

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

COMBUSTÃO DE MISTURA ÓLEO-CARVÃO
- VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA CARVÕES BRASILEIROS -

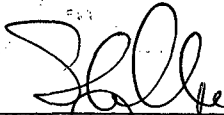
CAIO MÁRIO F. N. DA COSTA

COMBUSTÃO DE MISTURA ÓLEO-CARVÃO
- VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA CARVÕES BRASILEIROS -

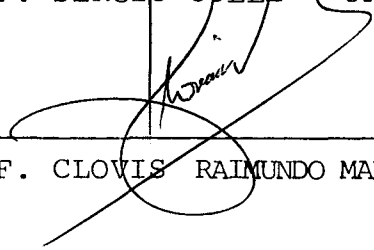
CAIO MÁRIO FRANCO NETTO DA COSTA

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

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FI-
NAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO




PROF. SÉRGIO COLLE - ORIENTADOR



PROF. CLOVIS RAIMUNDO MALISKA - COORDENADOR

BANCA EXAMINADORA



PROF. SÉRGIO COLLE, D.Sc.



PROF. CLOVIS RAIMUNDO MALISKA, Ph.D.



PROF. NARCISO ANGEL RAMOS ARROYO, M.Sc.

À SHEILA

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Sérgio Colle, pela orientação e confiança.

Ao Prof. Arroyo, pela colaboração.

Ao Prof. Blass, pela consideração.

À mãe, ao pai, ao Chico, e, especialmente, ao Gordo, pelo apoio.

Ao Fernando, pela amizade.

Ao Cheng e Udo, pela camaradagem.

Ao Firmino, pela casa nos Ingleses.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise de viabilidade técnica e econômica do uso de carvões brasileiros (baixo poder calorífico e alto teor de cinzas) como constituintes de mistura óleo-carvão.

O trabalho consiste de duas partes. A primeira parte é uma compilação de dados confirmados em combustão e manuseio da mistura, quando usada como combustível em caldeiras originariamente projetadas para consumo de óleo. Também o rendimento resultante e as mudanças no equipamento, depois da conversão da caldeira, são examinadas. É dada ênfase à análise de dados que são pertinentes para o caso do uso de mistura óleo-carvão com carvões brasileiros.

Na segunda parte, é apresentado um modelo quantitativo para estimar o consumo de combustível, necessário para gerar vapor na capacidade nominal (11 ton/h) em uma caldeira a óleo convertida para mistura óleo-carvão. São apresentados os resultados teóricos obtidos, usando misturas com carvões brasileiros, assim como a estimativa da economia que pode ser conseguida.

ABSTRACT

This paper presents a discussion on the technical and economical feasibility of using brazilian coals, with low heating value and high ash content, as component of coal-oil mixtures (COM).

The work consists of two parts. The first part is a compilation of confirmed data on combustion and handling of COM, when used as a fuel for converted oil-fired boilers. Also the resultant efficiency and equipment changing after the boiler conversion are examined. The data are analyzed throughout, considering the use of COM made with brazilian coals.

In the second part a quantitative method to estimate the consumption of COM of any type necessary to keep the original design steam capacity of 11 ton/hr at a converted boiler, is introduced. Results, when using COM from brazilian coals and estimation of the savings are presented.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO I - APRESENTAÇÃO	7
CAPÍTULO II - COMBUSTÃO - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS ..	9
CAPÍTULO III - CARACTERÍSTICAS DE MANUSEIO DA MISTURA	15
III.1 - Viscosidade	16
III.1.1 - Influência do carvão	16
III.1.2 - Influência do óleo	18
III.2 - Transporte e bombeamento	21
III.3 - Sedimentação e estabilidade da mistura	24
III.4 - Tipos de agregação	27
III.4.1 - Suspensões agregativas estáveis ...	27
III.4.2 - Suspensões floculadas	30
III.4.3 - Suspensões coaguladas	30
CAPÍTULO IV - MUDANÇAS NO DESEMPENHO DA CALDEIRA NA QUEIMA DE MISTURA ÓLEO-CARVÃO	32
IV.1 - Absorção de calor	32
IV.2 - Atomização da mistura nos queimadores	36
IV.3 - Deposição de cinzas	38
IV.4 - Emissões de NO_x e SO_x	39
IV.5 - Rendimento da caldeira	40
CAPÍTULO V - MODIFICAÇÕES DE EQUIPAMENTOS PARA USO DA MISTURA ÓLEO-CARVÃO	42
V.1 - Equipamentos de preparação de carvão	42

V.2 - Equipamentos para controle de cinza	43
V.3 - Equipamentos para preparo da mistura	44
V.4 - Equipamentos para transporte da mistura	45
V.5 - Atomizadores	46
V.6 - Instrumentação	47
CAPÍTULO VI - VIABILIDADE DO USO DE MISTURA ÓLEO-CARVÃO COM CARVÕES BRASILEIROS - ESTUDO QUANTITATIVO	
VI.1 - Proposta do modelo	49
VI.2 - Procedimento	50
VI.3 - Descrição do modelo	53
VI.3.1 - Determinação da correlação DHC x MC/MV	53
VI.3.2 - DHC para mistura com carvão brasileiro	54
VI.3.3 - Influência da cinza no DHC	59
VI.4 - Economia de Custos Operacionais	59
CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
APÊNDICE I	71
APÊNDICE II	76
APÊNDICE III	82
APÊNDICE IV	86
APÊNDICE V	90

LISTA DE FIGURAS

1 - Fluxograma de processos de uma instalação usando mistura óleo-carvão	8
2 - Perfis de chama para carvão, óleo e mistura	10
3 - Variação do comprimento de chama com o excesso de oxigênio	14
4 - Variação da emissividade de chama com a distância axial do queimador	14
5 - Influência da concentração de carvão na viscosidade plástica da mistura	17
6 - Efeito do tamanho de grão na viscosidade da mistura	19
7 - Efeito do diferencial da temperatura de pré-aquecimento na taxa de perda de carga	23
8 - Estados de agregação entre partículas na mistura	28
9 - Tipos de suspensão na mistura	29
10 - Variação da taxa de excesso de ar para combustão de mistura em usina de 400MW operando a várias cargas	33
11 - Fluxograma do modelo quantitativo	55
12 - Variação da taxa entre combustível gasto e vapor gerado com relação a diferença entálpica do combustível	56

13 - Variação dos consumos de mistura de carvão e de óleo com relação a concentração de carvão na mistura	58
14 - Variação do consumo equivalente em carvão em relação com a concentração de carvão na mistura ..	61
15 - Variação da economia no custo de operação com relação a concentração de carvão na mistura	63

LISTA DE TABELAS

1 - Modelos de ajuste apropriados para viscosidade de mistura	21
2 - Temperatura dos gases de combustão para caldeiras a óleo e a carvão	34
3 - Absorção espacial de calor em caldeira de usina de 400 MW, quando consumindo óleo ou mistura óleo-carvão	35
4 - Dados de operação experimental	51

INTRODUÇÃO

O uso, como combustível, de uma mistura de óleo pesado com carvão mineral, em caldeiras originariamente projetadas para queimar somente óleo, é uma tentativa de se conseguir um custo mais baixo de geração de vapor, aproveitando-se o menor preço do carvão e a maior facilidade de obtê-lo no mercado nacional.

Essa idéia não é nova: a primeira tentativa de uso da mistura óleo-carvão como combustível industrial, foi feita há quase um século. Uma patente foi concedida a SMITH e MUNSSELL nos ESTADOS UNIDOS, em 1879. Desde então, segundo notícias de J.J. DEMETER*, um grande número de trabalhos foi desenvolvido: inicialmente durante as duas guerras mundiais e, em nossos dias, devido à chamada "crise do petróleo".

Durante a 1ª GRANDE GUERRA, a ASSOCIAÇÃO DE DEFESA SUBMARINA, da Inglaterra, promoveu testes em um navio da Marinha americana movido por caldeiras aquo-tubulares. A mistura empregada compunha-se de 33% de carvão pulverizado abaixo de 200 mesh e; 1% de sabão de resina cálcica (como estabilizador); e óleo pesado. Com o término da guerra, os testes foram abandonados.

* J.J. DEMETER et al., COMBUSTION, April 1979.

Entre 1932 e 1935, a COMPANHIA DE VAPORES CUNARD, trabalhando na Inglaterra com companhias de mineração e engenharia em mar e terra, administrou testes com o objetivo de reduzir o óleo importado e aumentar o mercado para o carvão nacional americano. Nos testes, num cargueiro de doze caldeiras normalmente movidas a óleo foi usada uma mistura com 40% de concentração de carvão. O próprio equipamento existente para queima de óleo foi usado, não tendo sido encontrada dificuldade no manuseio e na combustão do novo combustível, embora os queimadores tivessem requerido limpezas mais frequentes.

Durante a 2ª GUERRA MUNDIAL, devido ao racionamento de óleo, programas de pesquisa foram patrocinados pelo U.S. BUREAU OF MINES, que constaram de estudos sobre estabilidade das suspensões de carvão no óleo, o efeito de tamanho da partícula e sobre a concentração de carvão na viscosidade da mistura; também testes de campo em equipamentos típicos para queima de óleo. Três testes, num total de 388 horas de operação, foram dirigidos em uma caldeira aquo-tubular de 151 HP (\sim 330kg/h de vapor), com misturas de 40% de concentração. Não foram relatadas dificuldades na queima da mistura por queimadores com atomização por vapor. Perdas devidas à combustão incompleta verificadas na cinza volante foram estimadas entre 0,4 e 0,8%.

Também, no KANSAS STATE COLLEGE OF AGRICULTURE, entre 1938 e 1944, realizaram-se testes bastante abrangentes, cobrindo moagem, misturação, fluxo da mistura em tubulação, estabilidade da dispersão em estoque, combustão e economia.

Dos testes de combustão realizados em duas caldeiras de 35.000 lb/h (~ 16 ton/h) de vapor e de 300 HP (~ 660 kg/h de vapor), com mistura de 40% de concentração, concluiu-se que a combustão da mistura era igual ou melhor que a obtida com óleo combustível.

Mais recentemente, devido à "crise do petróleo", a técnica voltou a ser testada. A GENERAL MOTORS CORP., com o suporte de outras organizações interessadas, iniciou um programa de testes em 1973 e conduziu um teste de combustão de 80 horas, com mistura de 30% de concentração numa caldeira de 30.000 lb/h (~ 14 ton/h) de vapor. Os testes de combustão foram encorajadores, embora fossem registrados problemas com o manuseio da mistura.

O prolongamento da "crise" e o provável agravamento da falta de petróleo no mercado mundial, bem como os repetidos sucessos nos testes de mistura óleo-carvão como combustível substitutivo, estimularam que esta tentativa de solução fosse estudada pelos meios técnico-científicos através do mundo. Assim, em maio de 1978, foi realizado nos EUA o PRIMEIRO SIMPÓSIO INTERNACIONAL NA COMBUSTÃO DE MISTURA ÓLEO-CARVÃO, patrocinado pelo DEPARTAMENTO DE ENERGIA americano através do PITTISBURG ENERGY TECHNOLOGY CENTER.

Logo, seguiram-se mais dois simpósios: em novembro de 1979 e em abril de 1981. Neste último, AUSTRÁLIA, CANADÁ, CHINA, FRANÇA, ITÁLIA, JAPÃO, SUÉCIA, ALEMANHA OCIDENTAL e EUA apresentaram relatórios sobre seus respectivos programas nacionais de pesquisa em mistura óleo-carvão.

Talvez o teste mais importante até hoje (apresenta-

do no III Simpósio) foi o relativo à transformação da caldeira a óleo de uma usina de 400 MW para a queima de mistura óleo-carvão. Foi realizado em SANFORD, FLÓRIDA, pela FLÓRIDA POWER AND LIGHT CORP., com início da operação em abril de 1980. Os resultados nesta caldeira de grande porte, foram auspiciosos, concluindo-se que "é tecnicamente praticável a queima de misturas óleo-carvão em gerador de vapor com as modificações apropriadas" [17].

O sucesso do "novo combustível" sugeriu o desenvolvimento do presente trabalho que se consubstancia em tentativa de estabelecer a viabilidade ou não do uso de mistura óleo-carvão, aproveitando-se carvões constituintes brasileiros, os quais se caracterizam pelos altos teores de voláteis e de cinzas e pelos baixos poderes caloríficos, em comparação com os carvões, de melhor qualidade, usados nos testes antes mencionados.

Considera-se que a proposta deste trabalho está perfeitamente encaixada na realidade energética nacional, pois os efeitos da crise do petróleo se fazem sentir, no Brasil, de maneira acentuada. Várias instalações foram desativadas através do país, entre elas, valendo destacar, a Usina de SANTA CRUZ, RJ, com 400 MW. Da mesma forma, se necessita resposta tecnológica para a operação de inúmeras unidades menores, nas quais se vem apenas tentando improvisações tais como a queima de lenha ou o uso de energia elétrica (eletrotermia).

Para abordagem da questão proposta da viabilidade do uso dos carvões brasileiros em mistura com óleo combustível, desenvolveu-se o trabalho em duas partes, a seguir sum-

riamente descritas: a primeira constitui-se de um apanhado geral do "estado da arte" da solução, baseado principalmente no exame dos últimos simpósios internacionais, com ênfase especial sobre os aspectos que mais interessariam relativamente às peculiaridades dos carvões brasileiros. Isso para dar embasamento para se prognosticar qualitativamente a eventual conversão de uma caldeira para o uso de mistura composta de carvões brasileiros. Nesta primeira parte a exposição compreende:

a) Combustão: características físicas, em cujo tópico se estuda o modo pelo qual se processa a combustão da mistura, ressaltando-se as suas diferenças quando comparada com a combustão de óleo e de carvão pulverizado, isoladamente.

b) Manuseio da mistura, onde são apresentadas as características do manuseio da mistura principalmente quanto à sua estabilidade, face à tendência de sedimentação das partículas de carvão e os problemas relativos ao transporte da mistura em tubulações.

c) Mudanças no desempenho da caldeira, onde são analisadas principalmente as perdas de calor e as questões relativas à deposição de cinzas.

d) Modificações necessárias no equipamento, principalmente quanto à instalação e/ou troca de equipamentos auxiliares, tais como equipamentos para pulverização de carvão, para mistura de óleo e carvão e para bombeamento. Trata este tópico, igualmente, de modificações nos queimadores e da necessidade de equipamentos para remoção de cinzas.

A segunda parte do trabalho consubstancia uma tenta

tiva de análise quantitativa da solução, através do método desenvolvido usando as equações de combustão do sistema C/H/N/O e que permite prognosticar sobre o consumo que teria uma caldeira de 24.000 lb/h (\sim 11 ton/h) de vapor se usasse mistura óleo-carvão, com várias concentrações de carvão constituinte brasileiro encontrado no mercado. Estipulados os dados de consumo, faz-se considerações sobre a economia que pode ser conseguida com a substituição de óleo pela mistura óleo-carvão.

Em última análise, este trabalho não pretende mais que servir como subsídio inicial de estudo futuro sobre o uso de mistura óleo-carvão com carvões constituintes brasileiros, que deverá empreender uma experimentação prática, suficiente para demonstração completa das hipóteses levantadas.

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO

Por mistura óleo-carvão se entende o combustível formado com a mistura de óleo pesado e carvão pulverizado a 90% abaixo de 200 mesh (74 μ m). Normalmente, o óleo usado é o de nº 6, mas, em alguns experimentos foi usado o óleo nº 2, mais leve.

Uma instalação de geração de vapor usando mistura óleo-carvão como combustível é sempre resultado de conversão a partir de caldeiras originariamente projetadas para uso exclusivo de óleo ou, mais raramente, de carvão pulverizado. A queima da mistura se dá por meio de queimadores atomizadores, de forma semelhante a anterior queima isolada de óleo.

O funcionamento de uma instalação usando mistura óleo-carvão pode ser acompanhado, de maneira detalhada, no diagrama de fluxo de processos (FIG.1). Seguindo sumariamente o diagrama pode-se ver que o carvão é inicialmente pulverizado e armazenado em silo próprio; a seguir é misturado com óleo, no tanque misturador. A mistura, então, é armazenada em um tanque diário de depósito, do qual é conduzida até os queimadores da caldeira, onde se dá a combustão. Ao final as cinzas são retiradas e descartadas.

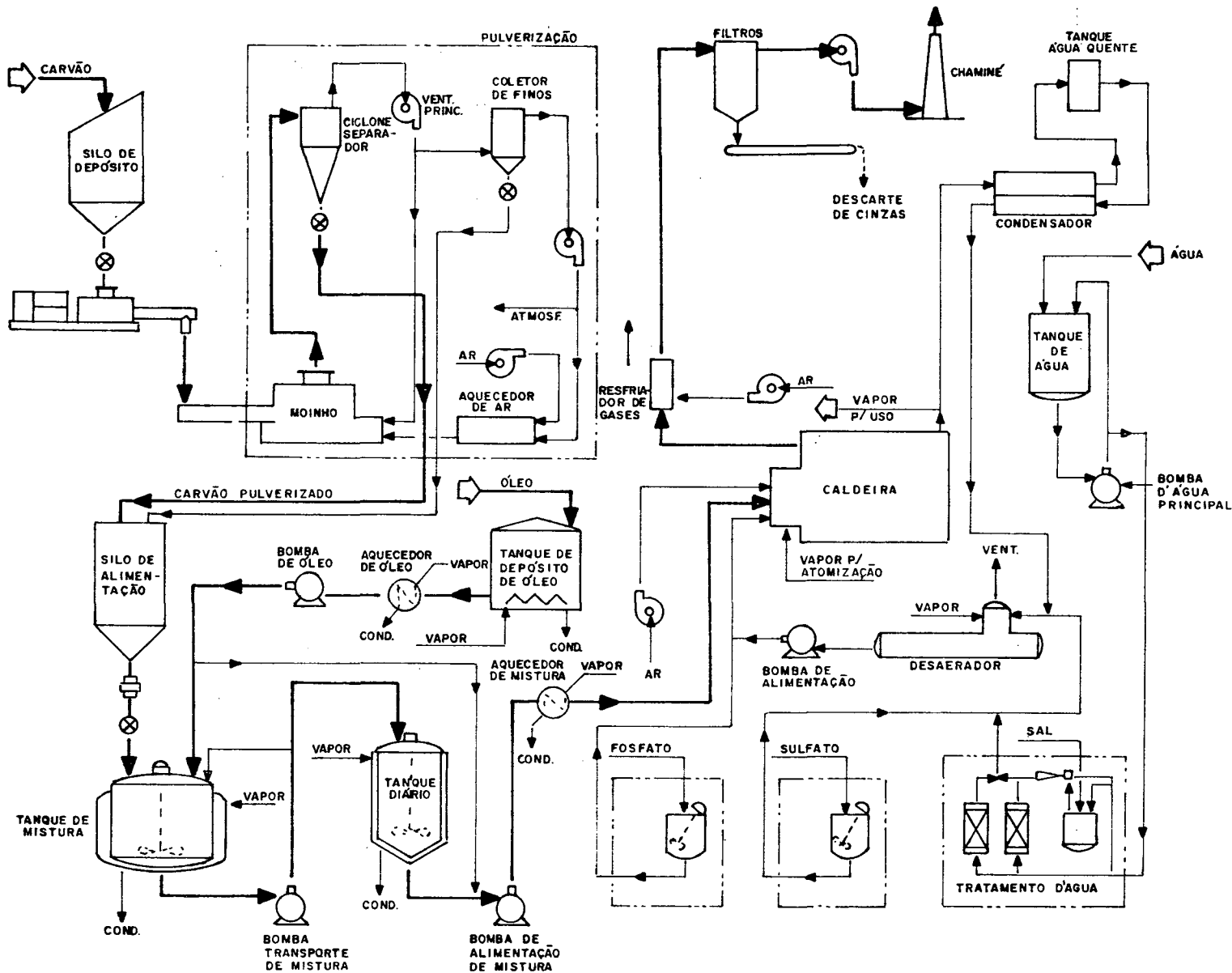


FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DE PROCESSOS DE UMA INSTALAÇÃO USANDO MISTURA ÓLEO - CARVÃO REF. (25)

CAPÍTULO II

COMBUSTÃO - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Tenta-se, através deste capítulo, apresentar uma sucinta idéia de como se processa a combustão da mistura óleo-carvão.

