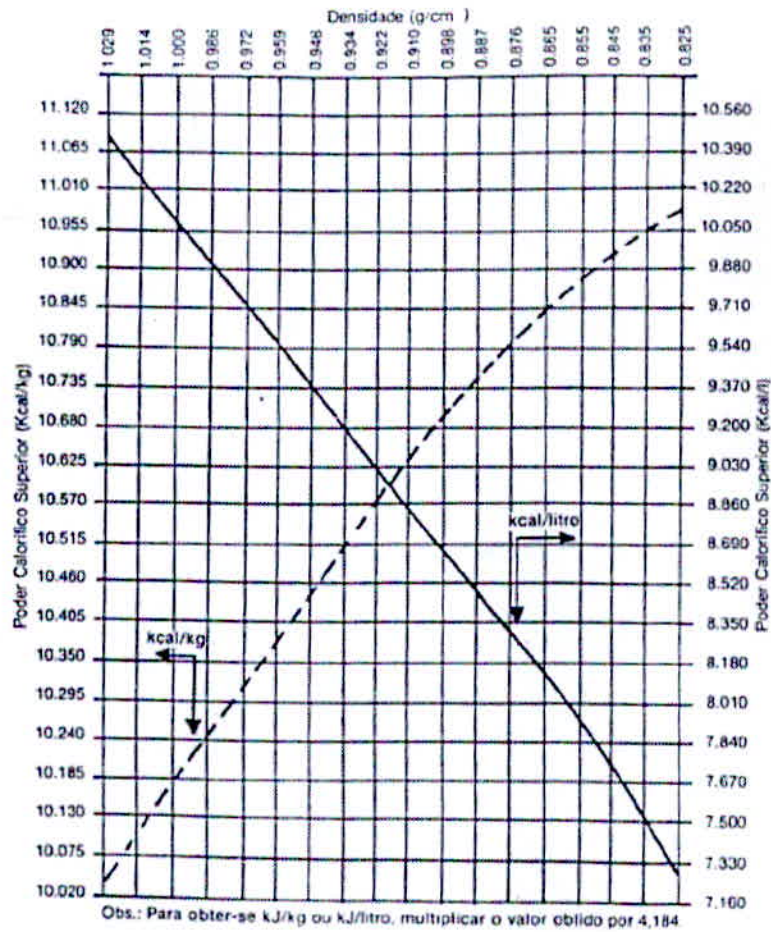
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

e) Peso Específico

Essa relação é dada entre peso e volume da substância. Para determinação utiliza-se os aparelhos chamados densímetros, valendo para temperaturas a 20°C pelo INPM, utilizado muito para óleos. A API (American Petroleum Institute), escalou isso pela fórmula a seguir:

$$\text{Grau API} = \frac{141,5}{\text{peso específico a } 20^{\circ}\text{C}} - 131,5$$

Ábaco 3 – Poder Calorífico Superior em Função da Densidade



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

f) Expansão Térmica

Com o aumento da temperatura, expandimos e contraímos as substâncias. O volume se altera nessa situação, particularidade que interessa muito quanto aos combustíveis líquidos para sua densidade a 20°C, deverá apresentar correção se superior a essa temperatura.

Tabela 4 – Variação da Densidade de Dois Tipos de Óleos Combustíveis com a Temperatura

Temperatura (°C)	Densidade (g/cm ³)	
	BPF	APF
15,5	0,971	0,9117
40,0	0,933	0,902
50,0	0,9266	0,8956
60,0	0,9207	0,8892
70,0	0,9138	0,8827
80,0	0,9074	0,8762
90,0	0,9010	0,8697
100,0	0,8946	0,8631
110,0	0,8882	0,8565
120,0	0,8817	0,8499
130,0	0,8752	0,8432
140,0	0,8687	0,836
150,0	0,8621	0,8297

Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

g) Condutibilidade Térmica

Importante na definição da transferência de calor para os três estados físicos. Vide tabelas abaixo:

Tabela 5 – Condutibilidade Térmica dos Óleos Combustíveis

Temperatura °C	Peso Específico (a 15 °C) (kg/dm ³)					
	1,0	0,95	0,9	0,85	0,8	0,75
	Grau A.P.I. (a 15 °C)					
	10,0	17,4	25,7	35,0	45,4	57,2
	Condutibilidade Térmica (cal/cm.s.°C)					
0	0,00028	0,00029	0,00031	0,00033	0,00035	0,00037
100	0,00026	0,00028	0,00029	0,00031	0,00033	0,00035
200	0,00025	0,00026	0,00028	0,00029	0,00031	0,00033
300	0,00023	0,00025	0,00026	0,00028	.	.
400	0,00022	0,00023	0,00024	.	.	.

Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Tabela 6 – Condutibilidade Térmica dos Gases

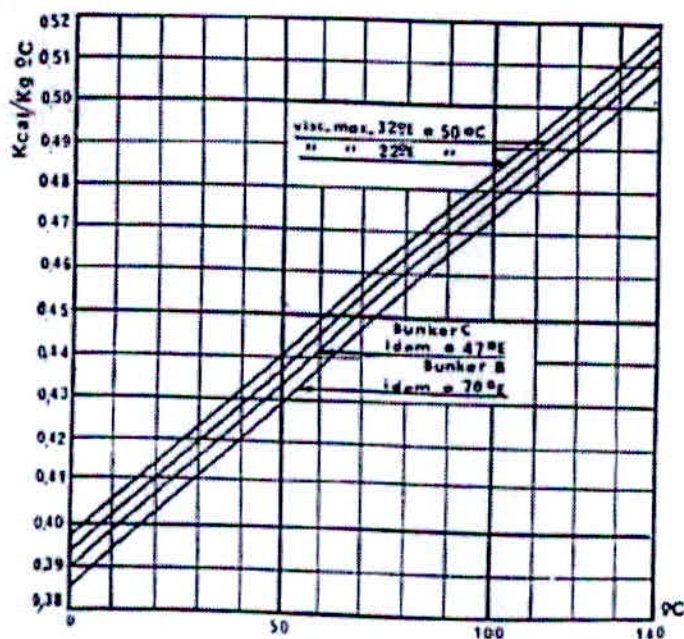
Gás	Temperatura °C			
	0	100	500	1000
	Condutibilidade Térmica (cal/cm.s. °C x 10 ⁴)			
Ar	0,58	0,76	-	1,02
Oxigênio	0,58	0,76	-	-
Nitrogênio	0,58	0,74	1,29	-
Gás Carbônico	0,35	0,53	-	1,09
Metano	0,72	-	-	-
Etano	0,43	-	-	-
Etileno	0,39	-	-	-
Hidrogênio	4,02	5,16	9,29	-
Vapor de água	0,38	0,56	1,36	-
Anidrido Sulfuroso	0,18	-	-	-

Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

h) Calor Específico

Com a variação da temperatura os óleos, em específico, apresentam valores distintos. Nas tabelas a seguir podemos verificar para óleos e gases.

Ábaco 4 – Calor Específico de Óleos Combustíveis de Viscosidades Diversas



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

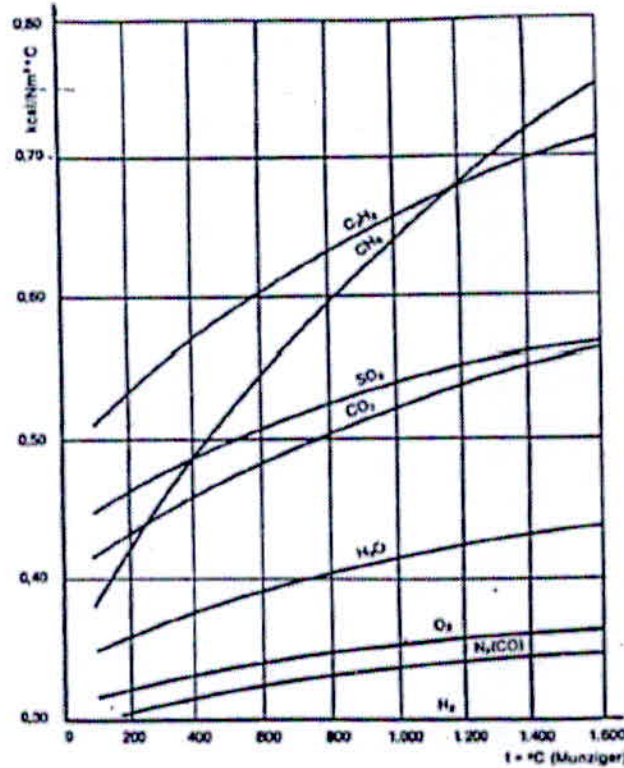
i) Poder Calorífico

À pressão constante, é a quantidade de calor gerado por unidade de massa ou volume de combustível. Entalpia de combustão com sinal trocado.

Vamos citar o PCS e PCI daqui em diante, Poder Calorífico Superior e Inferior respectivamente. Dado em kcal/kg (sólidos e líquidos) e kcal/m³ (gasosos).

Absorvidos esses valores em laboratório por Calorímetros, conhecidos os combustíveis.

Ábaco 5 – Calor Específico Médio dos Gases



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

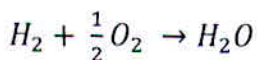
Cálculo do PCS:

$$PCS = (C \cdot \Delta t) / m$$

Diferença do PCS e PCI:

$$PCI = PCS - H_2O$$

Primeiramente a reação com oxigênio:



2 kg de hidrogênio forma 18 kg de água, valendo a queima em 9h de água.

Reunindo os valores temos:

$$9h + w.e \text{ ("w" = umidade do combustível e "e" entalpia)}$$

A dedução do PCI se conhece quando se dispõe do teor de hidrogênio (h) e umidade do combustível.

$$\text{Sendo assim a aplicação: } PCI = PCS - (9h + w) . e$$

Analiticamente partimos para a composição dos elementos dos combustíveis, genericamente apresentadas abaixo:

c = teor de carbono

h = teor de hidrogênio

s = teor de enxofre

o = teor de oxigênio

n = teor de nitrogênio

w = teor de umidade

z = teor de cinzas

Tabela 7 – Poder Calorífico dos Elementos e Gases

Substância	Fórmula	Peso Molec.	PCS		PCI	
			Kcal/kg	Kcal/Nm ³	kcal/kg	Kcal/Nm ³
Carbono	C	12.01	8.100	-	8.100	-
Hidrogênio	H ₂	2.016	33.960	2.893	28.702	2.448
Enxofre	S	32.06	2.214	-	2.214	-
Monóx C.	CO	28.01	2.419	2.866	2.419	2.866
Metano	CH ₄	16.041	13.279	9.015	11.965	8.126
Etano	C ₂ H ₆	30.067	12.410	15.949	14.405	11.360
Propano	C ₃ H ₈	44.092	12.044	23.051	11.089	21.127
Etileno	C ₂ H ₄	28.051	12.034	4.365	11.284	13.466
Propileno	C ₃ H ₆	42.077	11.699	20.790	10.948	19.455
Acetileno	C ₂ H ₂	32.06	11.954	13.341	11.551	12.887

Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Portanto:

$$PCI = 8100 + 33960 \left(h - \frac{O}{8} \right) + 2214 - 600 (9h + W)$$

Há outros métodos para o cálculo que serão comparados na tabela a seguir:

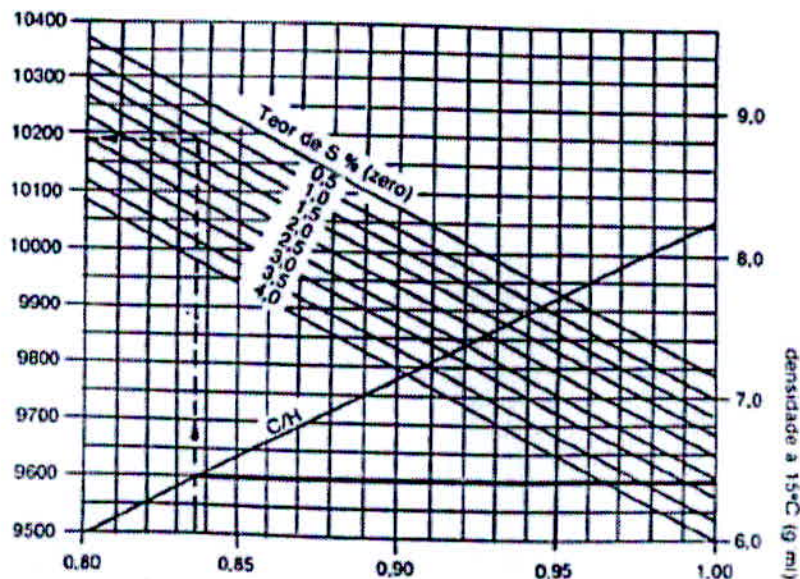
Tabela 8 – Comparação Entre os Valores do PCI Obtidos com Diferentes Métodos

Processos no cálculo na determinação do PCI	Elementos %	Carvão	Óleo (1)	Óleo (2)
	C	81,49	87,27	87,00
H ₂	4,26	10,17	11,30	
O ₂	3,31	0,50	0,61	
N ₂	0,80	0,10	0,10	
S	0,83	1,70	0,19	
Z	6,81	-	-	
W	2,50	0,26	0,80	
1- PCI estabelecido em laboratório	Kcal/Kg	7.604	9.598	9.783
2- PCI fórmula Dulong's.	Kcal/Kg	7.704	-	-
3- PCI pela fórmula (2.3.9)	Kcal/Kg	-	10.060	10.414
4- PCI fórmula (2.3.7)	Kcal/Kg	-	9.849	9.833
Erros entre 1-2	%	+ 1,31	-	-
Erros entre 1-3	%	-	+ 4,8	+ 6,45
Erros entre 1-4	%	-	+ 2,6	+ 0,51

Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

A Shell conforme a relação C/H, um ábaco para se ter o valor direto do PCI.

