

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE FORMATURA.

UTILIZAÇÃO DE GASOGÊNIO AUTOMOTIVO

1980
new

lUIZ VICTOR CARONE CARDIERI
RUBENS NAVAJAS

ORIENTADOR: PROF. OSWALDO GARCIA.

1980

AGRADECIMENTOS

1669167

Agradecemos a todos aqueles que exprimiram o seu interesse por este trabalho e contribuiram para a sua realização, com destaque ao nosso orientador Prof. Oswaldo Garcia, aos professores José Maria Saiz Jabardo e Júlio Militzer e ao valioso auxílio na montagem e ensaios do Sr. Oswaldo Scauri e dos colegas Luís Amato Neto e Leonardo Falcão Rollo.

ÍNDICE

PARTE I - CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O GASOGÊNIO

1.1. Motivação para o Uso do Gasogênio

1.2. Histórico

1.3. Definições

1.3.1. O aparelho Gasogênio

1.3.2. O gás de gasogênio ou gás pobre

1.3.3. Principais elementos constituintes de um gasogênio

1.3.3.1. Gaseificador

1.3.3.2. Ciclone

1.3.3.3. Resfriador

1.3.3.4. Filtro

1.3.3.5. Misturador

1.3.3.6. Ventilador ou Ventoinha

1.3.3.7. Reservatório de água

1.4. Funcionamento do Gasogênio

1.5. Componentes do Gasogênio

1.5.1. Gaseificadores

1.5.1.1. Química do processo

1.5.1.2. Operação do motor

1.5.1.3. Granulometria

1.5.1.4. Tipos de gaseificadores

1.5.2. Filtros

1.5.2.1. A necessidade de filtragem

1.5.2.2. Processos de filtragem

1.5.2.3. Tipos de filtros

- 1.5.2.3.1. Câmaras de expansão ou decantadores
- 1.5.2.3.2. Filtro de lavagem com água
- 1.5.2.3.3. Filtro de banho de óleo
- 1.5.2.3.4. Filtro de impacto de água ou óleo
- 1.5.2.3.5. Ciclone
- 1.5.2.3.6. Filtro de pano ou manga
- 1.5.2.3.7. Scrubber
- 1.5.2.3.8. Filtro de segurança
- 1.5.2.3.9. Depuradores de ação química

1.5.3. Resfriadores

- 1.5.3.1. A necessidade de resfriamento
- 1.5.3.2. Tipos de resfriadores
 - 1.5.3.2.1. Câmara de expansão
 - 1.5.3.2.2. Feixe multitubular
 - 1.5.3.2.3. Resfriador unitubular

1.5.4. Misturador

1.5.5. Órgãos Acessórios

- 1.5.5.1. Ventoinha ou aspirador
- 1.5.5.2. Reservatório de água
- 1.5.5.3. Compressor
- 1.5.5.4. Tubos

1.6. Instalação do Gasogênio nos Veículos

- 1.6.1. Introdução
- 1.6.2. Adaptação do equipamento
 - 1.6.2.1. Caminhões e caminhonetes
 - 1.6.2.2. Automóveis
 - 1.6.2.3. Tratores

PARTE II - PROJETO, CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO DO GASOGÊNIO

2.1. Configuração do Sistema

2.1.1. Seleção do equipamento de filtragem e resfriamento

2.1.2. Características gerais finais

2.1.2.1. Gaseificador

2.1.2.2. Geradores de vapor

2.1.2.3. Filtro ciclone

2.1.2.4. Trocador de calor

2.1.2.5. Filtro de manga

2.1.2.6. Filtro de segurança

2.1.2.7. Misturador

2.1.2.8. Tubulação

2.1.2.9. Acessórios

2.2. Gaseificador com Geradores de Vapor D'Água

2.2.1. Adaptação do gaseificador

2.2.2. Construção dos geradores de vapor

2.3. Ciclone

2.3.1. Projeto

2.3.1.1. Introdução

2.3.1.2. Aproximação teórica

2.3.1.2.1. Cálculo da eficiência de retenção

2.3.1.2.2. Velocidade de arraste

2.3.1.2.3. Perda de carga estimada

2.3.1.2.4. Comparação entre diversos projetos

2.3.1.2.5. Cálculo do fator de configuração G

2.3.1.2.6. Procedimento sugerido para o cálculo

2.3.1.3. Cálculos iniciais

2.3.1.3.1. Vazão aspirada pelo motor

2.3.1.3.2. Vazões de gás e ar

2.3.1.3.3. Propriedades do gás

2.3.1.3.4. Características das partículas

- 2.3.1.4. Dimensionamento
- 2.3.1.5. Análise do desempenho dos ciclones
 - 2.3.1.5.1. Perda de carga
 - 2.3.1.5.2. Eficiência de retenção

2.3.2. Construção

2.4. Filtro de Manga

- 2.4.1. Considerações para projeto
- 2.4.2. Seleção do material e construção

2.5. Trocador de Calor

- 2.5.1. Projeto
 - 2.5.1.1. Dados
 - 2.5.1.2. Propriedades dos gases envolvidos
 - 2.5.1.3. Cálculo da vazão em massa de ar
 - 2.5.1.4. Estimativa da temperatura de saída do ar
 - 2.5.1.5. Calor trocado
 - 2.5.1.6. Cálculo do número de Reynolds
 - 2.5.1.7. Coeficiente global de troca de calor

2.5.2. Construção

2.6. Misturador

- 2.6.1. Desempenho desejado
- 2.6.2. Funcionamento do misturador
- 2.6.3. Adaptação no veículo

2.7. Operação do Equipamento

- 2.7.1. Partida
- 2.7.2. Operação
- 2.7.3. Manutenção e limpeza
- 2.7.4. Observações sobre segurança.

PARTE III - ENSAIOS DOS GASES E DO VEÍCULO

3.1. Análise dos Gases Produzidos

3.1.1. Introdução

3.1.2. Geração dos Gases

3.1.3. Observação da Chama

3.1.4. Análise dos Gases pelo Orsat

3.2. Consumo e Desempenho do Veículo

3.2.1. Consumo

3.2.2. Perda de potência

PARTE I

CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O GASOGÊNIO

1.1 - MOTIVAÇÃO PARA O USO DO GASOGÊNIO

Define-se o gasogênio como o aparelho que transforma biomassa sólida em gases combustíveis, mediante uma série de reações endotérmicas e exotérmicas envolvendo os elementos carbono, oxigênio e hidrogênio. O gás resultante é chamado de gasogênio ou gás pobre, pelo seu baixo poder calorífico. A biomassa sólida utilizada como alimentação pode ser carvão (mineral ou vegetal), madeira (ou serragem), bagaço de cana, etc.

Sendo alguns destes combustíveis de fácil acesso e encontrados em relativa abundância em certas regiões, podemos concluir que o seu uso seria preferível em relação a combustíveis mais nobres tais como os derivados do petróleo.

Além disso, a situação nacional, no que diz respeito a energia, indica uma perigosa dependência externa que, no nosso ver, justificaria qualquer solução interna que minimizasse o risco de uma escassez repentina.

O gás de gasogênio teria uma aplicação imediata na área rural, onde os problemas de poluição atmosférico são menos críticos e onde o acesso do combustível importado é mais difícil que nas regiões metropolitanas.

Se a opção mais viável for o aproveitamento da biomassa vegetal como combustível, na forma de carvão ou lenha, de verão ser previstos programas de reflorestamento próximos às áreas de extração.

O gasogênio pode ser usado em veículos equipados com motores de ciclo Otto ou ciclo Diesel, sendo que com este último são mais comuns as misturas de gás com óleo diesel.

A instalação do equipamento, devido às dimensões e temperaturas alcançadas, além do perigo de intoxicação, deve ser feita na parte externa do veículo. Outra solução seria utilizar um reboque, transportando-se o gás ao veículo por meio de tubulação flexível.

Os veículos que mais facilmente se prestam a este tipo de instalação são caminhões, caminhonetas, tratores e máquinas agrícolas em geral, pois estes veículos possuem suspensão robusta e espaço externo adequado.

1.2 - HISTÓRICO

O processo de gaseificação para produzir combustíveis de fontes orgânicas já era usado em altos fornos há 180 anos atrás. A possibilidade de uso deste gás para aquecimento e geração de potência foi logo percebida. Surgiram então, na Europa, sistemas de produção de gás que usavam carvão vegetal e turfa como alimentação. No começo do século, o petróleo começou a ser usado em maior escala. Porém, durante o desenrolar das duas Grandes Guerras, principalmente a segunda a escassez de petróleo provocou uma retomada nos processos de gaseificação. Em 1945 o gás de gasogênio estava sendo usado para mover caminhões, ônibus, máquinas agrícolas e industriais. Somente na Suécia havia cerca de 70.000 veículos equipados com motores de combustão interna a ciclo Otto que utilizavam gasogênios.

Depois da II Guerra Mundial, a falta do ímpeto estratégico e a disponibilidade de combustível fóssil de baixo custo levaram a um declínio geral na indústria de produção de gás. A pesquisa e o desenvolvimento no uso do gás como combustível para motores de combustão interna tiveram uma súbita parada na maioria dos países. A Suécia, por outro lado, continuou o trabalho de desenvolvimento de gasogênio, como parte de plano estratégico para resguardar-se de futuros possíveis faltas de combustível, e para assegurar a tecnologia e experiência adquiridas neste campo.

Logo após a guerra, o trabalho com motores ciclo - Otto foi abandonado e concentrou-se no desenvolvimento de gasogênio para motores diesel de baixa rotação para máquinas - agrícolas, principalmente caminhões e tratores. Isto estava de acordo com a mudança gradual dos motores ciclo Otto para - ciclo Diesel nas máquinas agrícolas, assim como no transporte pesado, geração de eletricidade e outras aplicações, que teve início no começo dos anos 60.

Desde os anos 20 até hoje tem havido um constante e apreciável desenvolvimento no projeto e performance dos motores de combustão interna, quase universalmente orientados através de um maior conhecimento do combustível usado e da necessidade de maior volume de produção, o que pode influir positivamente no atual uso do gasogênio.

O Brasil, como país dependente da importação do petróleo e possuidor de grandes reservas florestais, desde os anos 30 considerou o gasogênio como uma boa opção para o problema de combustíveis. Naquela época, o governo incentivou os estudos para facilitar o uso do gasogênio nos motores de combustão interna de tratores agrícolas, veículos automotores, instalações fixas e semi-fixas e, além disso, incrementar a fabricação de gasogênio no Brasil. Quando, em consequência da Segunda Guerra Mundial, a crise de transportes tornou-se mais aguda o problema foi atacado mais seriamente, instituindo-se a Comissão Nacional do Gasogênio, além de órgãos estaduais. Devido ao racionamento dos derivados de petróleo, apareceram nesta época um grande número de veículos equipados com gasogênio, o que contribuiu para contornar a crise existente.

Nesta época apareceram inúmeros fabricantes que se aventuraram na industrialização do equipamento. O combustível utilizado era principalmente o carvão vegetal.

Hoje, vivendo novamente dias de crise o gasogênio reaparece como uma das soluções viáveis para amenizar a escassez e os altos preços dos combustíveis fósseis usados normalmente nos transportes de modo geral. Além disso, foram feitos estudos que comprovam a viabilidade da utilização de gasogênio em unidades fixas de potência até 10 KW.

Tudo isto com que novas pesquisas e trabalhos sejam feitos com o intuito de se conseguir melhores aproveitamentos da energia e sistemas de operação mais fácil e segura.

1.3 - DEFINIÇÕES

1.3.1 - O Aparelho Gasogênio

Chama-se de gasogênio ao aparelho que tem como função transformar, mediante a ação do calor, os combustíveis sólidos em combustíveis gasosos destinados a serem utilizados como carburantes.

Os gasogênios podem queimar os mais variados tipos de combustíveis, dentre os mais utilizados cita-se o carvão vegetal e a lenha. Em razão do tipo de aparelho empregado, do combustível a ser queimado e dos serviços a que está sujeito, a geração do gás pode vir acompanhada por agregados de algumas substâncias alheias ao combustível sólido ou somente conter partes dos elementos constituintes do mesmo; entretanto, em qualquer caso, o gás vem acompanhado dos elementos provenientes do ar necessário para a combustão, e que podem influir de maneira benéfica ou prejudicial nas qualidades do gás.

Para melhorar as qualidades que favoreçam um melhor combustão do gás nos cilindros, costuma-se introduzir, no gerador, nafta ou vapor de água, quer continuamente quer só em determinadas ocasiões, e de maneira automática ou por ação do motorista. A lenha, devido à maior porcentagem de água que entra em sua composição, não requer uma injeção tão abundante de vapor de água no gerador, o que já não ocorre com o carvão de lenha.

O gerador, onde se efetua a gaseificação do combustível, não é suficiente para preparar o gás nas condições ideais de ser enviado ao motor. Este gás deverá, portanto, ser substituído a vários processos preliminares, tais como refrigeração, filtragem das partículas sólidas provenientes da queima do carvão, mistura com quantidade adequada de ar (carburação), etc. Os elementos responsáveis por tais funções serão detalha-

6

dos nos ítems seguintes.

Assim, em resumo, pode-se dizer que o gasogênio é - uma fonte de gás explosivo em cujos diferentes órgãos se processa a gaseificação, refrigeração e depuração (filtragem) do gás produzido, a fim de que este seja utilizado de maneira adequada como carburante.

1.3.2 - O Gás de Gasogênio ou Gás Pobre.

O gás combustível obtido por meio do gasogênio e - destinado a ser misturado com uma certa proporção de ar no misturador (para ser depois queimado no interior dos cilindros) recebe o nome de gás de gasogênio ou também gás pobre, por não fornecer as mesmas calorias em relação aos gases resultantes - de outros combustíveis.

O gás pobre possui uma composição variável em função do modo em que é gerado e dos combustíveis sólidos empregados para sua obtenção. Essencialmente, o gás de gasogênio é - composto por monóxido de carbono, gás carbônico, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio em elevada proporção, metano e outros hidrocarbonetos.

1.3.3 - Principais Elementos Constituintes de um Gasogênio.

Para haver uma melhor visualização dos ítems que se rão a seguir relacionados, são mostrados na fig.1.3.1 os diversos componentes constituintes de um gasogênio.

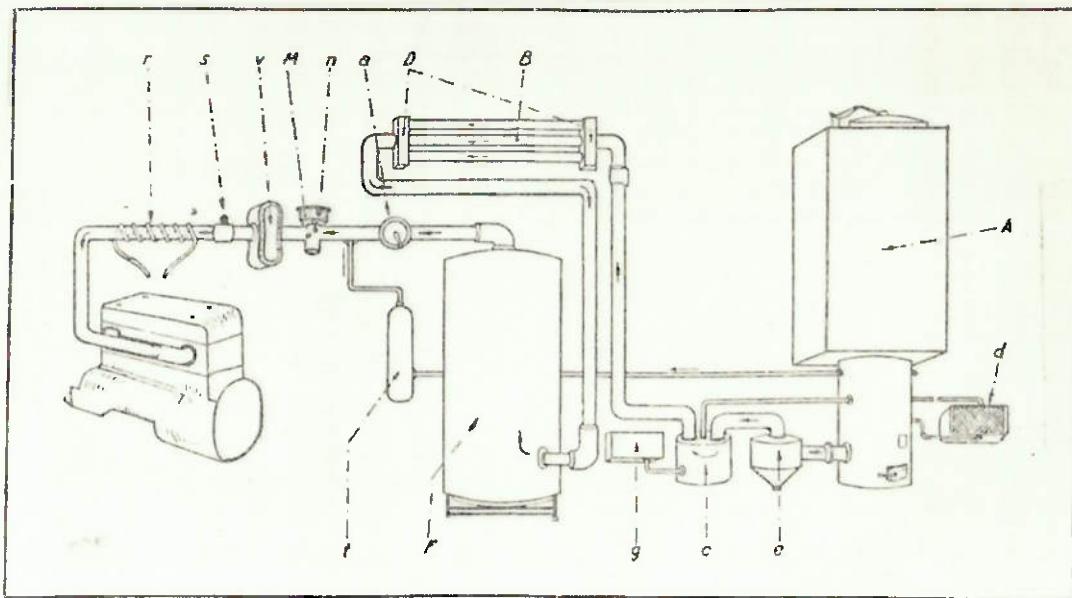


Fig.1.3.1 - Componentes de um gasogênio.

onde:

A - gerador de gás	M- misturador
B - trocador de calor	a- ventoinha
c - gerador de vapor	n- carburador auxiliar
D - câmaras de expansão	t- tubo de reserva
e - ciclone	v- compressor volumétrico
F - filtro principal	r- sistema refrigerador
g - reservatório de água	s- válvulas de segurança
	d- radiador.

1.3.3.1- Gaseificador

Tem a função de queimar o combustível sólido e produzir o gás; é utilizado também como depósito de combustível.

1.3.3.2- Ciclone

É utilizado para promover uma pré-filtragem do gás,

8

removendo as partículas maiores contidas no gás.

1.3.3.3- Resfriador.

Sua função é diminuir a temperatura do gás pobre, reduzindo consequentemente o volume do gás que sai do gerador e aumentando a massa de gás que entra nos cilindros. A redução do volume possibilita diminuir o tamanho dos tubos, filtros ou ciclones no gasogênio, e o aumento da massa é importante para o motor, uma vez que a força desenvolvida depende da quantidade de gás introduzida nos cilindros.

1.3.3.4- Filtro.

Utilizado para remover as partículas menores que estão presentes no gás gerado. Deverá ser projetado de tal forma que introduza a menor perda de carga possível no escoamento do gás.

