CETESB

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA
AV. PROF. FREDERICO HERMANN JR., 345 CEP 05489 - PINHEIROS
SÃO PAULO - BRASIL

PROGRAMA 14 : ESTUDOS RELATIVOS AO IMPACTO AMBIENTAL DECORRENTE DO USO DO CARVÃO MINERAL.

PROJETO 14.1 : CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES DE POLUIÇÃO DOS PROCESSOS DE GASEIFICAÇÃO DO CARVÃO.

B. INTERCAMBIABILIDADE DOS GASES - EXEMPLO DE APLICAÇÃO

OUTUBRO/1980

DEAM/SEAR/GFPAE/DAEN

040/1

82
R151c(RCET)
008617

CLASS
8617

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

OBJETO :

O presente relatório se refere ao ítem B do projeto 14.1 do Programa de Atividades da Superintendência de Engenharia do Ar - SEAR para 1980. O referido projeto trata da caracterização das fontes de poluição dos Processos de Gaseificação do Carvão, se constituindo em um dos ítens do programa 14 que abrange os Estudos relativos ao Impacto Ambiental Decorrente do uso do Carvão Mineral.

Sendo a intercambiabilidade dos gases um assunto de implicações estratégicas e ambientais, entendeu-se a necessidade de abordar, ao menos de forma introdutória, o tema que sem dúvida é compatível com o Programa de Atividades da Diretoria de Engenharia do Ar e de Ação Metropolitana - DEAM.

INTERCAMBIABILIDADE DOS GASES (REFERÊNCIA nº 1)

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

I. INTRODUÇÃO

Em um serviço de distribuição de gás é importante poder prever o comportamento dos equipamentos de utilização, quando estes são submetidos a um tipo diferente de gás.

Quando dois gases, para usos domiciliares, podem ser substituidos um pelo outro sem necessidade de correção dos equipamentos, obtendo-se resultados de combustão e de estabilidade de chama similares, diz-se que os mesmos são intercambiáveis. Este resultado raras vezes se alcança, e na realidade considera-se intercambiáveis, no caso de uso industrial, dois gases com os quais se obtém resultados de combustão com certas semelhanças.

Para serem considerados intercambiáveis, dois gases devem possuir características físicas como o poder calorífico, a densidade, o poder de combustão, a velocidade de combustão e os limites de inflamabilidade, não muito distintas entre si.

Uma vez que as características das misturas gasosas não são todas independentes entre si, é suficiente para definir a intercambiabilidade o controle, por exemplo, do poder calorífico superior, da densidade e da velocidade de combustão.

O problema da intercambiabilidade também se desenvolveu inicialmente no campo teórico com o italiano Wobbe, que definiu o seguinte índice :

$$W = \frac{P}{\sqrt{d}}$$

P : poder calorífico superior do gás

d : densidade relativa do gás (com referência ao ar)

mediante o qual se pode deduzir que se a pressão de alimentação permanece constante, a potência térmica de um queimador resulta proporcional a relação indicada.

Se a pressão "p" varia, a potência térmica é definida como:

$$\frac{P\sqrt{p}}{\sqrt{d}}$$

Depois do índice de Wobbe, outros índices foram definidos. Entre estes o índice de Knoy, baseado na observação experimental de que um queimador funciona corretamente quando o poder calorífico da mistura ar-gás na cabeça de um queimador atmosférico é aproximadamente igual a 1500 Kcal/m^3 :

$$K = \frac{\frac{P}{9,54} - 175}{\sqrt{d}}$$

P : poder calorífico do gás
d : densidade relativa do gás.

Um outro índice é o Schuster, aplicável aos queimadores - Otto :

$$S = \frac{P}{\sqrt{n} \cdot \sqrt{\nu}} = \frac{W}{\sqrt{\nu}}$$

ν : velocidade de combustão

A partir dos índices preliminares, vistos acima, desenvolveram-se vários métodos de intercambiabilidade, relativos todos aos gases de cidade.

Alguns investigadores tem desenvolvido a continuação do problema de intercambiabilidade também para os gases naturais, uma vez que estes combustíveis tem adquirido nos últimos tempos uma importância superior aos gases de baixo ou médio poder calorífico obtidos a partir do carvão.