Ábaco 6 – Poder Calorífico dos Óleos Combustíveis em Função da Relação C/H e da Densidade



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Para os gases processa-se a fórmula da seguinte maneira:

$$PCI = 2866 (CO) + 2488 (H_2) + 8126 (CH_4) + \dots$$

Um exemplo foi calculado, vamos para o PCI:

Lenha de Eucalipto com 20% de umidade:

$$C = 33,25$$

$$H_2 = 4,20$$

$$O_2 = 30,80$$

$$N_2 = 0,70$$

$$Z = 1,05$$

$$H_2O = 4,20$$

$$PCI = 8100 \times 0,3325 + 33960 \left(0,042 - \frac{0,3080}{8} \right) - 600 (9 \times 0,0420 + 0,3)$$

$$PCI = 2405 \text{ kcal/kg}$$

5.2 Ponto de Fulgor

Ponto de fulgor é a menor temperatura que o combustível libera vapor em quantidade para formar uma inflamação através de uma fonte externa de calor. Esse ponto não é suficiente para que tenha a constância da combustão.

A mistura inflamável, para que tenhamos o ponto de fulgor, a quantidade de gás ou vapor misturada com o ar que seja suficiente para início da inflamação em contato com fonte de calor, a queima abrupta do gás ou vapor acontecerá, que não seja preciso a combustão do combustível emitente. Um ponto a ser observado é, retirando-se a fonte de calor acaba a inflamação ou queima da mistura.

É um dado importante de classificação dos combustíveis, especial em referência à segurança, riscos de transporte, estocagem e manuseio.

Muitas vezes confundido com a temperatura de autoignição, não necessita de nenhuma fonte de ignição ou ponto de combustão, sua temperatura do vapor continua a queimar após ter sofrido ignição. O ponto de fulgor e o ponto de combustão não dependem da temperatura da fonte de ignição por ser elevada.

Frequentemente utilizado de característica descritiva de líquidos combustíveis, o ponto de fulgor, também é usado para ajudar a caracterizar os perigos de inflamação de líquidos. Esse conceito referencialmente tem serventia tanto a líquidos inflamáveis quanto para

combustíveis. Padronizados, cada termo se define de uma maneira. Líquidos, menor que 60,5°C ou 37,8°C, dependendo do seu padrão aplica-se, considerados inflamáveis, enquanto líquidos com pontos de fulgor acima de certas temperaturas são considerados combustíveis.

5.3 Resíduo Carbono

Coradson determina o resíduo carbônico de um processo de queima líquida em porcentagem.

5.4 Viscosidade

Viscosidade é uma propriedade dos fluidos que é responsável pelo transporte microscópico da quantidade dos movimentos por difusão molecular; maior a viscosidade, menor é a velocidade do fluido para se movimentar.

De suma importância para definição dos equipamentos de transferência e queima dos combustíveis líquidos, tem que se escoar com maior facilidade pelos orifícios, sendo uma variável para determinação de uma bomba, por exemplo.

Varia com pressão e temperatura. A unidade é dado em quanto tempo escoar determinado fluido.

6 Processos de Combustão

6.1 A Combustão

Sua consistência está na reação química com dois ou mais reagentes que tenha liberação de energia em forma de calor. As reações de combustão todas são extremamente exotérmicas, levando em consideração que necessitem de ignição para acontecer.

Em quase sua totalidade os combustíveis utilizados são orgânicos, suas cadeias são carbônicas com ligação atômicas de oxigênio ou hidrogênio.

Os comburentes, oxigênio é o mais presente, embora outras podem ser utilizados, como o flúor; sua função é oxidar o combustível adicionado. A combustão é, na maioria das vezes, uma reação de oxirredução, o oxigênio é o agente oxidante e reduz-se quase sempre ao Nox.

6.2 Tipos de Chamas

A classificação dessas chamas categoricamente são:

- a) Chama de Difusão – resultado da queima no exato momento que a mistura acontece; e
- b) Chama Pré Misturada – acontece a mistura antes do centelhamento.

Definição pelo critério de velocidade do fluxo a chama pode ser:

- a) Chama Laminar; e
- b) Chama Turbulenta.

Critério também ao tipo de combustível:

- a) Chama de Combustível Sólido;
- b) Chama de Combustível Líquido; e
- c) Chama de Combustível Gasoso.

Na prática podemos detectar possíveis problemas de combustão, conhecendo a chama dos três tipos referidos acima.

6.3 Queima dos Combustíveis

A combustão acontece com muita facilidade, e quando controlada o sistema é complexo e se torna perigoso. Sistemas automatizados também falham.

Quando a mistura é feita com alto grau de homogeneidade somado ao escorvamento de chama piloto, é o suficiente para a vinda da combustão e seu calor.

A temperatura desenvolvida na queima mantém o processo e a continuidade das reações.

Algumas chamas como hidrogênio é incolor, o CO é azul (comumente entre os gasosos), que são os mais fáceis de queimar.

Os combustíveis líquidos devem ser quebrados através de pulverizadores para minimizar as partículas próximas a de gases. Isso acontece em queimadores de alta eficiência, normalmente patenteados e trancados a sete chaves. São minimizados as partículas dos hidrocarbonetos por cinética de oxidação, variando de acordo com pressão temperatura, difusão das substâncias e regimes dos fluxos.

A temperatura aumentada para a faixa de 200 e 500°C aumenta as ramificações de compostos resultantes da queima como, CO_2 e H_2O . Com temperaturas maiores aumentam as

cisões liberando o carbono livre. Por isso que deve ser controlada a zona de vaporização do combustível, técnica muito complexa.

Nos combustíveis sólidos são queimados sobre grelhas ou suportes adequadamente projetados, fixos ou móveis, inclinados ou não; depende da natureza, granulometria e quantidade do combustível. Reação com oxigênio conforme os mecanismos abaixo:

- a) Oxigênio na presença de calor rompendo moléculas, formando gases instáveis.
- b) Após o item anterior, acontece a vaporização da matéria volátil associando com compostos instáveis.
- c) A dissociação libera os componentes dos combustíveis como CO e H_2 , que reagem com o oxigênio e formam CO_2 e água.

6.4 Velocidade de Propagação da Chama

Os combustíveis podem reagir com oxigênio conforme regimes a seguir:

- a) Por oxidação lenta, as vezes nem chama apresentam, acontecem na sua maioria que são estocados ao ar livre;
- b) Pela reação de componentes da mistura combustível/comburente, chama contínua e graduada em velocidade supersônica;
- c) Oxidação violenta e alta temperatura, regime turbulento de velocidade de deflagração altíssima (muitas vezes apresentado excesso de ar na mistura).

6.5 Temperatura da Chama

Definida como Temperatura Adiabática, no sistema não pode ser realizado trabalho, sem variações de energia cinética ou potencial, sem contato externo, admissão do ar estequiométrico necessário.

6.6 Comburente

O comburente na prática não trata-se do oxigênio puro e sim admissão do ar externamente, por meio de sucção ou insuflação.

A composição do ar se define em geral, 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio, claro que temos parcelas de outros gases que são praticamente desprezíveis.

O nitrogênio não participa das reações, pois sua característica de entrada permanece na saída.

6.7 Volume de Ar Real

Esse cálculo nos obriga a focar na prática. Praticamente impossível assegurar a combustão completa com ar teórico, não serão constantes a granulometria do combustível, estado de divisão, sistema de alimentação de ar, o aparelho da combustão, estabelecendo o excesso necessário de ar.

Se a admissão do ar for menor que ar teórico, a combustão é incompleta.

Para calcular o excesso de ar (n), seria:

$$n = \frac{\text{volume de ar teórico}}{\text{volume de ar real}}$$

Portanto quando temos uma combustão sendo realizada com 150% do ar teórico, estamos admitindo para o sistema 50% de ar a mais que do cálculo estequiométrico, fator 1,5.

Tabela 9 – Valores Experimentais do Fator de Excesso de Ar

Combustível	Fornalha	n
Carvão britado	greihas rotativas ar forçado	1,15 - 1,5
Carvão britado	greihas planas ar natural	1,5 - 1,65
Carvão moído	ciclonica	1,10 - 1,15
Carvão pulverizador	integralmente irradiada	1,15 - 1,20
Óleo combustível	queimador de óleo de baixa pressão de ar	1,3 - 1,4
Óleo combustível	queimador de pulverização mecânica	1,20 - 1,25
Óleo combustível	queimador de pulverização mecânica com vapor auxiliar	1,05 - 1,15
Lenha	greiha plana, ar natural	1,40 - 1,50
	greiha plana, ar forçado	1,30 - 1,35
Bagaço de cana	greiha inclinada	1,40 - 1,50
	fornalha colunar	1,25 - 1,30
Gás da refinaria	queimador com registro	1,05 - 1,10
Licor preto	fornalha de recuperação	1,05 - 1,07

Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

6.8 Ar Primário e Ar Secundário

Nos processos de combustão nem sempre são injetados todo o ar a primeira instância, é dividido na maioria e quase na sua totalidade, uma aplicada atravessando diretamente o combustível e parte no meio da chama, acima do leito de combustão; denominando-se

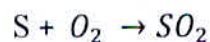
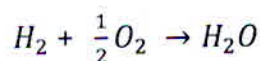
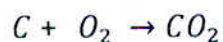
respectivamente ar primário e ar secundário. O ar secundário representa 10 a 20% do primário.

Isso acontece para que não haja combustão incompleta, ar primário responsável pela reações de decomposição e queima, e secundário pela parcela do gases ainda combustíveis.

7 CÁLCULOS DE COMBUSTÃO

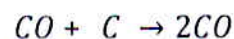
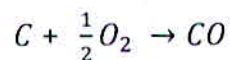
São realizados conforme as reações químicas que compõem os combustíveis, mais comburente e oxigênio contido no ar.

Sabendo-se da análise elementar do combustível, separar os elementos em reação com oxigênio, conforme a seguir:

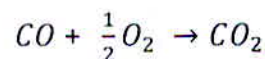


Resultado é a queima completa e sempre gás.

Ocorre a existência de monóxido de carbono também:



Essa é uma combustão imperfeita do carbono, ainda teria o que queimar na reação, conforme mostra:



Desprende apreciável quantidade de calor e ainda pode, nitrogênio, oxigênio de excesso, vapor, moléculas não queimadas e partículas orgânicas e inorgânicas.

7.1 Reações de Combustão

Volumes molares são tabelados:

Tabela 10 – Pesos e Volumes Molares de Substâncias

Substância	Símbolo	(a)Peso Molar kg/kmol	(b)Vol.Molar Nm ³ /kmol
Carbono	C	12,01	-
Hidrogênio	H ₂	2,016	22,43
Oxigênio	O ₂	32,00	22,39
Enxofre	S	32,06	-
Gás Carbônico	CO ₂	44,01	22,26
Monóxido de Carbono	CO	28,01	22,40
Água	H ₂ O	18,016	22,4(c)
Gás Sulfuroso	SO ₂	64,06	21,89
Nitrogênio	N ₂	28,016	22,40
Metano	CH ₄	16,041	22,36
Etano	C ₂ H ₆	30,057	22,16
Propano	C ₃ H ₈	44,092	-
Butano	C ₄ H ₁₀	58,118	-
Etileno	C ₂ H ₄	28,051	22,24
Propileno	C ₃ H ₆	42,077	-
Acetileno	C ₂ H ₂	26,036	-
Álcool Metílico	CH ₃ OH	32,041	-
Álcool Etilico	C ₂ H ₅ OH	46,067	-
Gás Sulfídrico	H ₂ S	34,076	-
Ar	H ₂ O	28,90	-

Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Combustível genérico será apresentado:

c = teor de carbono

h = teor de hidrogênio

s = teor de enxofre

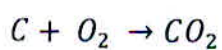
o = teor de oxigênio

n = teor de nitrogênio

w = teor de umidade

z = teor de cinzas

Carbono queima como:



Concluindo que:

1kmol C = 12kg reage com 1kmol de O_2 , pesando 32kg para formar 1kmol de CO_2 , pesando 44,01kg. O volume de 1kmol de O_2 = 22,39Nm³ reagindo com carbono forma 22,26Nm³ de gás carbônico.