1.3.3.5- Misturador.

É o componente que se assemelha ao carburador num motor a gasolina. Ele faz a mistura do gás produzido com o ar na proporção requerida, antes da admissão da mistura nos cilindros do motor, a fim de criar as melhores condições para a combustão do gás.

Existem também alguns elementos que podem ou não estar presentes num aparelho de gasogênio, e relacionados a seguir:

1.3.3.6- Ventilador ou Ventoinha.

É necessário para insuflar o ar no início da queima do combustível; no instante em que o motor entrar em funcionamento, a própria depressão nos cilindros promove o escoamento

do ar necessário para a queima do combustível no gerador. No caso de haver partida do motor por gasolina, a ventoinha torna-se dispensável.

1.3.3.7- Reservatório de água ou regulador de alimentação de água.

Empregado em alguns tipos de gasogênio, para controlar o fornecimento de água ao gerador, com a finalidade de localizar o fogo e principalmente aumentar o poder calorífico do gás.

1.4 - FUNCIONAMENTO DO GASOGÊNIO

Para produzir o gás no gasogênio é necessário que a queima do combustível (carvão, lenha) no gerador seja alimentado por um fluxo contínuo de ar. Assim, não é possível gerar gás suficiente na qualidade requerida se não forem satisfeitas as seguintes condições:

- a) o combustível no gerador deve estar aceso
- b) o fluxo de ar contínuo deve ser mantido através da carga de combustível
- c) a carga de combustível deve alcançar uma determinada temperatura e a zona de fogo deve atingir um determinado tamanho

Pelo que foi exposto acima, pode-se concluir que um motor de combustão interna, equipado com gasogênio, não pode ser posto em funcionamento imediatamente se o combustível no gerador estiver frio. Para solucionar esta dificuldade, dois métodos podem ser empregados:

- (1) Colocar uma ventoinha de acionamento manual ou elétrico, a fim de fornecer à câmara de combustão o fluxo de ar necessário. Este, por sua vez, deverá ser mantido até que a câmara de combustão tenha atingido a temperatura ideal para gerar o gás na qualidade adequada;
- (2) Forçar a admissão de ar no gerador, resfriadores e filtros colocando o motor em funcionamento pelos meios normais (isto é, partida à gasolina utilizando-se o carburador). Posto o motor a funcionar com gasolina, alguns minutos depois o gerador terá produzido gás na quantidade e qualidade desejadas para acionar o motor por si só, dispensando então o uso da gasolina.

Uma vez aceso o combustível no gerador, a zona de fogo aumenta em volume até ocupar parte do espaço compreendido entre a entrada do ar e a saída do gás, as quais poderão ser localizadas em várias posições no gerador (como será explicado adiante). Quando a corrente de ar atinge a zona de fogo, o oxigênio do ar entra imediatamente em combinação química com a parte de combustível que se encontra perto da entrada de ar e transforma-se em dióxido de carbono (gás inerte e não combustível). O dióxido de carbono é então forçado através da zona de fogo na parte mais distante da entrada de ar e aí se transforma em monóxido de carbono, graças à elevada afinidade química do carvão - incandescente com o oxigênio.

Este gás formado, além de possuir em suspensão muitas partículas e substâncias prejudiciais ao bom funcionamento e conservação do motor, tem uma temperatura na saída elevada - (varia de 400 °C a 600 °C). Desta maneira, o gás deverá ser resfriado e purificado para só então ingressar nas câmaras de combustão dos motores.

A refrigeração do gás se faz ou em trocadores tubulares ou em câmaras de expansão, isto é, caixas espaçosas nas quais o gás perde temperatura ao se expandir. Em ambos os casos, o gás começa a ser depurado, uma vez que no resfriamento se condensa parte do vapor de água em excesso, também poderá ser retido uma grande porcentagem de alcatrão.

Nos ciclones e filtros o gás será desprovido de suas impurezas tais como ácido acético, alcatrão, partículas de carvão e diversos produtos voláteis.

Finalmente, o gás passará pelo misturador, e será misturado com ar nas mesmas proporções (volume de gás igual ao volume de ar necessário para sua perfeita combustão).

1.5 - COMPONENTES DO GASOGÊNIO

A seguir serão descritos, de modo mais detalhado os principais subsistemas do aparelho gasogênio.

1.5.1 - Gaseificadores

1.5.1.1 - Química do processo.

O gás de gasogênio é formado pela combustão parcial da biomassa sólida em um reator de leito selado de fluxo vertical no qual o oxigênio ou ar para combustão atravessa o leito de baixo para cima, de cima para baixo ou transversalmente.

A direção e o sentido do fluxo do gás define os gaseificadores como fluxo ascendente, fluxo descendente ou fluxo cruzado.

O processo é chamado "gaseificação" pois ele transfere a maior parte da energia química do combustível sólido para a fase gasosa.

As principais vantagens de se usar ar ao invés de oxigênio puro no processo são:

- (a) Reduzir a temperatura da reação, portanto pode-se utilizar no projeto materiais de custo menor;
- (b) Facilitar o controle do processo.

O nitrogênio reage com o oxigênio e forma óxidos - dentro do gaseificado, mas somente em quantidade bem limitada (da ordem de partes por milhão). Ele pode, portanto, ser visto como um diluente inerte que reduz a sensibilidade da temperatura da reação com a variação do fluxo de gás. No entanto, é óbvio que o gás produzido com o uso de ar tem um poder calorífico menor que o gás produzido com o uso de oxigênio.

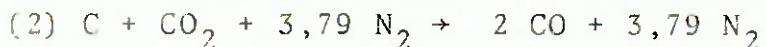
fico menor pela sua parcela de nitrogênio.

No processo de conversão, ocorre a reação de combustão (1), a qual supre de calor as zonas vizinhas do reator. O carbono constitui o elemento de maior proporção na alimentação e a reação principal é:



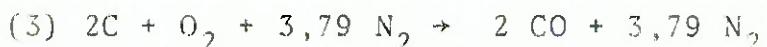
. Reação exotérmica que produz 395.400 kJ por kg mol de carbono.

O dióxido de carbono formado é reduzido na presença de carvão incandescente; mais de 90% do CO_2 é reduzido a CO em temperaturas acima de 900 °C.



. Reação endotérmica que absorve 172.000 kJ por kg mol de carbono.

A reação principal que é desejada no leito de reação é:



. Reação exotérmica que produz 223.300 kJ cada 2 kg mol de carbono.

Em condições de conversão totalmente favoráveis, a composição do gás formado, baseada nas equações acima e assumindo um leito de carvão, deveria ser 34,5% de monóxido de carbono e 65,5% de nitrogênio em volume. O poder calorífico

do gás então formado é 4359 kJ/m^3 nas condições normais de temperatura e pressão (C N T P). Baseado nisto, o calor contido em 2 kgmol de carbono é 790.800 kJ e destes, 223.300 kJ é emitido como calor sensível (reação (3)). Consequentemente 567.500 kJ são utilizados no gás produzido como calor latente de 5,79 kg mol de gás (reação (2)). A eficiência potencial do gás frio é aproximadamente 72%.

O gás quente possui parte do calor emitido na reação (3) e, portanto, na prática, a eficiência do gás quente é bem maior. Portanto o processo é particularmente eficiente quando o gás é para ser usado como uma fonte de calor.

$$\text{EFICIÊNCIA DO GÁS QUENTE} = \frac{\text{CALOR LATENTE} + \text{CALOR SENSÍVEL}}{\text{CALOR TOTAL DO COMBUSTÍVEL SÓLIDO}}$$

A injeção de água no reator, pela simples introdução na alimentação ou pela injeção direta de vapor na zona de reação e/ou aumentando a umidade do ar de entrada, pode aumentar o poder calorífico dos gases resultantes pela ocorrência da equação (4) abaixo.

Numa função importante da zona de combustão é fazer subir a temperatura da zona de reação a fim de promover a reação carvão + vapor que tem uma alta energia de ativação. Esta reação exige temperaturas acima de 900°C .



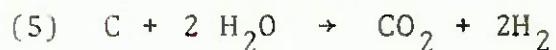
- Reação endotérmica que absorve 130 000 kJ por kg mol de carbono.

15

Este procedimento é denominado "gaseificação úmida" e tem ainda a vantagem de diminuir as temperaturas na vizinhança do centro da reação e reduzir a formação de clinker.

A reação (4) é muito importante na geração do gás - de gasogênio pois ela pode enriquecer o gás com hidrogênio que tem um alto poder calorífico.

A outra reação com carvão + vapor ocorre a temperaturas mais baixas, na faixa de 500 a 600 °C.



. Reação endotérmica que absorve 88.000 kJ por kg mol de carbono.

Numa outra reação que ocorre no gaseificador, com excesso de vapor, é escrita abaixo. Ela deve ser evitada na gaseificação, pois reduz a eficiência do gás frio.



. Reação exotérmica que produz 42.000 kJ por kg mol de CO.

Como pode ser visto nas equações acima, a presença de água na alimentação do combustível afeta a qualidade do gás produzido e a eficiência do processo de conversão. Isto se aplica também aos grupos hidroxila presente em outros componentes da biomassa.

Em unidades onde se pretende investir pouco inicialmente, a opção é a "gaseificação seca", pois a presença de água no leito de reação acarreta problemas como o controle das

16
quantidades introduzidas e outras complicações práticas. Quando se usa madeira, turfa ou outros resíduos não carbonizados, há uma suficiente geração interna de vapor. Água em excesso - produz um gás de pior qualidade como mostra a equação (6).

Outros fatores que afetam a gaseificação são a velocidade do ar, espessura da zona de reação, tamanho das partículas e a composição química do combustível sólido.

No projeto do processamento total do gás, devem ser previstos alguns importantes tratamentos, como por exemplo a filtragem do gás antes do uso no motor de combustão interna. Outro fator que deve ser levado em conta, é que o monóxido de carbono que sai da zona de redução deve ser resfriado rapidamente abaixo de 600 °C pois sua decomposição em fuligem predomina a altas temperaturas. Este resfriamento dos gases quentes reduz os depósitos de partículas.

1.5.1.2 - Operação do Motor.

O rendimento térmico teórico de um motor de combustão interna é dado pela expressão:

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{1}{r_v} \right)^{k-1}$$

onde: r_v = taxa de compressão

$$k = \frac{C_p}{C_v} = \text{expoente isoentrópico}$$

A curva obtida do rendimento térmico em função da taxa de compressão mostra que o rendimento aumenta com maiores taxas. Entretanto, gráficos basados na eficiência global observadas em ensaios de motores mostram que a curva de eficiência tende a horizontal em taxas de compressão de 12:1. Tentati

vas de aumentar a taxa de compressão nos motores funcionando - com gás resultaram em detonação, ou seja, quando a mistura de gases queima expontaneamente, tem lugar uma onda de choque que ao atingir as paredes do cilindro em alta velocidade provoca - um ruído característico, a "batida de pino". Este fenômeno deve ser evitado pois causa funcionamento irregular, perda de potência, além de poder fundir o motor. Estes problemas são superados com a adição de agentes anti-detonantes, o que é difícil de ser feito em combustíveis gasosos.

Estudos sobre o efeito do aumento da taxa de compressão, em motores usando gás de gasogênio de carvão vegetal, resultaram nos seguintes ganhos de eficiência:

TABELA 1.5.1

aumento na r_v	ganho de eficiência
5:1 para 6:1	8%
6:1 para 7:1	6%
7:1 para 8:1	4%

A composição do gás é bastante importante na performance do motor. A presença de um gás inerte como o nitrogênio reduz a velocidade de chama, diminuindo a probabilidade de detonação. Já o hidrogênio, que tem uma altíssima velocidade de chama, tende a promover a detonação. Este ponto é importante, pois o "gás de madeira" é mais rico em hidrogênio que o "gás de carvão" sem alimentação com vapor, necessitando ser usado em motores com taxas de compressão mais baixa, especialmente em motores que usam a mistura gás de gasogênio e diesel.

Outro aspecto a ser levado em conta é que, com uso do gás de gasogênio como combustível, o ponto de ignição do

motor precisa ser avançado em relação ao ponto do motor utilizando combustível fóssil. Com o gás produzido a partir de carvão vegetal, o ponto da faísca pode necessitar de um avanço de até 25° antes do ponto morto superior. Com o uso de gás a partir de madeira, ou carvão + vapor, o avanço pode ser menor devido às maiores porcentagens de hidrogênio (ver tab.1.5.2).

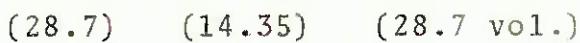
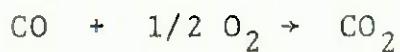
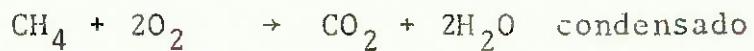
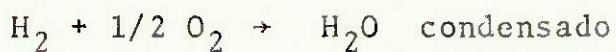
TABELA 1.5.2
COMPOSIÇÃO DO GÁS DE GASOGÊNIO A PARTIR DE CARVÃO E MADEIRA

	Gás de Carvão Típico * (%)	Gás de Madeira Típico ** (%)
CO ₂	3,1	9,5 - 9,7
C _x H ₄	0,1	0 - 0,3
O ₂	1,3	0,6 - 1,4
CO	28,7	20,5 - 22,2
H ₂	3,8	12,3 - 15,0
CH ₄	0,2	2,4 - 3,4
N ₂	65,0	50,0 - 53,0
PODER CALORÍFICO INFERIOR	5552 kJ/m ³	4.105 kJ/m ³

FONTE: * Forest Products and Fuel Technology Seccion, T.P.I.

** Hersefield and Williams, 1977.

A variação da composição do gás afeta a quantidade de ar requerida para a combustão no motor. O oxigênio requerido na combustão do gás do gasogênio de carvão (ver tab.1.5.2) é calculado pelas equações:



A quantidade estequiométrica de oxigênio para as reações, assumindo uma eficiência da reação de 100%, é portanto:

$$(1,9 + 0,4 + 14,35 - 1,3) = 15,35 \text{ moles de oxigênio}$$

O nitrogênio associado ao ar insuflado com 15,35 moles de oxigênio é

$$15,35 \times 3,79 = 57,74 \text{ moles.}$$

O poder calorífico do gás de gasogênio analisado, nas CNTP é 4 105 kJ/m³.

A mistura ar + gás de gasogênio tem o poder calorífico de:

$$\frac{4105 \times 100}{100 + 73,09} = 2 385 \text{ kJ/m}^3$$

As misturas ar + gasolina usadas nos motores de ciclo Otto possuem um p.c.i. de aproximadamente 3.500 kJ/m³.

Baseado neste valor, a operação de motores de ciclo Otto com gás de gasogênio tem uma queda na potência indicada, em comparação aos motores à gasolina, chegando a um valor de - 68% da potência indicada desta. ($\frac{2\ 385}{3\ 500} \times 100$)

Este valor depende bastante da eficiência da combustão e da qualidade do gás.

A eficiência de conversão total da potência indicada para a potência no eixo, com gás de gasogênio, é aproximada mente 18%. Este valor é obtido baseando-se em uma eficiência de gás frio de 72% (ver ítem Química do Processo) e um rendimento térmico do motor de ciclo Otto de 25%.

Esta eficiência pode ser aumentada por uma recuperação parcial do calor sensível perdido no processo, fazendo-se o pré-aquecimento do ar ou do vapor na alimentação como discutido antes.

1.5.1.3 - Granulometria.

Em reatores de leito selado, o tamanho da partícula influí sobremaneira nas reações com combustíveis como carvão vegetal, resíduos não queimados ou carvão mineral. O tamanho ideal do carvão vegetal, por exemplo, varia em uma larga faixa dependendo da geometria do gaseificador e condições de operação. De modo geral, grandes granulometrias devem ser evitadas pois elas formam vazios que diminuem a eficiência de conversão. O gás passa pelos canais formados em um tempo de contato reduzido. Por outro lado, o tamanho não deve ser por demais reduzidos pois causaria uma excessiva resistência à sucção do motor.

Um trabalho feito na Austrália na década de 40 nos dá uma classificação sobre o tamanho padrão de carvão vegetal

a ser usado em gasogênio. Ele especifica que o carvão selecionado deve passar através de uma peneira padrão de 3,175 cm de abertura (lado do quadrado) e ficar retido em outra com abertura de 0,95 cm. Isto se a instalação for para veículos, que são unidades relativamente pequenas. Para maiores instalações, tamanhos maiores podem ser usados.

As principais vantagens do uso de carvão vegetal como combustível de gaseificados, particularmente em pequena escala, são que a qualidade do carvão é razoavelmente constante e que seu processamento a partir da madeira é bastante simples, assim como a briquetagem na granulometria desejada.

Com o uso de madeira, a preparação de pedaços adequados para o gaseificador é mais difícil em pequena escala, pois com uma produção maior como em uma indústria se justificaria a aquisição de uma máquina para cortar a madeira.

1.5.1.4 - Tipos de Gaseificadores.

Existem três tipos básicos de gaseificadores: fluxo ascendente, fluxo descendente e fluxo cruzado. Nestes três tipos o material combustível chega gradualmente a zona central - onde as reações de combustão e redução são rápidas.

(a) Fluxo ascendente.