II. MÉTODO A.G.A. (American Gas Association) :

Baseia-se nos três índices seguintes :

1º) Índice de desprendimento de chama, que se analisa com a seguinte fórmula :

$$I_L = \frac{K_a}{\frac{f_a a_s}{f_s a_a} \left(K_s - \log \frac{f_a}{f_s} \right)}$$

sub-índice a : refere-se ao gás com o qual regulou-se determinado queimador

sub-índice s : refere-se ao gás de substituição

$$a = \frac{100\ A_t}{P}$$

$$f = \frac{1000\ V\sqrt{d}}{P}$$

$$K = \frac{F}{d}$$

P = poder calorífico

d = densidade relativa

A_t = ar teórico

F = coeficiente específico para a retenção de chama de cada um dos constituintes do gás (tabela I).

Condição de intercambiabilidade: $I_L < 1,0$

(Para certos gases naturais de alto poder calorífico pode-se alcançar o limite de 1,12, mas isto não é recomendável; para os gases naturais de alto teor de metano o limite é 0,6).

2º) Índice de retorno de chama

A tendência ao retorno de chama é caracterizado pelo seguinte índice:

$$I_F = \frac{K_s f_s \sqrt{\frac{P_s}{1000}}}{K_a f_a}$$

Condição de intercambiabilidade: $I_F < 1,18$ (limite máximo: 1,20).

3º) Índice de aparição de pontas amarelas

A tendência de formação de pontas amarelas em chamas azuis é verificada pelo índice:

$$I_y = \frac{f_s a_a y_a}{f_a a_s y_s}$$

$$Y = \frac{100\ T}{A_t + 7\ E - 26,3\ O_2}$$

T: coeficiente específico para a aparição de pontas amarelas em cada um dos constituin

tes do gás (tabela I).

E: concentração de substâncias inertes no gás.

O_2: concentração de oxigênio no gás

Condição de intercambiabilidade: $I_y > 1,0$

(Para certos gases de alto poder calorífico pode-se rebaixar o limite até 0,7, mas isto não é recomendável).

TABELA I : Tabela dos coeficientes "F" e "T" de diversos gases (método A.G.A.)

Gás	F	T
H_2	0,6	0,0
CO	1,407	0,0
CH_4	0,67	2,18
C_2H_6	1,419	5,8
C_3H_8	1,931	9,8
C_4H_{10}	2,55	16,85
C_2H_4	1,768	8,7
C_3H_6	2,06	13,0
C_6H_6	2,71	52
O_2	2,9	-4,76
CO_2	1,08	-
N_2	0,688	-
C_5H_{12}	-	25
C_4H_8	-	20
C_5H_{10}	-	30
C_4H_6(butadieno)	-	25
C_5H_8(pentadieno)	-	36
C_7H_8(tolueno)	-	60

III. MÉTODO DE WEAVER

A semelhança do método A.G.A., do qual se deriva, o método de Weaver (U.S. Bureau of Standards) leva em conta índices de intercambiabilidade, que correspondem aos distintos fenômenos registrados.

A maior parte dos índices se calcula a partir da velocidade de chama S, que para misturas gasosas complexas é dado pela seguinte expressão :

$$S = \frac{aF_a + bF_b + cF_c + \ldots}{A_t + 5Z - 18,8\,Q + 1}$$

onde :

a,b,c,...: proporções volumétricas dos constituintes combustíveis da mistura.

$F_a, F_b, F_c, \ldots$: coeficientes específicos relativos a cada gás combustível (tabela II)

A_t : volume de ar necessário para a combustão teórica da mistura (tabela II)

Z : proporção volumétrica dos gases inertes da mistura (CO_2 - N_2)

Q : proporção volumétrica de oxigênio na mistura.