Quanto às características físicas da combustão, a mistura não funciona como simples justaposição de óleo e carvão separadamente. Quando o combustível é pulverizado para o interior da chama, a imediata combustão do óleo irá acelerar a ignição e a alta emissividade das partículas de carvão e fuligem será útil na queima completa da mistura. Isso pode ser constatado com as análises dos perfis de chama para cada constituinte isolado e, ao final, para a mistura. Analisando, primeiramente, a combustão de óleo pesado através de um perfil de queima típico (ver FIG.2)* tem-se as seguintes etapas:

a) redução do peso**, a partir de 100°C, com a decomposição, por vaporização, de matéria de baixo ponto de vaporização, seguida de súbita reação exotérmica nas proximidades de 300°C;

b) mudança, para uma reação endotérmica, continuando a decomposição até quase atingir 500°C;

c) redução do peso, com uma súbita reação exotérmica a cerca de 550°C.

* A Fig.2 foi derivada para mistura de óleo e carvão mineral, a partir do diagrama apresentado por LOPEZ [24] para mistura de óleo e carvão vegetal.

** Por redução de peso se entende a progressiva decomposição do estado original da massa de combustível pela combustão.

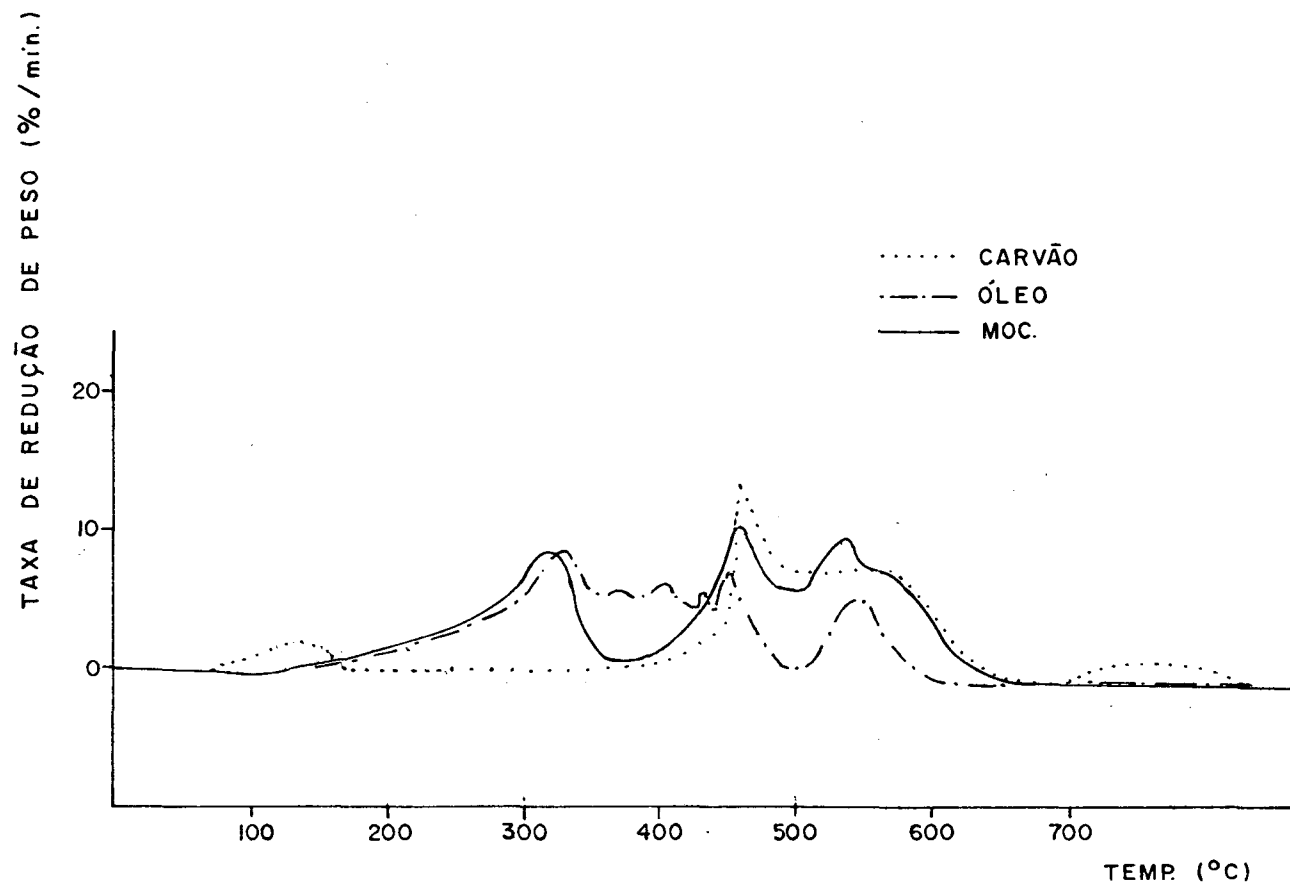


FIGURA 2 - PERFÍS DE CHAMA DE CARVÃO,
ÓLEO E MISTURA

Já o perfil de combustão isolada do carvão pulverizado se apresenta assim (ver FIG.2):

a) início da redução de peso, por vaporização e volatilização, anterior aos 100°C;

b) redução de peso, pela súbita reação exotérmica aos 470°C aproximadamente, prolongada por reação endotérmica de decomposição até os 600°C;

c) redução de peso, pela queima de carbono residual, na faixa de 600°C a 700°C, aproximadamente.

As fases do perfil de combustão da mistura óleo-carvão, por seu turno, se apresentarão normalmente na seguinte seqüência (FIG.2):

a) redução do peso, pela evaporação e decomposição de matéria de baixo ponto de vaporização, a partir de 100°C, seguida de súbita reação exotérmica, nas proximidades dos 300°C;

b) redução de peso, devido à decomposição endotérmica, na vizinhança dos 450°C;

c) redução de peso, devido à súbita reação exotérmica do carbono residual, a cerca de 550°C.

Nota-se que o perfil que ocorre no caso do carvão individualmente, entre 450° e 600°C, é repetido, de maneira mais rápida, para a mistura entre 500°e 600°C, o que indica que a combustão do óleo ocorre primeiramente e, só depois, a combustão do carvão.

Por sua vez a redução de peso, verificada entre 650° e 700°C, não ocorre no caso da mistura, o que significa que, com o calor, gerado inicialmente pela combustão do óleo, tem-se

uma queima mais rápida e sem carbono residual.

Nota-se também que a redução de peso, devida à evaporação de umidade e de voláteis, mesmo abaixo dos 100°C, para o carvão pulverizado, tende a não ocorrer quando da queima da mistura, pois a presença do óleo inibe essa fase, que só vai acontecer após os 100°C, quando voláteis e óleo são queimados juntos ou quase simultaneamente. Isso acontece porque, devido à evaporação, há um efeito de gaseificação sobre a partícula de carvão e um efeito de inchamento das gotículas de óleo*.

Além disso, a mistura óleo-carvão tem características de combustão que decorrem do tipo de carvão usado como constituinte, o que se passa a analisar.

ALBAF^[18] estabeleceu que os carvões de alta e média volaticidade apresentam combustão completa, enquanto os antracitosos apresentam dificuldades para finalizar a combustão. Esse fato é particularmente interessante para o caso dos carvões brasileiros. Os carvões antracitosos chegam a apresentar, na análise das cinzas das partículas de carvão, 75% em peso de carbono incombusto, com finais de chama mostrando faíscas nos gases de combustão da fornalha.

Embora o comprimento de chama, na combustão das misturas constituídas com carvões de médio e alto teor volátil, seja mais longo, uma combustão mais completa é atingida com esses carvões. No caso das misturas com carvões antracito-

* O estudo apresentado acima foi organizado a partir de informações contidas em [1], [3] e [24].

sos, muitas partículas deixam a chama ainda incombustas, dando a falsa aparência de uma chama mais curta.

Esse fenômeno pode ser constatado na figura 3, que mostra como se comportam os comprimentos de chama. Ainda, segundo ALABAF, tem-se que a emissividade de chama na combustão de mistura com carvão constituinte de alto teor volátil, medida com pirômetro ótico, é maior que a de outros tipos de mistura e que, mesmo as com média e baixa volatilidade são mais emissivas que a chama de óleo sozinho (FIG.4).

Analisando ainda a FIG.4, nota-se que as dispersões, com carvões mais voláteis, apresentam curvas mais agudas, que decaem rapidamente. Isso revela a rapidez com que se opera a combustão das misturas com carvões voláteis, o que não ocorre quando se usa carvão constituinte antracitoso.

LEGENDA

- BAIXA
 - MÉDIA
 - ALTA
 - ÓLEO COMBUSTÍVEL
- } VOLATILIDADE DO CARVÃO

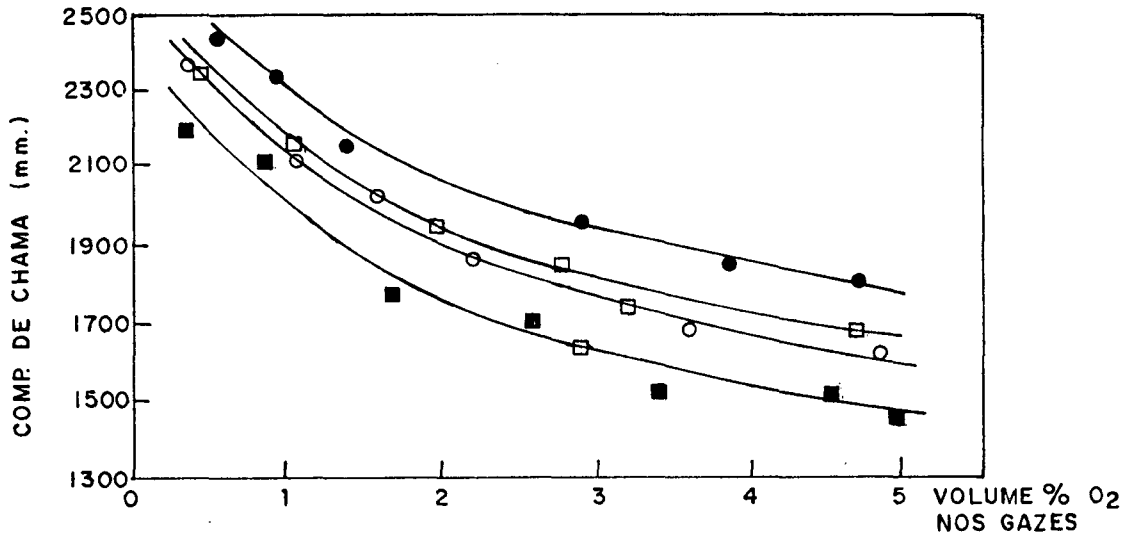


FIGURA 3 - VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE CHAMA COM EXCESSO DE OXIGÊNIO REF. (18)

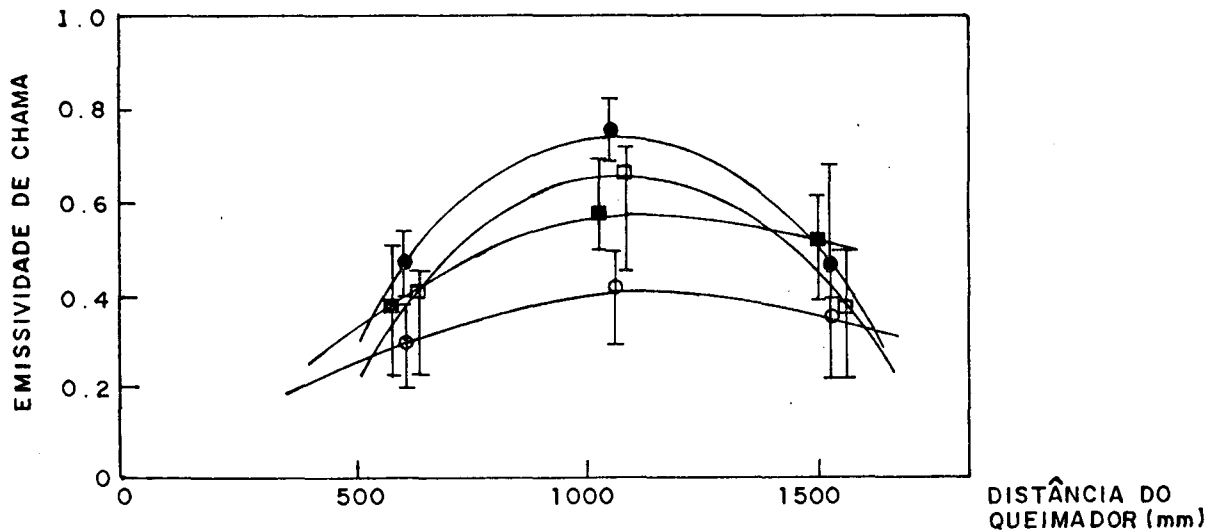


FIGURA 4 - VARIAÇÃO DA EMISSIVIDADE DE CHAMA COM A DISTÂNCIA AXIAL DO QUEIMADOR REF. (18)

CAPÍTULO III

CARACTERÍSTICAS DE MANUSEIO DA MISTURA

Quando se tem em consideração o manuseio da mistura óleo-carvão, o fator determinante é a sua temperatura de pré-aquecimento. Esta tem um efeito crítico no padrão de chama, pois o desempenho do queimador da caldeira depende, tanto de uma boa atomização, quanto da estabilidade da mistura, i.e., a temperatura ótima, para cada dispersão, deve ser tal que se obtenha uma boa atomização com um mínimo de sedimentação das partículas de carvão. Isso se dá porque uma temperatura mais alta diminui a viscosidade da mistura, melhorando as condições de transporte e a atomização no queimador, ao mesmo tempo que acarreta uma perda na capacidade de sustentação das partículas de carvão no óleo e, conseqüentemente, uma sedimentação mais rápida.

Pelas razões expostas, as três variáveis principais no manuseio - capacidade de bombeamento/transporte em tubulação, estabilidade e atomização, estão, basicamente, ligadas à viscosidade da mistura que, por sua vez, é controlada pela temperatura de pré-aquecimento. Seu ponto crítico deve ser determinado experimentalmente.

Dito isso, passa-se a considerar, separadamente, cada uma das aludidas variáveis.

III.1 - Viscosidade

A viscosidade da mistura dependerá, basicamente: da viscosidade do óleo constituinte, da concentração do carvão e do tipo de carvão constituinte.

III.1.1 - Influência do carvão

A viscosidade da mistura aumenta com uma concentração maior de carvão. Embora dispersões com até 30% de carvão apresentem um comportamento newtoniano^[15,20], ultrapassada esta concentração, a mistura apresenta um comportamento não-newtoniano (plástico e pseudo-plástico) e a viscosidade sobe acentuadamente. A FIG.5 mostra um exemplo típico*.

Além disso, o tipo de carvão constituinte também é fundamental, devido às diferenças de porosidade entre eles. O óleo pode penetrar nos poros e ser perdido, como lubrificante, entre as partículas. Por isso, misturas com carvões betuminosos apresentam viscosidade consideravelmente menor do que misturas com linhitos. Segundo REJEK^[14], pode-se afirmar que o óleo não penetra em poros com raio menor que 10^2Å , a temperatura de 80°C.

Por outro lado, como efeito secundário, as misturas com carvões mais voláteis apresentam viscosidade minorada, pois o sistema de duas fases carvão/óleo se transforma na tubulação, em um sistema de três fases carvão/óleo/gases. Este fenômeno de gaseificação cresce com o aumento da concentração do

* A FIG. 5 apresenta a viscosidade plástica das misturas, usando o modelo de Bingham eq. [3].

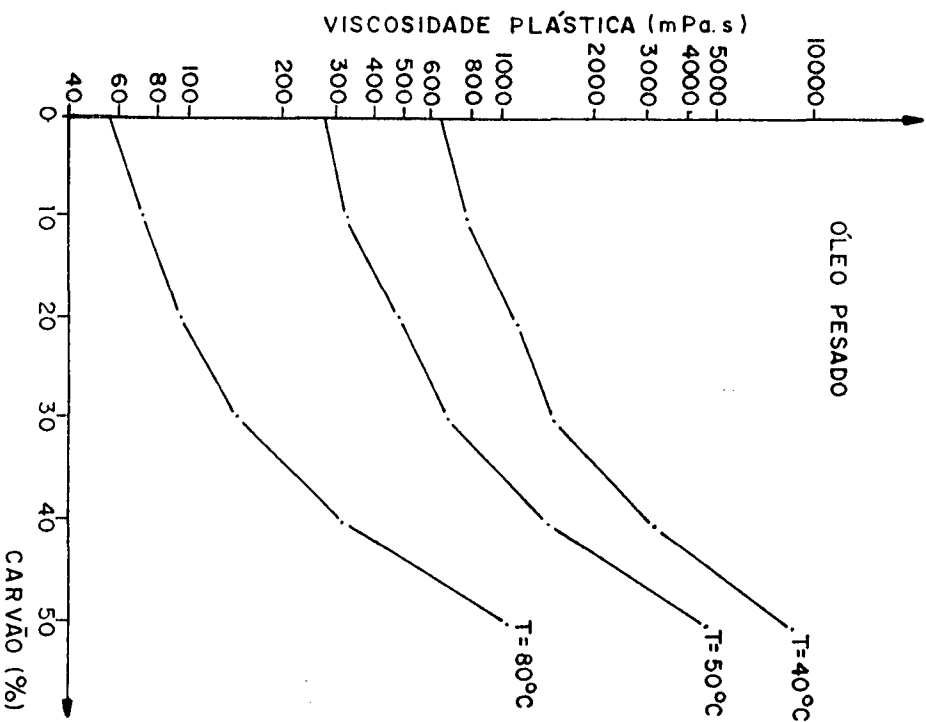
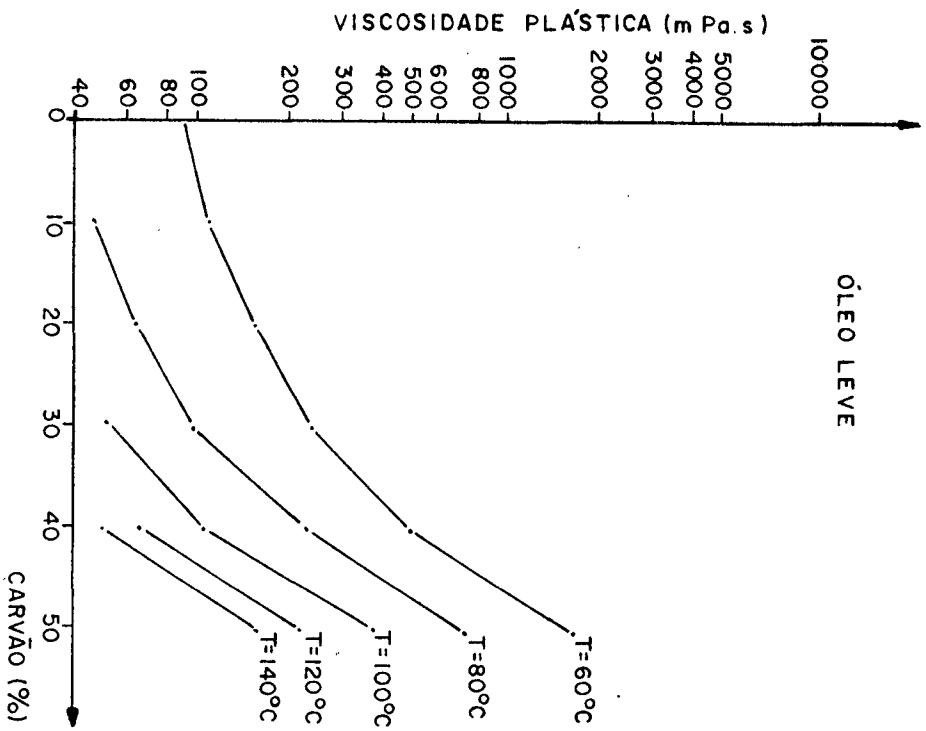


FIGURA 5 - INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE CARVÃO NA VISCOSIDADE PLÁSTICA DA MISTURA REF. (10)

carvão^[4].