No reator de fluxo ascendente as correntes de ar e vapor chegam a zona central pela base do aparelho. Nesta zona as temperaturas chegam a 900 °C ou mais. Com unidades de uso industrial de grande porte, a adição de vapor ajuda a reduzir as temperaturas na zona central e prolongar a vida do equipamento. Os gases produzidos na zona de combustão (zona central) passam através das zonas de redução, destilação e secagem, -

respectivamente, como mostra a fig. 1.5.1

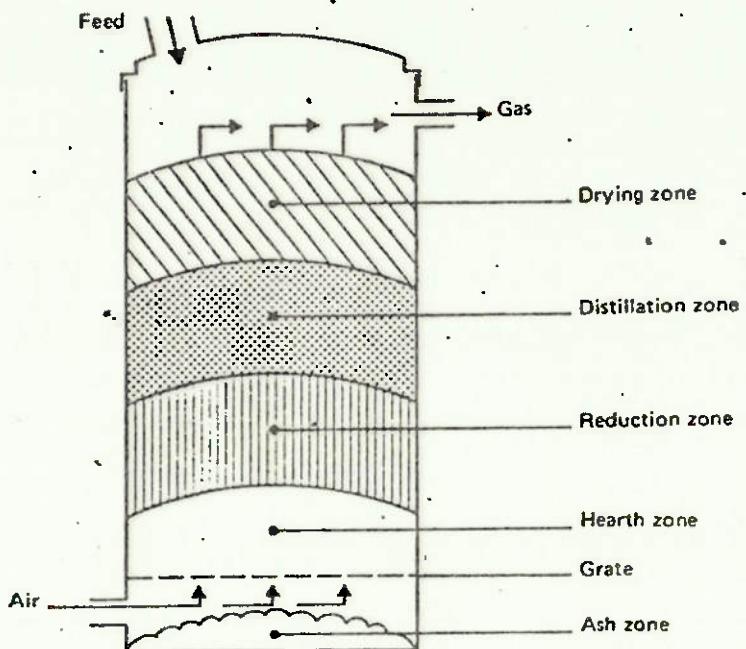


Fig. 1.5.1 - Gaseificador de fluxo ascendente.

Este tipo de processo deu origem ao reator de fluxo ascendente híbrido ou gaseificador de dois estágios. Estes modelos funcionaram por mais de 20 anos. Geralmente, o gás formado pode sair do gaseificador em dois níveis:

- Da zona de gaseificação, na área de redução, o que resulta o chamado "gás limpo".
- Da região de destilação ou secagem, o que produz "gás de topo". A temperatura deste gás é controlada ajustando a proporção de "gás limpo" do reator.

O gás de topo flui para um ciclone com alta eficiência para alcatrão e o gás limpo é canalizado para um ciclone - próprio pra pó. As duas correntes são então combinadas, e o

calor do gás limpo vaporiza o alcatrão e o óleo misturados ao gás de topo. A temperatura resultante do gás após a mistura é por volta de 350 °C.

Este método permite ao gás produzido ter qualidade suficiente sem a necessidade de resfriamento para a retirada do material volátil. Este gás pode então ser distribuído para uso sem o risco de bloqueio nos condutos.

(b) Fluxo descendente.

Este sistema de gaseificação foi desenvolvido com o objetivo de converter o alcatrão formado em produtos gasosos. Isto tem particular importância quando os gases são conduzidos por tubos relativamente longo. Também é relevante para gases que alimentam motores de combustão. O reator, neste caso, possui uma zona de destilação e de secagem logo acima da zona central, com a zona de redução situada abaixo, como mostra a fig. 1.5.2.

Os principais tipos para queima de fluxo descendente, usados para queima de madeira, turfa, foram os reatores Imbert e Roth, desenvolvidos na Alemanha e Suiça, respectivamente. Estas unidades operam com boa eficiência e possuem um afunilamento próximo à zona central. Este formato aumenta a velocidade do ar nesta região, elevando a temperatura de operação rapidamente e facilitando a conversão do alcatrão em componentes gasosos. O gás produzido possui, portanto, um baixo teor de alcatrão.

Os sistemas com fluxo descendentes foram desenvolvidos especificamente para usar madeira e outros resíduos não queimados. Com estes combustíveis, a porcentagem de hidrogênio no gás é maior que a obtida utilizando-se carvão, conforme falado anteriormente.

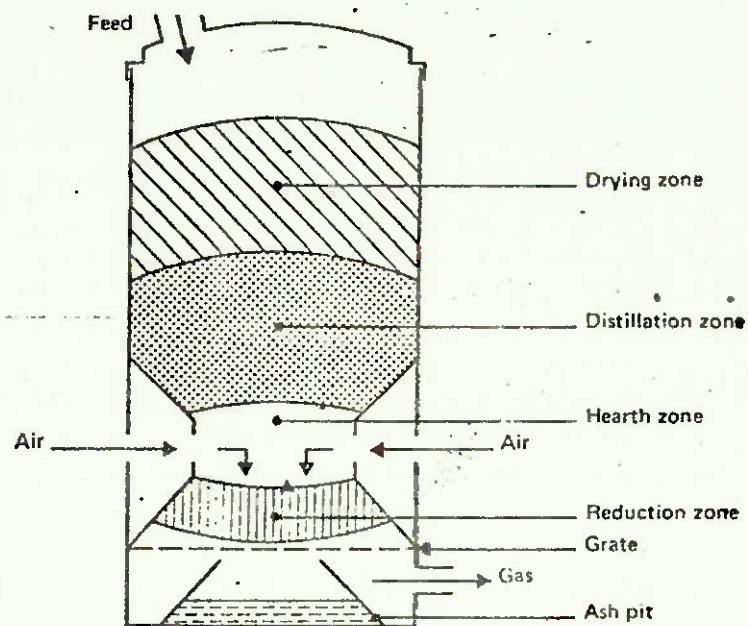


Fig.1.5.2 - Gaseificador de fluxo descendente.

A principal vantagem do fluxo descendente não é sua adequação aos combustíveis não carbonizados ou a redução de alicerçado nos produtos, mas o seu menor tempo de contato. Portanto, esse sistema possui uma melhor resposta para variações da demanda de gás, as quais ocorrem frequentemente em motores de veículos. Entretanto, são necessários tamanhos mais uniformes de combustível. A operação com pedaços acima de 15 cm não é recomendada nos gaseificadores dos tipos Imbert e Roth. Alguns gaseificadores de fluxo descendente não são adequados ao uso de pedaços com menos de 1,5 cm e acima de 5 cm. Estas unidades operam com temperaturas menores que as com fluxo cruzados e não são próprios para pequenas vazões de gás.

(c) Fluxo cruzado.

Neste sistema o fluxo de ar e gás é transversal ao gaseificador, embora não necessariamente no plano horizontal. A temperatura de operação nestes aparelhos é bastante alta e suas zonas de combustão e redução são restritas pelo uso de um bocal de tomadas de ar com diâmetro pequeno, conforme mostra a fig.1.5.3. Temperaturas até 2 000 °C são obtidas e um sistema de arrefecimento para o ferro fundido e as tubulações é essencial.

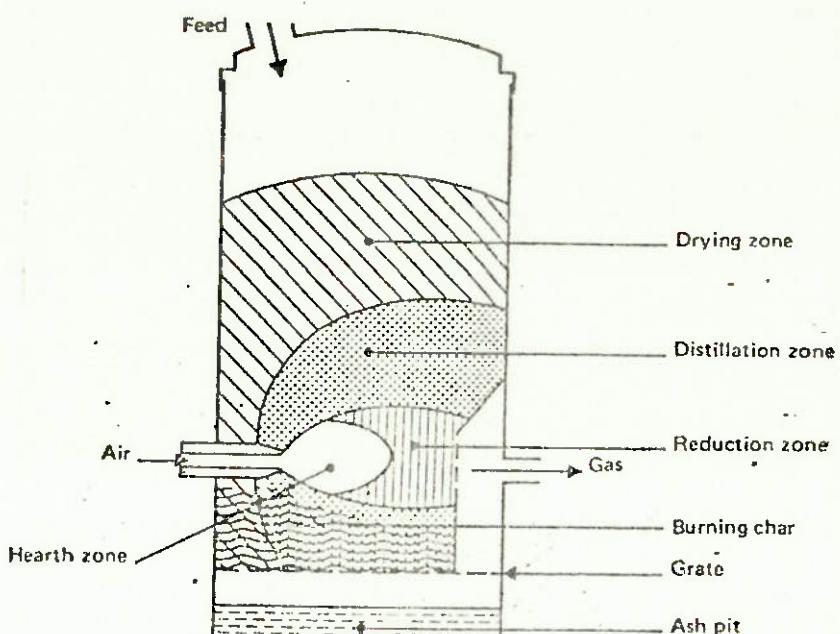


Fig.1.5.3 - Gaseificador de fluxo cruzado.

Considerando seus baixos tempos de contato é importante que combustíveis com pouco alcatrão sejam preferíveis, assim como partículas com tamanhos de 0,6 a 1,0 cm de diâmetro. O material combustível próximo às paredes atua como uma proteção térmica para a radiação. Com o uso de carvão vegetal,

o gaseificador não necessita de uma guarnição refratária. A região mais sujeita a alta temperaturas é a extremidade do bocal (cetilha), onde velocidades do ar acima de 80 m/s são usadas.

Estes tipos de gaseificadores são caracterizados por sua simplicidade de construção e partida rápida, sendo portanto adequados na alimentação de pequenos motores onde uma resposta rápida é alcançada com flutuações na vazão de gás. O uso de resíduos vegetais em sistemas de fluxo descendente podem causar variações na qualidade do gás se há flutuações na demanda. Isto se evidencia no caso de baixas vazões, quando a umidade tende a extinguir as reações desejadas e provocar menores - temperaturas.

A seleção do tipo de gaseificador nos diversos processos vai depender do local em que o gás será utilizado, da escala de operação, e do combustível disponível.

1.5.2 - Filtros.

1.5.2.1 - A necessidade da filtragem.

Três fatores concorrem para o desgaste dos cilindros, anéis, válvulas, etc.:

- a) a abrasividade das partículas sólidas contidas no gás
- b) a corrosão produzida por agentes químicos dos gases e das impurezas
- c) o atrito causado pelo contato direto entre as partes móveis

62

Sendo assim, não é a abrasão causada por impurezas o único fator de excessivo desgaste nos cilindros, mas principalmente a ação corrosiva.

O gás pobre, tal como é fornecido pelo gerador, é um gás impuro, que só deve ser utilizado depois de um tratamento adequado. Contém, além das conhecidas porcentagens de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogênio (H₂) nitrogênio (N₂), uma grande variedade de dispersóides mecânicos (que serão definidos a seguir), bem como de substâncias voláteis, suscetíveis de condensação e originando dispersóides condensados.

OBS:- Dispersóides é o nome genérico que se dá às substâncias dispersas nos gases. São dispersóides mecânicos aqueles provenientes da desagregação de um sólido (poeiras) ou da pulverização de um líquido (gotículas). São dispersóides condensados as partículas provenientes da condensação de substâncias em estado de vapor, fumos quando sólidos e névoas quando líquidos. Os diâmetros das partículas dos dispersóides mecânicos variam de 2000 a 1 micron (milésimo de milímetro), ao passo que os diâmetros das partículas dos dispersóides condensados variam de 1 a 0.003 microns.

Entre os dispersóides mecânicos de gás pobre encontra-se pó de carvão, cinzas, compostos silicosos e outros encontrados no combustível. Entre os dispersóides condensados figuram substâncias silicosas e outras provenientes da escória do carvão, água, compostos de nitrogênio, etc. Embora muitos desses produtos sejam inertes, alguns são corrosivos e outros abrasivos. A qualidade do gás e a quantidade de suas impurezas é função da qualidade do combustível, o que justifica uma apurada escolha deste último. Desta maneira, a escolha do melhor dispositivo para fazer a depuração do gás está vinculada ao -

combustível empregado. Por exemplo, a filtragem através de telas ou feltros é inadequada para gases resultantes da queima da lenha, pois o alcatrão em suspensão tapa rapidamente os filtros de pano ou malha metálica; torna-se pois necessário fazer estes gases passarem previamente através de caixas providas de chicanas cuja função é reter o alcatrão. No caso do carvão vegetal, já as chicanas não são obrigatórias. Geralmente, utiliza-se os ciclones para reter as partículas maiores, e os filtros de pano (filtro ou materiais sintéticos) para reter as menores.

1.5.2.2 - Processos de filtragem.

Os processos de se fazer a filtragem do gás podem então ser divididos da seguinte maneira:

- a) aproveitando-se a inércia das partículas mais pesadas do que o gás, quer seja pela ação da gravidade, quer seja pela ação da força centrífuga quando o gás recebe um movimento de redemoinho;
- b) através da tendência que tem o pó de aderir as superfícies úmidas ou mesmo líquidas.
- c) utilizando-se da permeabilidade de certos materiais com relação ao gás, e que evitam a passagem de partículas até um certo limite.

1.5.2.3 - Tipos de filtros.

Desta maneira, pode-se selecionar os principais tipos de dispositivos de filtragem do gás:

- câmara de expansão ou decantador
- filtro de lavagem com água
- filtro de banho de óleo
- filtro de impacto de água ou óleo
- ciclone
- filtro de tela ou pano
- scrubber
- filtro de segurança
- depuradores de ação química.

1.5.2.3.1 - Câmara de expansão ou decantadores.

A finalidade das câmaras de expansão não é só de refrigeração do gás, como também de filtragem e purificação, uma vez que permite a condensação de vapor e matérias voláteis em seu interior.

Estas câmaras devem em primeiro lugar eliminar o vapor de água para que não haja obstrução nos filtros posteriores. Convém lembrar que o vapor de água será mais abundante - nos gasogênios que funcionarem com lenha. A eliminação é feita por simples condensação, obtida pela expansão e refrigeração - do gás na câmara, na qual se forma uma névoa de finíssimas gotas que precipitam sobre as paredes.

As câmaras de expansão podem possuir em seu interior uma série de divisões ou chicanas (ver fig.1.5.4) metálicas com aberturas distribuídas alternadamente, cuja função é obrigar os gases a mudar constantemente de direção, de maneira que se facilita a precipitação das gotas de água contra as divisões.

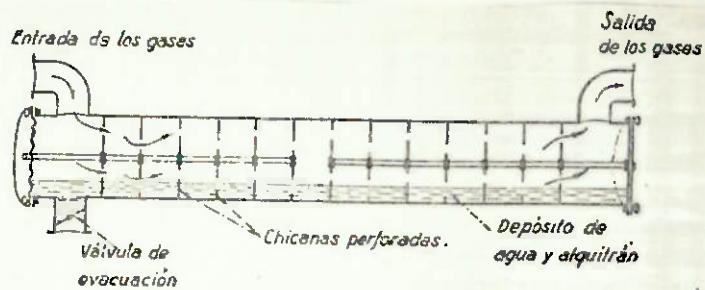


Fig.1.5.4 - Câmaras de expansão com chicanas.

O alcatrão existente também se adere em maior ou menor quantidade no fundo da câmara. Através de uma válvula de inspeção será feita a limpeza da câmara, permitindo-se a retirada da água com os resíduos de alcatrão. Se as divisões estiverem interligadas por uma barra solidária a uma das tampas da câmara, ao extraír-se esta tampa serão retiradas todas as divisões, o que facilita muito a limpeza.

Em resumo, este sistema elimina o pó e a água atuando segundo o princípio da inércia. Primeiro, como a velocidade do gás é reduzida pela grande secção da câmara, o pó e as gotas de água se precipitam por gravidade. Depois, como o gás, ao passar pelas chicanas, se vê obrigado a mudar de direção de maneira brusca, as partículas mais pesadas não conseguem seguir seu movimento, sofrendo então uma verdadeira centrifugação, e se chocam contra as divisões, aderindo-se às paredes úmidas e ao depósito no fundo.

No caso de se empregar feixe de tubos, cada um dos tubos termina em caixas de expansão, de maneira que o gás chega e sai por orifícios dispostos de tal forma que obrigam o gás a percorrer caminho sinuoso, deixando nestas caixas parte do pó contido no gás. Este prossegue sua refrigeração nos tubos, abandonando por refrigeração boa parte de água.

1.5.2.3.2 - Filtro de lavagem com água.

A lavagem do gás é considerada uma operação conveniente para sua melhor refrigeração e limpeza, retirando-se as partículas sólidas que riscariam as paredes dos cilindros.

Basicamente são constituídas de um recipiente metálico parcialmente cheio de água e construídos de tal forma que o gás, ao entrar abaixo da superfície da água por um tubo perfurado, forme uma série de bolhas na água, expondo ao máximo a superfície de contato com a água e permitindo mais facilmente a remoção das partículas. O espaço acima da superfície da água geralmente está cheio de sisal para reter o salpique de água e evitar que esta seja carregada com gás ao tubo de saída, localizado na parte superior do tubo.

Estes filtros não são recomendados para a eliminação de alcatrão, cujas partículas são levadas ao motor, em suspensão no gás. Neste particular são inferiores aos de banho de óleo, descritos a seguir.

1.5.2.3.3 - Filtro de banho de óleo.

Compõe-se de um cilindro vertical contendo uma camada de óleo no fundo. A filtragem se faz introduzindo-se o gás num nível abaixo do nível do óleo (ver fig.1.5.5). Para facilitar a limpeza, a tampa inferior do cilindro é removível, e permite retirar o óleo já impregnado de partículas.