Em peso:

$$1\text{kg de C exige } \frac{32}{12,01} = 2664\text{kg } O_2$$

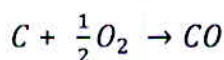
$$\text{e forma } \frac{44,01}{12,01} = 3664\text{kg } CO_2$$

Em volume:

$$1\text{kg de C exige } \frac{22,39}{12,01} = 1864\text{Nm}^3 O_2$$

$$\text{e forma } \frac{22,29}{12,01} = 1853\text{Nm}^3 CO_2$$

Quando não se queima o carbono completamente a reação é:



Em peso:

$$1\text{kg de C exige } \frac{16}{12,01} = 1332\text{kg } O_2$$

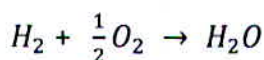
$$\text{e forma } \frac{28,01}{12,01} = 1834\text{kg } CO$$

Em volume:

$$1\text{kg de C exige } \frac{11,195}{12,01} = 0,932\text{Nm}^3 O_2$$

$$\text{e forma } \frac{22,40}{12,01} = 1859\text{Nm}^3 CO$$

Com o hidrogênio se obtém:



Em peso:

$$1\text{kg de C exige } \frac{16}{2016} = 7,94\text{kg } O_2$$

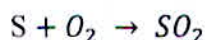
$$\text{e forma } \frac{18016}{2016} = 8,94\text{kg } H_2O$$

Em volume:

$$1\text{kg de H exige } \frac{11195}{2010} = 5,56\text{Nm}^3 \text{ O}_2$$

$$\text{e forma } \frac{22,4}{2016} = 11,11\text{Nm}^3 \text{ vapor de H}_2\text{O}$$

Com o enxofre se obtém:



Em peso:

$$1\text{kg de S exige } \frac{32}{32,6} = 0,98\text{kg O}_2$$

$$\text{e forma } \frac{64,06}{32} = 1,996\text{kg SO}_2$$

Em volume:

$$1\text{kg de S exige } \frac{22,39}{32,06} = 0,697\text{Nm}^3 \text{ O}_2$$

$$\text{e forma } \frac{21,89}{32} = 0,683\text{Nm}^3 \text{ SO}_2$$

Esses valores estabelecem peso e volume dos gases que intervêm dentre as reações de combustão.

7.2 Peso e Volume Teóricos de Ar

Considerando o mesmo combustível anterior, determinamos o oxigênio necessário:

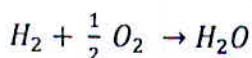
$$G_{\text{O}_2}^t = \text{peso de oxigênio teórico}$$

$$G_{\text{O}_2}^t = \text{o volume de oxigênio teórico, obtém-se:}$$

$$G_{\text{O}_2}^t = 2664C + 7,94 \left(h - \frac{1}{8} \right) + 0,998S$$

$$G_{\text{O}_2}^t = 1864C + 5,56 \left(h - \frac{O}{8} \right) + 0,697S$$

Admitindo-se a reação entre oxigênio e hidrogênio:



Dois kmol de H_2 necessita de 16 de oxigênio, então temos $\frac{O}{8}$ de oxigênio para hidrogênio. Convertendo-as:

$$G_{\text{ar}}^t = \frac{100}{23} \times G_{\text{O}_2}^t$$

$$V_{ar}^t = \frac{100}{21} \times V_{O_2}^t$$

Finalizando em:

$$G_{ar}^t = 11,582C + 34,52 \left(h - \frac{o}{8} \right) + 4,34S \text{ em } \frac{kg}{kg}$$

$$V_{ar}^t = 8,876C + 26,47 \left(h - \frac{o}{8} \right) + 3,32S \text{ em } \frac{Nm^3}{kg}$$

7.3 Peso e Volume de Ar Real

Dedução conforme item anterior:

$$G_{ar}^{ru} = n \times G_{ar}^t$$

$$V_{ar}^{ru} = n \times V_{ar}^t$$

7.4 Peso e Volume dos Gases de Combustão

A produção dos gases em perfeita condição, são incolores e contém bióxido de carbono, bióxido de enxofre, nitrogênio, oxigênio e vapor de água. Se a coloração dos gases for escura na saída da chaminé, sinal de combustão imperfeita, eventual presença de monóxido de carbono.

Sendo a combustão completa, tem-se:

$$G_g^t = \text{peso do gás teórico}$$

$$V_g^{ru} = \text{volume de gás teórico, tem - se:}$$

$$(CO_2) \quad (H_2O) \quad (SO_2) \quad (N_2)$$

$$G_g^{tu} = 3664C + 8,94(h + w) + 1,996S + 0,77 G_{ar}^t + n$$

A equação representa o peso de cada elemento.

Para o volume:

$$(CO_2) \quad (SO_2) \quad (N_2) \quad (H_2O)$$

$$V_g^{tu} = 1,8535C + 0,693S + 0,79 V_{ar}^t + 0,8n + (9h + w)1,24$$

Vapor seco, tira-se a parcela de água:

$$(CO_2) \quad (SO_2) \quad (N_2)$$

$$V_g^{tu} = 1,8535C + 0,693S + 0,79 V_{ar}^t + 0,8n$$

Excesso de ar sempre presente, temos:

$$G_g^{ru} = G_g^{tu} + (n - 1) G_{ar}^t$$

$$V_g^{ru} = V_g^{tu} + (n - 1) V_{ar}^t$$

Respectivamente, peso e volume dos gases de combustão.

7.5 Volume dos Gases de Combustão na Queima de Combustíveis Gasosos

Conhecendo o (n), calcula-se por $V_g^{ru} = V_g^{tu} + (n - 1) V_{ar}^t$

7.6 – Fórmulas e Ábacos Práticos

Nas reações de combustão, Rosin e Fehling, criaram fórmulas práticas para determinar os volumes dos fluidos para queima:

a) Combustíveis Sólidos

$$V_{ar}^t = \frac{1,01 \times PCI}{1000} + 0,5 Nm^3/kg$$

$$V_g^{tu} = \frac{0,89 \times PCI}{1000} + 1,65 Nm^3/kg$$

b) Combustíveis Líquidos

$$V_{ar}^t = \frac{0,85 \times PCI}{1000} + 2,0 Nm^3/kg$$

$$V_g^{tu} = \frac{1,11 \times PCI}{1000} Nm^3/kg$$

c) Gases $PCI > 3000 kcal/Nm^3$ (gases ricos)

$$V_{ar}^t = \frac{1,09 \times PCI}{1000} - 0,25 Nm^3/kg$$

$$V_g^{tu} = \frac{1,14 \times PCI}{1000} + 0,25 Nm^3/kg$$

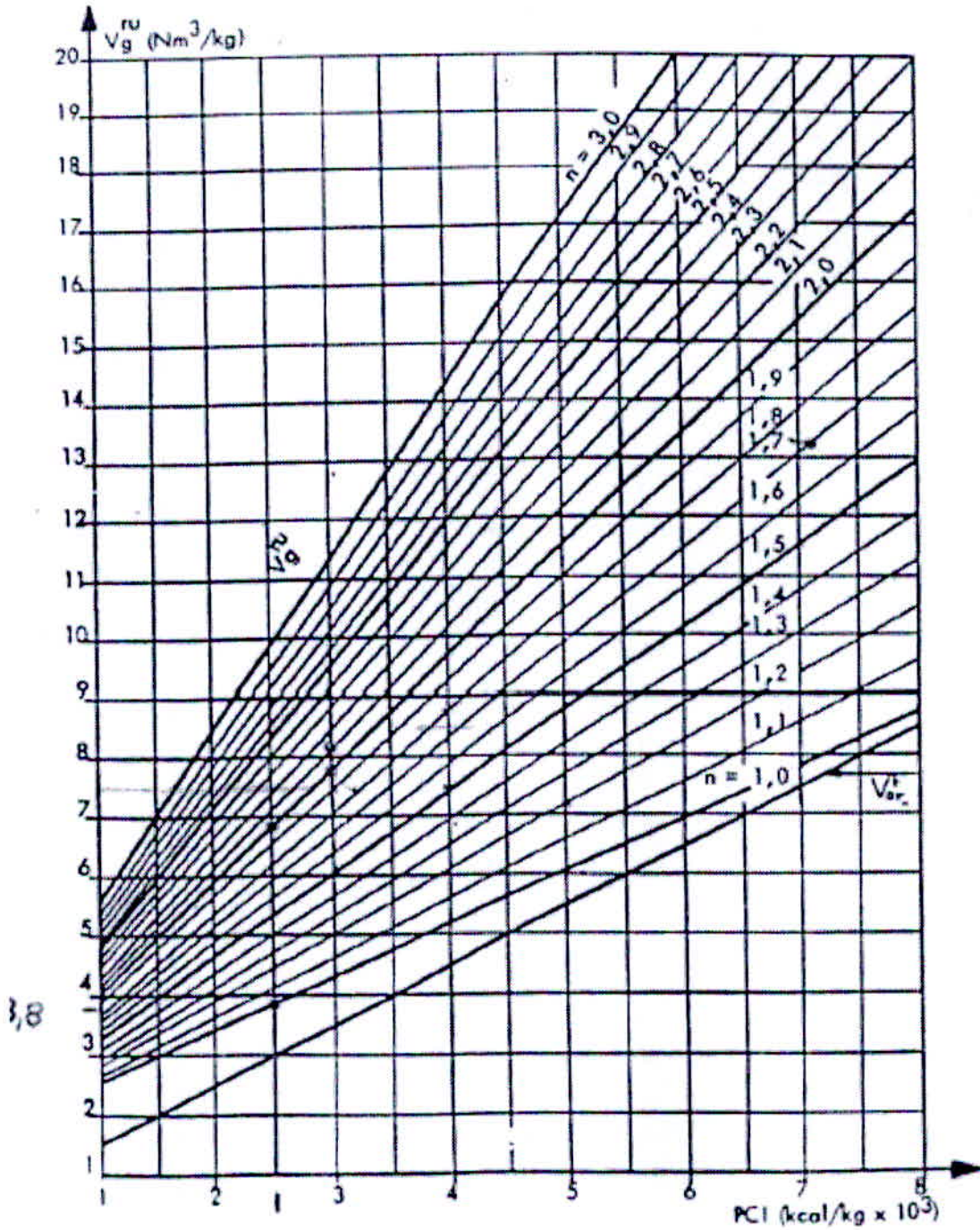
d) Gases $PCI < 3000 kcal/Nm^3$ (gases pobres)

$$V_{ar}^t = \frac{0,875 \times PCI}{1000} Nm^3/kg$$

$$V_g^{tu} = \frac{0,725 \times PCI}{1000} + 1,0 Nm^3/kg$$

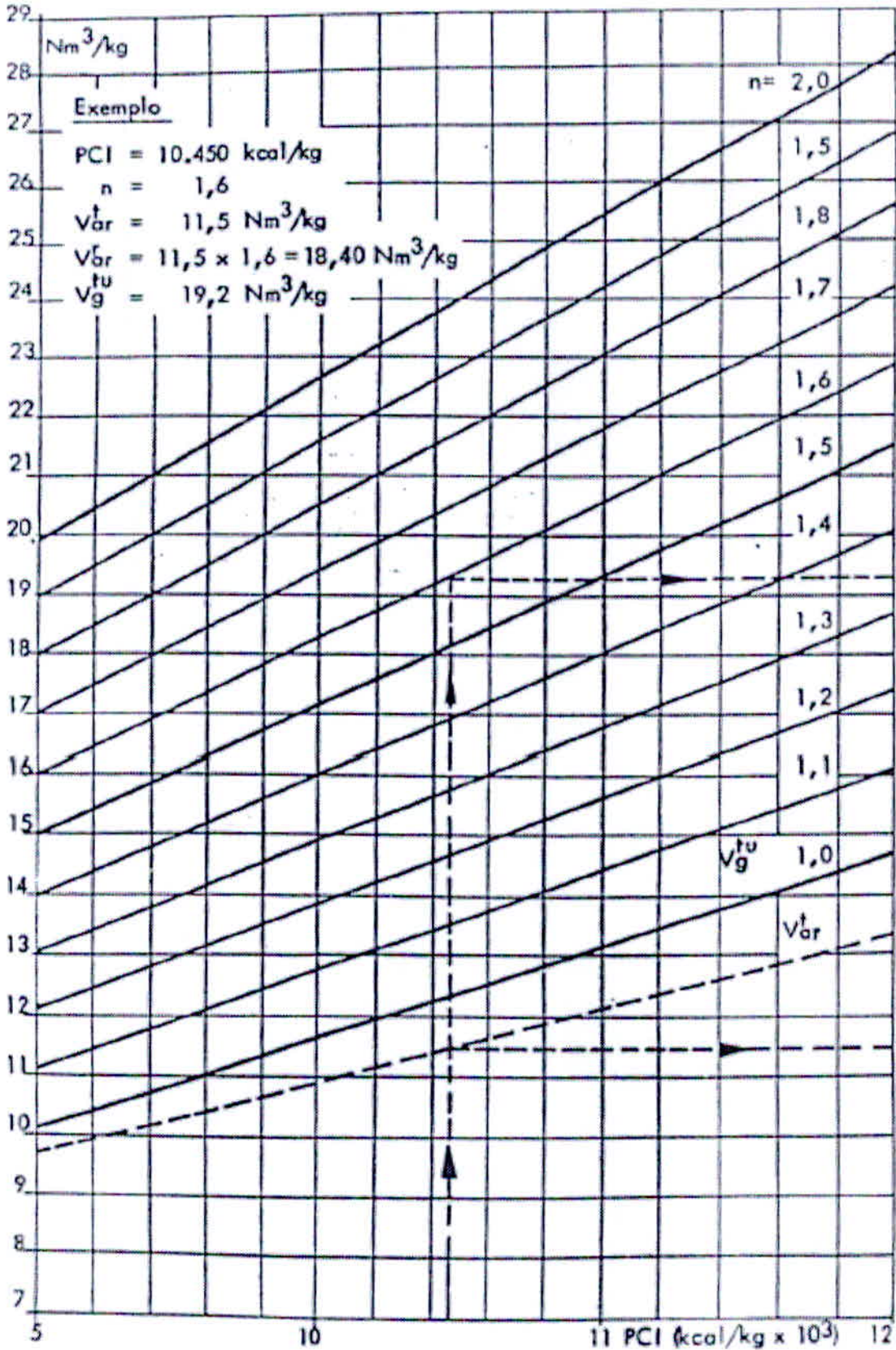
Volume de gás real pode ser obtida através de ábacos, resultado das fórmulas anteriores.