Com respeito ao tamanho de grão da partícula de carvão constituinte pode-se dizer que, as misturas com carvão linhítico mostram pouca variação na viscosidade^[15,19], enquanto as misturas com carvão betuminoso são submetidas a uma variação significativa somente acima de 30% de concentração, quando a viscosidade aumenta com a diminuição dos grãos (FIG 6). Este efeito se explica porque, nas concentrações acima de 30%, a mistura com partículas finas tende a formar uma pasta, que apresentará viscosidade mais alta do que a da mistura com carvão de maior tamanho de grãos, uma vez que, essa última tende, ainda, a comportar-se como um fluído com partículas em suspensão.

III.1.2 - Influência do óleo

A viscosidade do óleo constituinte é fundamental para a determinação da viscosidade da mistura. Comparando-se uma mistura, com a mesma concentração e o mesmo tipo de carvão constituinte e óleos de diferentes viscosidades, constata-se que a viscosidade da mistura resulta diretamente proporcional à viscosidade do óleo constituinte (FIG.5).

O trabalho de PAPACHRISTODOULOU^[20] ensina que para várias misturas, i.e., carvões diferentes e mesmo óleo, as curvas viscosidade versus concentração versus temperatura, mostram respostas similares até 40% de carvão. Para além desse valor, ocorrem desvios: quanto mais pesado o óleo, mais rapidamente a viscosidade aumenta com a concentração. A dependência da viscosidade da mistura, com relação a temperatura, é descrita pela mesma correlação aplicada aos óleos, só que esse efeito é menos pronunciado e decresce com o aumento da concentração de carvão. Essa relação pode ser expressa por u-

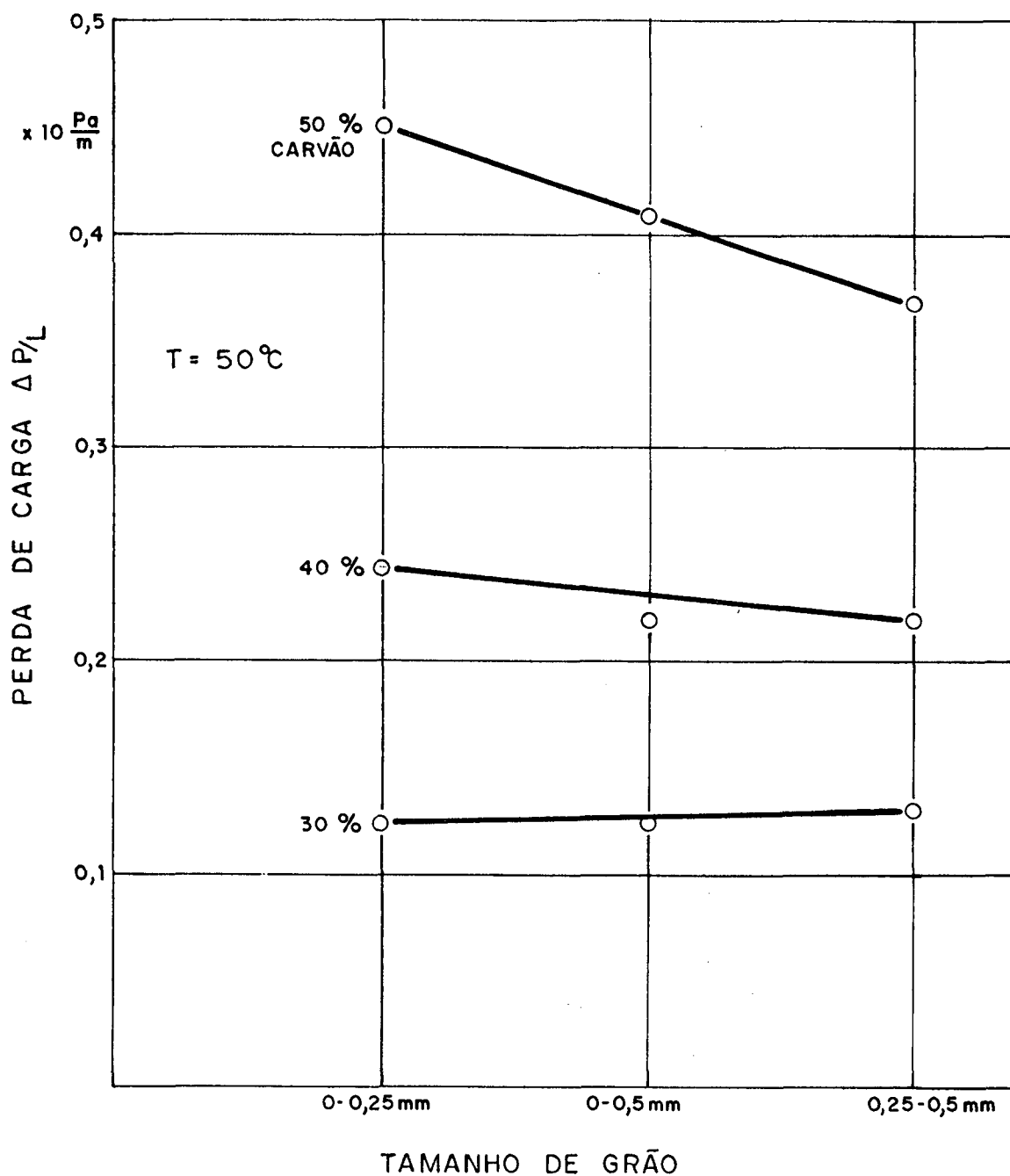


FIGURA 6 - EFEITO DO TAMANHO DE GRÃO NA VISCOSIDADE DA MISTURA REF. (14)

ma equação do tipo:

$$\log \log \eta = A - B \log T \quad * \quad (1)$$

GIRARDI^[10], por sua vez, apresenta a tabela 1, que mostra como os comportamentos da viscosidade das misturas se ajustam aos modelos:

- Newtoniano, fluido newtoniano

$$\zeta = \eta D \quad (2)$$

- Binghamiano, fluido plástico

$$\zeta = \zeta_0 + \eta D \quad (3)$$

- Ostwaldiano, fluido pseudoplástico

$$\zeta = KD^n \quad * \quad (4)$$

Nota-se que, embora à temperatura de 40°C, um grande intervalo seja coberto pelo modelo de Ostwald; acima dessa temperatura, a mistura pode ser considerada newtoniana até 40% de concentração. Já, para misturas de 50% de concentração, o comportamento é pseudo-plástico, a qualquer temperatura.

* onde: ζ é a tensão de cisalhamento
 η é a viscosidade plástica
 D é a taxa de cisalhamento
 K é a viscosidade aparente
 n é um índice de propriedades reológicas
 T é a temperatura

TABELA 1 - MODELOS DE AJUSTE APROPRIADOS PARA A VISCOSIDADE DE MISTURA Ref. [10]

Concentração % Carvão	0	10	20	30	40	50
T = 40°C	n	pp	pp	p	pp	pp
T = 50°C	n	n	n	n	n	pp
T = 60°C	n	n	n	n	n	pp
T = 80°C	n	n	n	n	n	pp
T = 100°C	n	n	n	n	n	pp
T = 120°C	n	n	n	n	n	pp
T = 140°C	n	n	n	n	n	pp

n = newtoniano; pp = pseudoplástico; p = plástico.

III.2 - Transporte e bombeamento

Naturalmente as características de transporte em tubulação e bombeamento da mistura óleo-carvão estão subordinadas aos mesmos parâmetros que regem sua viscosidade.

Assim sendo, WALL^[12] apresenta a seguinte fórmula para perda de carga em tubulação, que nada mais é do que a equação de Newton para fluxo laminar, devidamente modificada para levar em conta as características plásticas do fluido:

$$\Delta P = 4LK \left[\frac{8Q(3n + 1)}{n \pi d^3} \right]^n \quad (5)$$

Mas, até 30% de concentração na mistura pode-se usar a equação newtoniana simples:

$$\Delta P = \frac{4L \eta}{d} \frac{32 Q}{\pi d^3} \quad * \quad (6)$$

Conforme já se salientou através das fórmulas acima, a viscosidade baixa com a elevação da temperatura da mistura, portanto, para se ter seu transporte facilitado, a mistura deve ser pré-aquecida. Flutuações de temperatura, a baixas temperaturas e altas concentrações, na planta de bombeamento levam a mudanças significativas na capacidade de fluxo [15]. Portanto, temperaturas de 80°C a 95°C são recomendadas para o pré-aquecimento de operação. A recomendação é subscrita por vários autores, indistintamente, de concentrações e tipos de constituintes [15,3,12,14].

Quando a tubulação é aquecida e, portanto, o fluxo não é isotérmico, a perda de carga diminui, devido ao decréscimo da viscosidade na camada laminar adjacente à parede do tubo. A FIG.7 mostra, de maneira adimensional, esse comportamento.

* onde K é a viscosidade aparente
 n é um índice de propriedades reológicas
 L é o comprimento
 Q é a vazão
 d é o diâmetro

LEGENDA:

x ÓLEO PESADO

● M.O.C. 47,5 %

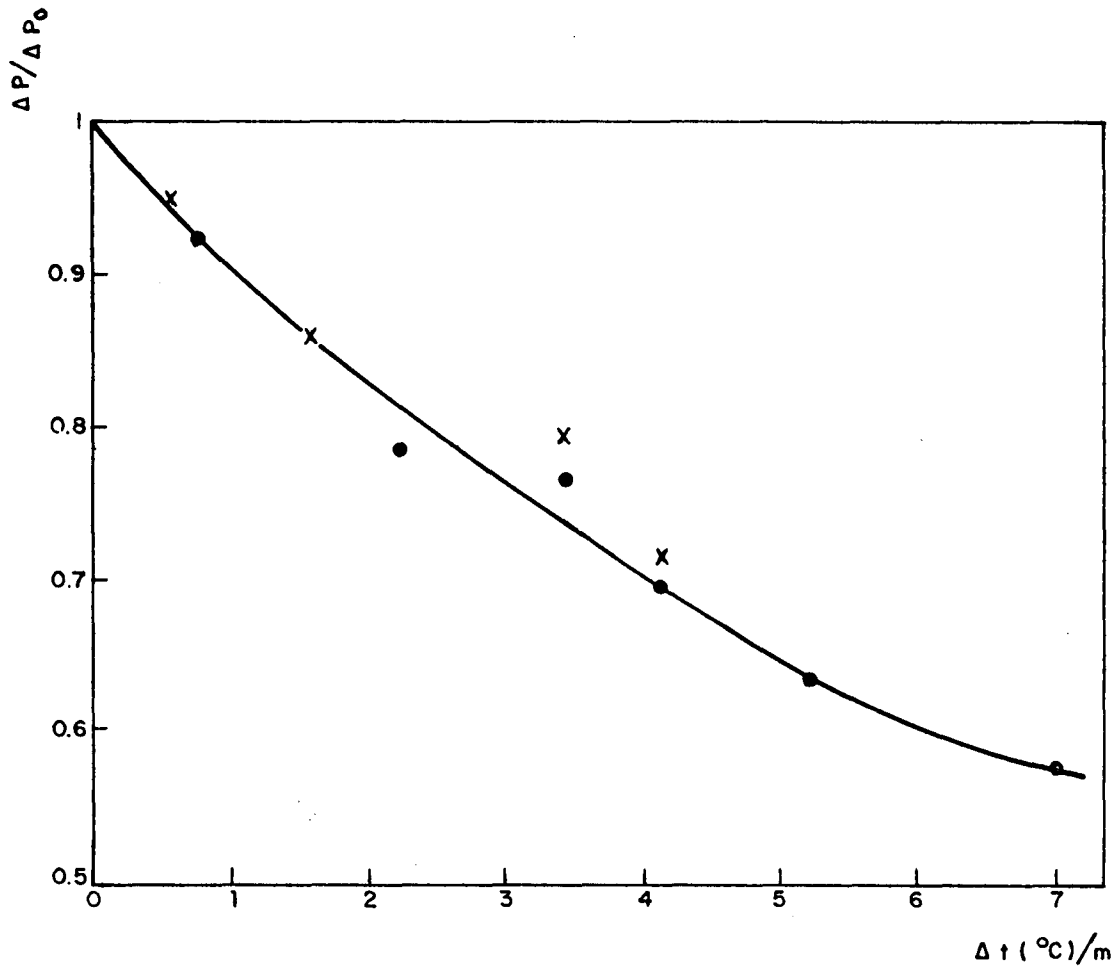


FIGURA 7 - EFEITO DO DIFERENCIAL DA TEMPERATURA DE AQUECIMENTO NA TAXA DE PERDA DE CARGA REF. (15)

Experimentalmente, KE-FACEN^[15] constatou que, mesmo a um comprimento de $210 \times d$, o gradiente de temperatura ao longo do raio do tubo continua pronunciado, enquanto o perfil de velocidades se mostra achatado.

Sabe-se, ainda, que dispersões contendo carvão de maior volaticidade requerem menor pré-aquecimento do que para misturas não-voláteis, o que se deve ao fenômeno da gaseificação já explicado anteriormente.

III.3 - Sedimentação e estabilidade da mistura

Embora se aconselhe o uso de mistura óleo-carvão, logo após, e, se possível, concomitantemente a sua preparação, a dispersão resultante deve apresentar um mínimo indispensável de estabilidade, pois uma dispersão instável pode ocasionar sedimentação, não só no tanque de depósito, como na pró-

pria tubulação, o que resultaria obviamente em um pobre padrão de chama.

KNELL^[19] afirma que a estabilidade da mistura aumenta com:

- o aumento de concentração de carvão;
- o aumento da viscosidade do óleo constituinte;
- a diminuição da granulação do carvão;
- a adição de pequena quantidade de água e aditivos surfactantes dispersantes.

Diz KNELL, ainda, que o efeito do tipo de carvão é imprevisível.

Quanto ao tamanho dos grãos de carvão, EKMANN^[21] determina que, abaixo de 10 μm , não se consegue maiores aprimoramentos quanto a estabilidade.

Vale notar que todas essas conclusões estão ligadas a fatores que levam a uma maior viscosidade na mistura, pois até mesmo a adição de uma pequena quantidade de água (até 3%) na mistura, causa sua maior viscosidade.

Quanto aos aditivos, não é proveitoso o aprofundamento no seu estudo, pois o número de trabalhos experimentais encontrados é tão grande e tão variado que não permite conclusão generalizante. A propósito já foi suficiente informar, acima, o tipo de surfactante indicado na maioria desses trabalhos.

KE-FACEN^[15], por sua vez, acrescenta as seguintes conclusões:

- o número de Reynolds de sedimentação para partículas de carvão na mistura é $Re \ll 1$, portanto, a força de inér-

cia da partícula pode ser desprezada e a Lei de Stokes se aplica; esta consideração, parece, não está totalmente correta pois dependendo do tipo de aglomeração das partículas, as forças de interação entre elas podem alterar o resultado, conforme se verá adiante;

- quanto maior a concentração de carvão maior a interação entre as partículas e mais vagarosa a sedimentação (conclusão também de [19]);

- quando o diâmetro médio das partículas de carvão dobra, a velocidade de sedimentação aumenta 3 a 4 vezes, para distribuições uniformes, e, 2 vezes, para distribuições dispersas.

Com relação a produção da mistura, o processo em que se moe o carvão já parcialmente misturado com óleo, para posterior complemento da mistura, apresentou resultados bem mais satisfatórios quanto à sedimentação que a simples mistura de carvão pulverizado e óleo. Existem ainda outros processos de mistura, tais como o da agitação ultrassônica e processos fluido-dinâmicos, que são bastante mais caros e só se justificariam quando o armazenamento é necessário. Entretanto, volta-se a salientar que, embora com características inferiores quanto à sedimentação, o processo de simples mistura mecânica é perfeitamente utilizável, para quando a mistura for usada imediatamente, sendo que na maioria dos casos essa prática acontece e é recomendável.

III.4 - Tipos de agregação

VIOLA^[23] apresenta um interessante estudo, que deve ser salientado, sobre os estados de agregação das partículas de carvão nas dispersões de óleo e carvão. Para ele, a propriedade chave que determina o tipo de mistura e define suas propriedades é o estado de agregação das partículas de carvão dispersas no óleo.

Existem três possibilidades diferentes, a saber:

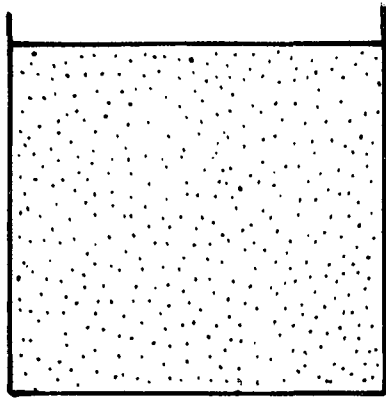
a) as partículas não tendem a aderir umas às outras, assim ficam perfeitamente dispersas no óleo (FIG.8.a);

b) as partículas interagem fracamente e formam flocos (FIG.8.b);

c) as partículas interagem fortemente e coagulam (FIG.8.c). Esses três estados de agregação conduzem a três tipos de suspensão, mostrados esquematicamente nas figuras 9 a,b,c, que são descritas a seguir.