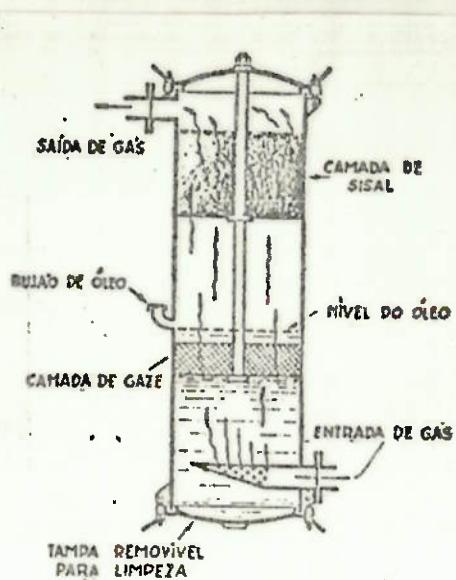


Fig.1.5.5 - Filtro a banho de óleo.

Para uma boa eficiência do filtro deste tipo, é preciso que o gás seja dividido de forma a produzir pequenas bolhas. No caso dessa bolhas serem muito grandes, serão formadas verdadeiras bolsas que atravessarão o óleo sem haver contato deste com as partículas em suspensão, que serão carregados pelo gás. Para facilitar a formação de bolhas pequenas, o gás é forçado a passar por pequenos furos no tubo de admissão que fica abaixo da superfície do óleo. Alguns filtros possuem uma camada de gaze situada acima do tubo de entrada do gás e abaixo da superfície do óleo. Sua função é reduzir o tamanho das bolhas até que seja formada uma espécie de espuma fina. Tal sistema produz um gás limpo, mas provoca resistência ao fluxo livre do gás se este entra em alta velocidade no filtro (por exemplo com o motor a altas rotações). Este método exige o emprego de uma espessa camada de sisal no filtro (situada acima do nível do óleo e abaixo do tubo de saída do gás) que tem por finalidade reter os vapores de óleo e evitar que a espuma seja

carregada pelo gás para a tubulação de saída.

O óleo empregado, para ter uma boa eficiência de retenção de partículas e se adaptar a este uso específico, deverá ter como características:

- resistência suficiente para não formar espuma excessiva
- baixa viscosidade para facilitar a formação de bolhas pequenas; ao mesmo tempo esta viscosidade não poderá ser muito baixa ao ponto de provocar uma fina neblina em vez de espuma
- boa capacidade de dissolver o alcatrão e outras matérias existentes no gás pobre
- alta resistência contra a formação de resíduos.

1.5.2.3.4 - Filtro de impacto de água ou óleo.

Consiste num recipiente parcialmente cheio de água ou óleo, onde o tubo de admissão do gás é colocado de tal maneira que o gás, ao entrar, é dirigido contra a superfície do líquido, e provoca uma certa agitação ou salpique no líquido (ver fig.1.5.6). Dependendo do tipo, coloca-se uma gaze (no caso de se utilizar água) ou palha de aço (no caso de se utilizar óleo) num nível acima do líquido, de tal maneira que a gaze ou a palha de aço se mantêm úmidos pelo salpique do fluido empregado, eliminando assim a passagem de partículas para a saída.

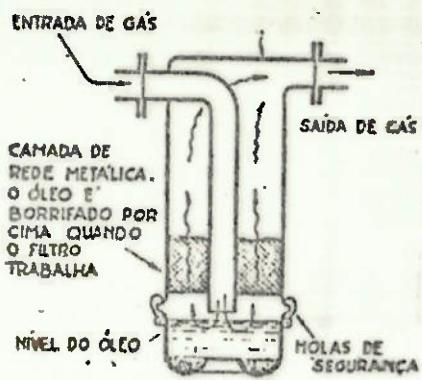


Fig.1.5.6 - Filtro de impacto a óleo.

1.5.2.3.5 - Ciclone.

Neste filtro as partículas mais pesadas são separadas do gás por centrifugação. Para tal obriga-se o gás a descrever um movimento espiral, com elevada velocidade de rotação. A força centrífuga, atuando sobre as partículas de pó relativamente mais pesadas e sobre gotas de água, os projeta do centro contra as paredes laterais do ciclone, em virtude de sua maior densidade. Como está indicado nas figs. 1.5.7 e 1.5.8, vários são os tipos construtivos. Antigamente obrigava-se o gás a descrever o movimento espiral por meio de palhetas ou superfícies helicoidais, (fig.1.5.7) o que já não é empregado atualmente. Nos projetos atuais a parte inferior do ciclone é cônica e não se utiliza mais a hélice interna, havendo assim redução de peso (fig.1.5.8). Costuma-se fazer o gás entrar pela parte superior (tangenciando as laterais) e sair pela inferior por meio de um tubo vertical no centro do filtro. A razão de se adotar tal método é que, uma vez que o gás é dirigido para a parte inferior do ciclone, evita-se a adesão das partículas nas pare-

des. Além disso, uma vez localizado o tubo de saída no centro haverá menor risco das partículas depositadas no fundo serem arrastadas com o gás para a saída. Através de um tampão na rede inferior, pode-se executar periodicamente a limpeza, retirando-se as partículas depositadas.

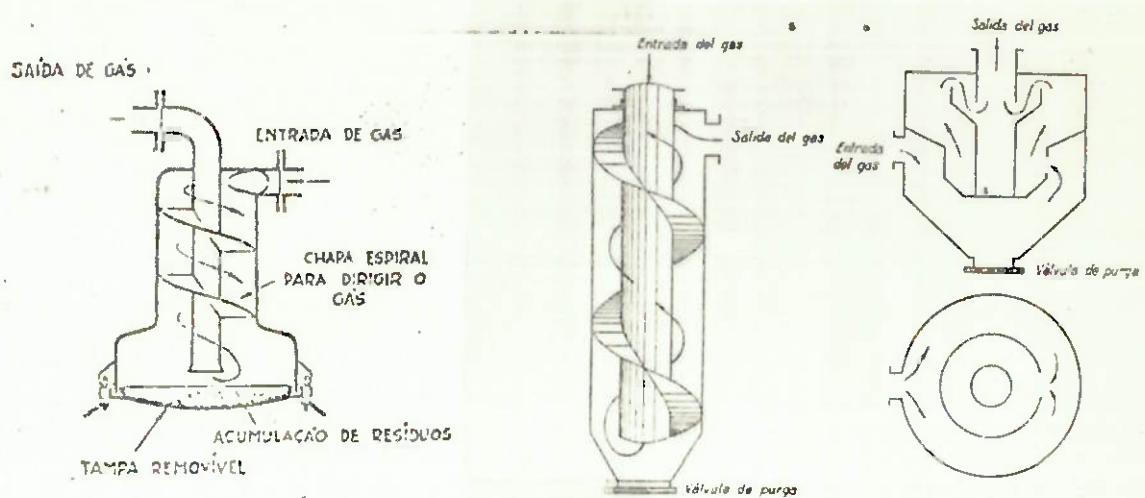


Fig.1.5.7 - Ciclones com palhetas.

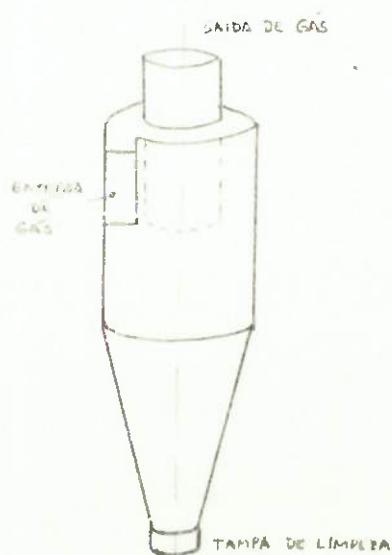


Fig.1.5.8 - Ciclone de concepção moderna.

1.5.2.3.6 - Filtro de pano ou manga.

Os filtros de tela ou pano são considerados como elementos de depuração fina, por conseguinte se prefere colocá-los após os outros elementos de depuração grossa tais como ciclones e câmaras de expansão. Pode-se empregar uma tela metálica, e antigamente utilizava-se flanela ou lã, ou outro tecido similar. A lã suporta temperaturas da ordem de 150 °C, porém é mais higroscópica que o algodão. Existem atualmente vários materiais sintéticos que suportam temperaturas mais elevadas, sem haver o perigo de se inflamarem.

A área de filtragem deve ser a maior possível, de preferência não abaixo de 1,0 m². A tela filtrante poderá ser colocada basicamente de duas maneiras: ou constituindo um único saco ou então diversos sacos dispostos paralelamente uns - aos outros, constituindo o chamado filtro de mangas (fig.1.5.9).

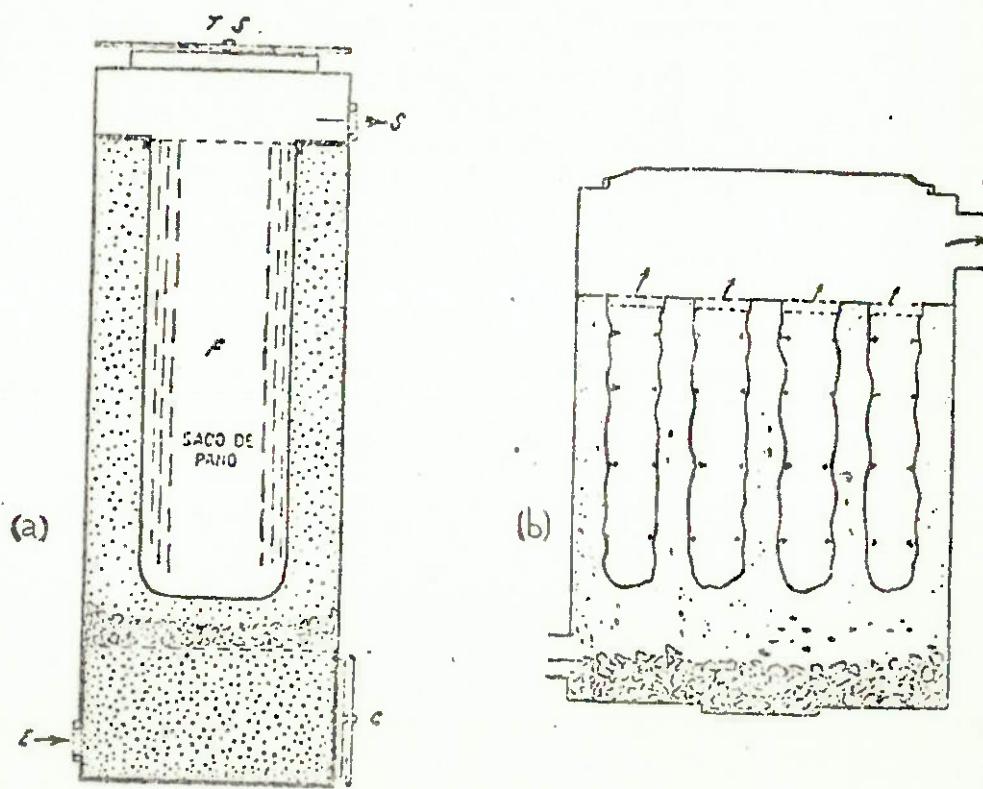


Fig.1.5.9 - Filtros de manga (a) um único saco
(b) diversos sacos.

1.5.2.3.7 - Scrubber.

Nos gasogênios destinados a funcionar especialmente com lenha, nos quais não se pode empregar diretamente as telas filtrantes para se evitar seu entupimento, se recorre aos scrubber, constituídos por uma aglomeração de fragmentos do coque de 5 a 7 centímetros de diâmetro, ou também de bronze, cortiça, bolas de vidro ou outros elementos não atacáveis pelos gases. Tais elementos se dispõem em coluna, dentro de um recipiente vertical de metal, e através do qual se faz passar o gás em fluxo ascendente (fig.1.5.10).

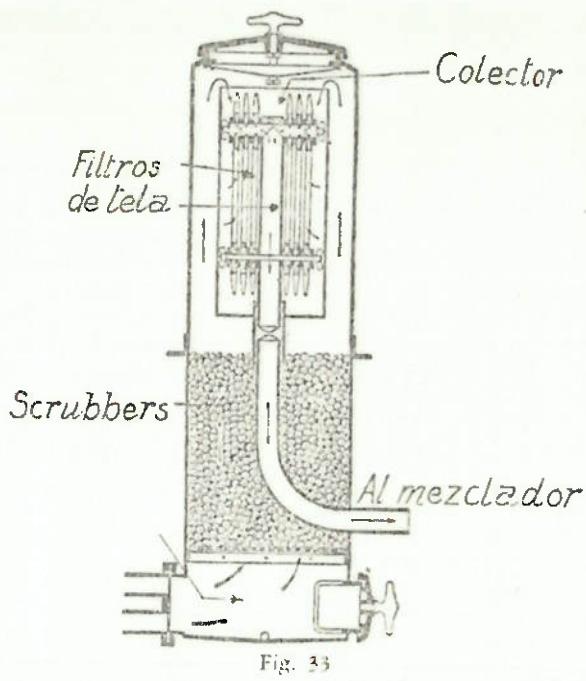


Fig.1.5.10 - Scrubber.

Logo na entrada do scrubber, como o diâmetro do recipiente é muito maior do que da canalização, as partículas sólidas não conseguem seguir o gás em seu movimento ascendente, caindo no fundo do recipiente; além disto, uma vez que a corrente de gás é obrigada a mudar constantemente de direção, por um processo de centrifugação as impurezas se separam e

aderem às superfícies dos elementos filtrantes. Esta filtragem será sensivelmente melhor se os elementos forem umidecidos constantemente por um tipo de chuveiro.

1.5.2.3.8 - Filtro de segurança.

Pode-se instalar nos equipamentos de gasogênio, intercalado no conduto que sai do último filtro, uma fina tela metálica (ou também de feltro) chamada de filtro de segurança (fig.1.5.11), cuja função é reter o pó que, por defeito nos filtros anteriores, poderia chegar ao motor e causar estragos indesejáveis nos cilindros. Esta tela é particularmente útil quando se emprega filtros de pano, os quais podem furar-se com o uso.

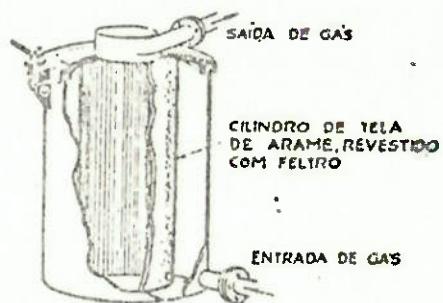


Fig.1.5.11 - Filtro de segurança.

Se o filtro de segurança entra em ação, rapidamente se cobre de pó, o que causa a obstrução na passagem do gás e consequente parada do motor. Este filtro geralmente é feito de forma cônica ou cilíndrica, disposto verticalmente dentro de uma caixa envolvente.

1.5.2.3.9 - Depuradores de ação química.

Pode acontecer, dependendo do caso, que os depuradores de ação mecânica se tornem insuficientes, devendo-se então recorrer aos depuradores de ação química. Nos gasogênios a lenha ou carvão mineral, de cujo processo se desprende maior número de impurezas que os gasogênios a carvão de lenha, o gás antes de chegar aos filtros de pano deve atravessar um depósito de substâncias químicas pulverizadas, cuja função é reter boa parte de suas impurezas mediante reações apropriadas. A composição do material empregado, assim como sua maneira de atuar como elemento filtrante, variam em função do tipo de combustível a ser queimado.

1.5.3 - Resfriadores.

1.5.3.1 - A necessidade do resfriamento.

Levando-se em conta que o gás que sai do gerador possui uma temperatura que varia entre 400 °C e 600 °C, é evidente que seu peso por unidade de volume é muito inferior ao peso que teria a uma temperatura nas condições normais. Em consequência, não só a massa de mistura a ser admitida nos motores é insuficiente, como também devido a essas temperaturas altas, o poder calorífico do gás tem seu valor reduzido. Tais fatores contribuem para que haja uma grande queda de potência no motor, o que tornaria inviável o emprego do gasogênio. Assim, o resfriamento do gás torna-se necessário não só pelo que foi acima exposto, como também possibilita a condensação de elementos prejudiciais ao motor (vapor de água, alcatrão), colaborando na purificação do gás a ser enviado às câmaras de combustão.

1.5.3.2 - Tipos de resfriadores.

Os tipos mais comuns de resfriadores empregados são:

- câmaras de expansão
- feixe multitubular
- tubo único (com ou sem aletas)

1.5.3.2.1 - Câmara de expansão.

Tal câmara trabalha no princípio da queda de temperatura do gás quando este sofre uma expansão. É um meio normalmente empregado para se obter a refrigeração de gases.

Consiste em uma câmara de seção transversal maior do que a secção dos tubos utilizados para a circulação do gás. (fig.1.5.12). Tal câmara deve ter um espaço suficiente para que os gases que se dirigem a seu interior percam velocidade e temperatura ao se expandirem. Graças à sua maior área de seção transversal, não possui o inconveniente (que possuem os resfriadores de feixe multitubular) de obstrução quando se empregam carvões com muito alcatrão, uma vez que a câmara de expansão serve também como condensador de vapor de água e alcatrão, que são facilmente retidos e retirados em bocas especialmente feitas para tal fim. Devido à sua construção, são leves, o que os torna de ótima aplicação nos veículos.