Ábaco 7 – Volumes de Ar e Gases da Combustão na Queima de Combustíveis Sólidos em Função do PCI



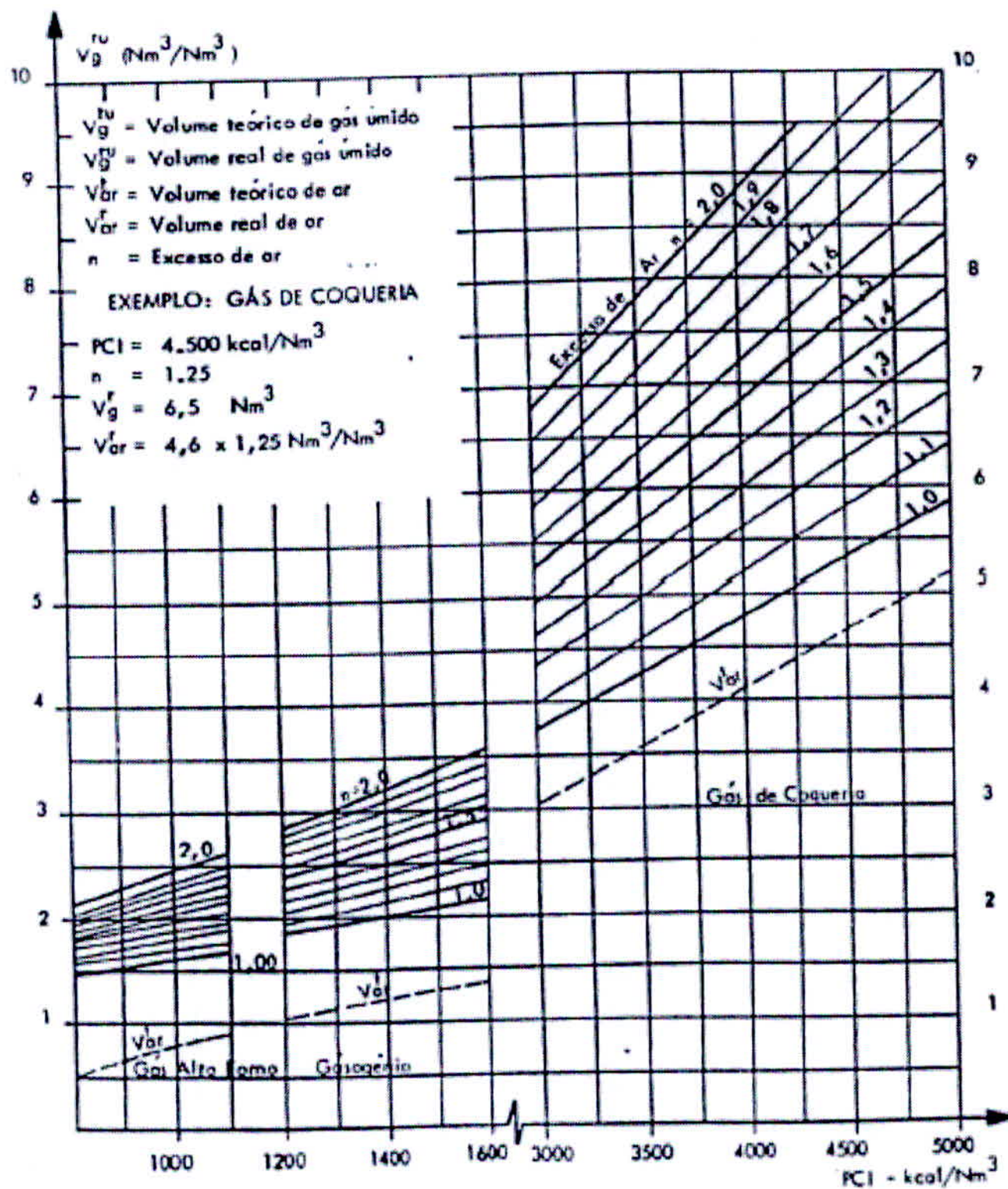
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 8 – Volumes de Ar e Gases da Combustão na Queima de Combustíveis Líquidos



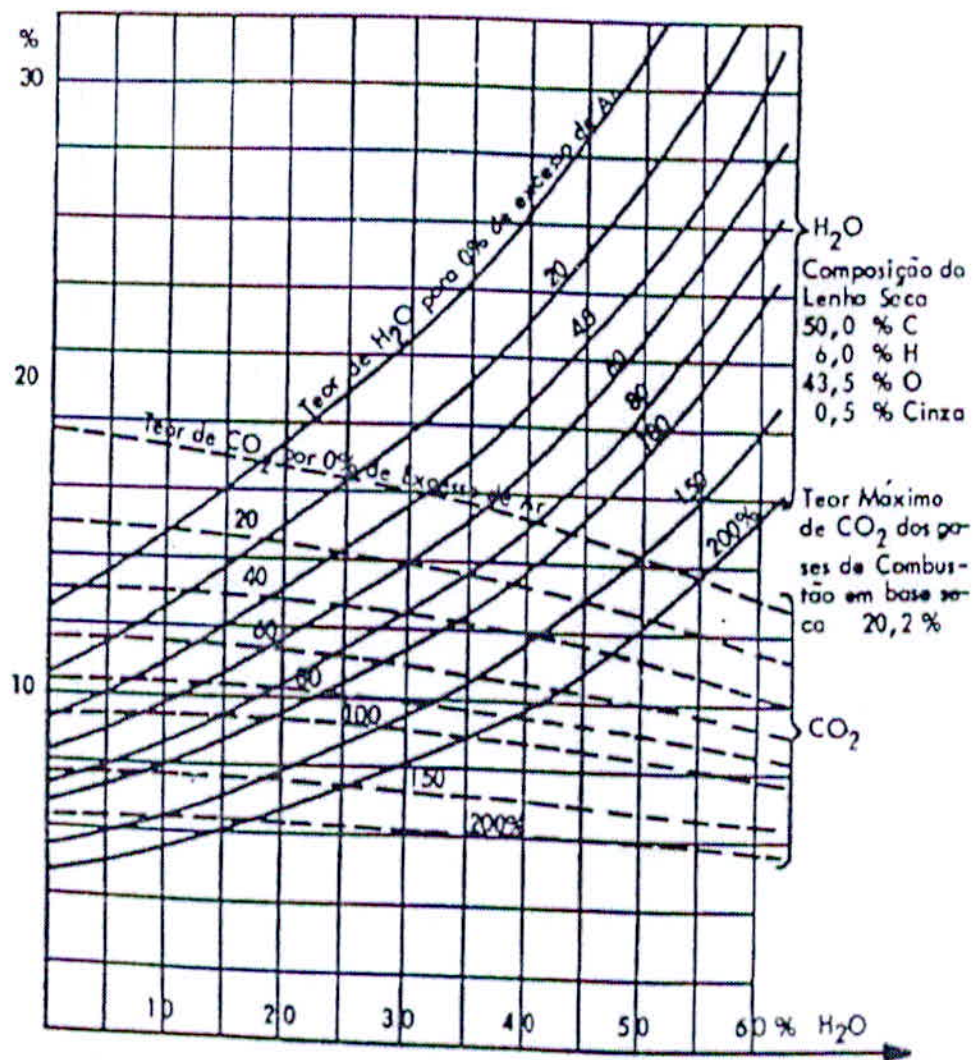
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 9 – Volumes de Ar e Gases da Combustão na Queima de Combustíveis Gasosos



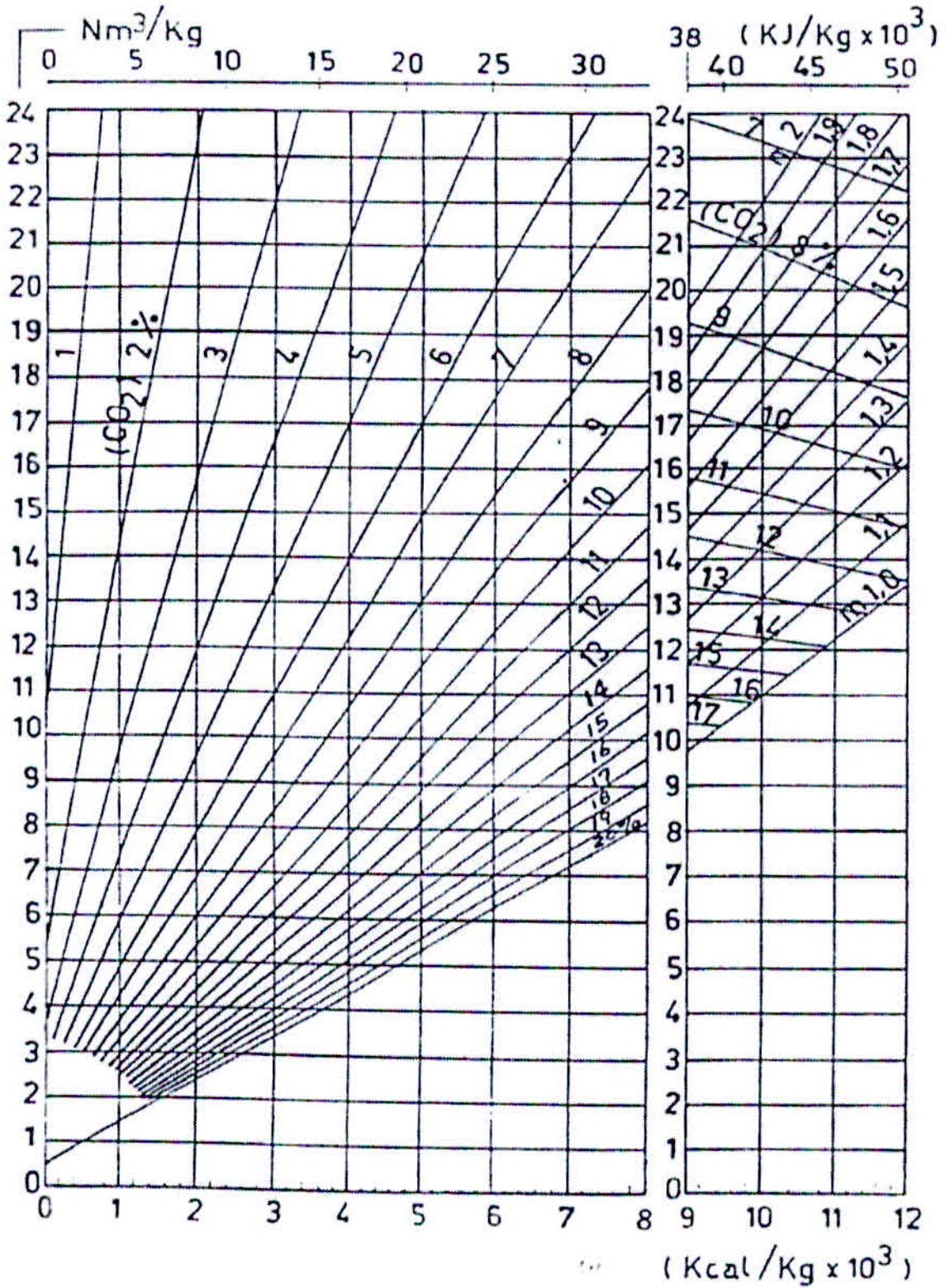
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 10 – Volume de Ar e Gases de Combustão da Lenha de Composição Definida com Avaliação de Água e CO_2 contido nos gases.