TABELA II : Tabela dos coeficientes F, densidade e ar teórico "A"

Gás	Densidade	Ar teórico - A -	Coeficiente - F -
CO	0,97	2,39	61
H_2	0,07	2,39	339
CH_4	0,55	9,55	148
C_2H_6	1.04	16,71	301
C_3H_8	1,56	23,87	398
C_4H_{10}	2,09	31,03	513
C_2H_4	0,97	14,32	454
C_3H_6	1,45	21,48	674
C_2H_2	0,91	11,93	776
C_6H_6(benzeno)	2,70	35,79	920
N_2	0,97	-	-
CO_2	1,53	-	-
O_2	1,11	(-4,78)	-
Ar	1,00	(-1,00)	-

1º) Índice de fluxo térmico :

A variação de fluxo térmico em um queimador é proporcional ao índice :

$$J_H = \frac{P \sqrt{d_a}}{P_a \sqrt{d}}$$

onde o sub-índice "a" se refere ao gás com o qual se regula o queimador.

Condição de intercambiabilidade : $J_H = 1$

2º) Índice de aeração primária :

O grau de aeração primária de um queimador atmosférico se obtém a partir do seguinte índice :

$$J_A = \frac{A \sqrt{d_a}}{A_a \sqrt{d}}$$

Condição de intercambiabilidade : $J_A = 1$

3º) Índice de desprendimento de chama:

A tendência ao desprendimento de chama é representada pelo índice :

$$J_L = J_A \frac{S}{S_A} \frac{(100 - Q)}{(100 - Q_a)}$$

Condição de intercambiabilidade : $J_L = 1$

4º) Índice de retorno de chama :

A tendência ao retorno de chama é dada pelo índice:

$$J_F = \frac{S}{S_a} - 1,4\ J_A + 0,4$$

Condição de intercambiabilidade : $J_F = 0$

5º) Índice de formação de fuligem e de pontas amarelas:

A tendência de aparição de pontas amarelas nas chamas e de produção de fuligem é dada pelo índice :

$$J_y = J_A + \frac{N - N_a}{100} - 1$$

"N" é igual a soma dos produtos dos átomos de carbono de cada hidrocarboneto não saturado presente pela sua porcentagem na mistura.

Condição de intercambiabilidade : $J_y = 0$

6º) Índice de combustão incompleta :

A tendência de se obter uma combustão incompleta com formação de monóxido de carbono é caracterizada pelo seguinte índice :

$$J_I = J_A - 0,366 \frac{R}{R_a} - 0,634$$

onde "R" é a relação entre o número de átomos de hidrogênio e o número de átomos de carbono considerando unicamente os hidrocarbonetos.

Condição de intercambiabilidade : $J_I = 0$

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

IV - MÉTODO DE PRIGG

Este método estabelece as seguintes equações :

1º) limite para haver combustão completa :

$$\frac{W}{W_a} - 0{,}132 \frac{S}{S_a} = 0{,}968 \quad \text{(em unidades inglesas)}$$

2º) limite para não haver retorno de chama :

$$\frac{W}{W_a} - 0{,}391 \frac{S}{S_a} = 0{,}460 \quad \text{(em unidades inglesas)}$$

3º) limite para haver deslocamento de chama :

$$WS\ (1 - Q) = 21300 \quad \text{(em unidades inglesas)}$$

O sub índice "a" corresponde ao gás de referência "W" e "S" são calculados, conforme vimos, de acordo com os ítens I e III respectivamente.

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

V - OUTROS MÉTODOS

Na Itália o método de intercambiabilidade mais usado é o de Delbourg, que se baseia nos métodos anteriores com a introdução de certos coeficientes de correção.

No Bureau of Mines de Pittsburgh, J. Grumer desenvolveu um método que usa o seu nome.

Maiores detalhes do método de Delbourg e do método de Grumer podem ser vistos no livro "La Combustion" de Guiliano Salvi (páginas 556 a 564).

VI- CONTROLE DE QUALIDADE DO GÁS DE RUA EM SÃO PAULO (COMGÁS)- Referência nº 02.

Um determinado queimador, ajustado em condições ótimas para um gás com determinada composição, continuará oferecendo bom desempenho se a variação de sua composição não fizer com que sejam ultrapassados os limites de número de Wobbe, retorno de chama, descolamento ou de combustão completa.