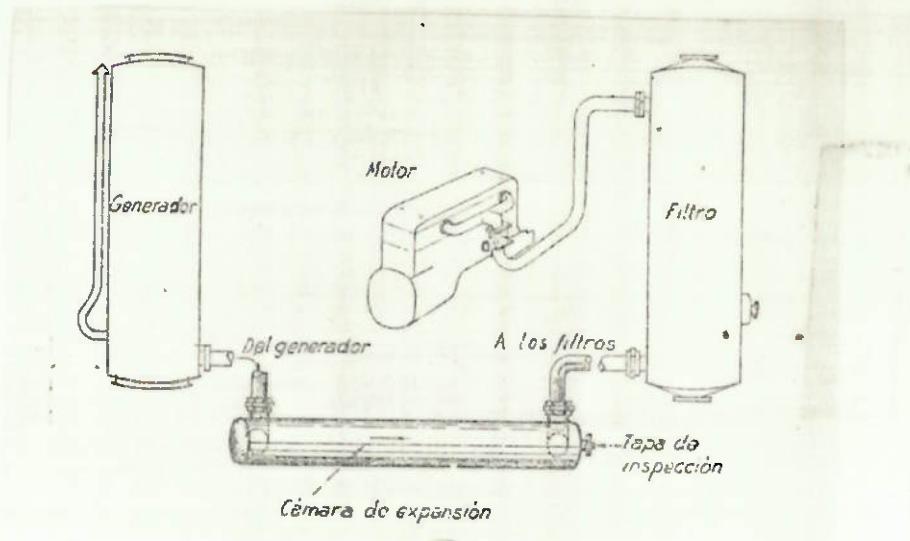


Fig.1.5.12 - Câmara de expansão.

1.5.5.2.2 - Feixe multitubular.

Neste tipo de refrigerador o gás se dirige a uma série de tubos metálicos, cujo número é função da área necessária para o resfriamento. Os tubos se dispõem paralelamente uns aos outros, formando um feixe cujos extremos se apoiam numa caixa distribuidora e outra coletora (ver fig.1.5.13), que têm função análoga à da câmara de expansão, ou seja, também atuam como elementos de refrigeração e filtragem. Tal feixe deve estar situado em local de boa ventilação quando se coloca o veículo em movimento.

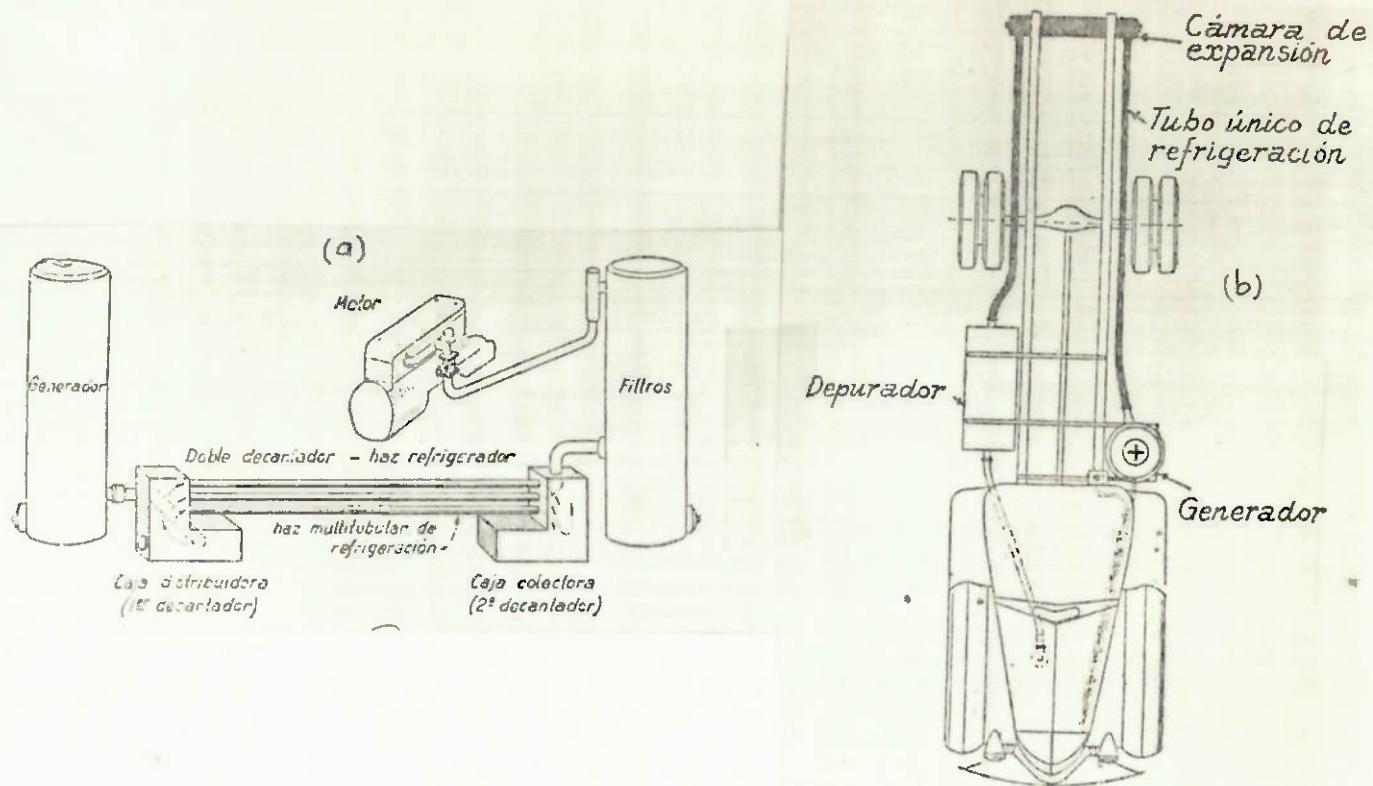


Fig.1.5.13 - Resfriador multitubular (a) e unitubular (b)

Uma vez que se empregam vários tubos, a soma das seções de cada tubo é bem elevada, no que resulta uma velocidade de passagem dos gases suficientemente reduzida para assegurar uma eficiente troca de calor com as paredes dos tubos. Obtém-se, assim, uma dupla refrigeração dos gases, isto é, - por contato nos tubos e por expansão nas caixas distribuidora e coletora.

Para se obter bons resultados, indica-se na prática os valores de 2 a 3 cm para o diâmetro interno dos tubos, e um comprimento total de aproximadamente 12 metros. O comprimento dos tubos poderá ser sensivelmente diminuído se forem colocados aletas externas. Esta diminuição será função do tamanho, espaçamento e material das aletas. Convém ressaltar, no entanto, que esta não é a melhor solução do ponto de vista econômico.

Os refrigeradores de feixes tubulares são de preço mais elevado, e requerem uma manutenção permanente devido ao risco de obstrução pelas impurezas arrastadas pelo gás.

1.5.3.2.3 - Refrigerador unitubular.

Consiste num único tubo de grande comprimento e de diâmetro elevado, aproximadamente 7 ou 8 cm, e que se dispõe ao longo dos veículos quando assim o permitir. Em ônibus e caminhões normalmente está situado em volta do chassi e próximo às longarinas (ver fig.1.5.13), de tal maneira que a tubulação proveniente do gerador se dirige até à parte posterior do veículo, onde se localiza uma câmara de expansão. Desta maneira se obtém uma refrigeração mais acentuada do que se usassemos um único tubo (isto é, sem a câmara de expansão). A superfície total em contato com o ar é maior do que no feixe multitubular, assim como a refrigeração obtida é também superior. Ambos refrigeradores (feixe multitubular ou tubo único) são de ação mais enérgica do que a câmara de expansão.

1.5.4 - Misturador.

O misturador, substituto do carburador nos veículos a gasogênio, tem a função de misturar uma determinada quantidade de gás pobre com certa porção de ar, a fim de que a combustão se processe de maneira rápida e completa.

De construção muito mais simples que um carburador, o misturador dispensa o uso de dispositivos tais como enriquecedor de mistura para altas e baixas rotações, parafusos de regulagem (de operação delicada), injetor de combustível para acelerações, etc. Estas vantagens são obtidas uma vez que ambos os fluidos a serem misturados são de origem gasosa, motivo pelo qual não é necessária a gaseificação preliminar de um dos fluidos, como ocorre com a gasolina.

A proporção de mistura deve estar em relação com a potência exigida pelo motor. De outra parte, a relação ar-gás

necessária pode por sua vez variar em função da velocidade, - carga transportada, natureza do terreno e necessidade momentânea (transitórios) exigidos pelo serviço. Mas normalmente a relação aproximada de mistura é de uma parte de ar para uma parte de gás (em volume), levando-se já em conta excesso de ar para a combustão completa nos cilindros.

Em certos misturadores a regulagem da mistura se faz semi ou automaticamente. Em caso contrário o condutor deverá atuar sobre as duas borboletas para obter a melhor mistura.

De maneira geral o misturador é constituído de um corpo que reúne condutos de passagem de forma tal que o conjunto apresenta três aberturas (fig.1.5.14): uma delas é destinada a receber o gás proveniente do gerador, a outra destinada a receber o ar que será misturado com o gás e uma terceira para permitir a saída da mistura para o motor.

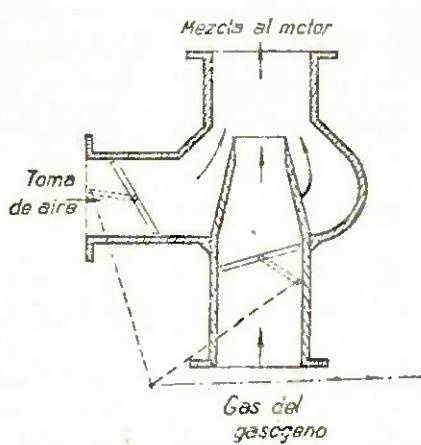


Fig.1.5.14 - Esquema de um misturador.

Os misturadores possuem formas as mais variadas, mas em todos eles o princípio de funcionamento é o mesmo. Em alguns modelos (Solex) o ar para a combustão ingressa por -

uma canalização perpendicular ao conduto do gás, e em outros, ambos os condutos são paralelos, e faz-se a mistura através de uma parede porosa.

Nos misturadores, tanto a seção de conduto do gás - como do ar se encontram regulados por borboletas que permitem obter a mistura ideal. Em misturadores modernos são colocados dispositivos de atuação automática ou manual que efetuam a mistura de acordo com as exigências.

Para exemplificar, é mostrado a seguir (fig.1.5.15) um misturador SOLEX, onde estão indicadas as funções das várias borboletas.

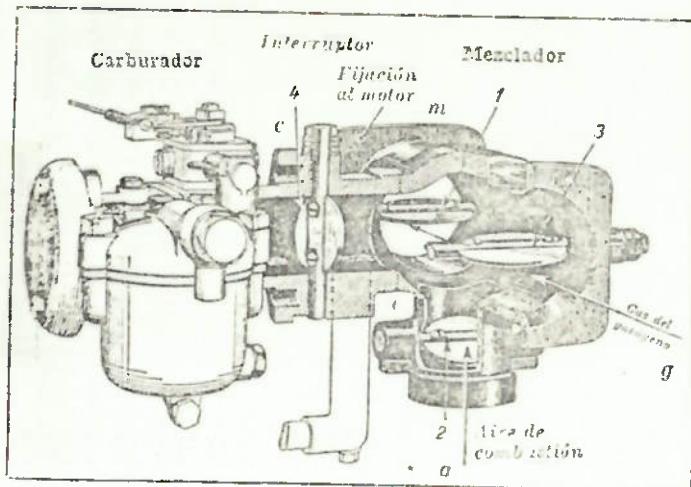


Fig.1.5.15 - Misturador Solex.

Neste misturador, o gás proveniente do gerador chega pelo conduto g, e o ar ingressa pela entrada a, na parte inferior; a mistura se dirige ao motor através da abertura m. O conduto c está interligado com o carburador que agora passa a ser um componente auxiliar. Pode-se ver que cada uma destas aberturas possui um obturador correspondente, independentemente da borboleta do próprio carburador. As borboletas

1 e 2 e mais a do carburador são interligadas entre si e ao pedal do acelerador, embora cada uma delas possa ser acionada independentemente.

No caso do funcionamento exclusivamente com gás, a borboleta 4 deverá estar completamente fechada, isolando-se assim o carburador do circuito de gás. No caso de se desejar enriquecer a mistura com gasolina, mantém-se aberta a borboleta 3 e abre-se a 4 na medida necessária. Para se manter aceso o gerador com o carro parado, a borboleta 4 se encontrará aberta (em maior ou menor grau), e a borboleta 2 estará quase que completamente fechada, a fim de permitir que haja sucção pelo motor. Se entretanto for necessário o funcionamento exclusivamente com o carburador auxiliar, as borboletas 2 e 3 permanecerão totalmente fechadas.

Para se tornar vantajoso o emprego do carburador auxiliar, convém que este seja utilizado somente em ocasiões de maior necessidade, tais como subidas muito íngremes, acelerações rápidas ou mesmo no caso de haver um problema momentâneo no gerador.

1.5.5 - Órgãos acessórios.

1.5.5.1 - Ventoinha ou aspirador.

Tal aparelho é empregado quando não se utiliza a partida do motor com gasolina, isto é, ao invés do motor funcionar inicialmente a gasolina, e aspirar o ar necessário à queima do carvão no gerador (e consequente produção do gás), emprega-se a ventoinha que fará a aspiração do ar. A ventoinha poderá ter acionamento manual ou elétrico, sendo o segundo não indicado por razões de ordem prática. Uma vez que o motor passa a funcionar com o gás de gasogênio, a ventoinha será

isolada do circuito através de uma válvula, e o próprio motor se encarregará da aspiração. Convém lembrar que a aspiração - da ventoinha deve ser mantida dentro de certos limites: uma aspiração demasiadamente alta não deixa tempo suficiente para ser formado o gás, enquanto que uma aspiração insuficiente - não pode manter a necessária intensidade do fogo.

1.5.5.2 - Reservatório de água.

A introdução de um reservatório de água no sistema será feita com uma das duas finalidades seguintes:

- (a) armazenar a água que será utilizada na refrigeração dos bicos de injeção de ar no gerador, quando estes forem empregados. Uma vez que tais bicos ficam em contato direto com zonas de altas temperaturas, faz-se necessária sua refrigeração para que não haja fusão do material.
- (b) introduzir água ou vapor d'água no gerador, a fim de localizar o fogo e principalmente melhorar o poder calorífico do gás, uma vez que a água, em contato com as altas temperaturas no gerador, se dissociará em hidrogênio, que eleva o poder calorífico do gás gerado. Esta introdução de água terá um valor limitado, uma vez que não se deve bairar em demasia a temperatura dentro do gerador, pois haveria queda na produção de CO.

1.5.5.3 - Compressor.

A finalidade de se empregar um compressor nos motores que funcionam a gasogênio é melhorar o rendimento volumétrico.

trico, consequentemente aumentando-se a potência fornecida pelo motor. A queda no rendimento volumétrico é causada pela temperatura da mistura (quanto mais alta a temperatura desta, mais reduzida é a quantidade admitida pelos cilindros) e pelas perdas de carga existentes na tubulação, filtros, ciclones, etc.

Com o emprego adequado do compressor, pode-se chegar a valores de potência equiparáveis à obtida nos motores convencionais de gasolina. Entretanto, seu emprego é bem mais complicado do que no caso de um motor a gasolina, uma vez que o gás contém impurezas com as quais o compressor trabalha em condições deficientes. Deve-se também estar atento quanto à refrigeração do compressor, uma vez que a compressão provoca uma sensível elevação de temperatura.

Os compressores poderão ser movidos ou pelos gases de escape ou então pela correia acionada pelo próprio motor. Em alguns casos ele poderá até mesmo ser acionado por um motor elétrico auxiliar.

1.5.5.4 - Tubos.

A tubulação que interliga os vários componentes de um gasogênio terá como função não só transportar o gás, como também auxiliar em seu resfriamento. De preferência serão utilizados tubos de parede fina com 30 a 40 mm de diâmetro, evitando-se traçados sínusos que aumentam a perda de carga no sistema nos locais que trabalhem com temperaturas mais baixas, se necessário, poderá ser utilizada mangueira de borracha.

Com relação às juntas entre as flanges, nos locais de temperatura mais elevada, estas deverão ser de amianto. Se forem empregados em temperaturas mais baixas, pode-se utilizar couro, borracha ou papelão especial de vedação.

1.6 - INSTALAÇÃO DO GASOGÊNIO NOS VEÍCULOS

1.6.1 - Introdução.

Inicialmente, pode-se dizer que aqueles que estiverem interessados na instalação de aparelhos de gasogênio em seus veículos, deverão levar em conta que nem todos os veículos se prestam para tal adaptação. E, embora esta adaptação seja possível, quer estética como técnica ou economicamente, dever-se-á fazer uma análise cuidadosa sobre o tipo de terreno e o tipo de serviço a que o veículo estará sujeito. Como já observado anteriormente, sabe-se que o gás pobre provoca uma queda na potência do motor, queda esta que se fará sensível em ladeiras e terrenos acidentais. A este fator já desfavoráveis soma-se o inconveniente do gás necessitar de certo tempo para se formar, e mesmo que este fique armazenado no gaseificador, filtros e tubulações, em regimes transitórios seu consumo será elevado, e até que mais gás seja produzido, haverá uma queda inesperada no rendimento do veículo. Assim, as melhores adaptações são aquelas onde o motor puder trabalhar em regime o mais constante possível. Desta maneira, em transportes urbanos sujeitos a constantes interrupções, não teremos adaptações proveitosas, podendo ser imaginado sistemas auxiliares no que diz respeito ao desempenho, como turbocompressores ou a adição de outro combustível de melhores características nestas condições.