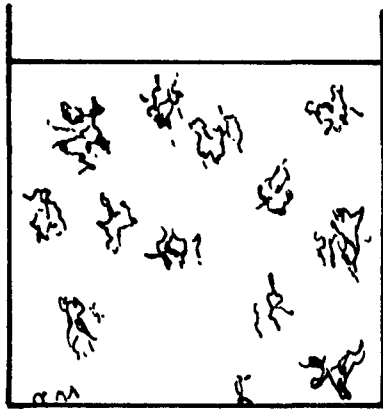
III.4.1 - Suspensões agregativas estáveis

As partículas sedimentam-se por gravidade; somente os finos coloidais permanecem em suspensão como resultado do movimento brauniano. A sedimentação ocorrerá em regime de classificação, isto é, as partículas se estratificam quanto ao tamanho, com partículas maiores ao fundo e finas acima. Além disso, devido ao fato de as partículas não aderirem, elas podem rolar umas sobre as outras e formar um sedimento bastante



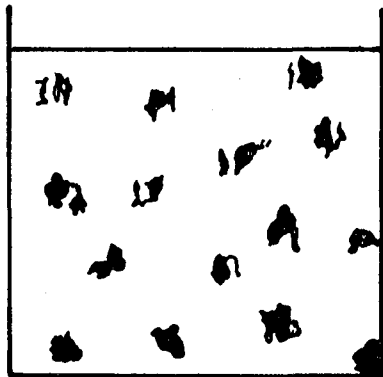
(A)

ESTADO AGREGATIVO
ESTÁVEL



(B)

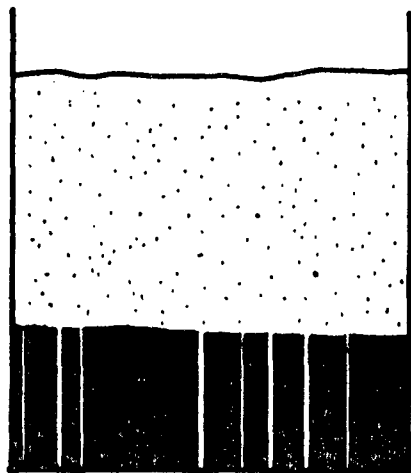
ESTADO FLOCULADO



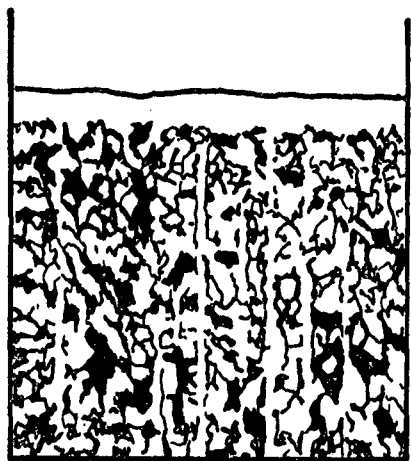
(C)

ESTADO COAGULADO

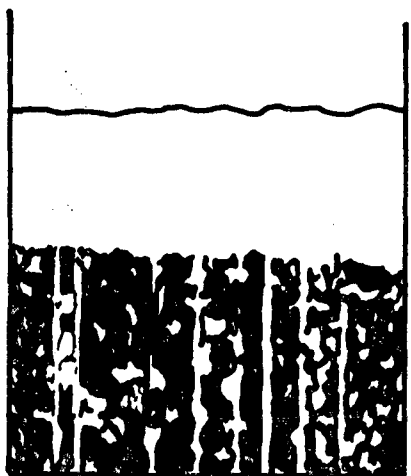
FIGURA 8 - ESTADOS DE AGREGAÇÃO ENTRE PARTÍCULAS
NA MISTURA ÓLEO - CARVÃO REF. (23)



(A)
SUSPENSÃO AGREGATIVA
ESTÁVEL



(B)
SUSPENSÃO
FLOCULADA



(C)
SUSPENSÃO
COAGULADA

FIGURA 9 - TIPOS DE SUSPENSÃO PARA MISTURA
ÓLEO - CARVÃO

REF. (23)

compacto. Embora as dispersões deste tipo de baixa concentração apresentem comportamento newtoniano, qualquer concentração maior será não-newtoniana e, portanto, sedimentos deste tipo são extremamente indesejáveis para uso normal.

III.4.2 - Suspensões floculadas

Suspensões de flocos dispersos sedimentam muito vagorosamente, até mesmo em baixas concentrações, devido ao arraste adicional causado pela estrutura aberta do floco. O sedimento formado pelos flocos é bastante disperso, assim ocupando uma porção relativamente grande do volume original da mistura. O líquido se mantém entre os interstícios da rede de flocos e, como resultado, as suspensões deste tipo são na maioria das vezes estáveis quanto à sedimentação. Estas suspensões apresentam comportamento não-newtoniano (a temperaturas baixas).

III.4.3 - Suspensões coaguladas

O coágulo que se forma, como resultado de interações partícula/partícula, deposita-se muito rapidamente devido ao seu tamanho e estrutura compacta. Entretanto, uma vez que os próprios coágulos interagem entre si, o sedimento apresenta alguma porosidade. Dispersões desse tipo são não-newtonianas.

Resumindo, pode-se dizer que as suspensões do tipo floculadas apresentam as melhores características para uso como misturas óleo-carvão.

CAPÍTULO IV

MUDANÇAS NO DESEMPENHO DA CALDEIRA NA QUEIMA DE MISTURA ÓLEO-CARVÃO

Quando se troca o combustível de uma caldeira, originariamente projetada para consumo de óleo, para uso de mistura óleo-carvão, acontecem algumas mudanças qualitativas na sua operação, especialmente quanto:

- à absorção de calor no interior da caldeira;
- à deposição de cinzas;
- à atomização da mistura;
- à emissão de óxidos de nitrogênio e de enxofre.

Essas mudanças de desempenho serão tratadas, uma a uma, nas seções deste capítulo. Por último, se analisará suas conseqüências no rendimento da caldeira.

IV.1 - Absorção de calor

Na queima de mistura óleo-carvão, verifica-se variação na distribuição espacial da absorção de calor no interior da caldeira. Essa variação decorre de dois fatores fundamentais: a diferença de emissividade das chamas de mistura e do óleo (FIG.3) e o maior coeficiente de excesso de ar necessário à queima de mistura óleo-carvão (FIG.10).

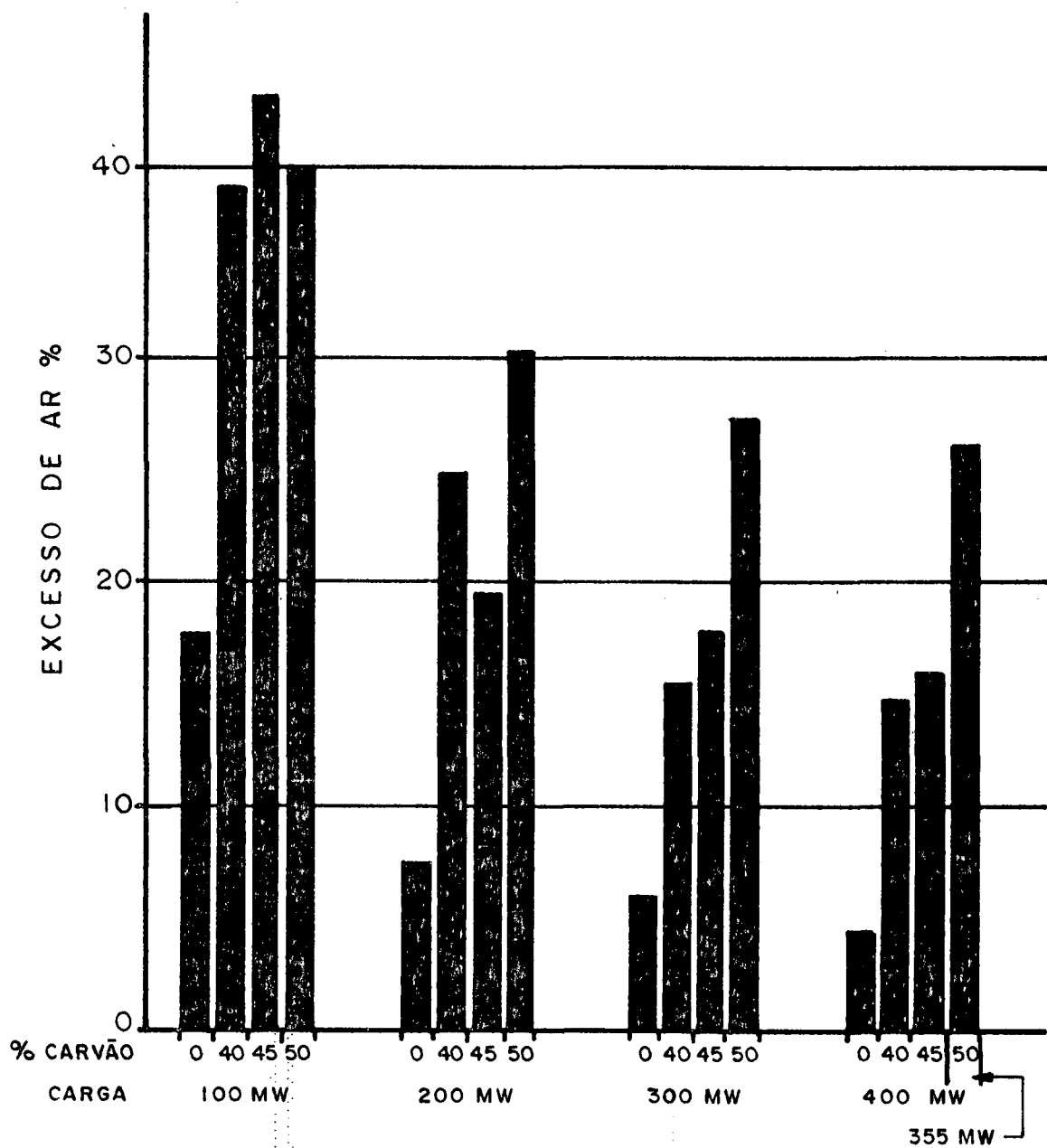


FIGURA 10 - VARIACÃO DA TAXA DE EXCESSO DE AR PARA COMBUSTÃO DE MISTURA ÓLEO E CARVÃO EM USINA DE 400MW OPERANDO A VÁRIAS CARGAS REF. (17)

O excesso de ar, objetivando a combustão completa, aumenta com a concentração de carvão na mistura. Deve-se cuidar para que a capacidade dos ventiladores não seja ultrapassada na caldeira quando usando misturas de altas concentrações e à plena carga.

O maior volume de ar na combustão causa uma queda (4 a 6%) na absorção de calor nas paredes d'água da fornalha. Entretanto, por sua vez, a maior emissividade de chama do carvão conduz a uma maior temperatura dos gases de combustão (Tabela 2), que, aliada ao seu maior volume devido ao excesso de ar, produz uma maior absorção de calor nos superaquecedores e no economizador. Em razão disso, temos uma temperatura maior no vapor dos superaquecedores, o que compensa em parte a perda de absorção de calor nas paredes d'água. Isso se dá até certo nível de temperatura, que, se ultrapassado, pode ocasionar o inchamento dos tubos, implicando a existência, na caldeira convertida, de um controle adequado para temperatura do vapor superaquecido.

TABELA 2 - TEMPERATURA DOS GASES DE COMBUSTÃO PARA CALDEIRA A ÓLEO E CARVÃO Ref.[1]

	PODER CALORÍFICO [Kcal/kg]	TEMPERATURA TEÓRICA DE COMBUSTÃO [°C]	TEMP. DE SAÍDA DA ZONA DE COMBUSTÃO [°C]	TEMP. NA SAÍDA DA FORNALHA [°C]
Carvão betuminoso	7100	2290	1265	1160
Óleo pesado	9600	2330	1100	1030

De acordo com os dados de operação de SLEPOW^[17], para a caldeira da usina de SANFORD, EUA, à carga parcial de 300 MW, é válida a tabela 3, que mostra em que medida se dão as modificações na absorção de calor por elemento da caldeira. Nota-se que a diminuição da absorção de calor na fornalha, quando da queima de mistura, é contrabalançada nos superaquecedores e no economizador, em consequência do maior volume e da temperatura mais elevada dos gases de combustão.

TABELA 3 - ABSORÇÃO ESPACIAL EM CALDEIRA DE USINA DE 400 MW
CONSUMINDO ÓLEO OU MISTURA ÓLEO-CARVÃO
Ref. [17]

ABSORÇÃO DE CALOR [%]	ÓLEO	MIST.40%	MIST.50%
Fornalha	47,4	43,9	43,1
Superaquecedor primário	12,1	14,3	17,2
Superaquecedores secundários	19,4	19,9	17,3
Economizador	5,1	5,4	6,5
Rendimento total	89,8	88,9	88,3

Sabe-se ainda, embora não tenha se encontrado na bibliografia nenhum estudo mais aprofundado da questão, que a presença de sólidos na chama da mistura também contribui para compensar a perda de absorção de calor na parede d'água, devido ao aumento no coeficiente de troca térmica da chama. Em caldeiras de pequeno e médio porte, que não contam com economizadores e superaquecedores, este foi o fator fundamental, aliado à maior emissividade de chama, para que o rendimento da caldeira se conservasse quase inalterado.

IV.2 - Atomização da mistura nos queimadores

Uma das primeiras preocupações, quando se cogita da combustão de mistura óleo-carvão em queimadores originariamente projetados para óleo é a estabilidade de chama, a qual depende fundamentalmente de uma boa atomização da mistura. Um padrão de chama pobre pode causar incrustação e vitrificação da escória da cinza no queimador, o que afetaria profundamente a atomização, num círculo vicioso até a inevitável parada da operação. Poderia também sobre-aquecer a injeção de combustível, resultando disso o entupimento do injetor, devido à precipitação das partículas de carvão no óleo. Uma chama imperfeita, com excesso de ar insuficiente, ao atingir as paredes da caldeira, resultaria na incrustação de escória de cinzas nos tubos d'água. Desse fenômeno decorreria redução da transmissão de calor e aumento da emissão de monóxido de carbono. Isso é provável de ocorrer dado que a chama de mistura

é mais longa do que a correspondente de óleo na mesma caldeira, dependendo do teor de voláteis do carvão constituinte, conforme já foi exposto.

Portanto, o ajuste da temperatura de pré-aquecimento da mistura, a boa atomização e o posicionamento do injetor (para um padrão ótimo de chama) são fundamentais para boa queima de mistura óleo-carvão numa caldeira projetada para uso de óleo.

Felizmente, em todos os trabalhos consultados foram conseguidos padrões de chama satisfatórios e tão estáveis quanto à chama correspondente na queima de óleo^[3,17,18].

A boa condição de atomização da mistura pode ser creditada ao fato de que as partículas de carvão contribuem para a fissão do jato de óleo, devido a sua força de inércia^[3]. Com isso acabamos por ter uma atomização da mistura a té mesmo superior à atomização do óleo separadamente.

Na maioria dos casos, um bom padrão de chama pode ser conseguido, sem maiores inconvenientes, através do ajuste adequado dos queimadores. A propósito, pode-se dizer que o pré-aquecimento da mistura (para diminuição de sua viscosidade e resultando melhor condição de bombeamento) apresenta uma temperatura crítica quando da passagem no queimador. Isso acontece porque uma temperatura alta, em ponto anterior a atomização, pode causar a precipitação das partículas de carvão, com a conseqüente desomogenização da mistura e prejuízo da chama. A temperatura e a pressão ótimas, para cada mistura, deve ser determinada experimentalmente. Sabe-se que as misturas com carvão antracitoso requerem temperatura mais alta de pré-

aquecimento do que as constituídas por carvão volátil.

IV.3 - Deposição de cinzas

Embora a deposição de cinza seja também função do tipo de dispositivo que equipa a caldeira, algumas constatações básicas podem ser destacadas, no caso de se utilizar mistura óleo-carvão:

a) a emissão de cinzas é função do teor de cinza do carvão constituinte da mistura a ser queimada;

b) as cinzas tendem a se dividir aproximadamente em 20% de cinzas pesadas e 80% de cinza volante;

c) da cinza pesada, parte é depositada no fundo da caldeira e parte adere às paredes da câmara de combustão;

d) a parte depositada no fundo da caldeira tenderá a acumular até formar uma camada de equilíbrio, da qual não excede em virtude dos efeitos aerodinâmicos do fluxo dos gases na câmara de combustão [25];

e) a parte que adere às paredes da câmara varia, desde simples fuligem até severas incrustações vitrificadas. As incrustações leves ocorrem nas paredes d'água e podem ser retiradas com facilidade por sopradores de fuligem ou na limpeza periódica da caldeira. As incrustações vitrificadas se fixam nas paredes refratárias e causam grande dificuldade de retirada; sua formação se dá quando a temperatura de fusão das cinzas for menor que a temperatura de serviço das paredes. Portanto, caldeiras com grandes áreas não refrigeradas de re-

fratários e tubos d'água largamente espaçados não são recomendáveis à transformação para uso da mistura. Nesses casos, o uso de carvões de alta temperatura de fusão é o mais indicado^[12];

f) mistura constituída de carvões de baixa volatilidade (antracitosos) tendem a formar, até mesmo em superfícies refrigeradas uma cinza viscosa e firme, de difícil remoção, em consequência da combustão incompleta das partículas de carvão (Cap.II). A propósito, SLEPOW^[17] afirma: "Acredita-se que os depósitos de cinza pesada são basicamente resultado da combustão incompleta. A matéria mineral dos constituintes individuais do combustível ou a alta proporção de carvão na mistura não é causa de depósitos excessivos"; acrescentando que: "Testes de laboratório, nos depósitos espessos, são indicativos de combustão incompleta do material, precedente à deposição nas paredes da caldeira e da queima continuada dos depósitos já nas próprias paredes".

IV.4 - Emissões de NO_x e SO_x

As emissões de óxidos de nitrogênio e de enxofre aumentam na queima de mistura óleo-carvão, na razão média ponderada do que se teria entre as emissões na queima de óleo e de carvão pulverizado. As emissões NO_x são produzidas por duas fontes: (a) a fixação de nitrogênio no ar de combustão, que só ocorre em temperaturas elevadas; (b) do nitrogênio contido no próprio combustível. As emissões de SO_x dependem somente

do conteúdo de enxofre dos constituintes da mistura*.

Portanto, as precauções relativas à proteção ambiental devem levar em consideração o tipo de carvão constituinte da mistura que será queimada.

IV.5 - Rendimento da caldeira

Dois métodos convencionais podem ser usados para aferir o rendimento de uma caldeira usando qualquer combustível: o método "input-output" e o "heat losses" que constam do ASME POWER TEST CODES (1964). O método das perdas de calor é o preferido para testes de combustão de mistura óleo-carvão, pois não só calcula o rendimento da caldeira como também provê informação detalhada de cada perda de calor individual.