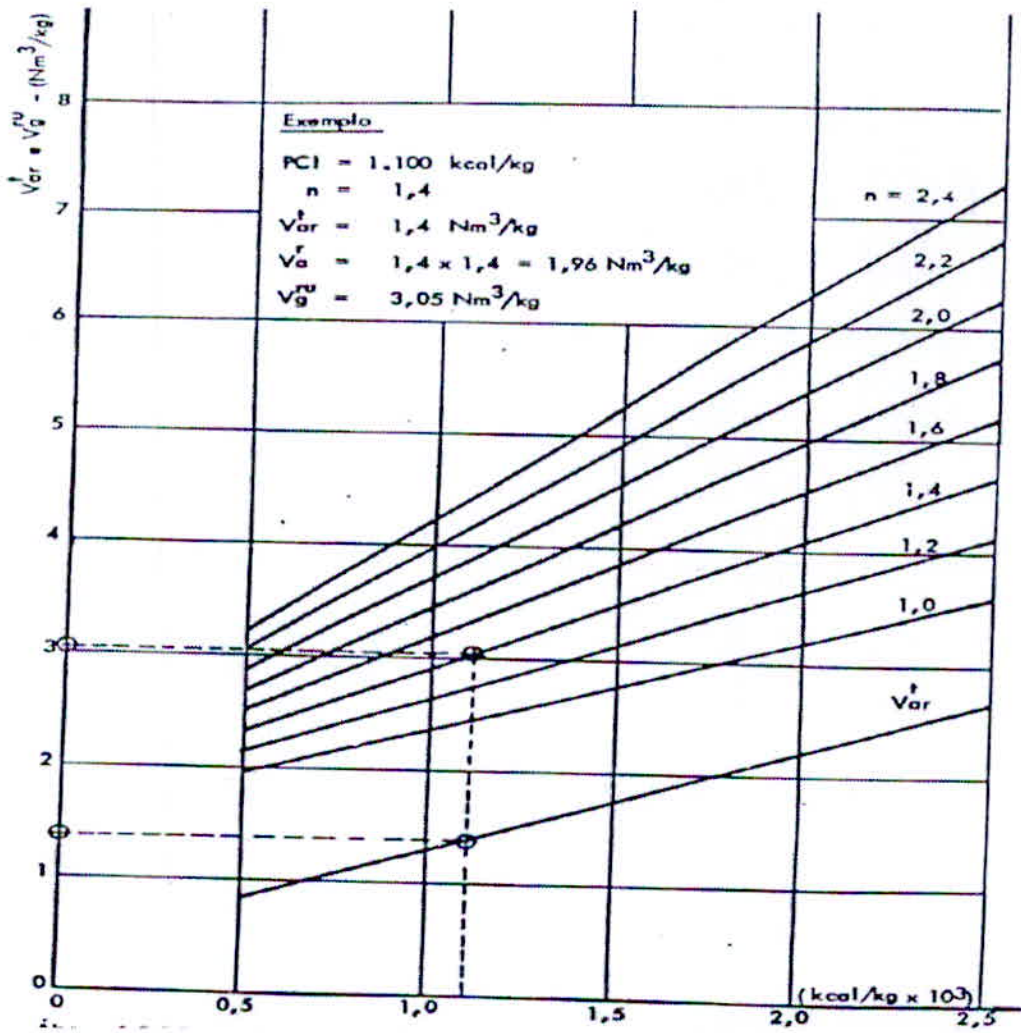
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 11 – Determinação do Volume Ar/Gases Formados na Queima de Combustíveis Sólidos e Líquidos em Função do PCI



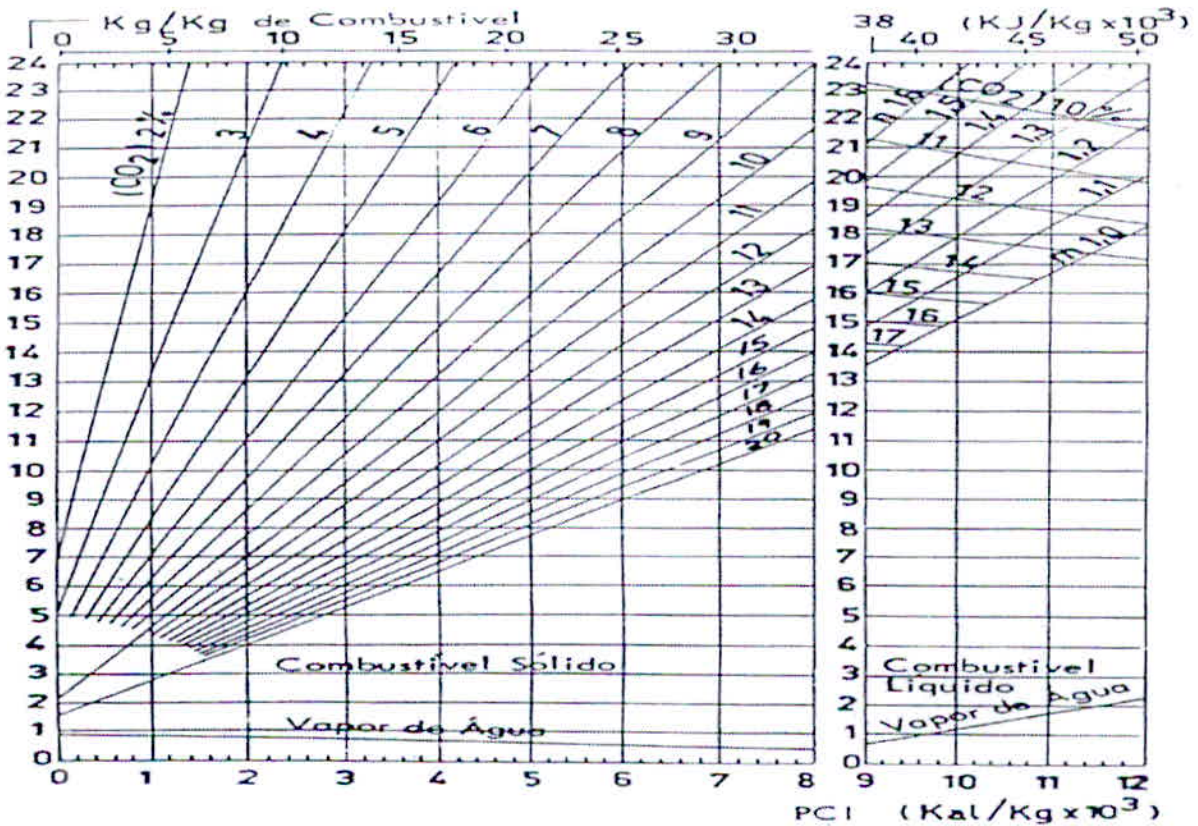
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 12 – Apresenta os Valores da Combustão do Lixo Urbano em Função do PCI



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 13 – Determinação do Peso de Gas e do Vapor de Água Formados na Queima de Combustíveis Sólidos e Líquidos em Função de “n”



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

A aplicação tem margem de 1,5 percentual de erro.

8 PROPRIEDADES DOS GASES

O gás é um fluido de difícil controle das propriedades físicas e termodinâmicas para a combustão, práticas que torna possível sua elaboração. Temos que ter em projeto cálculos como densidade, calor específico, entalpia, viscosidade e coeficiente de condutividade térmica.

O seu domínio por seu estado de matéria, se torna complicado pelo seu movimento veloz, ocupação total do volume envolvente exercendo pressão contra as paredes.

O comportamento pode ser explicado através de algumas leis. Como segue:

Lei de Mariotte

Temperatura constante do gás, são inversamente proporcionais a pressão.

V_1 e P_1 , volume e pressão do gás, estado definido. V_2 e P_2 , volume e pressão de igual quantidade de gás, submetido a pressão que é outra condição de estado.

Portanto:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2} \rightarrow V_1 \times P_1 = V_2 \times P_2$$

Lei de Gay-Lussac

Pressão constante, volume ocupado em determinada quantidade de gás são proporcionais às temperaturas.

Portanto:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \rightarrow V_1 \times T_2 = V_2 \times T_1$$

Temperatura variando, ocorre os seguintes processos a seguir:

- 1) à pressão constante e volume variável;
- 2) à volume constante e pressão variável; e
- 3) à volume e pressão constante.

Para o projeto do gerador de vapor nota-se primariamente o passo número 1.

Coefficiente de expansão $\frac{1}{273}$, $\alpha = \frac{1}{273} = 0,00365$, representa da dilatação a 1°C. O V_0 , submetido ao aquecimento e pressão constante e temperatura T, vai para um volume V, então:

$$V = V_0 (1 + \alpha.T) \rightarrow \frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0}$$

Fator proporcional ao aumento do volume:

$$f = (1 + \alpha.T) = \left(1 + \frac{T}{273}\right) \rightarrow V = f.V_0$$

8.1 – Cálculo de Volume Real e Temperatura de Saída dos Gases

Uma queima de 500kg/h de carvão, 35% de ar em excesso, determinaremos o volume real dos gases de saída na chaminé para 240°C.

Conforme $V = f.V_0$, temos:

$$f = \left(1 + \frac{T}{273}\right) = \left(1 + \frac{240}{273}\right) = 1,879$$

$$V_0 = B \cdot V_g^{tu}$$

B = quantidade de combustível = 500kg/h

$$V_g^{tu} = 7,06 \text{ Nm}^3$$

∴

$$V_0 = 500 \times 7,06 = 3,530 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$V_{240}^{tu} = 3,530 \times 1,879 = 6632,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

Para temperatura de saída dos gases 350°C, temos:

$$f = \left(1 + \frac{T}{273}\right) = \left(1 + \frac{350}{273}\right) = 2,282$$

$$V_{350}^{tu} = 3,530 \times 2,282 = 8055 \text{ m}^3/\text{h}$$

A tabela nos mostra o Coeficiente de Dilatação Térmica dos Gases:

Tabela 11 – Coeficiente de Dilatação Média dos Gases entre 0 e 100°C

gás	α	gás	α
Ar atm.	0,00367	CO ₂	0,00371
N ₂	0,00367	CO	0,00367
H ₂	0,00370	SO ₂	0,00390

Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Equação Geral do Gás Perfeito, conforme Mariotte e Gay-Lussac:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1 + \alpha T_1}{1 + \alpha T_2} = \frac{T_1}{T_2} \rightarrow \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} = \text{const.}$$

∴

Clapeyron-Mendeleev, const. = R (constant do gás).

$$\frac{P \cdot V}{T} = R$$

E para um mol de gás, tem-se a Constante Universal dos Gases:

$$R = \frac{V \cdot P}{T} = 847,7 \text{ kgf} \frac{\text{m}}{\text{kg mol} \cdot \text{°K}}$$

–

$$\text{Dividir o R pelo peso molar, } R = \frac{R}{M} = \frac{847,7}{M}$$

Ar seco a 0°C, nível do mar – 29,92mmHg – (10,333kg/m²) e $\gamma = 1,2988\text{kgf/dm}^3$, o valor de $R = 29,27\text{kgf/(m}^\circ\text{K)}$

Tabela 12 – Propriedades dos Gases Perfeitos

Gás	Formula Quimica	Pêso Molecular	R - $\frac{\text{kgf} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}$	C _{po} kcal/kg ^o K	C _{vo} kcal/kg ^o K	k _o
Ar	...	28,97	29,27	0,240	0,171	1,400
Argônio	Ar	39,94	21,29	0,1253	0,0756	1,667
Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	14,59	0,415	0,381	1,09
Dióxido Carbono	CO ₂	44,01	19,27	0,203	0,158	1,285
Monóxido Carbono	CO	28,01	30,27	0,249	0,178	1,399
Etano	C ₂ H ₆	30,07	28,20	0,427	0,361	1,183
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	30,23	0,411	0,340	1,208
Hélio	He	4,003	211,8	1,25	0,753	1,667
Hidrogênio	H ₂	2,016	420,6	3,43	2,44	1,404
Metano	CH ₄	16,04	52,87	0,532	0,403	1,32
Neônio	Ne	20,183	42,02	0,246	0,1477	1,667
Nitrogênio	N ₂	28,016	30,27	0,248	0,177	1,400
Octano	C ₈ H ₁₈	114,22	7,42	0,409	0,392	1,044
Oxigênio	O ₂	32,000	26,50	0,219	0,157	1,395
Propano	C ₃ H ₈	44,097	19,23	0,407	0,362	1,124
Vapor d'água	H ₂ O	18,016	47,07	0,445	0,335	1,329

Nota: C_{po} e C_{vo} e k_o são a 26,7°C $k_o = \frac{C_{po}}{C_{vo}}$ $R = C_{po} - C_{vo}$

Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Lei Dalton

A composição de vários gases não interagem entre si, soma-se as pressões parciais:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$$

A exemplo disso, uma câmara cheio de ar seco com pressão 10kgf/cm², contém 21% de O₂ e 79% de N₂. Pressão parcial do gás é:

$$10 \times 0,21 = 2,1\text{kgf/cm}^2$$

$$10 \times 0,79 = 7,9\text{kgf/cm}^2$$

Densidade:

$$\rho = m / V$$

Peso Específico:

$$\gamma = G / V$$

Peso Específico de gás seco em condições de trabalho, normais:

$$\gamma_n = \gamma_1 \times \frac{T_1}{P_1} \times \frac{P_n}{T_n} \times K$$

γ_n = peso específico nas condições normais

γ_1 = peso específico nas condições de trabalho

K = coeficiente de compressibilidade do gás

$$K = \frac{\gamma_n}{\gamma_0}$$

Para misturas gasosas, temos:

$$K_{mis} = \frac{J_1 \cdot K_1 + J_2 \cdot K_2 + \dots + J_i \cdot K_i}{100}, \text{ onde;}$$

j = partes de cada um dos componentes em % de volume

k = coeficiente de compressibilidade de cada componente

Se o gás apresentar umidade, o peso específico se formula:

$$\gamma_\mu = \frac{\gamma_n (P_1 - \phi P_{1H_2O}) T_n}{P_n T_1 K} + \phi \gamma_{H_2O}$$

γ_μ = peso específico do gás úmido à pressão P_1 e temperatura absoluta T_1 .