Podemos então perceber que os aparelhos de gasogênio terão bons resultados quando utilizados em veículos para transporte interurbano, no campo, e cita-se até mesmo o emprego do gasogênio em embarcações e ferrovias, onde encontra-se regimes de trabalho constante e terrenos pouco acidentados. Também não esquecer que os veículos destinados a trabalhar em regiões agrícolas (caminhões, caminhonetes e tratores) possuem a vantagem de estar próximos às fontes de matéria prima (car-

vão vegetal, lenha, madeira, sabugos de milho, etc), quando então podemos ver um ótimo emprego do gás pobre para fins de transporte, trabalho e até mesmo geração de energia (por exemplo geradores de energia elétrica estacionários). No caso do emprego do gasogênio em automóveis particulares, pode-se dizer que do ponto de vista técnico a adaptação sempre é possível, mas nem sempre proveitosa, principalmente nos carros pequenos. Nestes, um dos inconvenientes será o motor de baixa potência (a qual terá uma queda mais acentuada com o emprego de gás pobre), assim como a própria adaptação fica difícil em função do pouco espaço disponível para tal, e a relação peso-potência torna desvantajosa qualquer adaptação. Além disso, nos carros pequenos o consumo de combustível já é menor, o que não justifica todo o investimento de um gasogênio. Pelo acima exposto, conclui-se então que o emprego do gás pobre pode se tornar vantajoso nos automóveis maiores, com motores mais potentes, e de consumo mais elevado. Inclusive, mediante uma boa adaptação e adequado manuseio do gasogênio, e sem modificações no motor, podemos ter uma queda na velocidade de 25%, o que significa obtermos, após a transformação, para um veículo relativamente potente, uma velocidade máxima de 100 a 110 km/h, que é considerável tendo-se em vista que nenhuma modificação foi realizada no motor. Além dessas considerações iniciais sobre os veículos e seu serviço, devemos lembrar que os aparelhos de gasogênio deverão reunir certas características que podem ser resumidas nas seguintes:

- facilidade de limpeza de todos seus órgãos
- facilidade acesso aos filtros e queimadores (isto é, às partes para inspeção, manutenção, alimentação, etc) quando instalados sobre o veículo
- peso o mais reduzido possível, sem que haja prejuízo na autonomia do veículo
- emprego de materiais resistentes à corrosão pelo gás, e também de tinta resistente a altas temperaturas, para proteção

externa do conjunto

- o projeto deve ser tal que os gases ao chegar no misturador tenham a temperatura mais baixa possível, para não haver prejuízo no rendimento volumétrico do motor.
- o misturador deve efetuar misturas adequadas em todas as fai xas de regime, sendo a regulagem a mais automática possível
- deve-se prever um sistema que permita o funcionamento do mo tor com gás pobre, gasolina (ou outro combustível líquido) ou mistura de ambos.

Para finalizar convém ressaltar que uma vez que o conjunto tenha sido projetado para queimar um determinado combustível, não utilizá-lo para queimar outros combustíveis, se não poderão haver prejuízos não só para o gasogênio, como também para o motor do veículo.

1.6.2 - Adaptação do equipamento.

Neste trabalho, de todos os veículos adaptáveis a gasogênio, será dado um enfoque especial aos caminhões, camionetas e automóveis, sendo também feitos alguns comentários sobre adaptações em tratores, nos quais o gasogênio torna-se uma adaptação de especial interesse (em função das condições em que é utilizado e da facilidade de obtenção do combustível, como já observado). Convém lembrar também que a adaptação em caminhões e tratores será mais fácil em termos da dimensões dos veículos e sabendo-se que algum prejuízo em questão de estética não é tão importantes como nos automóveis, onde a instalação terá de ser mais cuidadosamente estudada. Inclusive, para certos casos, poderá até ser utilizado um reboque, como veremos mais adiante.

1.6.2.1 - Caminhões e caminhonetes.

Uma primeira solução que visa reduzir ao mínimo a perda de espaço útil e não prejudicar a visão é colocar o gerador e o filtro em cada lado da cabina, em frente à carroceria (ver fig.1.6.1). Deve-se tomar o cuidado de isolar termicamente o gerador da cabina e carroceria, a fim de se evitar uma elevada transferência de calor o que ocasionaria queima - nas pinturas, madeiramento (quando existente) da carroceria e também sensação de desconforto aos ocupantes ou estragos à - carga transportada.

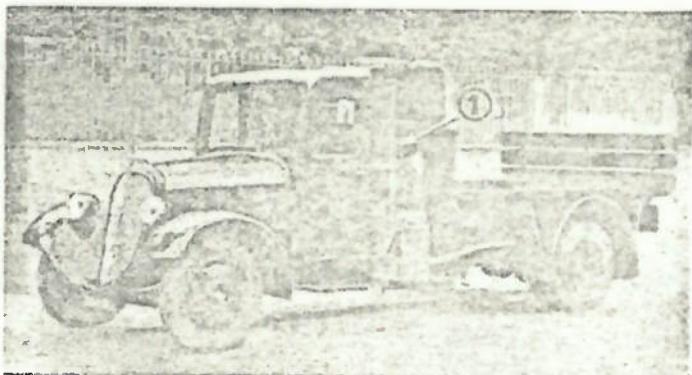


Fig.1.6.1 - Caminhão equipado com gasogênio Gohin-Poulenc

Noutros casos se prefere colocar gerador e filtro entre a cabina e a carroceria, que terá sua área útil diminuída (figs. 1.6.2 a 1.6.5). e usa-se interpor placas e isolantes cuja finalidade é reduzir a radiação a ser recebida pelas partes a se proteger.

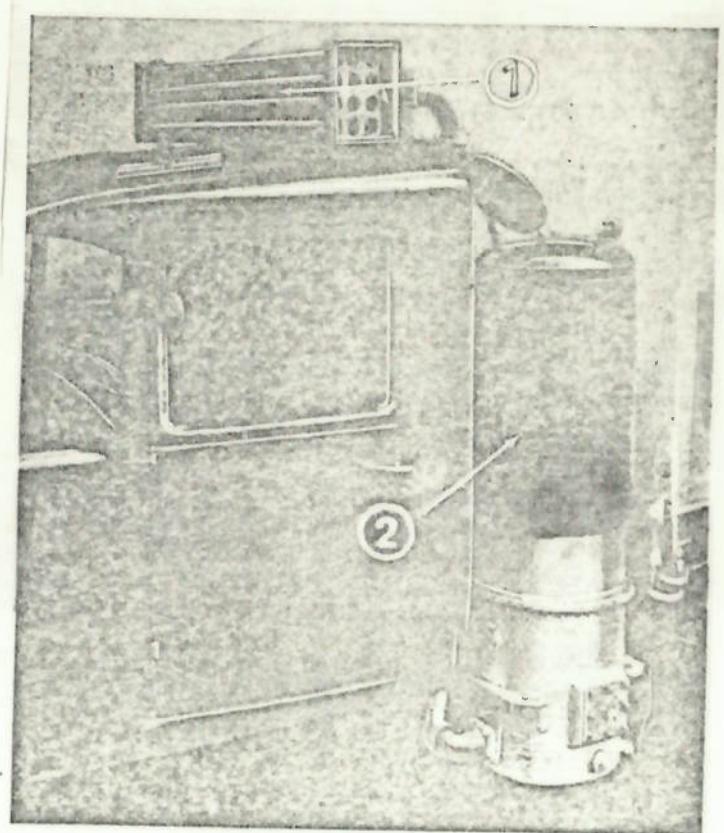


Fig.1.6.2- Caminhão com gasogênio Decauville onde
(1) resfriador e (2) gerador

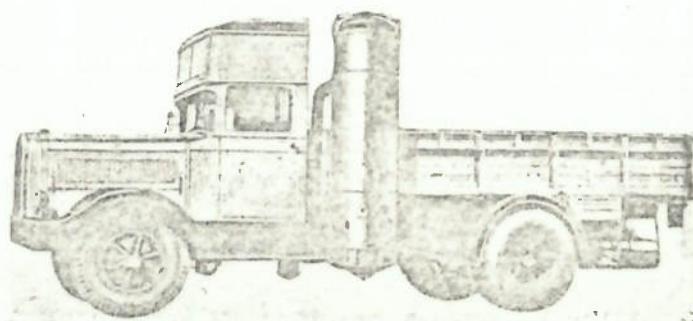


Fig.1.6.3- Gasogênio de grandes dimensões para boa autonomia

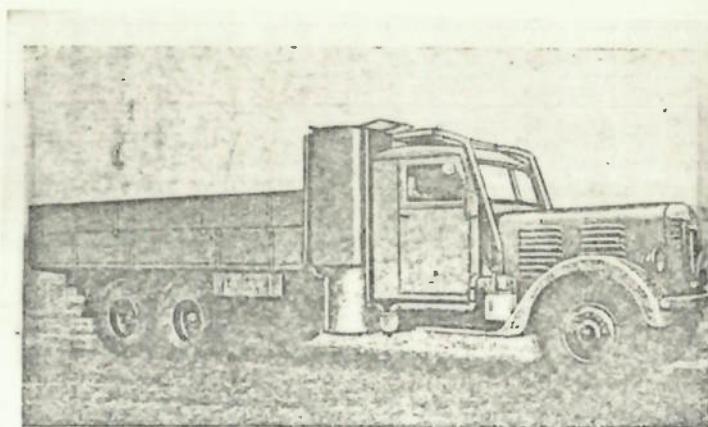


Fig.1.6.4- Gasogênio Svedlund com protetor de radiação

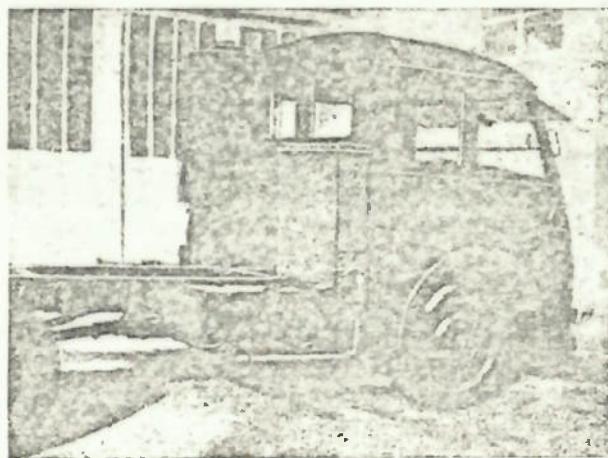


Fig.1.6.5.- Caminhão Renault com gasogênio Dupuy

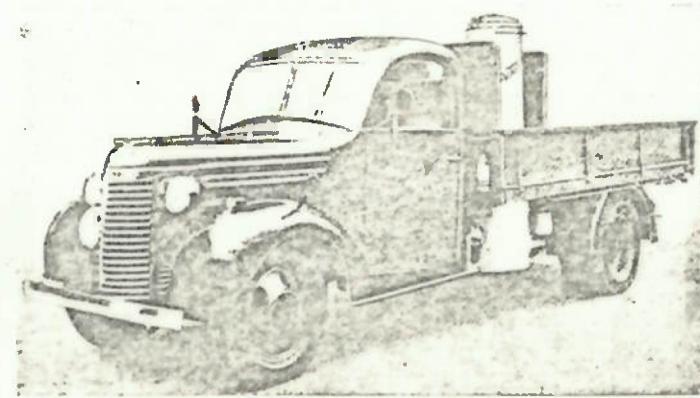


Fig.1.6.6- Caminhão com gasogênio Autark

Nestas figuras convém destacar a utilização do trocador de calor multitubular com câmaras de expansão (fig.1.6.2) a simetria na montagem do gerador e filtro (fig.1.6.3) e a superfície isoladora de radiação (fig.1.6.4).

Se o gerador for instalado dentro da carroceria, pode ser necessário, em função do tamanho, que se faça um furo para permitir a montagem sem que tenhamos uma altura excessiva (ver fig.1.6.6). Também poder-se-á colocar os equipamentos atrás da carroceria, com prejuízo na estabilidade e maiores esforços no eixo traseiro (fig.1.6.7).

As figuras 1.6.8 a 1.6.11 mostram como é possível localizar os diversos elementos componentes do aparelho de gásogênio.

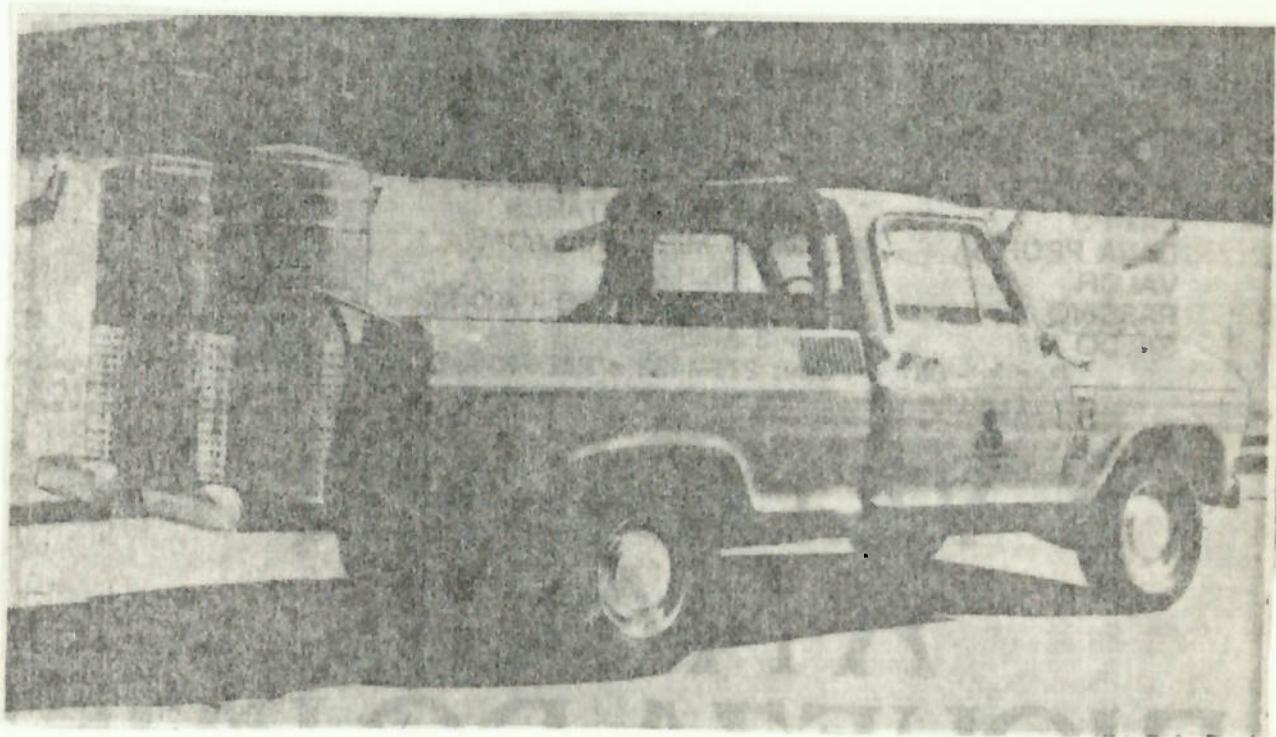


Fig.1.6.7- Caminhonete Chevrolet com equipamento no balanço traseiro.

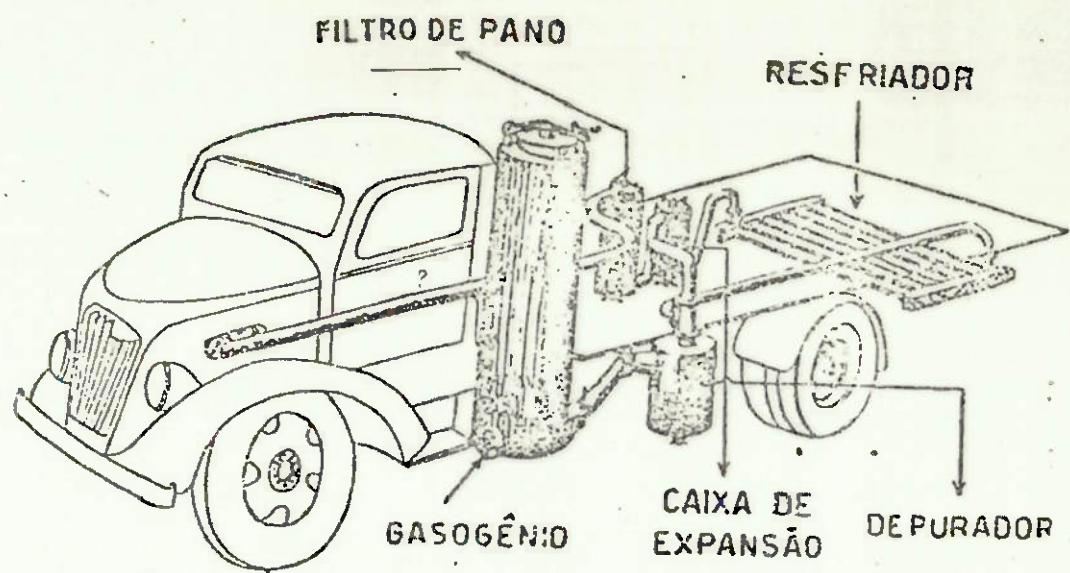


Fig. 66 — Uma das adaptações num chassis de caminhão.