Como todos êsses limites se relacionam com o número de Wobbe e com a velocidade de chama, é possível estabelecer um diagrama (em anexo) de controle de qualidade.

O referido diagrama é traçado considerando-se:

a) como limite de carga térmica a variação de $\pm$ 10% sobre o nº de Wobbe do gás (CRG) com o qual os queimadores foram ajustados.

b) o critério para estabelecimento do limite de combustão completa é a relação CO/CO_2 nos gases de combustão provenientes da queima do gás com o qual os queimadores foram ajustados.

c) igualmente foram estabelecidos critérios para os limites de retorno de chama e descolamento.

Qualquer variação na composição do gás que está sendo distribuido só é admitida se o número de Wobbe e a velocidade de chama definirem pontos que caiam dentro do diagrama de controle de qualidade.

- Composição típica dos dois tipos de gás produzidos a partir da nafta e distribuidos pela COMGÁS:

GÁS CRG

CO: 3,00% em volume
CO_2: 20,80% em volume
H_2: 43,00% em volume
CH_4: 32,60% em volume
Nafta: 0,60% em volume
P.C.: 4750 kcal/Nm^3
dens.: 0,57 (ar = 1)
P.orv.: + 10ºC à 17,6 kg/cm^2
N.Wobbe: 660 BTU/scf
V.chama: 31

GÁS HTR

CO: 18,00% em volume
CO_2: 6,30% em volume
H_2: 59,30% em volume
CH_4: 6,50% em volume
N_2: 1,00% em volume
O_2: 0,50% em volume
C_nH_m: 8,40% em volume
P.C.: 4750 kcal/Nm^3
dens.: 0,49 (ar = 1)
P.orv.: + 25ºC a 1kg/cm^2
N.Wobbe: 720 BTU/scf
V.chama: 48

Com os dois últimos parâmetros, nº de Wobbe e velocidade de chama, os dois gases acima acham-se representados no diagrama de intercambiabilídades em anexo (gás CRG: ponto A no diagrama - gás HTR: ponto B no diagrama).

- Composições típicas do gás bruto produzido em gaseificadores à carvão - Gases de baixo e médio poder calorífico Referência 3

Composição, % vol.(seco)	gás de baixo poder calorif.	gás de médio poder calorif.
CO_2	3 — 14	6 — 31
CO	16 — 29	17 — 61
CH_4	1 — 5	1 — 14
H_2	11 — 23	23 — 39
N_2	40 — 63	1 — 3
H_2S, ppmv	400 — 6900[a]	3700 — 15000[a]
NH_3, ppmv	b	b
HHV, (kcal/Nm^3)	1223 — 1881	2351 — 3480

"a" : A concentração de H_2S é proporcional ao conteúdo de enxofre no carvão. Os intervalos mostrados são baseados em dados disponíveis. O valor superior do intervalo para o gás de baixo poder calorífico é o que se pode esperar ao se gaseificar um carvão com 3,5% de enxofre.

"b" : A quantidade depende do conteúdo de nitrogênio no carvão e das condições de operação do gaseificador. Dados não disponíveis para se ter um intervalo representativo.

- Gás de médio poder calorífico produzido a partir de carvão redutor (R.G.S.) em gaseificador Lurgi.

a) Composição - referência 4

Componente	% Mol
CO_2	1,49
C_2H_4	0,13
CO	9,18
H_2	74,96
CH_4	12,76
C_2H_6	0,34
C_3H_8	0,58
C_4H_{10}	0,32
N_2	0,24
P.C.S.	4000 kcal/Nm^3
Pressão	70 ata
Temperatura	30ºC

b) Representação do gás, com a composição acima, no diagrama de intercambiabilidade da COMGÁS.