Tendo em conta o que foi apresentado neste capítulo, as considerações técnicas e suas implicações, pode-se dizer que, de uma maneira geral, os testes reportados na bibliografia apresentam resultados bastante satisfatórios quanto ao rendimento das caldeiras, quando usada mistura óleo-carvão. Este ficou pouco abaixo (0,7 a 1,5% para SLEPOW^[17]) do rendimento nas mesmas caldeiras, quando queimando somente óleo.

SLEPOW^[17] afirma que: "A diferença no rendimento da caldeira a óleo contra a que utiliza mistura óleo-carvão não representa qualquer limitação operacional significativa na u-

* Essas conclusões foram apresentadas em [3], [18] e [25].

nidade testada". Declaração semelhante é feita por PAN^[25].

A pequena queda no rendimento das caldeiras projetadas para óleo quando queimando mistura óleo-carvão é causada basicamente pelos seguintes fatores fundamentais:

- o aumento do excesso de ar que, por sua vez, aumenta o volume dos gases de combustão e, por conseguinte, aumenta as perdas de calor, pela saída dos gases;

- a menor eficiência de combustão, isto é, de conversão do carbono na queima de mistura óleo-carvão, a qual é função da respectiva concentração de carvão e do teor de cinzas do carvão constituinte.

Vale salientar que um maior excesso de ar melhora a conversão de carbono na combustão, ao mesmo tempo em que aumenta as perdas de calor pelos gases de combustão. Portanto, para cada caldeira, deve se encontrar o ponto crítico para o excesso de ar que gera o melhor rendimento possível.

CAPÍTULO V

MODIFICAÇÕES DE EQUIPAMENTOS PARA USO DE MISTURA ÓLEO-CARVÃO

Tendo-se presente o que foi apresentado nos capítulos anteriores, discorre-se, neste capítulo, sobre as modificações necessárias no equipamento, para uso satisfatório de mistura óleo-carvão em caldeiras originariamente projetadas para queima de óleo combustível.

As modificações são exigidas nos equipamentos de preparação de carvão, preparação da mistura, transporte da mistura, atomização da mistura (queimadores), controle de cinzas e instrumentação.

V.1 - Equipamentos de preparação de carvão

Este conjunto de equipamentos terá de ser todo ele anexado à instalação original, o que implica a parte mais significativa do investimento de transformação de uma caldeira para uso de mistura óleo-carvão.

O conjunto de equipamentos de preparação do carvão consta, basicamente, dos equipamentos comumente usados em qualquer unidade de pulverização e classificação, que é composta de:

- silo para armazenagem do carvão bruto,
- moinho para pulverização do carvão,
- silo para carvão pulverizado,
- separadores classificadores e ventiladores,
- válvulas rotativas de dosagem e seus motores.

(Ver figura 1)

Para caldeiras de médio e pequeno porte, pode-se simplificar esse conjunto ou eliminá-lo, caso seja possível receber o carvão já pulverizado e classificado da fonte fornecedora.

V.2 - Equipamentos para controle de cinza

Em decorrência da maior produção de cinza, que inevitavelmente se terá com a queima de mistura óleo-carvão em substituição ao óleo, faz-se necessário um equipamento para deposição das cinzas.

Deve-se, como princípio básico, aproveitar ao máximo os dispositivos já existentes na unidade para a deposição das cinzas de óleo. Naturalmente, mudanças e reaproveitamentos estão subordinados a disponibilidades de projeto; face à grande variedade das unidades que podem ser passíveis de transformação para o uso de mistura óleo-carvão, não se entrará em maiores detalhes a respeito dos equipamentos do conjunto de deposição de cinzas.

De maneira geral são necessárias mudanças no sistema de controle de cinzas pesadas e de cinzas volantes. Even-

tualmente, será necessária a colocação de sopradores de fuligem para limpeza das paredes da caldeira.

Para o controle de cinzas pesadas deve-se aproveitar as aberturas do fundo da caldeira originalmente projetadas para retirada de cinzas de óleo e limpezas periódicas. A cinza pesada deve ser precipitada por gravidade. Um sistema de deposição, com recipientes portáteis, deve ser projetado. Dificilmente será necessária modificação substancial do fundo da caldeira, salvo se as aberturas existentes forem muito pequenas para a retirada da quantidade de cinza gerada.

O descarte das cinzas volantes deve ser feito por um sistema de transporte pneumático, até um silo apropriado.

Eventualmente, se a legislação de controle de poluição do ar o exigir e, dependendo do porte da instalação, um precipitador eletrostático ou equipamento equivalente será necessário. Face à incerteza quanto à distribuição das cinzas e sua deposição dentro da unidade, deve-se proceder a testes preliminares de combustão, para se determinar a necessidade e lugar de colocação de sopradores de fuligem. Após esses testes, a caldeira deverá ser inspecionada para se determinar onde instalar os sopradores e os tipos a serem usados.

V.3 - Equipamentos para preparo da mistura

Com base no que foi discutido no capítulo terceiro, este tópico se cinge a considerações sobre os equipamentos para a simples mistura de óleo e carvão por agitação mecânica.

O sistema pode constituir-se de dois tanques: um de depósito e outro de mistura; ou de apenas um tanque, com ambas as funções. Ambos os tanques têm especificações semelhantes, apenas que o tanque de mistura conta com um agitador mais potente. Constam do tanque propriamente dito, fechado e cilíndrico vertical, dotado de pás estacionárias fixadas às paredes, para melhor turbilhonar a mistura, e de uma lâmina (tipo hélice), para agitação mecânica, a qual, normalmente, é acionada desde o tampo do tanque, por um motor elétrico.

SMITH^[9] ressalta que: "Os vários testes indicaram que o propulsor de três lâminas (tipo axial) resultou em menor consumo, para manter a dispersão adequada. Os propulsores do tipo turbina, de 2 e 6 lâminas, durante baixas rotações (100-300 rpm), sustentaram melhor a mistura que outros tipos de impulsor". O tanque deve ser isolado e contar com um sistema interno de aquecimento da mistura, preferivelmente a vapor, para que a mistura se mantenha em torno de 90°C.

V.4 - Equipamentos para transporte da mistura

Conforme se pode constatar pela Figura 1, o sistema de transporte de mistura consta de: uma bomba, para transporte entre o tanque de mistura e o tanque de depósito, uma bomba, para alimentação dos queimadores e a tubulação.

Ambas as bombas só podem ser de deslocamento positivo, devido à alta viscosidade do fluido. Podem ser dos tipos: bomba de lóbulos, bomba helicoidal ou bomba de cavidade pro-

gressiva. Eventualmente, se o queimador for de baixa pressão, pode-se usar bombas pneumáticas de diafragma.

As bombas de alimentação dos queimadores deverão ter dispositivo para controle de variação de velocidade, para que não sejam necessárias válvulas de controle de fluxo que sofreriam desgaste por abrasão. Adicionalmente, o controle de velocidade proporciona uma extensão na vida útil da própria bomba de alimentação, em virtude do uso de velocidades mais baixas, quando em menores demandas.

Todas as bombas devem ser especificadas para serviço abrasivo, com proteção especial para os selos do eixo. DUNN^[7] usou selos de cerâmica e lóbulos e carcaça endurecidos.

KASPRIK^[11] indica que a tubulação pode ser de aço carbono, conforme a norma ANSI B.31.1., "CODE FOR POWER PIPING", com velocidade limite de fluxo de 0,6 m/s para mínima perda de carga.

Toda a linha deverá ser aquecida por vapor ou eletrotermia para não sobrecarregar as bombas.

Acessos devem ser providenciados, para eventual limpeza e desentupimento da linha, onde for necessário.

V.5 - Atomizadores

Embora não se encontre na bibliografia consultada, um consenso quanto a um projeto específico para atomização de mistura óleo-carvão, face ao grande número de equipamentos

testados, pode-se estabelecer alguns parâmetros gerais. Deve-se optar, se possível, por manter o atomizador original, respeitadas as seguintes condições:

- O diâmetro das tubeiras deve ser aproximadamente dez vezes maior que o diâmetro da maior partícula de carvão na mistura. Com isso se evitará o problema de entupimento e velocidade muito grande de saída da mistura, o que previne um maior desgaste nas tubeiras e direcionadores.

- A atomização deve ser por meio fluido - vapor ou ar; nunca por meios mecânicos.

- Tubeiras cerâmicas não devem ser usadas, pois se esfarelam; tubeiras de aço inoxidável endurecido se mostraram satisfatórias quanto ao desgaste.

V.6 - Instrumentação

Na mudança do óleo para mistura óleo-carvão tornam-se necessárias as seguintes novas medições, com a instrumentação respectiva:

- do fluxo de mistura, na alimentação dos queimadores,

- do fluxo de saída do sistema de misturação,

- da densidade de mistura, na alimentação (opcional) e

- medição da viscosidade da mistura (opcional).

Segundo KASPRIK^[11]: "A mais importante consideração na especificação e na instalação de instrumentos, para ser

viço com mistura óleo-carvão é a da exigência de se usar mecanismos sem penetração na mistura, ou mesmo isolar o equipamento do fluxo". Nas tentativas para se atingir este objetivo observa-se a seguinte prática:

- instrumentos de pressão e diferenciais foram protegidos com diafragmas;

- o nível do tanque de mistura é medido por um transmissor de diferencial de pressão, com um diafragma de selagem estendido na parte alta, para juntar o nível do diafragma com a superfície do tanque de mistura;

- concentração do carvão na mistura é medida por aparelho de densidade nuclear no exterior da linha;

- o fluxo é medido por instrumentos ultrassônicos não intrusivos o qual é ideal para serviço com dispersões;

- viscosidade da mistura é medida por viscosímetro do tipo sonda, interiores à linha.

CAPÍTULO VI

VIABILIDADE DO USO DE MISTURA ÓLEO-CARVÃO COM CARVÕES BRASILEIROS - ESTUDO QUANTITATIVO

A decisão quanto à conversão ou não de uma caldeira para o uso de mistura óleo-carvão não pode ser tomada com base somente numa análise qualitativa da proposta, sendo indispensável também um prognóstico quantitativo a respeito do desempenho da caldeira com o novo combustível e da conseqüente economia gerada.

Esse prognóstico poderia ser obtido pela via experimental, entretanto um experimento dessa natureza envolve considerável investimento em equipamentos. Para contornar tal experimento e mesmo para se obter uma idéia mais exata quanto ao sucesso da conversão, é que se procurou desenvolver um modelo quantitativo.

VI.1 - Proposta do modelo

Para se montar um modelo quantitativo foi necessário o uso de dados experimentais já existentes, para que não houvesse necessidade de que o próprio modelo fosse experimentado.

O objetivo proposto para o modelo é o seguinte: par

tindo-se de dados experimentais já existentes da combustão em caldeira convertida de óleo para mistura óleo-carvão e, refazendo-se, a partir desses dados, as equações químicas de combustão, estabelecer correlações comuns, aplicáveis a outros equipamentos e outras misturas combustíveis constituídas com carvões diferentes. Por via das aludidas correlações procuradas, entende-se possível determinar o desempenho de caldeiras quando usando misturas com carvões brasileiros.

VI.2 - Procedimento

Resolveu-se, para tanto, utilizar o artigo Y. S. PAN^[25], o qual contém dados de operação de uma caldeira de 10.900 kg/h de vapor, suficientes para rearranjo das equações químicas de combustão (ver Tabela 4).

Assim, a partir dos dados de operação se estabeleceu as equações químicas de combustão do sistema C/H/N/O, as quais representam teoricamente as condições de combustão da mistura. Feito isso, verificou-se a correlação ou não entre várias variáveis básicas. O desenvolvimento do trabalho revelou uma correlação razoável (linha reta) entre a diferença de entalpia dos reagentes e produtos de combustão (DHC) e a razão entre a massa de combustível consumido e a massa de vapor gerado pela caldeira (MC/MV) (Ver FIG.12).

Vale salientar que a verificação de tal correlação se constitui em contribuição original deste trabalho. Sua maior vantagem reside em sua independência em relação ao com-

TABELA 4 - DADOS DE OPERAÇÃO EXPERIMENTAL, Y.S. PAN [25]

TESTE*	50% MOC	50% MOC	50% MOC	40% MOC	40% MOC	30% MOC	30% MOC	ÓLEO Nº 6			
EXPERIMENTO	CARV. LAVADO		V	VI	VII	VIII	IX	X	XI		
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Concent. Carvão (%)	49,0	48,5	49,0	54,3	40,5	40,0	40,5	29,0	29,9	0,0	0,0
Análise Elementar da Mistura (%)											
. Hidrogênio	7,9	8,0	8,3	7,8	8,9	8,7	8,8	9,4	9,3	10,8	11,0
. Carbono	80,0	80,7	80,4	78,9	79,9	81,6	82,7	82,8	82,8	37,3	86,7
. Nitrogênio	1,0	0,9	0,7	0,9	0,6	0,8	0,7	0,5	0,6	0,3	0,1
. Enxofre	1,3	1,3	1,2	1,4	1,1	1,1	1,0	1,0	0,9	0,8	0,7
. Oxigênio	5,4	4,6	3,9	4,1	4,5	3,5	2,2	2,6	2,6	0,8	1,4
. Cinza	4,5	4,5	5,6	7,0	5,0	4,4	4,6	3,7	3,9	0,0	0,0
Poder Calorífico (Kcal (kg)	8984	8969	8955	8687	9170	9352	9301	9538	9606	10296	10346
Excesso O ₂ (%)	3,01	2,40	2,99	2,35	3,33	2,75	2,40	2,76	2,39	3,00	2,43
Excesso Ar (%)	14,55	10,82	13,95	8,39	15,76	12,60	10,30	12,87	10,50	15,71	12,24
Vapor gerado (kg/h)	10687	10936	10641	10850	10691	10723	10795	10614	10954	10805	10664
Cons. Combust. (kg/h)	797	788	797	860	787	770	786	757	759	699	675
Temp. Combust. (°C)	131	129	133	132	103	110	108	101	101	101	97
Temp. Gases (°C)	276	279	291	292	270	277	289	276	274	277	274

* Todos os testes com caldeira à plena carga.

bustível consumido na caldeira (desde que o uso do novo combustível não acarrete mudanças cruciais nas características de operação), pois a diferença entálpica teórica DHC pode ser calculada para qualquer tipo de mistura, uma vez conhecidas as análises elementares dos seus componentes, escolhidas as concentrações de carvão na mistura, e simuladas as condições prováveis de operação.

Considerando-se que esta correlação deve se verificar para qualquer caldeira, embora, é claro, com inclinação e intersecção diferentes para cada uma, e que essa variação deve depender basicamente da capacidade da caldeira, ela foi utilizada para determinar o desempenho teórico que teria a mesma caldeira referido no artigo de Y.S. PAN quando queimando mistura formada com "carvão brasileiro".

Convém notar, ainda, que se poderia ampliar este modelo para caldeiras de diferentes capacidades. Isso seria possível, a partir dos dados de operação de caldeiras de várias capacidades, com os quais se determinaria a correlação $DHC \times MC/MV$ para cada uma delas. Assinale-se que, sendo certo que a correlação independe do combustível consumido, os dados em questão não precisariam ser, necessariamente, de operações com mistura óleo-carvão em caldeiras convertidas; podendo a variação de DHC exigida para determinação da correlação ser obtida de dados de operação com óleo mesmo, através de mudanças nas condições de operação e do tipo de óleo usado.

VI.3 - Descrição do modelo

VI.3.1 - Determinação da correlação DHC x MC/MV

Utilizando-se os dados do artigo de Y.S.PAN, obtidos na combustão de mistura e óleo em caldeira de 10.900 kg/h de vapor, nas equações de combustão do sistema C/H/O/N, determinou-se a diferença (DHC) entre as entalpias dos reagentes (HR) e produtos de combustão (HP) (ver apêndice II), que são definidas por: $DHC = HR - HP$

$$\text{com: } HR = [h_{\text{comb}} + (M_{O_2} \times h_{O_2}) + (M_{N_2} \times h_{N_2})]_{TR} \quad [\text{kJ}/100\text{g comb}] \quad (1)$$

$$HP = [M_{CO_2} \times h_{CO_2} + (M_{H_2O} \times h_{H_2O}) + (M_{N_2} \times h_{N_2}) + (M_{O_2} \times h_{O_2})]_{TP} \quad (2)^*$$

(ver apêndice I para exemplo numérico detalhado).

Conhecendo-se a massa de combustível consumido (MC) e a massa de vapor gerado (MV), para cada operação experimental (Tabela 4), determinou-se a razão entre MC e MV.

Essa primeira etapa do procedimento pode ser acom-

* onde: h é a entalpia do respectivo constituinte
 M é o número de moles do respectivo constituinte
 TR é a temperatura dos reagentes
 TP é a temperatura dos produtos.

Na eq. (2) não foram considerados os produtos de combustão: CO, SO_x, NO_x e hidrocarbonetos por serem insignificantes conforme os dados de operação em Y.S.PAN [25].

panhada no diagrama de funcionamento do modelo (FIG.11).

Quando confrontados DHC com MC/MV verificou-se a dependência entre as duas variáveis. O gráfico DHC x MC/MV é uma reta conforme mostra a FIG.12.

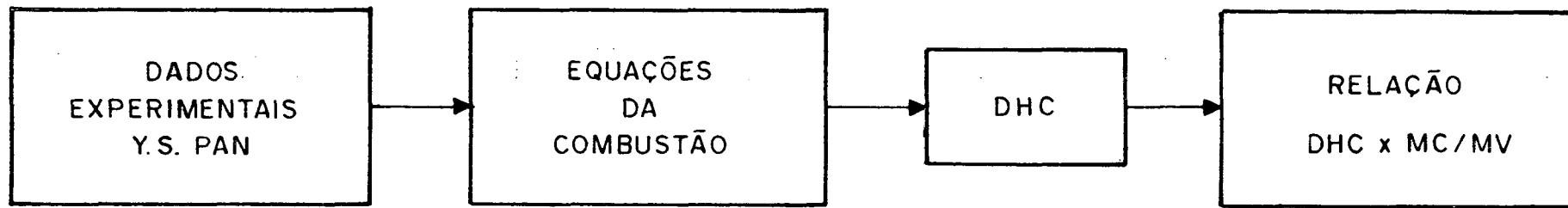
A existência de tal correlação com a sua característica de ser independente da mistura usada, isto é, de servir para qualquer constituição e concentração de mistura, torna possível o seu uso como "ponte" entre os dados de Y.S. PAN e os prognósticos para qualquer outro tipo de mistura em caldeira semelhante. Este procedimento é descrito a seguir. Antes, porém, é preciso salientar que a premissa básica para que a correlação DHC x MC/MV seja utilizada é que a queima de óleo e a de mistura óleo-carvão nesta caldeira, possuam características físicas semelhantes.