Fig.1.6.8- Gasogénio com resfriador multitubular

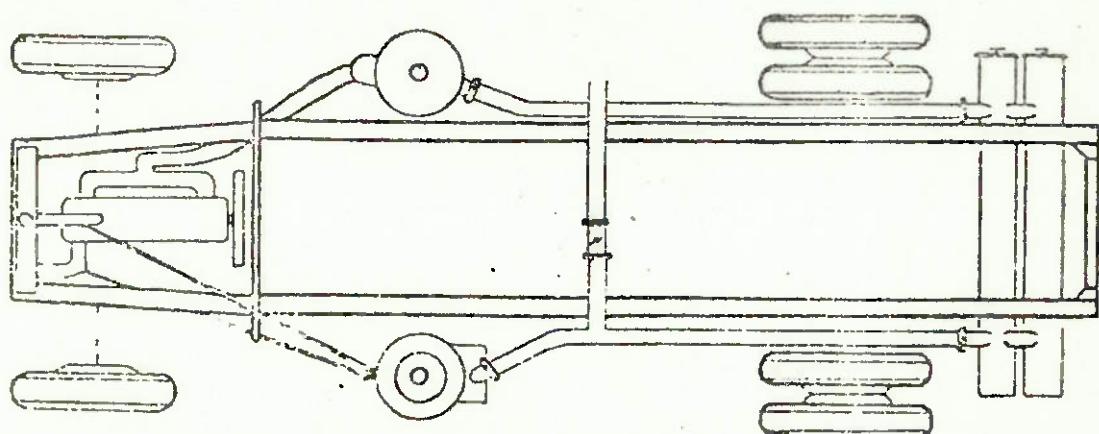


Fig. 67 — Montagem dos órgãos de Gasogénio Gohin-Poulenc, num chassis de caminhão.

Fig.1.6.9- Esquema de montagem do gasogénio Gohin-Poulenc

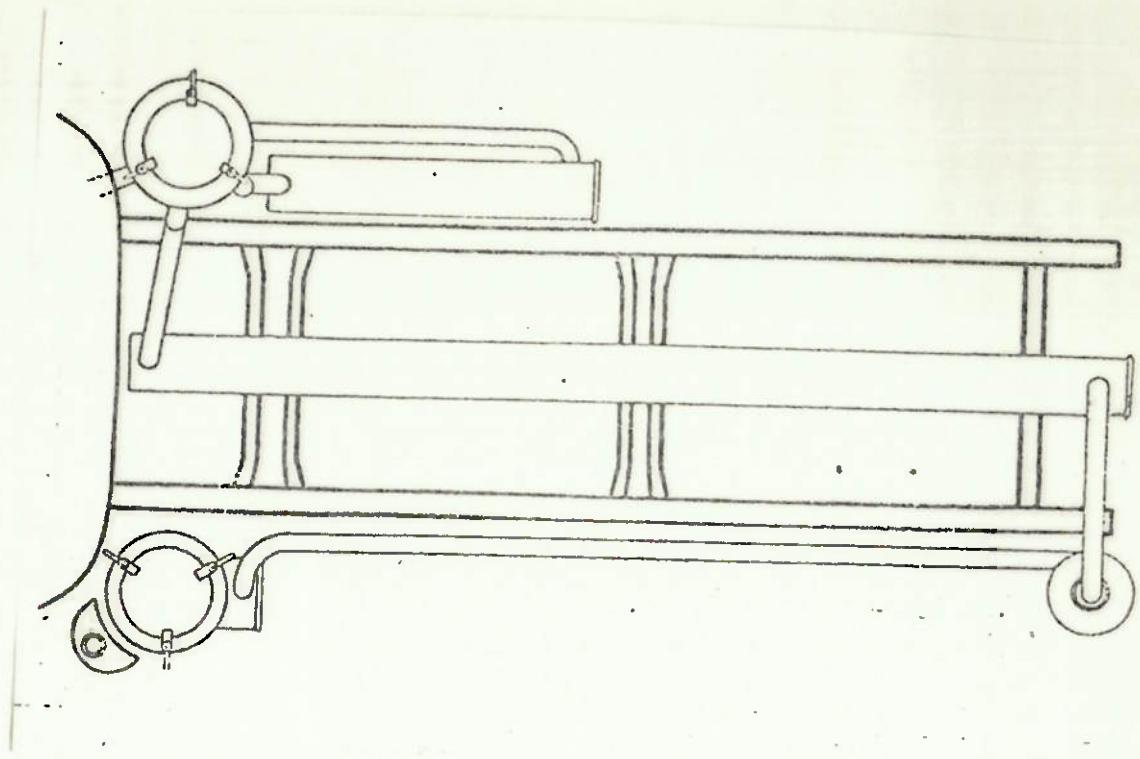


Fig.1.6.10- Esquema de montagem do gasogênio General Motor

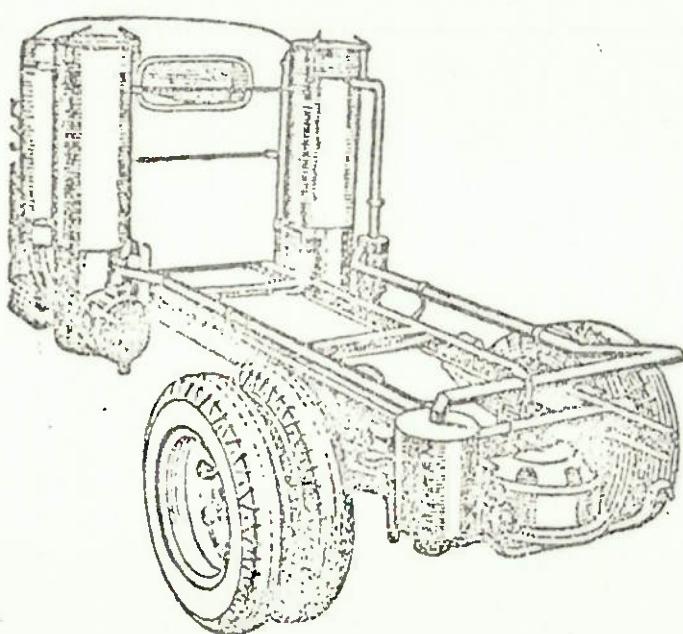


Fig.1.6.11- Equipamento de grande porte

1.6.2.2 - Automóveis.

Uma vez que para automóveis teremos um aparelho de dimensões mais reduzidas, a montagem do gerador e filtros poderá ser feita na frente do veículo, com um mínimo de prejuízo à visibilidade (fig.1.6.12); nas laterais, quando o modelo assim o permitir (fig.1.6.13); na traseira quando então poder-se-á ter até dimensões maiores (fig.1.6.14); e finalmente, no interior do porta-malas (fig.1.6.15).

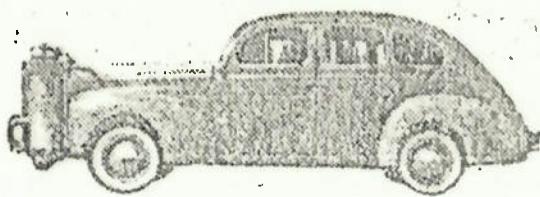


Fig.1.6.12 - Posicionamento dianteiro

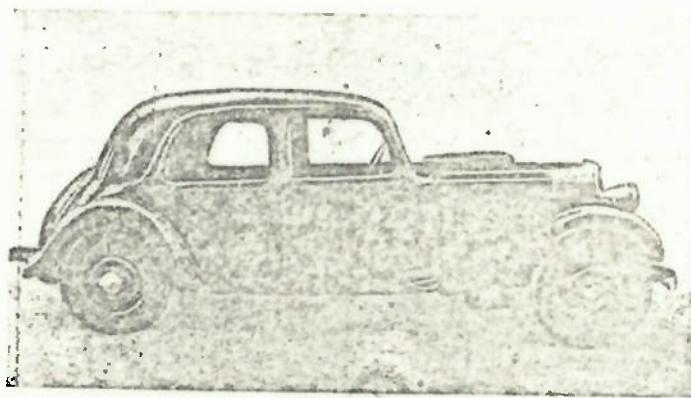


Fig.1.6.13 - Posicionamento lateral

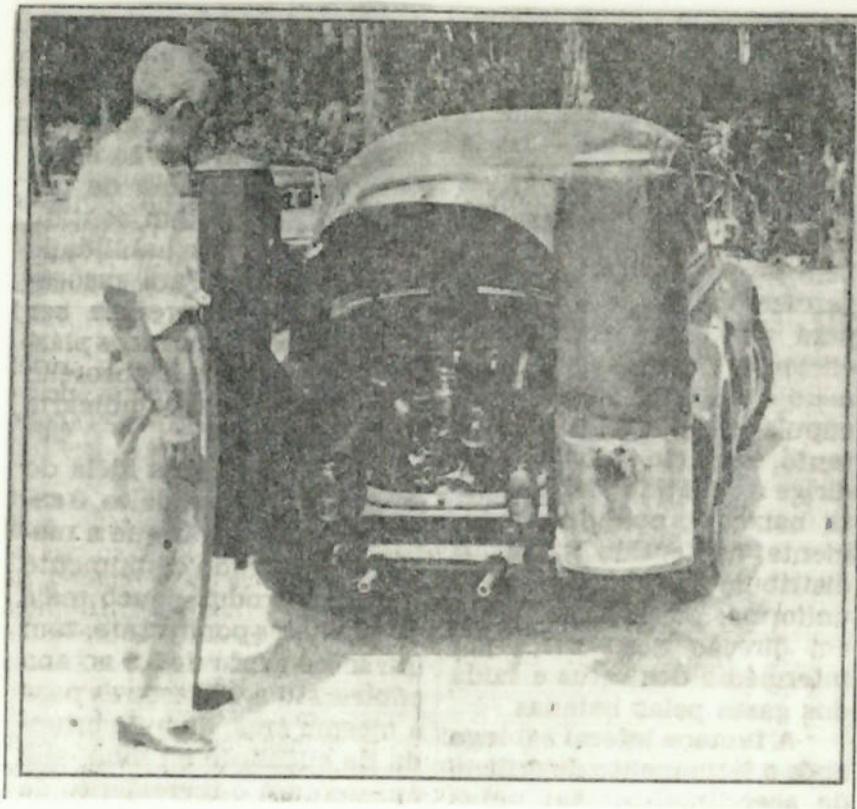


Fig.1.6.14 - Posicionamento traseiro.

Na solução da fig.1.6.14, pode-se ver a simetria na montagem do filtro (à esquerda) e do gerador (à direita), para melhor distribuição de peso e também aparência estética. Foi retirado o tanque de gasolina do porta-malas dianteiro, que então é utilizado como depósito de carvão.

Na instalação em interiores de porta-malas, deve-se tomar muito cuidado com o isolamento térmico, e principalmente, que se garanta uma boa ventilação em seu interior.

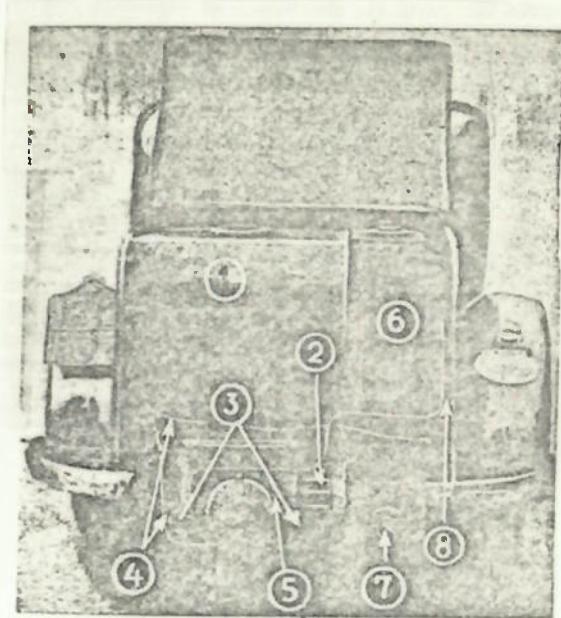


Fig.1.6.15 - Gasogênio colocado no interior do porta-malas.

Podem ainda ser feitos modelos bem compactos, como o mostrado na fig.1.6.16, onde se vê o gerador ao centro, cirundado do resfriador multitubular.

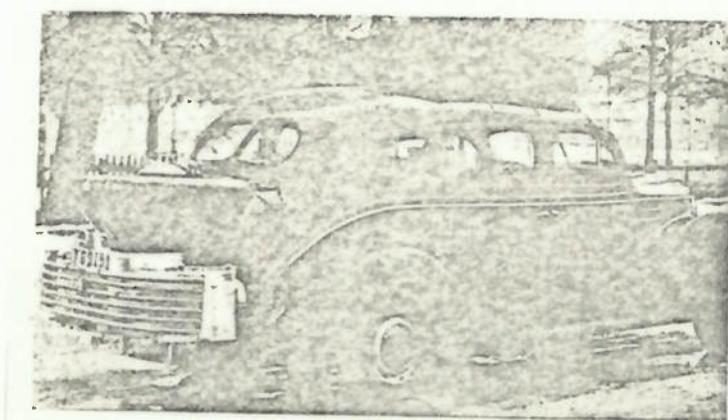


Fig.1.6.16 - Gasogênio compacto.

As soluções onde se aplica o aparelho sobre um reboque (fig.1.6.17) é interessante do ponto de vista que não reduz o espaço útil nos veículos, e nem requer modificações trabalhosas e caras. Mas possui o inconveniente de aumentar o espaço ocupado pelo conjunto veículo- reboque, a dificulta muito as manobras.



Fig.1.6.17 - Gasogênio colocado em reboque.

1.6.2.3 - Tratores.

Nestes casos, como não se quer impedir a visão traseira quando, por exemplo usa-se o arado, coloca-se o gerador na lateral, entre as rodas (fig.1.6.18) ou na dianteira (fig. 1.6.19). A montagem nas laterais é preferível e vista da melhor distribuição de peso. Em ambas as situações, entretanto, pode-se notar a boa ventilação do gerador.

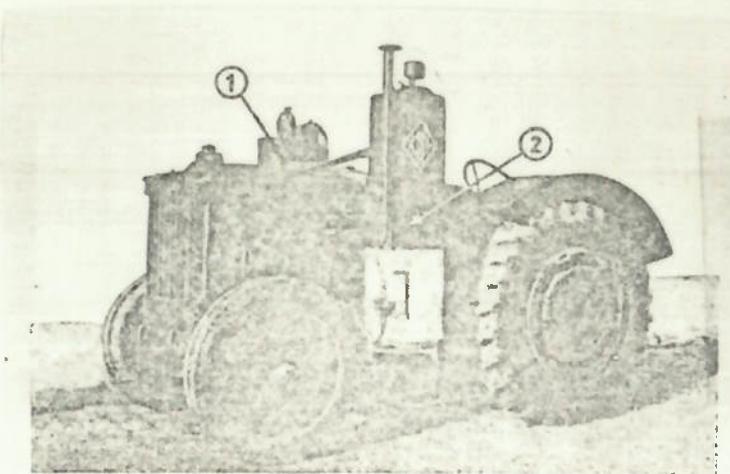


Fig.1.6.18 - Trator com equipamento na lateral.



Fig.1.6.19 - Trator com gasogênio na frente.

PARTE II

PROJETO, CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO DO GASOGÊNIO

2.1 - CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA

Na parte I deste trabalho descrevemos os diversos tipos de equipamentos existentes, tanto no conjunto como por unidades. O que pudemos comprovar é que o equipamento gerador de gás de gasogênio com fins automotivos deve ter uma configuração básica consistindo de:

- (a) gerador de gás (gaseificador)
- (b) filtro primário (geralmente do tipo centrífugo)
- (c) filtro secundário (para partículas até $1 \mu\text{m}$)
- (d) resfriador do gás (ou tubulação adequada)
- (e) misturador ar-gás no motor
- (f) soprador (ou partida a gasolina)

O nosso veículo deve manter o funcionamento a gasolina como opção em viagens mais curtas, o que implica na não existência do soprador. No conjunto restante, as maiores variações observadas são quanto ao sistema de limpeza/resfriamento do gás após o gaseificador.

Portanto, para escolhermos a configuração mais conveniente devemos selecionar os filtros primários e secundários, e, segundo suas características, inserir a unidade de resfriamento, se necessário.

2.1.1 - Seleção do equipamento de filtragem e resfriamento

Para optarmos por algum tipo de filtro necessitamos identificar o tipo de partícula que desejamos eliminar da corrente fluida.

As partículas existentes no gaseificador foram criadas durante o manuseio do material, ou durante a sua queima (cinzas). A análise visual deste material constata uma grande variedade de tamanhos, variando de alguns milímetros até microns. As menores partículas existentes são certamente a poeira criada pelo manuseio, como indica a fig.2.1.1.

Kind of Dust	Median Size, Microns
Outdoor dust	0.5
Sand blasting	1.1
Granite cutting	1.1
Trap rock milling	
Crusher house	1.4
Screen house	1.3
Disc crusher	0.9
Foundry parting compound	1.4
General foundry air	1.2
Talc milling	1.5
Slate milling	1.7
Marble cutting	1.5
Soapstone	2.4
Aluminum dust	2.2
Bronze dust	1.5
Anthracite coal mining	
Breaker air	1.0
Mine air	0.9
Coal drilling	1.0
Coal loading	0.8
Rock drilling	1.0

Fig.2.1.1 - Tamanhos médios de poeira.

A grande variedade de diâmetros de partículas encontrados sugere a adoção de dois ou mais filtros em série no sistema.