- Densidade do Gás (d):

com auxílio da tabela II - página 6 - temos:

$$d = 0{,}0149 \times 1{,}53 + 0{,}0013 \times 0{,}97 + 0{,}0918 \times 0{,}97 + 0{,}7496 \times 0{,}07 + 0{,}1276 \times 0{,}55 + 0{,}0034 \times 1{,}04 + 0{,}0058 \times 1{,}56 + 0{,}0032 \times 2{,}09 + 0{,}0024 \times 0{,}97$$

$d = 0,0228 + 0,0013 + 0,0890 + 0,0525 + 0,0702 +$

$+ 0,0035 + 0,0090 + 0,0067 + 0,0023$

$d = 0,2573$ (ar = 1)

- Número de Wobbe do Gás (N.W.)

$$N.W. = \frac{PCS}{\sqrt{d}} = \frac{4000}{\sqrt{0,2573}} \quad kcal/Nm^3$$

$N.W. \cong 7886\ kcal/Nm^3 \cong 838,5\ BTU/scf$

- Velocidade de Chama (S)

de acordo com o método de Weaver (página 5) temos:

$$S = \frac{aF_a + bF_b + cF_c + \ldots}{A_t + 5Z - 18,8Q + 1}$$

partindo da composição do gás e utilizando-se a tabela II, página 6, temos:

C_2H_4	$a = 0,0013$	$A_a = 0,0013 \times 14,32$	$F_a = 454$
CO	$b = 0,0918$	$A_b = 0,0918 \times 2,39$	$F_b = 61$
H_2	$c = 0,7496$	$A_c = 0,7496 \times 2,39$	$F_c = 339$
CH_4	$d = 0,1276$	$A_d = 0,1276 \times 9,55$	$F_d = 148$
C_2H_6	$e = 0,0034$	$A_e = 0,0034 \times 16,71$	$F_e = 301$
C_3H_8	$f = 0,0058$	$A_f = 0,0058 \times 23,87$	$F_f = 398$
C_4H_{10}	$g = 0,0032$	$A_g = 0,0032 \times 31,03$	$F_g = 513$

$A_t = A_a + A_b + A_c + \ldots\ldots = 3,5427$

$aF_a + bF_b + cF_c + \ldots\ldots\ldots = 284,1626$

$$Z = \underbrace{0,0024}_{N_2} + \underbrace{0,0149}_{CO_2} = 0,0173$$

$Q = 0$

$$S = \frac{284,1626}{3,5427 + 5 \times 0,0173 - 0 + 1}$$

$S = 61,3848$

$S \cong 61,4$

- Representação do gás no diagrama de intercambiabilidades da COMGÁS:

  com N.W. = 838,5 Btu/scf e S = 61,4, o gás acha-se representado no diagrama em anexo (ponto C).

- Comentários:

  Ao examinarmos a localização do ponto C no diagrama de intercambiabilidade da COMGÁS, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

  - O gás em questão satisfaz o limite de retorno de chama.
  - O gás em questão satisfaz o limite de combustão completa.
  - O gás em questão satisfaz o limite de descolamento de chama.
  - O gás em questão possue uma carga térmica muito elevada, pois supera o limite superior de nº de Wobbe. Isto se deve principalmente à menor densidade do gás "Lurgi" ao ser comparado com o gás "CRG" da COMGÁS.

    Ao examinarmos a composição dos dois gases, chegamos a conclusão que a menor densidade do gás "Lurgi" está relacionada com o menor teor de CO_2 e com o maior teor de H_2 existente relativamente ao gás "CRG". Portanto para torná-lo intercambiável, um aumento do teor de CO_2 seria suficiente, porém, convém lembrar que um maior teor de CO_2 pode, dependendo do processo de remoção de gases ácidos utilizados na planta de gaseificação, significar um aumento no teor de H_2S. Considerando o problema de poluição do ar atmosférico, a presença deste último composto é indesejável, uma vez que o mesmo se oxidará principalmente à SO_2, quando o gás for utilizado como combustível.

- Gás de médio poder calorífico obtidos a partir de carvões nacionais (carvão vapor de Santa Catarina, carvão de candiota R.G.S. -, carvão de charqueadas R.G.S. e carvão de leão - R.G.S.) em gaseificadores Koppers Totzek.

a) Composição - Referência 5

Refere-se à composição aproximada resultante da produção do gás a partir dos carvões mencionados acima.