VI.3.2 - DHC para mistura com carvão brasileiro

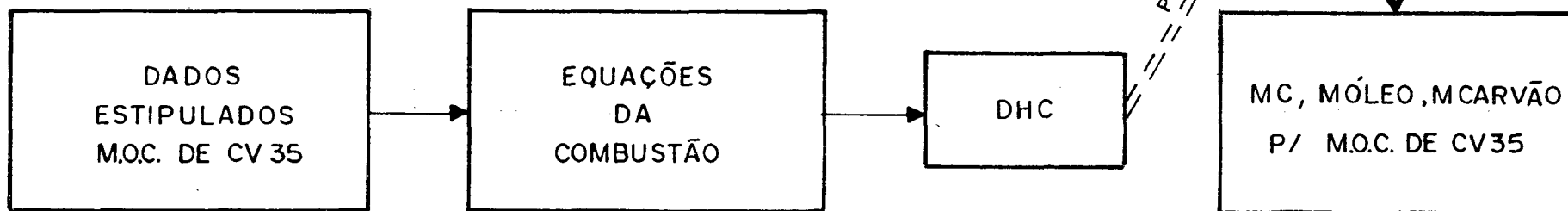
A seguir passa-se para a segunda etapa do modelo (ver FIG.11), determinamos através das equações de combustão o DHC para queima de mistura com carvão constituinte brasileiro* em várias concentrações (de 5 a 55% do carvão) (ver apêndice III).

* Foi usado o CV35 da COPELMI/RS, pois este é um carvão lavado, de uso comum e baixo custo e do tipo que possivelmente seria usado, na prática, no Brasil. As suas características básicas estão no apêndice IV. Já, o óleo foi considerado como tendo características iguais ao usado por Y.S.PAN^[25], para que as diferenças com a troca de carvão fossem totalmente evidenciadas.

ETAPA I



ETAPA II



DHC = HR - HP

FIGURA 11 - FLUXOGRAMA DO MODELO QUANTITATIVO

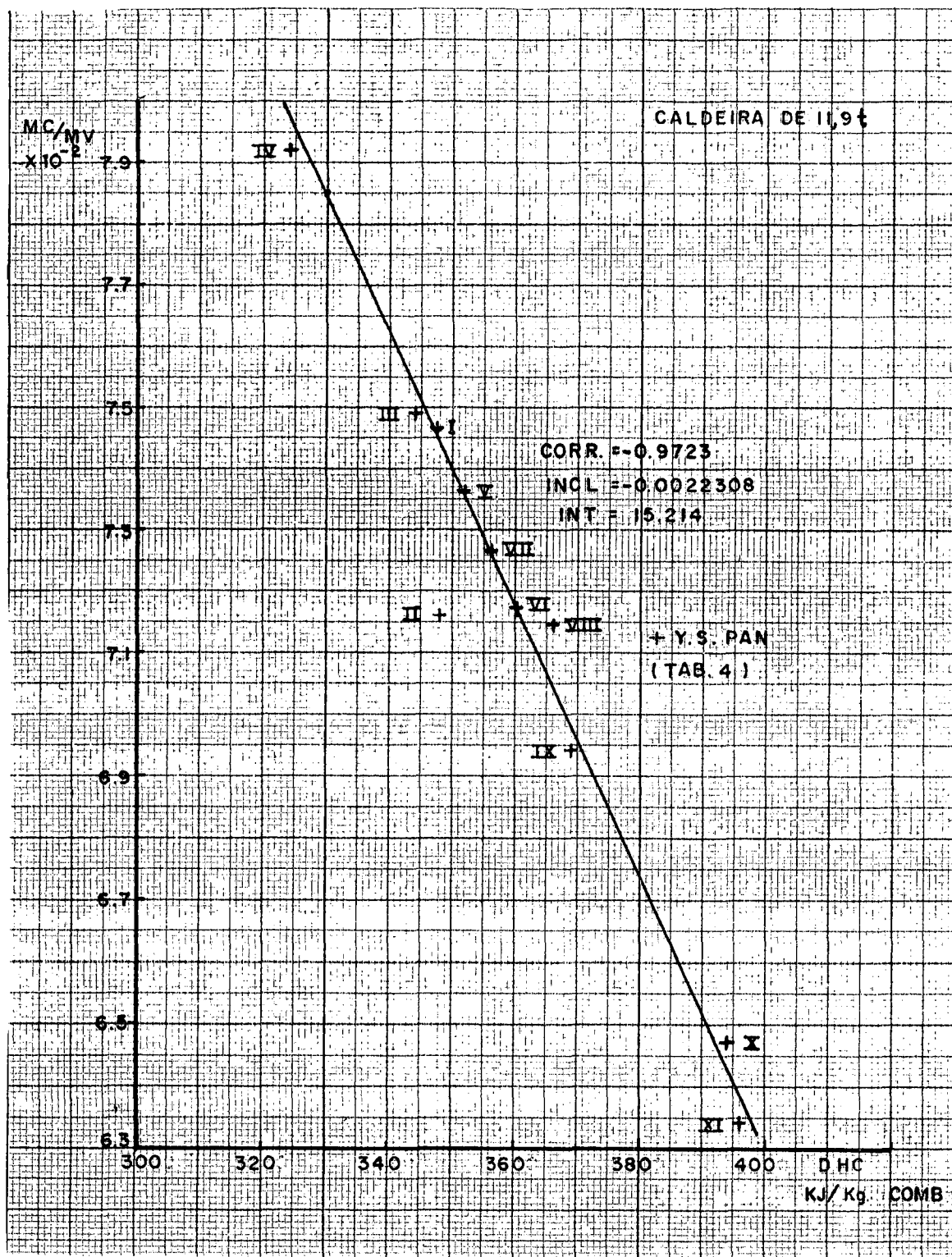


FIGURA 12 - VARIÇÃO DA TAXA ENTRE COMBUSTÍVEL USADO E VAPOR GERADO COM RELAÇÃO A DIFERENÇA ENTÁLPICA DO COMBUSTÍVEL.

Com o DHC para cada concentração entra-se no gráfico DHC x MC/MV (FIG.12), que, como já foi dito, é independente da mistura, i.e., tipos de carvão e óleo constituintes, e tem-se a razão MC/MV. Fixando-se a massa de vapor gerado MV no nível desejado (~ 10.900 kg/h de vapor para o presente caso), se terá, para cada concentração, a massa de combustível MC necessária para alcançar a geração de vapor no nível fixado. Conhecido MC, pode-se calcular as respectivas massas de óleo e de carvão a serem consumidas, para cada concentração, conforme mostra o gráfico (FIG.13).

Nota-se, pelo gráfico, que o consumo de combustível MC é representado por uma linha reta crescente de 0 a 50% de concentração de carvão, contudo, na medida em que MC cresce, cresce de maneira mais acentuada a concentração de carvão na mistura. Com isso, a linha do consumo de óleo (MOLEO) sofre uma queda até 50% de concentração, o que resulta numa crescente economia que é analisada, em termos de custo, na próxima seção.

É importante salientar que tais resultados só serão válidos enquanto a caldeira puder manter o mesmo nível de operação, com relação ao aumento de concentração de carvão e o tempo de operação, vale dizer, se não houver queda no padrão de chama nem no nível de troca térmica por acúmulo de cinzas, na atomização, etc. Portanto, é necessário que a performance da caldeira seja mantida num nível satisfatório com os equipamentos disponíveis.

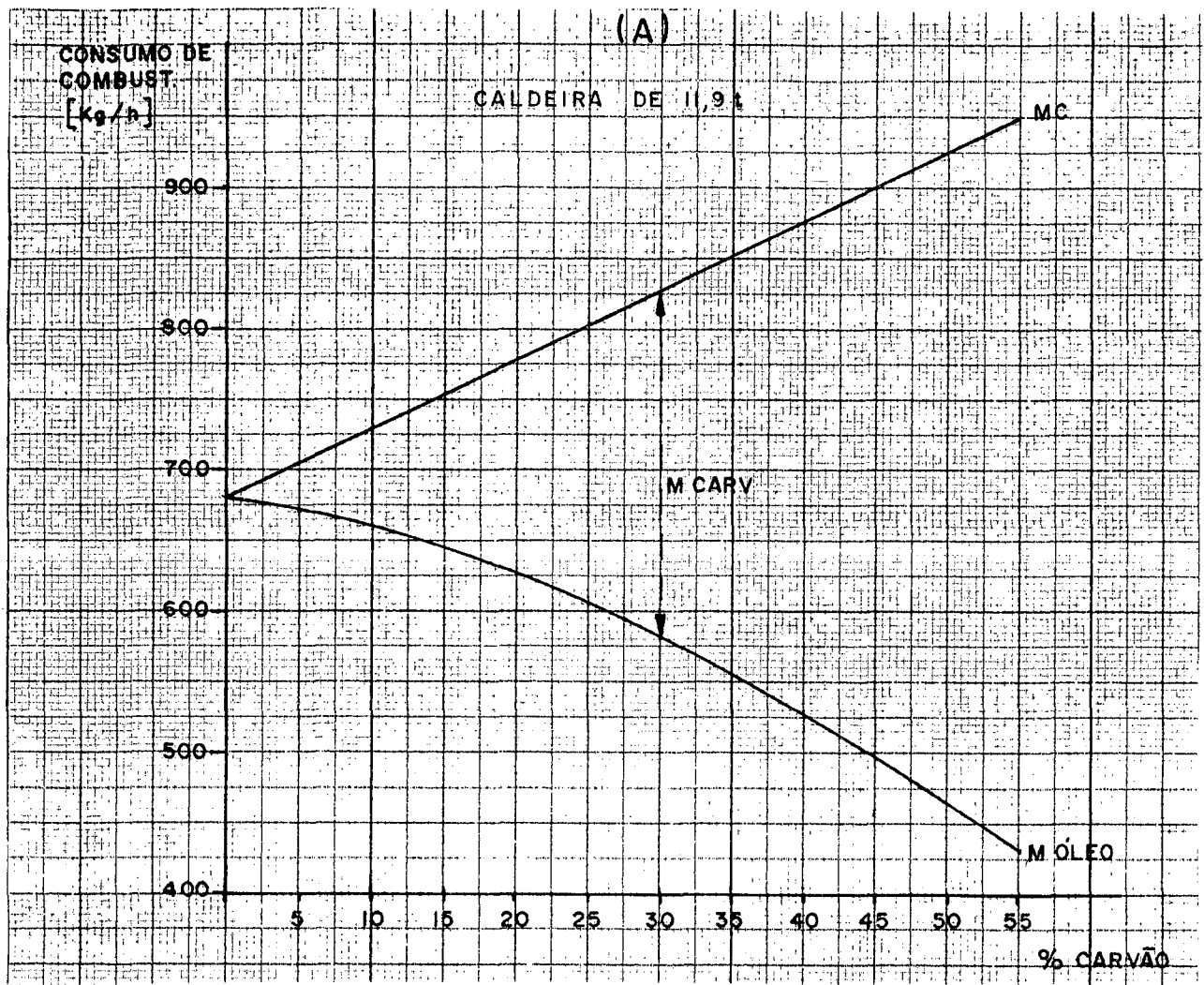
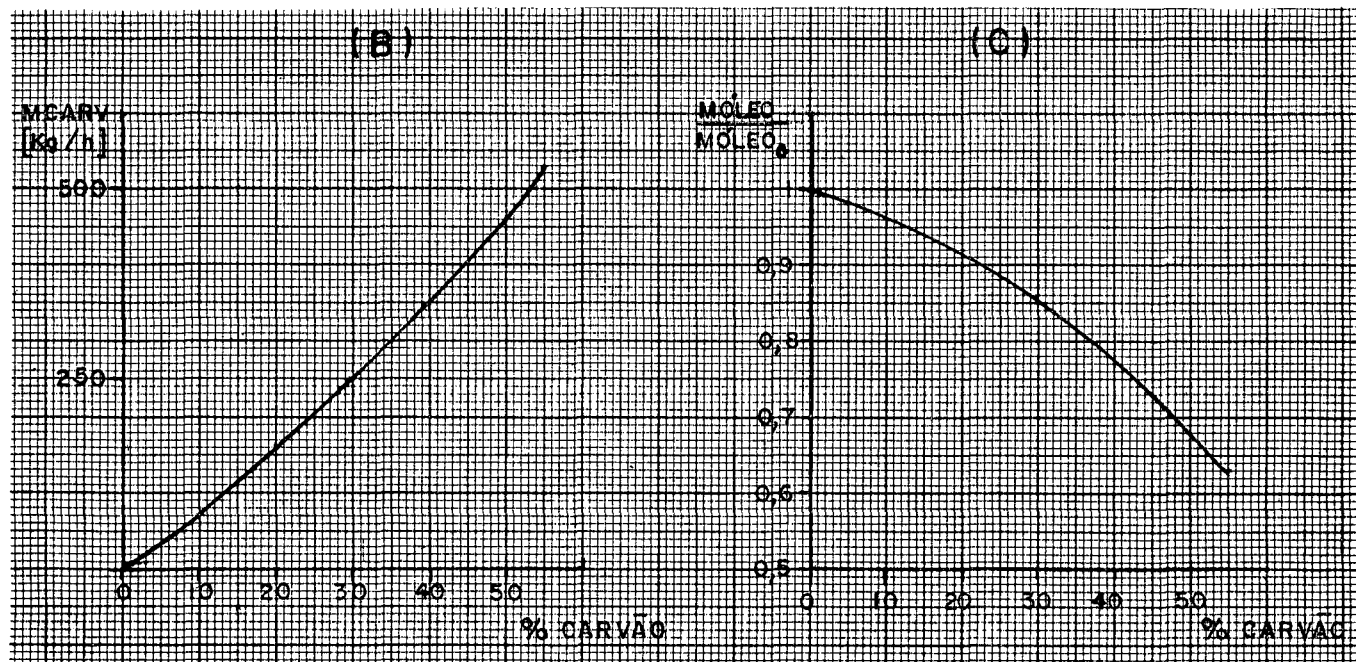


FIGURA 13 - VARIAÇÃO DOS CONSUMOS DE MISTURA, DE CARVÃO E DE ÓLEO, COM A CONCENTRAÇÃO DE CARVÃO NA MISTURA.



VI.3.3 - Influência das cinzas no DHC

Conforme se pode verificar no apêndice III, foi levada em conta, na determinação do DHC a energia, i.e., entalpia, perdida no aquecimento da cinza do carvão constituinte na mistura DCZ*. Pode-se notar que as cinzas desempenham papel menor, quase insignificante, na determinação de DHC, mesmo em altas concentrações. Este é um dado importante quando se trata de carvões brasileiros que apresentam alto teor de cinza, pois mostra que, ao menos quanto a uma eventual perda de calor para aquecimento das cinzas, não há impeditivos para uso de carvões menos nobres.

VI.4 - Economia de Custos Operacionais

Calculados os valores mínimos de MC, MOLEO e MCARV pode-se confeccionar os seguintes gráficos que dão idéia da economia conseguida através da queima de mistura em várias concentrações, para o caso presente.

Como os preços do óleo e do carvão tendem a variar no mercado com relativa facilidade, optou-se por definir um preço relativo PR, que é a relação entre o custo de utilização do óleo pelo custo de utilização do carvão. Para se ter um resultado mais definido com relação a economia a ser conseguida com o uso do novo combustível, é necessário que ao custo do

* Esta formulação foi feita considerando-se a cinza como SiO₂ puro.

carvão, utilizado para calcular PR, se incorpore os custos do investimento para a conversão da caldeira e os custos de operação e manutenção dos novos equipamentos anexados à unidade. Obviamente, esses custos devem ser todos igualmente periodizados, de forma convencional. Assim, PR pode ser definido da seguinte forma:

$$PR = \frac{1}{(1+\alpha)} \frac{\text{CUSTO DE UTILIZAÇÃO DO ÓLEO}}{\text{CUSTO DE UTILIZAÇÃO DO CARVÃO}}$$

sendo que os custos de conversão, operação e manutenção são incorporados pelo parâmetro α .

Definiu-se, ainda, a variável auxiliar, EQCARV, que é o consumo equivalente de mistura, em termos de kg/h de carvão, ou seja:

$$EQCARV = MOLEO \times PR + M CARV \text{ [kg/h]} \quad (1)$$

O gráfico da FIG.14 mostra como varia EQCARV com relação à concentração da mistura e o preço relativo PR.

Finalmente, para se ter o custo de operação com mistura óleo-carvão tem-se somente que multiplicar o consumo equivalente pelo custo atual do carvão:

$$\text{CUSTO DE OPERAÇÃO} = EQCARV \times \text{CUSTO DO CARVÃO} \text{ [$/h]} \quad (2)$$

O apêndice V apresenta um exemplo desse procedimento, calculado a partir dos preços atuais do carvão e do óleo, onde se obtém os custos que resultariam do uso de mistura com "carvão brasileiro" em uma caldeira tal como a experimentada por

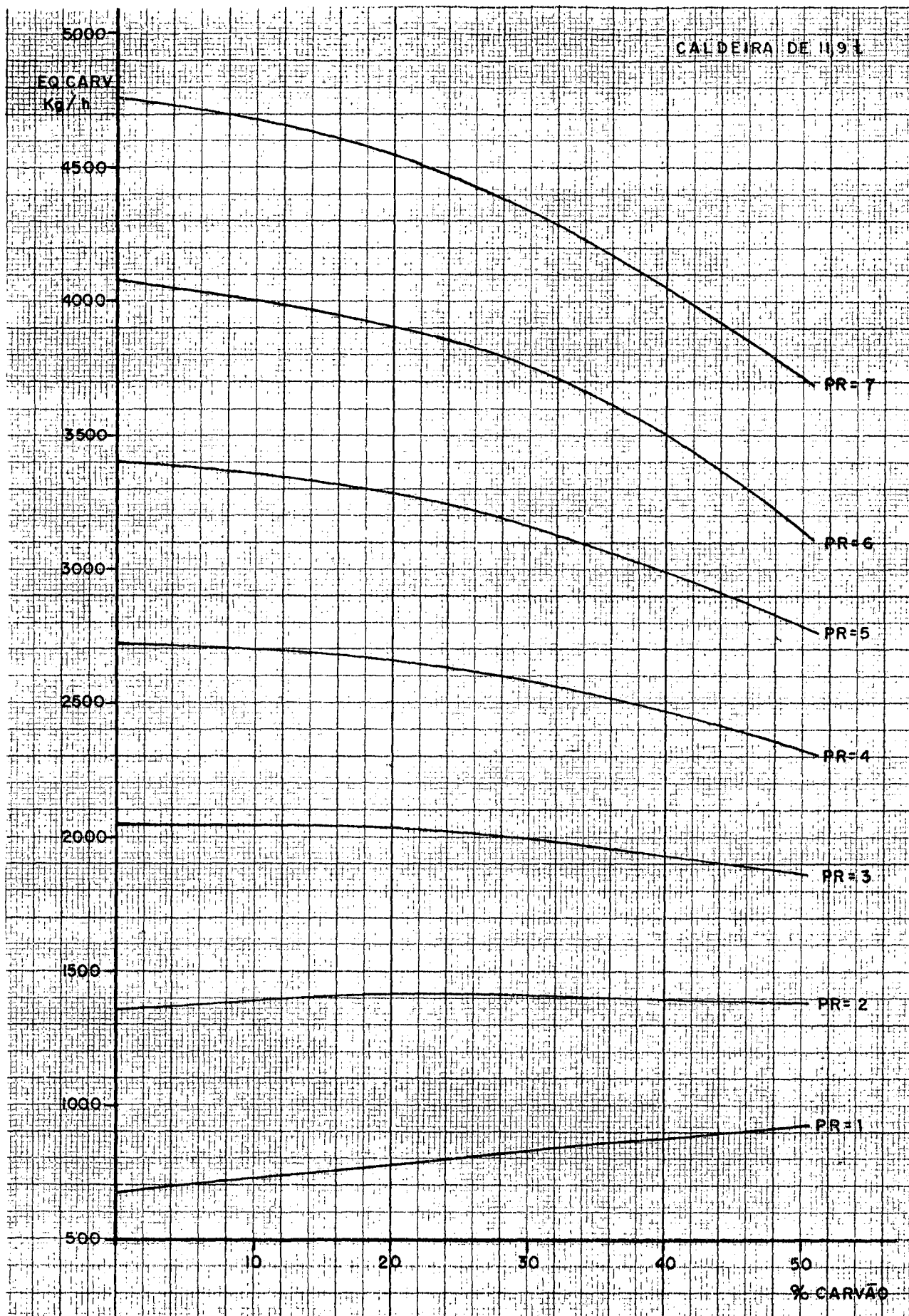


FIGURA 14 - VARIAÇÃO DO CONSUMO EQUIVALENTE EM CARVÃO COM A CONCENTRAÇÃO DE CARVÃO NA MISTURA.