P_{1H_2O} = pressão parcial do vapor de água saturada à temperatura T_1 .

γ_{H_2O} = peso específico do vapor de água saturado à temperatura T_1 .

O peso específico das misturas gasosas:

$$\gamma_M = a_1 \cdot \gamma_1 + a_2 \cdot \gamma_2 + \dots + a_i \cdot \gamma_i$$

ou

$$\gamma_M = \frac{1}{\frac{b_1}{\gamma_1} + \frac{b_2}{\gamma_2} + \dots + \frac{b_i}{\gamma_i}}$$

a_i = partes da mistura em volume

b_i = partes em peso

Tabela 13 – Peso e Volume Específicos de Alguns Gases

Gás	Símbolo	Peso Específico Kg/Nm ³	Volume Específico Nm ³ /Kg
Vapôr de água	H ₂ O	0,604	1,244
Air Seco	O ₂ +N ₂	1,290	0,775
Oxigênio	O ₂	1,429	0,7
Hidrogênio	H ₂	0,089	11,2
Nitrogênio	N ₂	1,257	0,796
Monóx. Carbono	CO	1,250	0,8
Bióxid. Carbono	CO ₂	1,97	0,509
AnidridoSulfuroso	SO ₂	2,86	0,35
Metano	CH ₄	0,716	1,4
Etileno	C ₂ H ₄	1,25	0,8

Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Umidade

Quando em contato com o gás aquecido, a água passa suas moléculas parcialmente para o mesmo na forma de vapor e estabelece um certo equilíbrio. Sendo a temperatura maior no gás a água também aumenta, assim a pressão parcial aumenta.

Esse conteúdo é caracterizado por dois tipos de umidade, a absoluta e relativa.

Absoluta é a massa de vapor d'água em determinado volume de gás, já a relativa também chamada de grau higrométrico é a relação entre a densidade do vapor no gás úmido com a máxima densidade possível do vapor, nas condições de trabalho.

Podemos calcular a absoluta em:

$$\mu^t = \frac{\mu}{1 + \frac{\mu}{\rho}} \text{ kg/Nm}^3 \text{ (úmido)}$$

$$\mu = \frac{\mu^t}{1 - \frac{\mu^t}{\rho}} \text{ kg/Nm}^3 \text{ (seco)}$$

$$\rho = \text{densidade do vapor} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Relativa: } \gamma = \frac{\rho}{\rho \text{ máx.}}$$

ρ = densidade do vapor úmido à pressão de trabalho P

$\rho \text{ máx}$ = máxima densidade possível do vapor à pressão de trabalho P

∴

$$\gamma = \frac{P_i}{P_{sat.}}$$

P_i = pressão parcial do vapor de água do gás

$P_{sat.}$ = pressão do vapor de água saturado à temperatura de trabalho

Convertendo a umidade absoluta em relativa temos:

$$\gamma = \frac{P_i}{(\mu + \rho \text{ máx.} + K_0) \cdot P_{sat.}}$$

Temperatura de Orvalho

Temperatura na qual os vapores contidos no ar ou gás atingem a saturação. Abaixando a temperatura do gás umidificado inicia-se a condensação e o ponto depende de inúmeros fatores.

Calor Específico

À pressão constante C_p e o calor específico à volume constante C_v , termodinâmica imprescindíveis ao cálculo de gases perfeitos. O calor específico à pressão constante é mais importante que a volume constante, pela variação de entalpia do gás em função da temperatura.

$$C_v = \left(\frac{\delta U}{\delta T} \right) V$$

$$C_p = \left(\frac{\delta h}{\delta T} \right) V$$

Independente do volume, a energia interna se expressa por:

$$C_{vo} = \frac{dU}{dT},$$

$$du = C_{vo} \cdot dT$$

Para massa m:

$$du = m \cdot C_v \cdot dT$$

Entalpia em função da temperatura:

$$C_p = \frac{dh}{dT} \rightarrow dh = C_p \cdot dT$$

E massa m:

$$dQ = m \cdot C_p \cdot dT$$

Integradas as temperaturas:

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)$$

Quando a pressão dos gases são próximas dos gases perfeitos, a pressão do sistema tende à zero.

Tabela 14 – Calores Específicos à Pressão Constante de Vários Gases Perfeitos

Gás	Fórmula para o Cálculo do c_{po} $\theta = \frac{T}{100}$ ($\frac{\text{cal.}}{\text{gmolk}}$)	Faixa (%)	Erro Máximo %
N ₂	$c_{po} = 9,3355 - 122,560 \cdot \theta^{1,5} + 256,380 \cdot \theta^2 - 196,080 \cdot \theta^3$	300 - 3.500	0,43
O ₂	$c_{po} = 8,9465 + 4,8044 \times 10^{-3} \theta^{1,5} - 42,6790 \cdot \theta^{1,5} + 56,6150 \cdot \theta^2$	300 - 3.500	0,30
H ₂	$c_{po} = 13,505 - 167,960 \theta^{0,75} + 278,440 \theta^{1,5} - 134,010 \theta^{2,25}$	300 - 3.500	0,60
CO	$c_{po} = 16,526 - 0,168410 \theta^{0,75} - 47,9850 \theta^{0,5} + 42,2460 \theta^{0,75}$	300 - 3.500	0,42
OH	$c_{po} = 19,490 - 14,1850 \theta^{0,25} + 4,14180 \theta^{0,75} - 1,01960$	300 - 3.500	0,43
NO	$c_{po} = 14,169 - 0,408610 \theta^{0,5} - 16,8770 \theta^{0,5} + 17,8990 \theta^{1,5}$	300 - 3.500	0,34
H ₂ O	$c_{po} = 34,190 - 43,8600 \theta^{0,25} + 19,7780 \theta^{0,5} - 0,884070$	300 - 3.500	0,43
CO ₂	$c_{po} = -0,89286 + 7,29670 \theta^{0,5} - 0,980740 + 5,7835 \times 10^{-3} \theta^2$	300 - 3.500	0,19
NO ₂	$c_{po} = 11,005 + 51,6500 \theta^{0,5} - 86,9160 \theta^{0,75} + 55,5800 \theta^2$	300 - 3.500	0,26
CH ₄	$c_{po} = -160,82 + 105,100 \theta^{0,25} - 5,94520 \theta^{0,75} + 77,4080 \theta^{0,5}$	300 - 3.500	0,15
C ₂ H ₄	$c_{po} = 22,800 + 29,4330 \theta^{0,5} - 8,51850 \theta^{0,75} + 43,6830 \theta^3$	300 - 3.500	0,07
C ₂ H ₆	$c_{po} = 1,648 + 4,1240 - 0,1530 \theta^2 + 1,74 \times 10^{-3} \theta^3$	300 - 1.500	0,83
C ₂ H ₈	$c_{po} = -0,966 + 7,2790 - 0,37550 \theta^2 + 7,58 \times 10^{-3} \theta^3$	300 - 1.500	0,40
C ₄ H ₁₀	$c_{po} = 0,945 + 8,8730 - 0,4380 \theta^2 + 8,36 \times 10^{-3} \theta^3$	300 - 1.500	0,54

Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Entre C_{vo} e C_{po} , conforme tabela acima, a relação é:

$$C_{po} - C_{vo} = R \text{ (por mol de substância)}$$

$$C_{po} - C_{po} = R$$

Calor Específico Médio

Não se calcula o C.E. para cada temperatura, média entre as duas temperaturas:

$$C_{pm} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_p dT}{(T_2 - T_1)}$$

Se pode chegar nesse valor por gráfico (C_{pm} entre T_1 e T_2). O cartesiano coloca nas ordenadas os valores T_1 e T_2 e $\frac{T_1 + T_2}{2}$ e nas coordenadas C_p . Valores de T_1 , T_2 e $T = 0$, traça a curva para achar o C_{pm} .

Calor Específico Médio de Mistura de Gases

O calor necessário para elevar a temperatura, equivale a soma dos calores de cada componente, à mesma variação de temperatura.

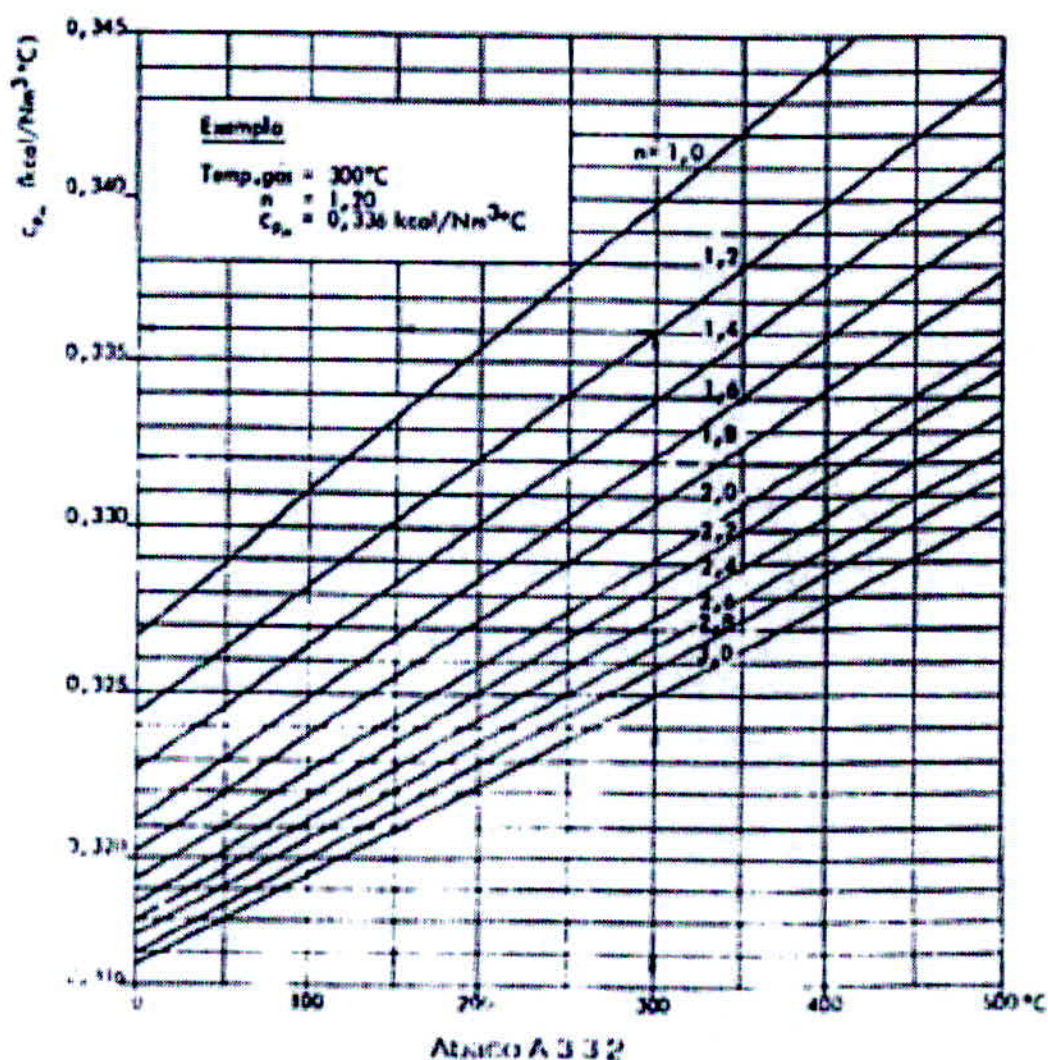
$$m_i \cdot C_{pm} \cdot dT = \sum_t^n m_i \cdot C_{pi} \cdot dT$$

E o calor da mistura será:

$$C_{pm} = \frac{\sum_t^n m_i \cdot C_{pi}}{m}$$

Publicado pela Shell, conforme ábaco a seguir, o calor específico médio para os gases de combustão do óleo (em função da temperatura).

Tabela 15 - Calor Específico Médio dos Gases



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Entalpia

“Vale salientar que os ábacos postados anteriormente substituem os cálculos de combustão.”

Vamos para o próximo passo da relação PCI/volume dos gases, também diagramados “ht”. Limitaremos à apenas alguns dados como; poder calorífico inferior dos combustíveis, excesso de ar e temperatura dos gases.

O “ht”, permite realizar com rapidez o balanço térmico e o rendimento térmico do equipamento.

O conteúdo térmico na unidade de massa ou volume é a entalpia específica “h”.