Componente	% Mol
CH_4	23,8
CO	15,8
H_2	57,8
CO_2	0,2
N_2 + ar	2,4
PCS	4500 kcal/Nm^3

b) Representação do gás, com a composição acima, no diagrama de intercambiabilidade da COMGÁS.

- densidade do gás (d)

com auxílio da tabela II página 6 - temos :

$$d = 0{,}238 \times 0{,}55 + 0{,}158 \times 0{,}97 + 0{,}578 \times 0{,}07 + 0{,}002 \times 1{,}53 + 0{,}024 \times 0{,}97$$

$$d \cong 0{,}3510$$

- número de Wobbe do gás (N.W.)

$$N.W. = \frac{PCS}{d} = \frac{4500}{0{,}3510}$$

$$N.W. \cong 7596 \text{ kcal/kg}$$

$$N.W. \cong 807{,}6 \text{ Btu/scf}$$

- velocidade de chama (S)

de acordo com o método de Weaver (página 5) temos:

$$S = \frac{aF_a + bF_b + cF_c + \ldots}{A_t + 5Z - 18{,}8Q + 1}$$

partindo-se da composição do gás e utilizando-se a tabela II, página 6, temos:

CH_4	$a = 0,238$	$A_a = 0,238 \times 9,55$	$F_a = 148$
CO	$b = 0,158$	$A_b = 0,158 \times 2,39$	$F_b = 61$
H_2	$c = 0,578$	$A_c = 0,578 \times 2,39$	$F_c = 339$

$$A_t = A_a + A_b + A_c = 4,0319$$

$$aF_a + bF_b + cF_c = 240,804$$

$$Z = \underbrace{0,024}_{H_2} + \underbrace{0,002}_{CO_2} = 0,026$$

$$Q = 0$$

$$S = \frac{240,804}{4,0319 + 5 \times 0,026 - 0 + 1}$$

$$S = 46,6503 \cong 46,65$$

- Representação do gás no diagrama de intercambiabilidades da COMGAS:
  com N.W. ≅ 807,6 Btu/scf e S ≅ 46,65, o gás acha-se representado no diagrama em anexo (ponto D)

- Comentários
  Ao examinarmos a localização do ponto D no diagrama de intercambiabilidades da COMGAS, as seguintes conclusões podem ser obtidas:
  - O gás em questão satisfaz o limite de retorno de chama.
  - O gás em questão satisfaz o limite de combustão completa.
  - O gás em questão satisfaz o limite de descolamento de chama.
  - O gás em questão possue uma carga térmica muito elevada, pois supera o limite superior de nº de Wobbe. Isto se deve principalmente à menor densidade do gás "Koppers-Totzek" ao ser comparado com o gás "CRG" da COMGAS. Ao examinarmos a composição dos dois gases

chegamos à conclusão que a menor densidade do gás está relacionada com o menor teor de CO_2 existente relativamente ao gás "CRG". Portanto para torná-lo intercambiável, um aumento de teor de CO_2 seria suficiente, porém convém lembrar que um maior teor de CO_2 pode, dependendo do processo de remoção de gases ácidos utilizados na planta de gaseificação, significar um aumento no teor de H_2S. Considerando o problema de poluição do ar atmosférico, a presença deste último composto é indesejável, uma vez que o mesmo se oxidará principalmente à SO_2, quando o gás for utilizado como combustível.