Y.S.PAN^[25]. Pode-se constatar, também, que o PR atual é cerca de 3,5 (com o parâmetro α já incluído)*.

Finalmente, para se ter uma idéia do percentual de economia gerado pela utilização de mistura óleo-carvão em relação ao custo relativo PR para várias concentrações de mistura temos o gráfico da figura 15.

Nota-se que para o PR atual de 3,5, uma economia razoável nos custos de operação (10%) somente começaria a ser obtida com concentrações de carvão na mistura ao redor de 45% em peso.

Nota-se também que, somente a partir de PR superior a 4 é que se obteria economia razoável nos custos de operação (10%) com a concentração de carvão na mistura usualmente recomendada (\sim 35%).

* Conforme mostra o apêndice V o parâmetro α usado foi de 0,8, que pôde ser calculado a partir dos dados sobre os custos de conversão, operação e manutenção, apresentados por BLAKE^[16].

O uso do parâmetro α em PR substitui uma análise do tipo "break-even point", pois traz para o valor presente o estudo quanto à economia gerada.

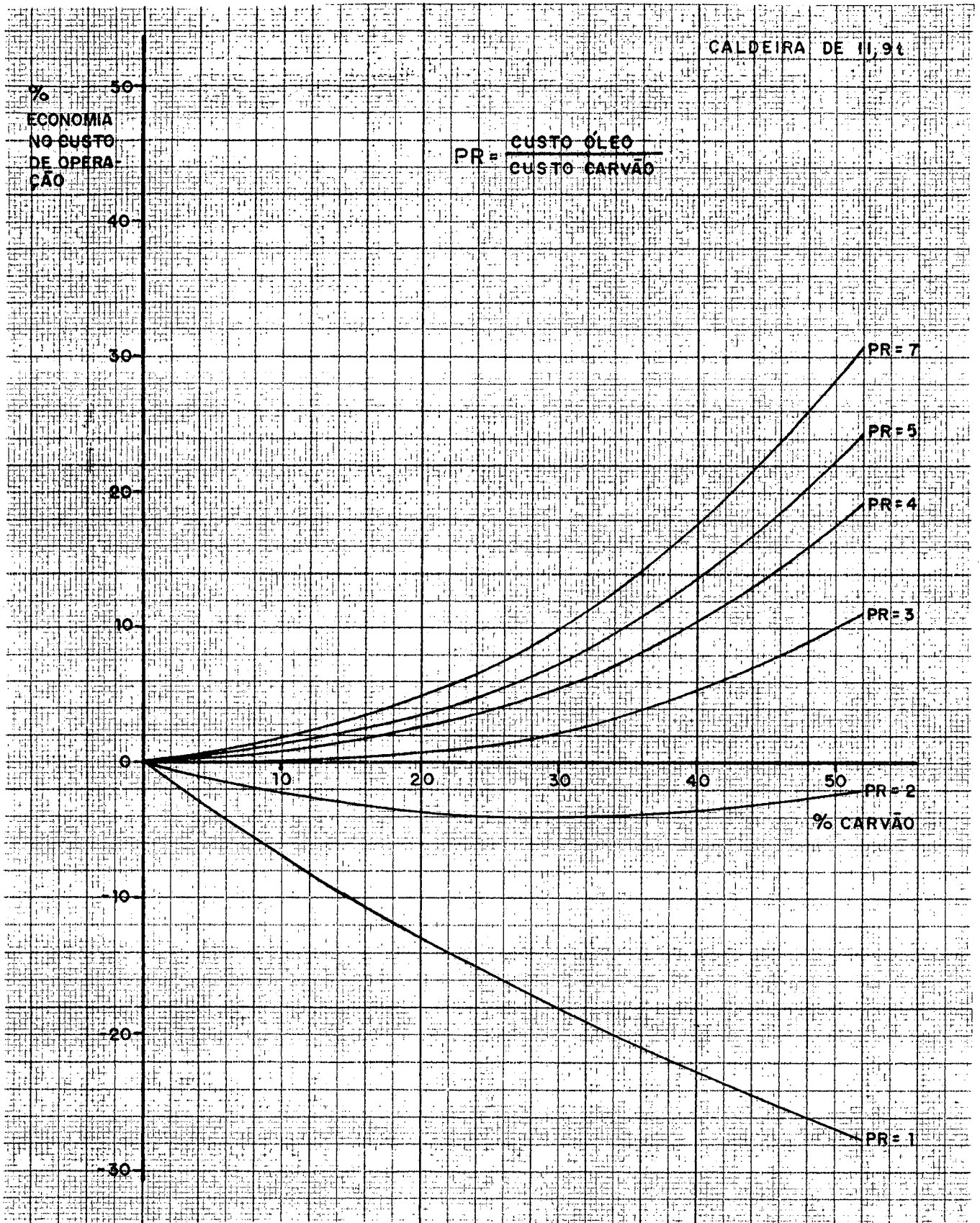


FIGURA 15 - VARIACÃO DA ECONOMIA NO CUSTO DE OPERAÇÃO COM RELAÇÃO A CONCENTRAÇÃO DE CARVÃO NA MISTURA

CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho teve como proposição básica, conforme foi salientado na introdução, servir como passo inicial no estudo de viabilidade da solução técnica mistura óleo - carvão com carvão brasileiro típico de mercado. Como tal, não poderia apresentar conclusões completas, bastando-se com levantar evidências e indicações pertinentes à condução de um experimento prático, já direcionado, que daria, este sim, conclusões finalizadas. Ressalvada esta ótica, pode-se seguir na explanação.

Na primeira parte deste trabalho levantou-se as seguintes vantagens relacionadas ao uso de carvões voláteis - presente caso - na formação da mistura óleo-carvão; se comparado ao uso de carvões antracitosos:

- as partículas de carvão volátil têm maior facilidade para atingir combustão completa na chama da mistura;

- misturas com carvão volátil apresentam maior emissividade de chama;

- misturas com carvão volátil necessitam de menor pré-aquecimento, pois a formação, na tubulação, de um sistema de três fases carvão/óleo/gases (gaseificação) diminui sua viscosidade;

- misturas com carvão volátil tendem a formar cinzas bem menos incrustantes.

Por tudo isso o rendimento térmico da caldeira, quando usada mistura com carvão volátil, se mantém em um nível bem próximo do atingido com o uso isolado de óleo combustível.

Todavia, para se ter uma indicação mais precisa quanto ao uso de mistura constituída com carvões brasileiros (com características de alta volatilidade, de baixo poder calorífico e de alto teor de cinzas) é que se desenvolveu a segunda parte do trabalho.

Assim, depois de efetuados os estudos quantitativos, constatou-se que:

- o alto teor de cinzas dos carvões brasileiros não seria impeditivo, em termos de perda de calor para a quecimento das cinzas, pois pôde-se constatar que essa perda é insignificante*;

- o baixo poder calorífico não chega a ser impeditivo, ao menos para o caso analisado, pois o acréscimo na quantidade (peso) de combustível requerido para se atingir os níveis originais de produção de vapor na caldeira está perfeitamente dentro da capacidade dos queimadores.

Portanto, a viabilidade do uso de mistura óleo-carvão, constituída com carvões brasileiros como combustível no gerador de vapor acima examinado, se mostra, se não assegurada, bastante provável.

* Quanto a retirada de um volume maior de cinzas gerado no interior da caldeira, esta representaria um investimento apenas um pouco maior que quando do uso de mistura com carvões mais limpos.

Contudo, em vista do relativo benefício econômico - sendo necessário o uso de altas concentrações de carvão na mistura para se conseguir alguma redução de custos operacionais, a alternativa mistura óleo-carvão parece mais atraente para os casos em que os equipamentos de manuseio, transporte e pulverização já se encontram disponíveis na planta. Nesse sentido, um estudo mais apurado seria necessário para se estabelecer a viabilidade do uso de mistura em queimadores de usinas termelétricas, onde, ordinariamente, combustível líquido é usado para estabilizar a chama ou mantê-la em nível mínimo de sustentação na caldeira.

A sugestão que se formula é a de, como prosseguimento deste estudo, e com base de partida nas indicações técnicas nele apresentadas, se proceda a um experimento prático, de bancada, em uma caldeira de pequeno porte, originariamente projetada para o consumo de óleo. Tal experimento reforçaria decisivamente o levantamento técnico aqui apresentado e daria respaldo para conversões de instalações de maior porte, para uso de mistura que incluísse carvões brasileiros.

Antes disso, porém, seria interessante, como trabalho teórico, estender o modelo para cobrir toda a faixa usual de caldeiras, na forma anteriormente indicada na seção VI.2. Um tal aprofundamento ensejaria condições mais seguras de previsão da economia de custos operacionais para caldeiras de qualquer capacidade.

VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HAO, L., "Preliminary considerations of the use of COM in the experimental power plant of Tsinghua University as an energy fuel", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Novembro 1979.
2. MIGAKI, H. et alii, "Report on fine COM Combustion Test", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Novembro 1979.
3. TAKAHASHI, Y., "Basic studies on COM Combustion", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Novembro 1979.
4. NAKABAYASHI, Y., "Fine & coarse coal oil mixture combustion tests of air atomizer burner in Japan", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Novembro 1979.
5. MABES, T.W., "Handling coal oil mixtures with positive displacement pumps", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Novembro 1979.
6. LUCKIE, P.T., BAGGA, P.S., "Grinding of coal in oil", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Novembro 1979.
7. DUNN, R.M., "Startup and feasibility testing on the Salem Harbor COM demonstration", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Novembro 1979.
8. WHALEN, P.J., DAVIES, F.W., LEE, L.K., "Coal-oil mixture combustion applied to Canadian utility boilers", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Novembro 1979.

9. SMITH, S.R., COLE, R.M., COX, R.B., "Investigations of coal-oil mixtures as a utility boiler light-off fuel", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Novembro 1979.
10. GIRARDI, E., PASSARINI, N., "Rheology and combustion of COM - Preliminary results of activity", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
11. KASPRIK, A.J., CAUSILLA, H., KARTZLE, P., "Design considerations and operating experience of the Sanford COM test facility", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
12. WALL, D.R., "The handling and combustion of stable coal/fuel oil dispersions". In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
13. ROWELL, R.L., KOSMAN, J.J., "Stabilization of coal-oil mixtures by chemical additives", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
14. REJEK, U., FRANKE, F.H., "Viscosity and transportation characteristics of coal-oil-slurries", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
15. KE-FACEN, et alli, "Experimental investigation of preparation and handling of COM in Zhejiang University", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
16. BLAKE, J.C., FOO, D.K., JAMGOCHIAN, E.M., "Conversion of oil-fired industrial boilers to coal-liquid mixtures", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. Of Energy, Abril 1981.
17. SLEPOW, L.D., MENDELSON, A.S., "FPL's Sanford COM demonstration project", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
18. ALABAF, J.S., PATTERSON, M.C., MOLES, F.D., "Handling combustion and emissions from coal-oil dispersions when fired through a LPA turner", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.

19. KNELL, E.W., BAUER, H.F., "Status of the occidental coal-oil mixture program", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
20. PAPACHRISTODOULOU, G., TRASS, O., "Rheology of ultrafine coal-oil mixtures", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
21. AIKENS, A.C., EKMANN, J.M., "The effect of coal particle size on settling behavior of coal-oil mixtures", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
22. MARLOW, B.J., ROWELL, R.L., "Stability and rheology of coal-oil mixtures and coal-water mixtures", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
23. VIOLA, M.A. et alii, "Characterization of various types of COM", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
24. LOPEZ, B.A., MURATA, H. et alii, "Physical properties and combustibility of mixture of oil and charcoal", In: Third International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, U.S. Dept. of Energy, Abril 1981.
25. PAN, Y.S., BELLAS, G.T., MATHUR, M.P., BIENSTOCK, D., "Combustion of coal-oil mixtures in a 700 HP watertube boiler", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Noviembre 1979.
26. EKMANN, J.M., BIENSTOCK, D., "The role of coal and oil characteristics in the study of coal oil mixtures", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Noviembre 1979.
27. CARMI, S., GHASSEMZADEH, M.R., "Atomization of coal-oil mixtures", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Noviembre 1979.
28. BOTSARIS, G.D., VIOLA, M.A., "Characterization and structural studies of various types of COM", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Noviembre 1979.

29. STOKES, C.S., "The production of stable coal-oil mixtures using high intensity mechanical mixing devices", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Novembre 1979.
30. NAGATA, K., SHIDIZAWA, A., "Pilot plant test on coarse coal system", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF - 791160, U.S. Dept. of Energy, Novembre 1979.
31. FOO, O.K. et alii, "Market assessment and financial analysis of COM conversion", In: Second International Symposium on Coal-oil Mixture Combustion Proceedings, CONF-791160, U.S. Dept. of Energy, Novembre 1979.
32. CAMPBELL, ASHLEY, S., "Thermodynamic analysis of combustion engines", New York, John Wiley & Sons, 1979.

APÊNDICE I

EXEMPLO DE DETERMINAÇÃO DE DHF

Este exemplo mostra como foram aplicadas as equações de combustão do sistema C/H/O/N para uma mistura de CV35 e óleo nº 6 com 40% de concentração de carvão.

Dadas as porcentagens em peso de C, H, O, N, S e cinza no carvão e no óleo, obtém-se a seguinte tabela:

	% PESO		PM	% PESO NA MISTURA	Nº MOLES NA MISTURA
	CV35	ÓLEO Nº6			
C	52,0	86,7	12	72,82	6,07
H	1,7	11,0	1	7,28	7,28
O	9,6	1,4	16	4,68	0,29
N	0,8	0,1	14	0,38	0,03
S	0,9	0,7	32	0,78	0,02
Cinza	35,0	0,0	60*	14,00	0,23
P.C.	2004	4338	→ 3404 KJ/100g comb		

Com um excesso de O_2 de 3% tem-se que o nº de moles de oxigênio para combustão (Y) é: $Y = 1,03 Y_{CC}$
 onde: Y_{CC} é o nº de moles de oxigênio para se conseguir combustão completa.

Conforme capítulo 2 do CAMPBELL^[32], tem-se que:

* Considerou-se toda a cinza como sendo SiO_2 .

$$(1) Y_{CC} = MC + \frac{MH}{4} - \frac{MO}{2} = 6,07 + \frac{7,28}{4} - \frac{0,29}{2} = 7,745$$

$$\rightarrow Y = 7,98$$

onde: M é o respectivo nº de moles para cada elemento.

Continuando, tem-se que

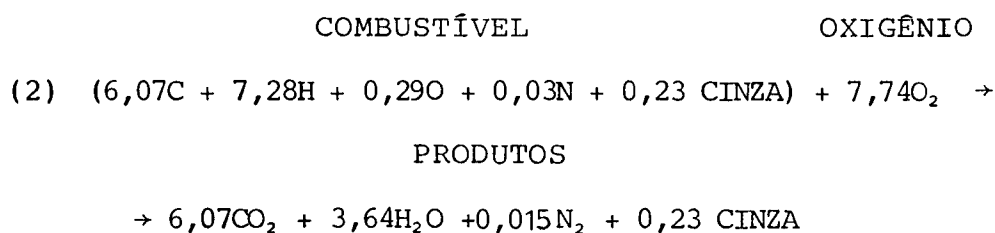
- para:
- CO, N(1) = 0,00
 - CO₂, N(2) = MC = 6,07
 - H₂O, N(3) = $\frac{MH}{2}$ = 3,64
 - N₂, N(4) = 3,76 Y = 30,00
 - O₂, N(5) = Y - Y_{CC} = 0,23
 - CINZA, N(6) = M(6) = 0,23.

onde: N(I) é o nº de moles nos produtos de combustão.

Conhecidas as temperaturas dos reagentes e dos produtos:

- TR = 383°K,
- TP = 550°K.

Para combustão com oxigênio estequiométrico tem-se a seguinte equação elementar:



E a equação do poder calorífico resulta sendo:

$$(3) H_{rp} = (6,07 h_{CO_2} + 3,64 h_{H_2O} + 0,015 h_{N_2} - h_{COMB} - 7,74 h_{O_2})_{298^{\circ}K}$$

[kJ/100g COMB]

onde: h_i são as entalpias dos produtos de combustão e

h_{COMB} é a entalpia do combustível.

Sabendo-se que as entalpias dos produtos de combustão são:

*	AMB 298°K	TR 380°K	TP 550°K
CO ₂	9.364	12.580	19.985
H ₂ O	57.316	60.094	66.050
N ₂	15.780	18.168	23.200
O ₂	17.200	19.631	24.900

* entalpias em [kJ/100g mol]

e como já se conhece H_{rp} em (3), tem-se que:

$$h_{\text{COMB}} = 3550 \text{ kJ/100g COMB}$$

e as entalpias dos reagentes e produtos são:

$$HR(383^\circ\text{K}) = (h_{\text{COMB}} + 7,98 h_{\text{O}_2} + 30,0 h_{\text{N}_2})_{383} = 4250 \text{ kJ/100g COMB} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} HP(550^\circ\text{K}) &= (6,07 h_{\text{CO}_2} + 3,64 h_{\text{H}_2\text{O}} + 30,0 h_{\text{N}_2} + 0,23 h_{\text{O}_2})_{550} \quad (5) \\ &= 1063 \text{ kJ/100g COMB} \end{aligned}$$

tem-se ainda que calcular a diferença de entalpia perdida no aquecimento da cinza, da seguinte forma:

$$HCZ = MCZ \times \int_{TR}^{TP} C_p \, dT \quad (6)$$

Sabendo-se que: $C_{p_{\text{SiO}_2}} = 10.87 + 0.008712T - 241200/T^2$ [cal/mol]

tem-se: $HCZ = 2.31 \text{ kJ/100g COMB}$.