Dados de entrada:

PCI – poder calorífico do combustível [kcal/kg]

V_g^{ru} = volume formado pela queima de 1kg de combustível em Nm³/kg à úmido

q = calor por unidade de volume kcal/Nm³

Extremamente útil para projetar o gerador de vapor.

Diagrama ht

Conforme Rosin e Fheling, o volume de um gás é função do poder calorífico e excesso de ar.

$$V_g^{ru} = f(PCI, n) \rightarrow Q_t = \frac{PCI}{f(PCI, n)}$$

Pode-se também conforme tratado anteriormente, à pressão constante:

$$Q = m \cdot C_p \cdot (T_1 - T_2)$$

Para $T_2 = 0$:

$$Q = m \cdot C_p \cdot T$$

Substituindo:

$$m \cdot C_p \cdot T = f(PCI, n)$$

- Chega-se a relação; PCI, temperatura e excesso de ar.

Os ábacos citados abaixo e conforme mencionados por autores anteriormente, retiram todo o método ortodoxo para o cálculo dos geradores e com exatidão.

Calculando o Gerador de Vapor

Se consome 1100kg de B.P.F. no gerador em questão, absorve-se 4.500.000kcal na sua fornalha. Que temperatura se tem na saída da câmara com 20% de excesso de ar?

Calor da queima:

$$Q_t = 1.100 \times 9.750 = 10.725.000 \text{kcal/h}$$

Calor após a câmara:

$$Q_s = 10.725.000 - 4.500.000 = 6.225.000 \text{kcal/h}$$

DIAGRAMA 3.2.2 (OBTENÇÃO DO VALOR DO VOLUME DE GASES POR kg DE COMBUSTÍVEL COM $n=1.4.1.2$)

$$V_g^{ru} = 15,5 \text{Nm}^3/\text{kg}$$

Volume total:

$$V_g^{ru} = V_g B \quad 15,5 \times 1.100 = 17.050 \text{Nm}^3/\text{h}$$

A entalpia:

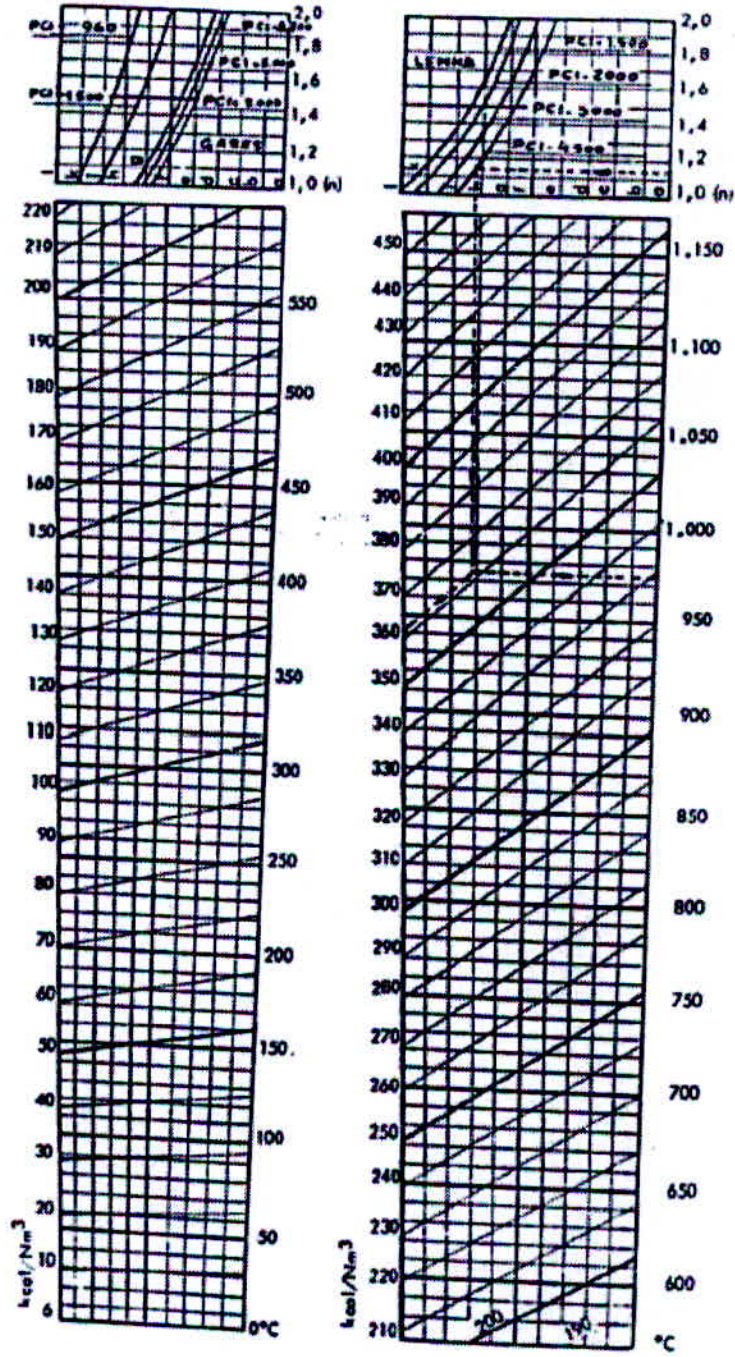
$$H = \frac{6.225.000}{17.050} = 365 \text{kcal/Nm}^3$$

Entretanto, diagrama com excesso de ar:

$$N = 1,4 \cdot \text{PCI} = 9.750 \text{kcal/Nm}^3$$

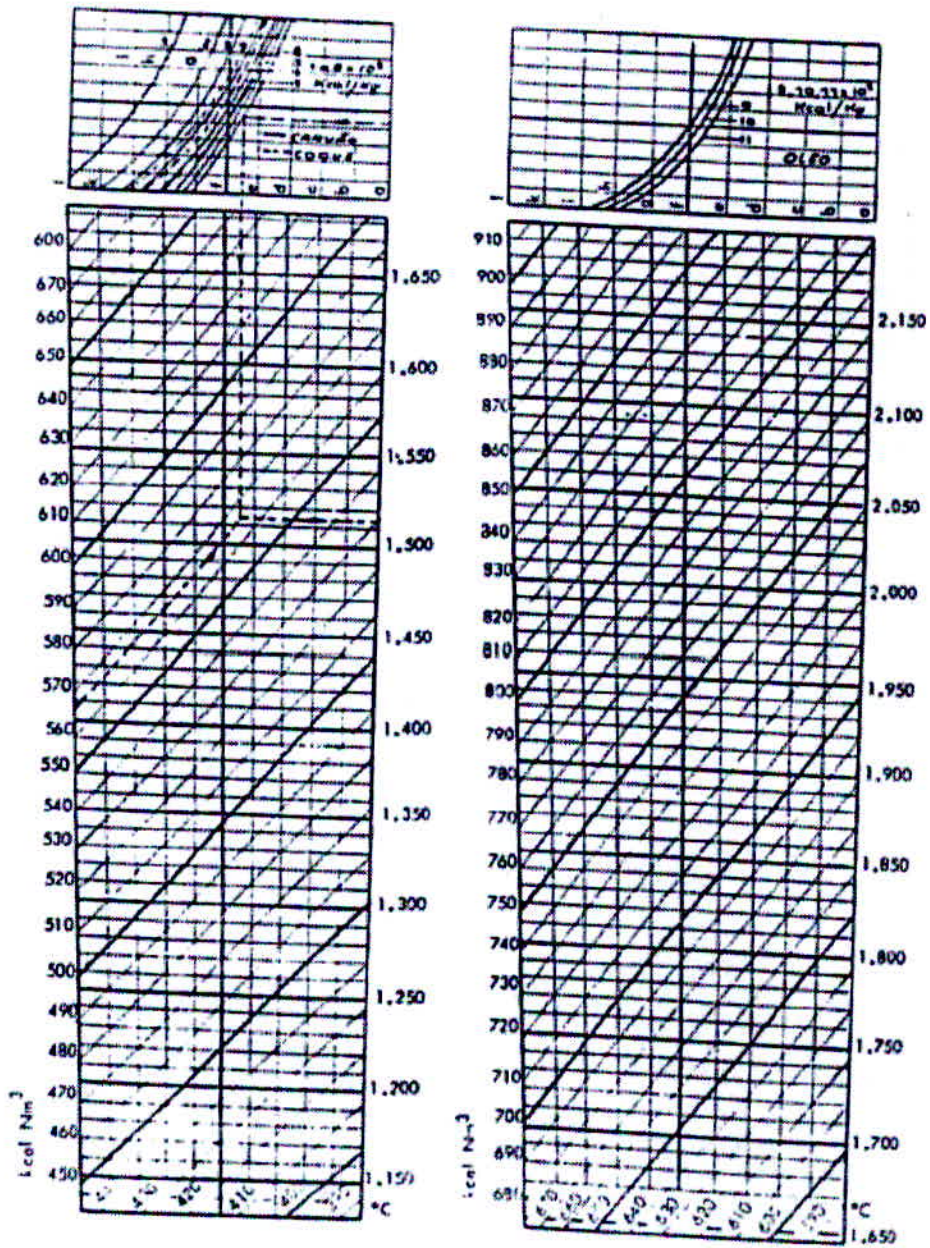
Verificar até kcal/Nm³, vertical; horizontal partindo desse ponto à direita 990°C.
Contando com excesso de 15%, $n=1,15$, temperatura será de 1158°C.

Ábaco 14 – Entalpia dos Gases em kcal/Nm³



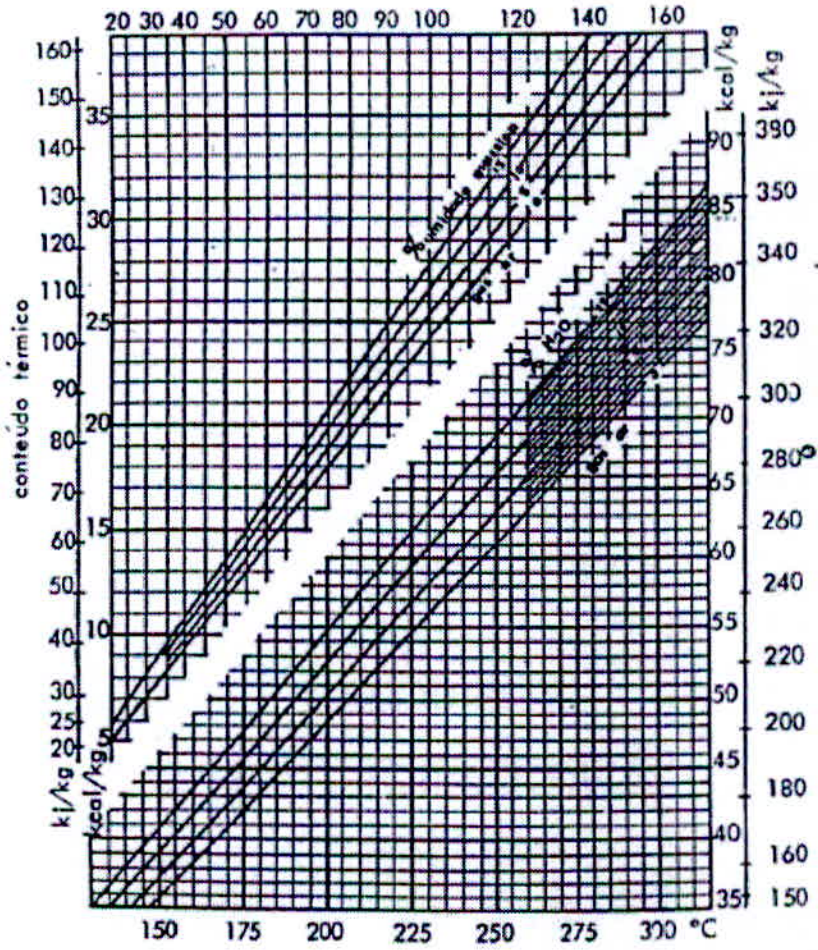
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 15 – Entalpia dos Gases em kcal/Nm³