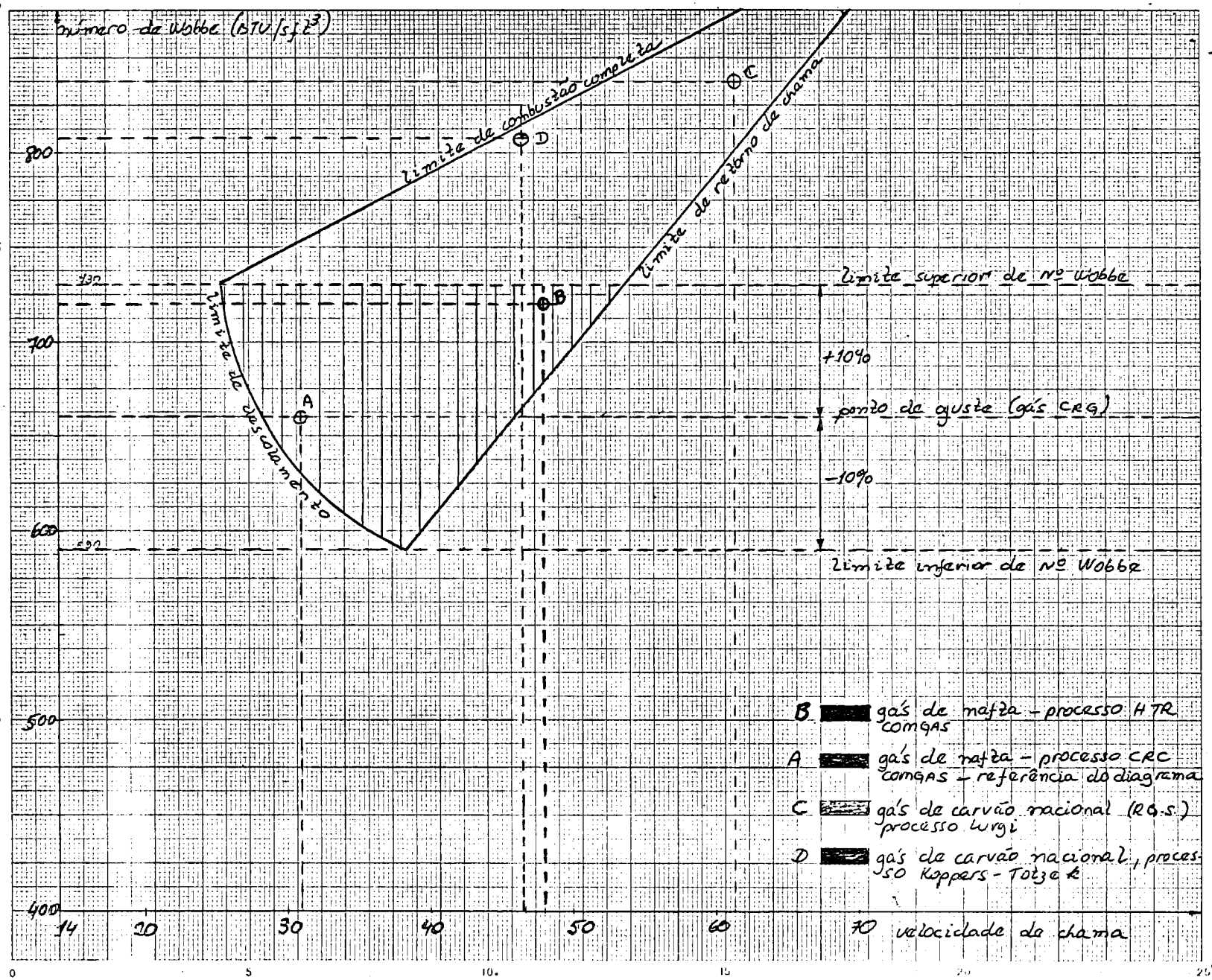
CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

Originado por:

Engº Sergio Randevas

Branco

Engº Gabriel Murgel Branco
Chefe da Divisão de Alternativas de Energia



CETESB
Ref: 4410 papel tecnico Ramilec
33-10-040/1

B I B L I O G R A F I A

1. "La Combustion" - autor : Giuliano Salvi

2. "Gaseificação da Nafta" - autor : Engº Luís Álvaro Gomes Rodrigues - Instituo Brasileiro do Gás (I.B.G.)

3. "Technology Assessment Report for Industrial Boiler Applications: Synthetic Feuls"/Draft : June 1979/ U.S.E.P.A.

4. "Process Study for the Gasification of South Brazilian Coals for FINEP" - Technical Information - vol. III.

5. "Gasification of Brazilian Coal Using the Koppers - Totzek Process" - Volume 5 : Fuel gas Plant . - - prepared by Krupp - Koppers GmbH, Essen, Germany for FINEP.

Data Aquis.: 28/8/91
Indic.:
Livraria:
Preço:
Data Tombo: 28/8/91