Finalizando tem-se que a diferença de entalpia na combustão é:

$$DHF = HR - HP - HCZ = 3185 \text{ kJ/100g COMB.} \quad (7)$$

APÉNDICE. II

NOMENCLATURA DOS PROGRAMAS

ETP3(I) - Entalpia dos produtos de combustão T=300°K

ETP4(I) - Entalpia dos produtos de combustão T=400°K

ETP5(I) - Entalpia dos produtos de combustão T=500°K

ETP6(I) - Entalpia dos produtos de combustão T=600°K

[kJ/100g mol]

onde I tem a seguinte correspondência:

I = 1 → CO₂, I = 2 → H₂O, I = 3 → N₂, I = 4 → O₂

PA - PESO ATÔMICO

I = 1 → C, 2 → H, 3 → O, 4 → N, 5 → S, 6 → CINZA

TP - temperatura dos produtos [°K]

TR - temperatura dos reagentes [°K]

RY - excesso de O₂

HRP - poder calorífico [kJ/100g COMB]

HTR - entalpia dos reagentes [kJ/100g COMB]

HTP - entalpia dos produtos [kJ/100g COMB]

TEOR(I) - porcentagem de "I" na M.O.C.

M(I) - nº de moles para cada elemento

I = 1 → C, 2 → H, 3 → O, 4 → N, 5 → S, 6 → CINZAS

Y_{CC} - nº de moles de oxigênio para combustão completa

Y - nº de moles de oxigênio efetivamente usado

N(I) - nº de moles dos produtos I

I = 1 → CO, 2 → CO₂, 3 → H₂O, 4 → N₂, 5 → O₂, 6 → CINZAS

HCOMB - entalpia do combustível [kJ/100g COMB]

HASH - entalpia gasta para aquecer as cinzas [kJ/100g COMB]

HR - entalpia dos reagentes [kJ/100g COMB]

HP - entalpia dos produtos de combustão

DHF - diferença de entalpia = HR - HP - HASH

- TCOAL(I) - teor de (I) no carvão *
- TOIL(I) - teor de (I) no óleo
- I = 1 → C, 2 → H, 3 → O, 4 → N, 5 → S, 6 → CINZAS
- *HRPOIL - poder calorífico do óleo [kJ/100g COMB]
- *HRPCOAL- poder calorífico do carvão
- *PCOAL - porcentagem de carvão na mistura
- HTR(I) - entalpia do reagente(I) [kJ/100g mol]
- HTP(I) - entalpia do produto(I)
- I = 1 → CO₂, 2 → H₂O, 3 → N₂, 4 → O₂
- *MFMW - relação MF/MW
- *MF - massa consumida de combustível [kg/h]
- *MW - massa produzida de vapor [kg/h]
- *MCOAL - consumo de carvão [kg/h]
- *MOIL - consumo de óleo [kg/h]
- PR(I) - consumo equivalente (EQCOAL) em carvão [kg/h]
- * para preço relativo PR
- I = preço do óleo/preço do carvão

* Somente para o programa COMCV.

PROGRAMA COMMX*

Calcula a diferença entálpica da combustão (DHF)
para as operações experimentais apresentadas no artigo de Y.
S.PAN^[25].

* Ver nomenclatura

```

REAL M,N,ME
COMMON CL(5),CL(5),N(5)
DIMENSION ETP5(6),PA(6),HTR(4),HTP(4),TEOR(6),M(6),ETP6(6),ETP3(6)
*,ETP4(6)
DO 10 I=1,6
READ(5,20) ETP5(I),ETP6(I),PA(I),ETP3(I),ETP4(I)
20 FORMAT(5F14.2)
10 CONTINUE
DO 30 J=1,11
READ(5,40) TP,TR,RY,HRP
40 FORMAT(2F5.1,F6.4,F6.1)
IF(TR.GT.399) GOTO 14
RR=(TR-300.)/100.
GOTO 15
14 RR=(TR+00.)/100.
15 RP=(TP-500.)/100.
DO 50 I=1,4
IF(TR.GT.399) GOTO 13
HTR(I)=(ETP4(I)-ETP3(I))*RR+ETP3(I)
GOTO 50
13 HTR(I)=(ETP5(I)-ETP4(I))*RR+ETP4(I)
50 HTP(I)=(ETP6(I)-ETP5(I))*RP+ETP5(I)
READ(5,70) TEOR(1),TEOR(2),TEOR(3),TEOR(4),TEOR(5),TEOR(6)
70 FORMAT(6F4.1)
DO 60 I=1,6
60 M(I)=TEOR(I)/PA(I)
YCC=M(1)+M(2)/4.-M(3)/2.
Y=RY*YCC
N(1)=0.
N(2)=M(1)
N(3)=M(2)/2.
N(4)=3.76*Y
N(5)=Y-YCC
HCOMB=(N(2)*HTR(1)+N(3)*HTR(2)+M(4)/2.*HTR(3)-(M(1)+M(2)/2.-M(3)/2
*.)*HTR(4))/1000.+HRP
HASH=M(6)*4.1868/1000.*((10.87*TP+0.004356*TP**2+241200./TP)-(10.8
*7*TR+0.004356*TR**2+241200./TR))
HR=HCOMB+(Y*HTR(4)+N(4)*HTR(3))/1000.
HP=(N(2)*HTP(1)+N(3)*HTP(2)+N(4)*HTP(3)+N(5)*HTP(4))/1000.
DHF=HR-HP-HASH
WRITE(6,80) HR,HP,DHF,ME,HRP
80 FORMAT(5F14.1)
30 CONTINUE
STOP
DEBUG INIT(TP,TR,RY,TEOR,RR,RP,HTR,HTP,M,HASH)
END

```

RESULTADOS DO PROGRAMA COMMX

EX- PE- RIM.	% CAR VÃO	TP OK	TR OK	Y (%)	C	H	TEORES %		S	CIN ZA	HcZ kg/ 100g	HASH kg/ 100g	HR kg/ 100g	HP kg/ 100g	DHC kg/ 100g	MCMV x 10 ⁻²
XI	0,0	547	370	2,43	86,7	11,0	1,4	0,1	0,7	0,0	4338	0,0	5389	1422	3967	6,329
X	0,0	550	374	3,00	87,3	10,8	0,8	0,3	0,8	0,0	4317	0,0	5376	1434	3942	6,473
IX	29,9	547	374	2,39	82,8	9,3	2,6	0,6	0,9	3,9	4028	0,64	4984	1286	3698	6,931
VIII	29,0	549	374	2,76	82,8	9,4	2,6	0,5	1,0	3,7	3999	0,62	4963	1301	3661	7,137
VII	40,5	562	380	2,40	82,7	8,8	2,2	0,7	1,0	4,6	3900	0,81	4844	1274	3568	7,277
VI	40,0	550	383	2,75	81,6	8,7	3,5	0,8	1,1	4,4	3921	0,71	4857	1248	3608	7,183
V	40,5	543	376	3,33	79,9	8,9	4,5	0,6	1,1	5,0	3845	0,80	4771	1246	3524	7,356
IV	54,3	565	405	2,35	78,9	7,8	4,1	0,8	1,4	7,0	3642	1,09	4526	1178	3346	7,923
III	49,0	564	406	2,99	80,4	8,3	3,9	0,7	1,2	5,6	3755	0,87	4674	1231	3442	7,493
II	48,5	552	402	2,40	80,7	8,0	4,6	0,9	1,3	4,5	3760	0,66	4672	1194	3477	7,205
I	49,0	549	404	3,01	80,0	7,9	5,4	1,0	1,3	4,5	3767	0,63	4668	1187	3480	7,458

APENDICE III

PROGRAMA COMCV*

Calcula a diferença entálpica (DHF), o consumo total de combustível (MF), e o consumo equivalente em carvão (EQCARV) para vários preços relativos (PR), na combustão de mistura óleo-carvão com carvão CV35 e óleo nº 6, com concentrações variando de 0 a 55%.

* Ver nomenclatura no apêndice II.

```

REAL M,N,MFMW,MF,MCOAL,MOIL
COMMON BL(5),CL(5),N(5)
DIMENSION ETP5(6),PA(5),HTR(4),HTP(4),TCOAL(6),M(6),ETP6(6),ETP3(6)
*,ETP4(6),TOIL(6),TCOAL(6),PR(7)
DO 10 I=1,6
  READ(5,20) ETP5(I),ETP6(I),PA(I),ETP3(I),ETP4(I)
20 FORMAT(5F14.2)
10 CONTINUE
DO 90 I=1,6
  READ(5,70) TCOAL(I),TOIL(I)
70 FORMAT(2F4.1)
90 CONTINUE
HRPOIL=4538.
HRPCOA=2004.
DO 50 ICOAL=1,50
  COAL=FLOAT(ICOAL-1)/100.
  PCOAL=FLOAT(ICOAL-1)
DO 60 I=1,6
  TCOAL(I)=COAL*TCOAL(I)+(1-COAL)*TOIL(I)
50 M(I)=TCOAL(I)/PA(I)
  YCC=M(1)+M(2)/4.-M(3)/2.
  Y=1.03*YCC
  N(1)=0.
  N(2)=M(1)
  N(3)=M(2)/2.
  N(4)=3.76*Y
  N(5)=Y-YCC
  TP=550.
  READ(5,40) TR
40 FORMAT(1F6.1)
  IF(TR.GT.399) GOTD 21
  RR=(TR-300.)/100.
DO 54 I=1,4
54 HTR(I)=(ETP4(I)-ETP3(I))*RR+ETP3(I)
  GOTD 22
21 RR=(TR-400.)/100.
DO 52 I=1,4
52 HTR(I)=(ETP5(I)-ETP4(I))*RR+ETP4(I)
22 RP=(TP-500.)/100.
DO 53 I=1,4
53 HTP(I)=(ETP6(I)-ETP5(I))*RP+ETP5(I)
  HRP=COAL*HRPCOA+(1-COAL)*HRPOIL
  HCOMB=(N(2)*HTR(1)+N(3)*HTR(2)+M(4)/2.*HTR(3)-(M(1)+M(2)/2.-M(3)/2
  *.)*HTR(4))/1000.+HRP
  HASH=M(6)*4.1868/1000.*((10.57*TP+0.004356*TP**2+241200./TP)-(10.8
  *7*TR+0.004356*TR**2+241200./TR))
  HR=HCOMB+(Y*HTR(4)+N(4)*HTR(5))/1000.
  HP=(N(2)*HTP(1)+N(3)*HTP(2)+N(4)*HTP(3)+N(5)*HTP(4))/1000.
  DHF=HR-HP-HASH
  MFMW=(-0.0022308)*DHF+15.2159
  MF=23500.*MFMW/100.
  MCOAL=MF*COAL
  MOIL=MF*(1-CCAL)
DO 41 I=1,7
41 PR(I)=FLOCAT(I)*MOIL+MCOAL
  WRITE(6,80) HR,HP,HASH,DHF,MFMW,HRP
80 FORMAT(6F14.2)
  WRITE(6,42) FCOAL,MF,MCOAL,MOIL,PR(1),PR(2),PR(3),PR(4),PR(5),PR(6)
  *),PR(7)
42 FORMAT(11F8.0)
30 CONTINUE
  STOP
  DEBUG INIT(PA,TR,TP,M)
  END

```

RESULTADOS DO PROGRAMA COMCV

% CAR VÃO	HRP kg/100g	HR kg/100g	HP kg/100g	HCZ kg/100g	DHC kg/100g	MCMW x10 ⁻²	MC kg/h	MCARV kg/h	MOLEO kg/h	EQCARV kg/h						
										PR (1)	PR (2)	PR (3)	PR (4)	PR (5)	PR (6)	PR (7)
0	4338	5402	1438	0,0	3965	6,37	679	0,0	679	679	1358	2037	2716	3395	4074	4753
5	4221	5253	1394	0,29	3859	6,61	704	35	669	704	1373	2042	2711	2380	4049	4718
10	4105	5104	1350	0,59	3753	6,84	729	73	656	729	1385	2041	2697	3353	4009	4665
15	3988	4954	1306	0,88	3647	7,08	754	113	641	754	1395	2036	2677	3318	3959	4600
20	3871	4805	1262	1,17	3541	7,31	780	156	624	780	1404	2028	2652	3276	3900	4524
25	3754	4655	1218	1,47	3436	7,55	805	201	604	805	1409	2013	2617	3221	3825	4429
30	3638	4506	1175	1,76	3330	7,79	830	249	581	830	1411	1992	2573	3154	3735	4316
35	3521	4363	1131	2,00	3230	8,01	854	299	555	854	1409	1964	2519	3071	3629	4184
40	3404	4217	1087	2,25	3128	8,24	878	351	527	878	1405	1932	2459	2981	3513	4040
45	3288	4080	1043	2,38	3034	8,44	900	405	495	900	1395	1890	2385	2880	3375	3870
50	3171	3927	999	2,47	2926	8,69	926	463	463	926	1389	1852	2315	2778	3241	3704
55	3054	3769	955	2,61	2811	8,94	953	524	429	953	1382	1811	2240	2669	3098	3527

APÉNDICE IV

1. PRODUÇÃO

O CV 35 é produzido, a partir do carvão "run of mine" da Mina do Recreio, município de Butiá (km 82 da BR 290), mediante beneficiamento no Lavador de Aços Finos Piratini S.A., em Charqueadas, Município de São Jerônimo.

2. CARACTERIZAÇÃO COMERCIAL

O CV 35 tem a sua caracterização comercial fixada através da Resolução 03/80, de 15.01.80, do CNP.

3. PODER CALORÍFICO

3.1 - Superior (p.c.s.), base seca:

- Máximo 4.800kcal/kg;
- Normal 4.780kcal/kg;
- Mínimo 4.750kcal/kg.

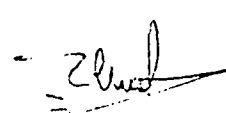
3.2 - Inferior, base úmida;

- aproximadamente 4.338kcal/kg.

3.3 - Teor de umidade total: $\pm 13\%$

4. ANÁLISE ELEMENTAR TÍPICA

Carbono, b.s., %	52,0
Hidrogênio, b.s., %	1,7
Nitrogênio, b.s., %	0,8
Enxofre, b.s., %	0,9
Oxigênio, %	9,6



5. ANÁLISES IMEDIATAS

ELEMENTOS	Amostra Re 04	Amostra Re 07	Amostra Re 35
Umidade higroscópica, %	6,8	8,1	7,5
Cinza, b.s., %	35,4	35,5	35,0
Matéria volátil, b.s., %	30,3	28,9	29,6
Carbono Fixo, b.s., %	34,3	35,6	35,4
Enxofre, b.s., %	1,0	0,9	0,9
p.c.s., b.s., cal/g	4756	4794	4780
Certificado - CIENTEC	36.633*	36.632*	Normal

*(Transcrito dos Certificados da Fundação de Ciência e Tecnologia, CIENTEC, de 07.06.79)

6. CINZAS

O CV 35 tem aproximadamente 35% de cinzas.

6.1 - Análise Química Típica de Cinzas

Óxido de Silício (SiO_2), %	60,30
Óxido de Alumínio (Al_2O_3), %	26,50
Óxido de Ferro (Fe_2O_3), %	3,90
Óxido de Cálcio (CaO), %	1,02
Óxido de Magnésio (MgO), %	0,46
Óxido de Titânio (TiO_2), %	0,75
Óxido de Sódio (Na_2O), %	1,32
Óxido de Potássio (K_2O), %	0,07
Óxido de Fósforo (P_2O_5), %	4,00
Óxido de Enxofre (SO_3), % a 950°C	0,83
Óxido de Enxofre (SO_3), % a 450°C	0,95
Perda ao fogo (950°C)	4,00

(Transcrito do Certificado nº 36.617, de 07.06.79, da Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC)

6.2 - FUSIBILIDADE DAS CINZAS

Amostras	Ponto de amolecimento °C	Ponto de semi esfera (fusão °C)	Ponto de Liquidez °C
R _c - 1	1400	1570	1590
R _e - 2	1410**	1620	1620
R _e - 3	1380*	1560*	1580*
R _e - 4	1400	1615	1630
R _e - 5	1400	1630**	1630**
R _e - 7	1400	1620	1650

*Mínimo

**Máximo

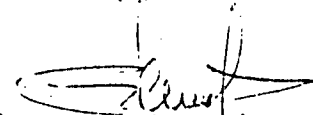
(Transcrito do Certificado 36.613 da Fundação de
Ciência e Tecnologia - CIENTEC, de 07.06.79)

7. GRANULOMETRIA

O CV 35 é produzido na granulometria de 1 a zero polegada, apresentando as seguintes faixas:

Retido na peneira de	AMOSTRAS (colhidas em 09.09.80)				Média %
	"A" %	"B" %	"C" %	"D" %	
25,40mm	8,5	8,7	6,8	10,4	8,6
15,88mm	28,4	28,5	26,2	31,5	28,7
12,70mm	17,1	16,7	14,6	15,6	16,0
9,50mm	1,0	1,1	1,0	0,8	1,0
6,35mm	11,0	9,6	8,8	9,7	9,8
4,76mm	9,4	8,3	8,4	8,3	8,6
3,36mm	4,8	12,8	11,6	4,5	8,4
2,00mm	6,0	5,4	8,8	5,6	6,4
1,00mm	8,2	7,2	10,4	7,6	8,3
0,00mm	5,6	1,7	3,4	6,0	4,2
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Porto Alegre, RS, em 20.XI.80


Raul Cesar Moreira
Reg. 053 00318
Químico Responsável

APÊNDICE V

EXEMPLO DE CÁLCULO DO CUSTO DE OPERAÇÃO

A finalidade deste exemplo é se dar uma idéia mais detalhada de como se usou o método quantitativo proposto no capítulo VI. Entretanto, o procedimento mais rápido, para se obter os custos resultantes e a economia gerada com a utilização de mistura óleo-carvão seria, uma vez calculado o preço relativo (PR), se fazer uso dos gráficos das Figuras 13, 14 e 15.

O presente exemplo é feito a partir dos preços atuais (84) da COPELMI/RS para o carvão CV35, e do CNP para o óleo BPF. São apresentados os custos que resultariam do uso de mistura óleo-carvão com 40% de concentração em uma caldeira com capacidade nominal de 10.900 kg/h de vapor, tal como a que usou Y.S. PAN^[25], em seus experimentos.

Dados: preço do óleo (BPF) = US\$ 149,38/ton

preço do carvão (CV35) = US\$ 23,30/ton

e considerando que os custos de frete não alterem o problema, tem-se que:

$$PR = \frac{1}{(1+\alpha)} \frac{C. \text{ ÓLEO}}{C. \text{ CARVÃO}} = \frac{1}{(1+0,8)} \frac{149,38}{23,30} \cong 3,5$$

O índice α usado foi calculado a partir dos custos de conversão e O&M apresentados por BLAKE^[16].

Com 40% de carvão na mistura tem-se pelo gráfico da Figura 13, que:

$$MCARV = 351 \text{ kg/h}$$

$$MÓLEO = 527 \text{ kg/h}$$

Assim, o consumo equivalente de mistura em termos

de carvão seria:

$$\begin{aligned} \text{EQCARV} &= \text{MOLEO} \times \text{PR} + \text{MCARV} = \\ &= 527 \times 3,5 + 351 = 2195,5 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

Finalizando, tem-se que o custo de operação é o seguinte:

$$\begin{aligned} \text{CUSTO DE OPERAÇÃO} &= \text{EQCARV} \times \text{CUSTO DO CARVÃO} = \\ &= 2195,5 \times \frac{23,30}{1000} = 51,15 \text{ US\$/h.} \end{aligned}$$