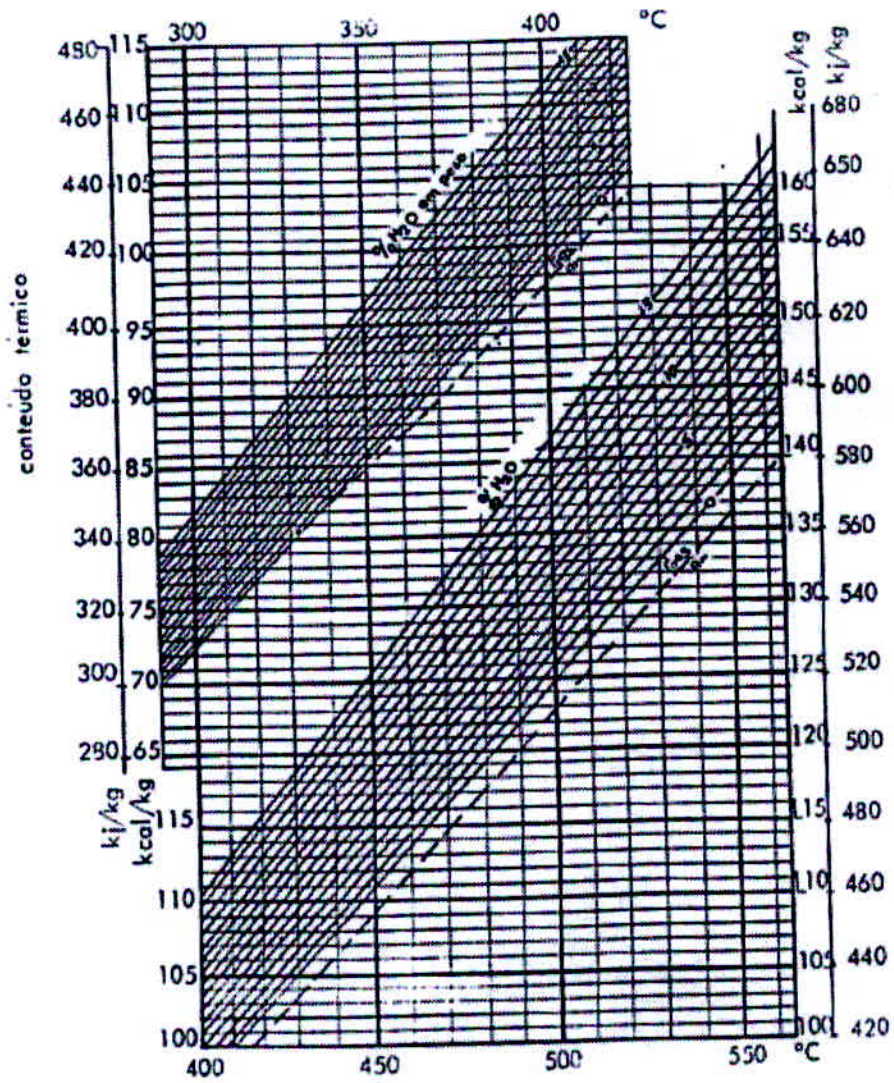
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 16 – Entalpia do Ar e do Gás de Combustão (20~135°C)



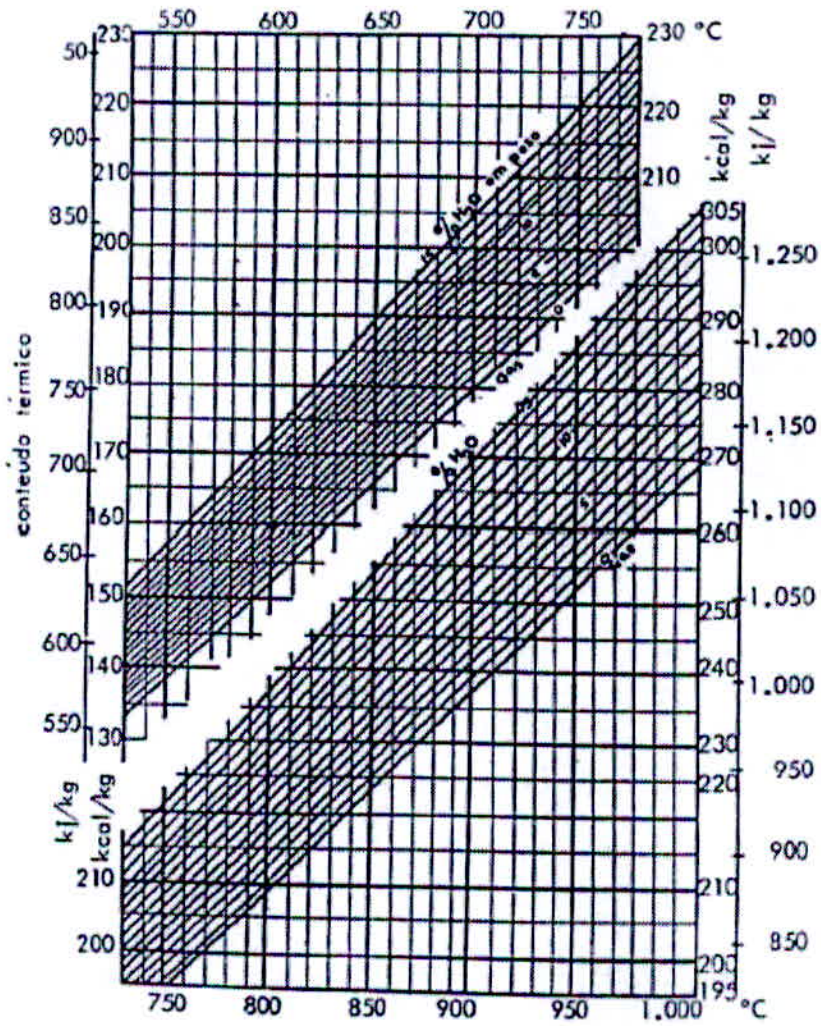
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 17 – Entalpia do Ar e do Gás de Combustão (290~560°C)



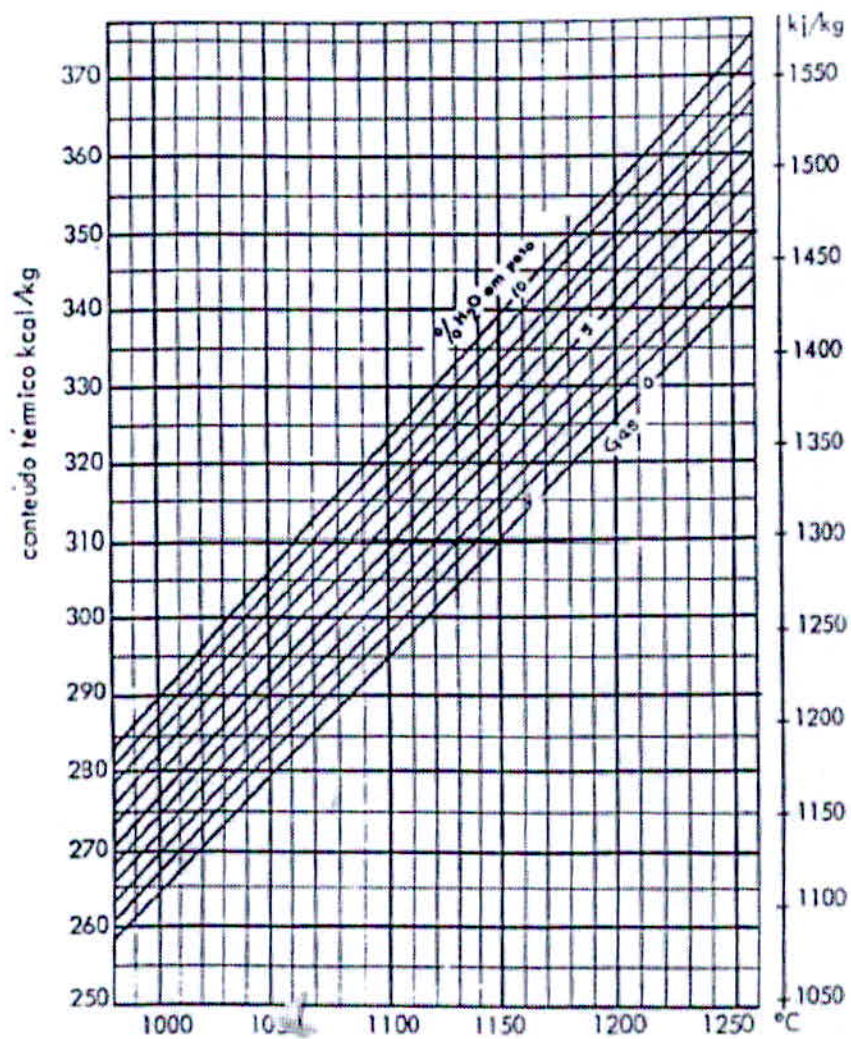
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 18 – Entalpia do Ar e do Gás de Combustão (530~1010°C)



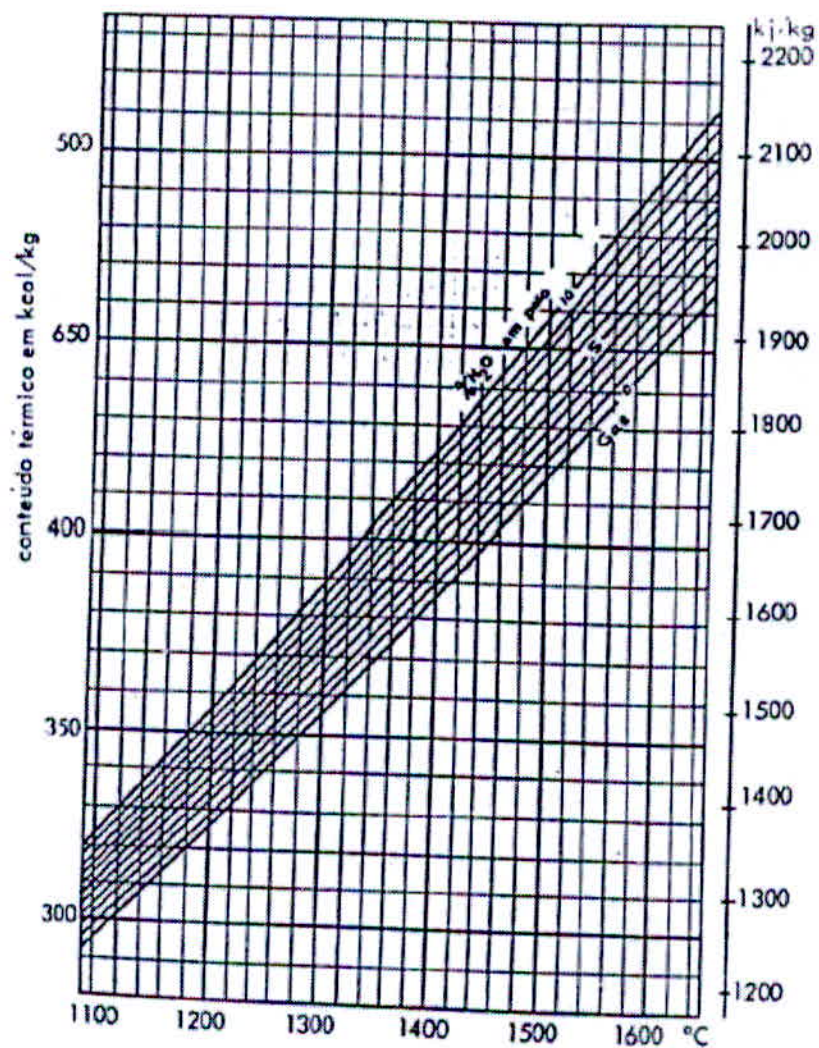
Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 19 – Entalpia do Ar e do Gás de Combustão (980~1260°C)



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Ábaco 20 – Entalpia do Ar e do Gás de Combustão (1095~1650°C)



Fonte (Geradores de Vapor, 1982)

Através desses diagramas, há grande facilidade de utilização e nos permite, a obtenção da temperatura equivalente dos gases, excesso de ar, PCI e entalpia; ou inversamente (conhecendo outros dados primeiramente).

9 – CONCLUSÃO

A combustão responde por mais de 85% da energia utilizada pelos humanos e ainda se torna atualmente presente em praticamente toda a sociedade. A preocupação com o meio ambiente necessita-se de um controle rigoroso desta energia gerada, é visto que, este processo gera poluentes super nocivos ao ambiente e também à saúde dos seres humanos.

O trabalho propõe um acesso facilitador da determinação de quantidades dos poluentes e encontrar caminhos das melhores condições de queima no processo de combustão. Avaliar o percentual de excesso de ar pelo oxigênio nos gases de exaustão conclui que quanto maior o percentual de oxigênio nos gases de exaustão maior o percentual de excesso de ar, isto, quanto mais ar é injetado, mais pobre é a mistura da combustão. Diminui a temperatura de chama o que diminui minorando a eficiência térmica. Com essa quantidade maior de ar com a mesma de combustível, aumenta-se o volume de gases de exaustão e conseqüentemente perda devido à entalpia dos gases.

A transferência de calor desse trabalho não foi o foco principal, transferência de calor do interior da fornalha para a parede por radiação, por condução pela espessura determinada na fornalha e pelos tubos, por convecção água e vapor; mas sim como dito anteriormente a chegada até entalpia. Este trabalho é futuro.

Observando que o objetivo geral foi a chegada ao cálculo da entalpia que no ábaco final nos deu a temperatura do interior da fornalha, ponto que foi crucial para determinação da temperatura na fornalha, nessa sequência poderíamos determinar a temperatura do vapor que desejaríamos no vapor na caldeira.

10 – REFERÊNCIAS

Steammaster Equipamentos Térmicos LTDA.

PERA, Hildo. Geradores de vapor de água: Escola Politécnica de São Paulo: Março 1982.

Turns, Stephen R. Introdução à Combustão: Conceitos e Aplicações 3ª Ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

Garcia, Roberto. Combustíveis e Combustão Industrial: Ed. Interciência 2ª Ed. 2013.

INCROPERA, F. P. *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.