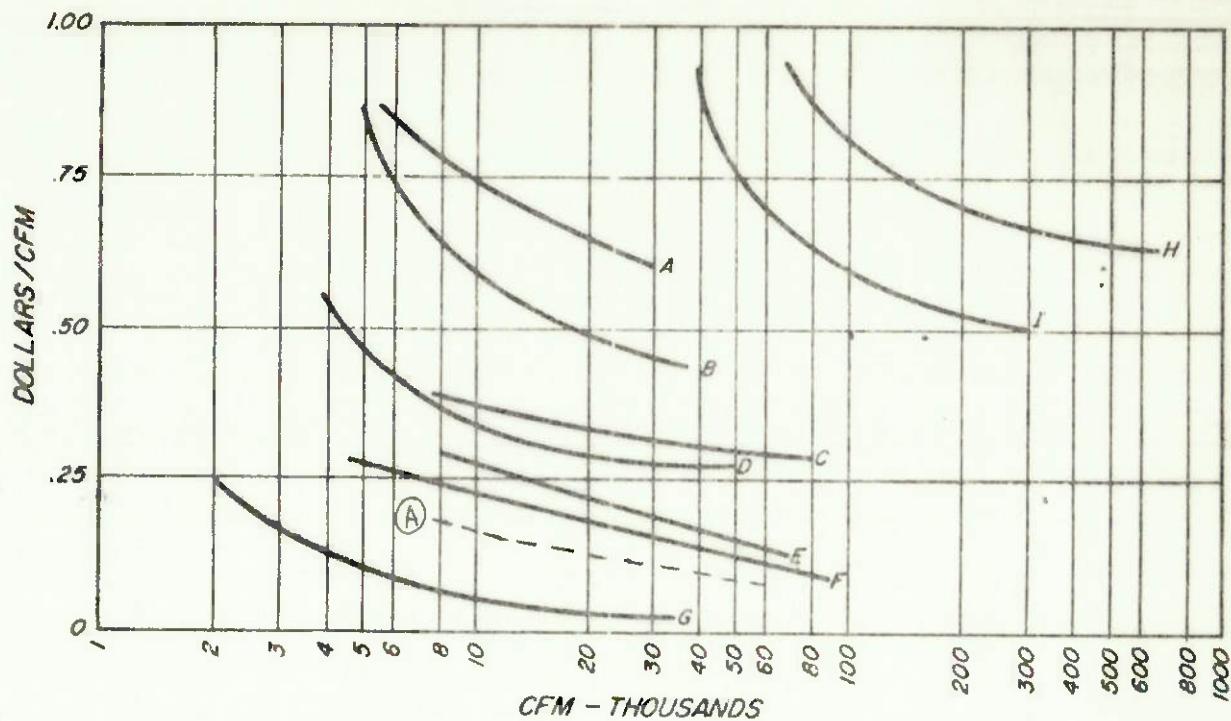
O filtro primário deve ter uma eficiência alta na faixa do diâmetro médio de partícula (D_p). Este diâmetro foi calculado no ítem 2.3.1.3.4 e vale $D_p = 24 \mu\text{m}$. Além disso deve ter características como baixo custo, simplicidade de construção, manutenção fácil e bom desempenho nas altas temperaturas.

O tipo de filtro mais conveniente neste caso é o ciclone, utilizando no projeto uma solução de compromisso entre a alta eficiência e a baixa perda de carga.

Esta escolha pode ser justificada pelo diâmetro de partículas encontrado (fig.2.1.2, letra A), pelo custo reduzido (fig.2.1.3, letra A) e suas características gerais como construção em chapa metálica (que favorece a troca de calor) e facilidades na limpeza e construção.

Collector Type	Minimum Particle Size, in Microns
Gravity	200
Inertial (Chamber type)	50 to 150
Centrifugal	
Large-diameter cyclone	40 to 60
Intermediate-diameter cyclone	20 to 30
Small-diameter cyclone	10 to 15
Fan type	15 to 30
Scrubber	
Pressure drop 3 in. to 6 in.	2.0 to 3.0
High energy	0.25 to 1.0
Fabric Filter	0.25
Electrostatic precipitator	0.25 to 1.0

Fig.2.1.2 - Tamanhos de partículas adequados aos diversos filtros.



- A - High temperature fabric collector (continuous duty)
- B - Reverse jet fabric collector (continuous duty)
- C - Wet collector (maximum cost range)
- D - Intermittant duty fabric collector
- E - High efficiency centrifugal collector
- F - Wet collector (minimum cost range)
- G - Low pressure drop cyclone (maximum cost range)
- H - High voltage precipitators
- I - High voltage precipitators (minimum cost range)

Fig. 2.1.3 - Custo estimado dos equipamentos de filtragem.

Além disso, verificando os tipos de filtros usados na indústria encontramos que os ciclones são frequentemente usados em concentrações altas de partículas médias e grossas, o que confirme a nossa opção (fig. 2.1.4, letra A).

Operation	Concen- tration Note 1	Particle Sizes Note 2	COLLECTOR TYPES USED IN INDUSTRY						See Remark No.
			Cyclone (A)	High Eff. Centrifugal	Wet Collector	Fabric Angular ~(B)	Hi-Volt. Electro- static		
CERAMICS									
a. Raw product handling	light	fine	rare	seldom	frequent	frequent	no	no	1
b. Fettling	light	fine to medium	rare	occasional	frequent	frequent	no	no	2
c. Refractory sizing	heavy	coarse	seldom	no	occasional	frequent	no	no	3
d. Glass & vitr. enamel spray	moderate	medium	no	no	usual	usual	no	no	
CHEMICALS									
a. Material handling	light to moderate	fine to medium	occasional	frequent	frequent	frequent	rare	no	50
b. Crushing, grinding	moderate	fine to coarse	often	frequent	frequent	frequent	no	no	4
c. Pneumatic conveying	heavy to very heavy	fine to coarse	usual	occasional	rare	usual	no	no	5
d. Roasters, kilns, coolers	heavy	med coarse	occasional	usual	usual	rare	often	no	6
COAL MINING AND POWER PLANT									
a. Material handling	moderate	medium	rare	occasional	frequent	frequent	no	no	51
b. Bunker ventilation	moderate	fine	occasional	frequent	occasional	frequent	no	no	8
c. Dedusting, air cleaning	heavy	med-coarse	frequent	frequent	occasional	occasional	no	no	9
d. Drying	moderate	fine	rare	occasional	frequent	frequent	often	no	10
							no	no	11
FLY ASH									
a. Coal burning—chain grate	light	fine	no	rare	rare	no	no	no	12
b. Coal burning—stoker fired	moderate	fine to coarse	rare	usual	no	no	no	no	
c. Coal burning—pulverized fuel	heavy	fine to coarse	rare	occasional	frequent	no	no	no	13
d. Wood burning	varies	fine to coarse	no	occasional	occasional	no	no	no	14
FOUNDRY									
a. Shakeout	light to moderate	fine	rare	rare	usual	occasional	no	no	15
b. Sand handling	moderate	fine to medium	rare	rare	usual	rare	no	no	16
c. Tumbling mills	heavy	med-coarse	no	no	no	frequent	frequent	no	17
d. Abrasive cleaning	moderate to heavy	fine to medium	no	occasional	frequent	frequent	no	no	18
GRAIN ELEVATOR, FLOUR AND FEED MILLS									
a. Grain handling	light	medium	usual	occasional	rare	frequent	no	no	50
b. Grain dryers	light	varies	no	no	no	no	no	no	19
c. Flour dust	moderate	medium	usual	no	occasional	frequent	no	no	20
d. Feed mill	moderate	medium	usual	no	occasional	frequent	no	no	21
							no	no	22
METAL MELTING									
a. Steel blast furnace	heavy	varied	frequent	are	frequent	no	frequent	no	23
b. Steel open hearth	moderate	fine to coarse	no	no	difficult	no	possible	usual	24
c. Steel electric furnace	light	fine	no	no	occasional	considerable	frequent	rare	25
d. Ferrous cupola	moderate	varied	no	occasional	no	frequent	frequent	rare	26
e. Non-ferrous reverberatory	varied	fine	no	no	no	rare	no	no	27
f. Non-ferrous crucible	light	fine	no	no	no	rare	occasional	no	28
METAL MINING AND ROCK PRODUCTS									
a. Material handling	moderate	fine to medium	rare	occasional	usual	no	no	no	29
b. Dryers, kilns	moderate	med coarse	frequent	rare	frequent	no	rare	occasional	30
c. Cement rock dryer	moderate	fine to medium	rare	rare	occasional	no	no	occasional	31
d. Cement kiln	heavy	fine to medium	rare	frequent	no	no	no	no	32
e. Cement grinding	moderate	fine	rare	occasional	rare	no	frequent	rare	33
f. Cement clinker cooler	moderate	coarse	occasional	rare	no	no	no	no	34
METAL WORKING									
a. Production grinding, scratch brushing, abrasive cut off	light	coarse	frequent	rare	frequent	considerable	no	no	50
b. Portable and swing frame	light	medium	rare	rare	rare	no	no	no	35
c. Buffing	light	varied	frequent	rare	no	no	no	no	36
d. Tool room	light	fine	frequent	rare	frequent	rare	no	no	37
e. Cast iron machining	moderate	varied	rare	rare	no	no	no	no	38
PHARMACEUTICAL AND FOOD PRODUCTS									
a. Mixers, grinders, weighing, blending, boiling, packaging	light	medium	rare	rare	frequent	frequent	no	no	39
b. Cooking pans	varied	fine to medium	rare	rare	frequent	frequent	no	no	40
PLASTICS									
a. Raw material processing	light	varied	no	no	no	no	no	no	50
b. Plastic finishing	light to moderate	varied	frequent	frequent	frequent	frequent	no	no	41
							no	no	42
RUBBER PRODUCTS									
a. Mixers	moderate	fine	no	no	frequent	usual	no	no	43
b. Batchelor rolls	light	fine	no	no	no	no	no	no	44
c. Talc dusting and dedusting	moderate	medium	no	no	no	no	no	no	45
d. Grinding	moderate	coarse	often	often	frequent	frequent	no	no	46
WOODWORKING									
a. Woodworking machines	moderate	varied	usual	occasional	rare	no	no	no	50
b. Sanding	moderate	fine	frequent	occasional	occasional	frequent	no	no	47
c. Waste conveying, bags	heavy	varied	usual	rare	occasional	occasional	no	no	48
							no	no	49

Note 1: Light, less than 2 gr./ft³; Moderate, 2 to 5 gr./ft³; Heavy, 5 gr./ft³ and up.

Note 2: Fine, 50% less than 5 microns; Medium, 50% 5 to 15 microns; Coarse, 50% 15 microns and larger.

Fig.2.1.4 - Tipos de filtros usados na indústria.

Algumas características comuns aos ciclones estão na fig.2.1.6, letra A, e as suas formas básicas aparecem na fig.2.1.5, mostrando também o fluxo gasoso no seu interior.

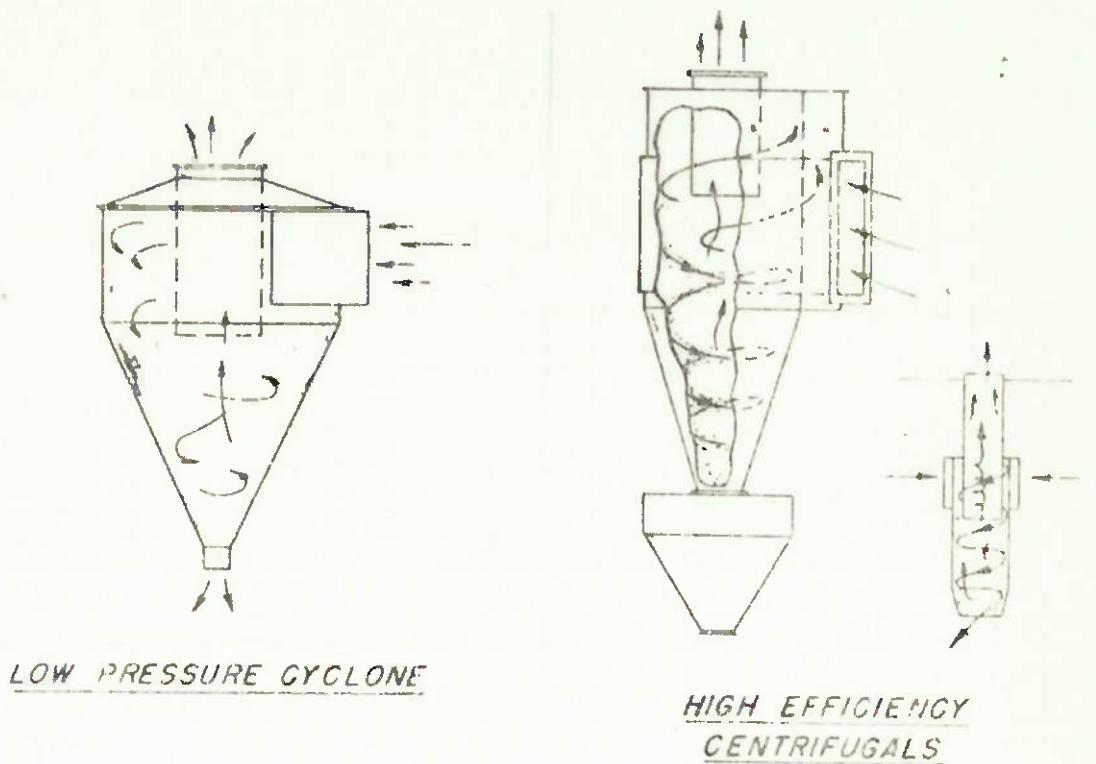


Fig.2.1.5 - Formas típicas de ciclone.

Na presente situação, os elementos que temos no nosso circuito são: a montante o gaseificador e o ciclone, que como saída um gás a alta temperatura (~ 300 °C) com uma concentração média de partículas pequenas (aprox. de 1 μm a 20 μm), e a jusante o misturador acoplado ao carburador, que devem receber um gás limpo e razoavelmente denso (ou seja as perdas de cargas não devem ser excessivas), o que é conseguido abaixando-se a temperatura.

Para fecharmos o circuito necessitamos introduzir elementos que filtrem o gás das partículas existentes com -

uma boa eficiência e confiabilidade e que resfriem até a temperaturas próximas a ambiente.

Isto deve ser feito considerando-se o arranjo físico disponível, ou seja, o gaseificador e o ciclone na caçamba e o motor à frente.

O refrigerante a ser usado na troca de calor é o ar em movimento (ou eventualmente parado) que possui uma certa temperatura não controlável. Portanto, as maiores eficiências na troca de calor por convecção são obtidas (para uma mesma área) enquanto o gás está mais quente. Então o nosso trocador deverá estar posicionado em seguida ao ciclone.

Esta escolha também está ligada ao fato do filtro secundário selecionado ser um filtro tipo manga, que consiste em um recipiente razoavelmente volumoso contendo um elemento de tecido ou fibra sintética, pois estes elementos tem uma temperatura de operação relativamente baixas.

O filtro de manga foi escolhido pelo fato de já possuirmos o recipiente apropriado e também por suas boas características de retenção de pó, perda de carga e manutenção. Numa descrição aproximada das suas características está nas figuras anteriores, letra B, e também na figura 2.1.6.

A localização deste filtro será na caçamba, o que sugere que a tubulação ligando-o ao motor deva também trocar calor. A maneira mais conveniente é usarmos um tubo metálico sob o veículo, com junções curvas flexíveis, aproveitando o ar circulante nesta região.

Outro elemento que pode ser colocado para fechar o circuito é um filtro de segurança, objetivando uma maior confiabilidade na retenção de partículas. Ele deve poder ser retirado do circuito quando observar-se a boa performance dos filtros anteriores, a fim de reduzir a perda de carga.

Type	Higher Efficiency Range on Particles Greater than Mean size in Microns	Pressure Loss Inches	H_2O Gal per 1,000 CFM	Space	Sensitivity to CFM Change		Humid Air Influence	Max. Temp., F. Standard Construction
					Pressure	Efficiency		
Electrostatic	0.25	1/2	-	Large	Negligible	Yes	Improves Efficiency	500
Fabric:								
Conventional	0.25	3-6	-	Large	As cfm	Negligible	May Make Reconditioning difficult	160
Reverse Jet	0.25	3-8	-	Moderate	As cfm	Negligible		Note 1
Glass, Reverse flow	0.25	3-8	-	Large	As cfm	Negligible		160
Wet:								
Packed Tower	1-5	1.5-3.5	5-10	Large	As cfm	Yes		550
Wet Centrifugal	1-5	2.5-6	3-5	Moderate	As (cfm) ²	Yes		
Wet Dynamic	1-2	Note 2	1/2 to 1	Small	Note 2	No		
Orifice Types	1-5	2 1/2-6	10-40	Small	As cfm or less	Varies with design		
Higher Efficiency:								
Fog Tower	0.5-5	2-4	5-10	Moderate	As (cfm) ²	Slightly	None	Note 3
Venturi	0.5-2	10-100	5-15	Moderate	As (cfm) ²	Yes		Unlimited
Dry Centrifugal:								
Low Pressure Cycle	20-40	0.75-1.5	-	Large	As (cfm) ²	Yes		750
High Eff. Centrifugal	10-50	2-5	-	Moderate	As (cfm) ²	Yes	May cause condensation	750
Dry Dynamic	10-20	Note 2	-	Small	Note 2	No	and plugging	750

Note 1: 160 F based on cotton fabric. Synthetic fabrics may be used to 275 F.

Note 2: A limitation of the mechanical efficiency of these combined exhausters and dust collectors.

Note 3: Precooling of high temperature gases will be necessary to prevent rapid evaporation of fine droplets.

Note 4: See NFPA requirements for fire hazards, i.e., zirconium, aluminum, magnesium, wood working, etc.

Fig. 2.1.6 - Comparação entre características de alguns filtros.

O dimensionamento de cada um destes elementos foi feito em níveis de diferentes de complexidade, em função do que já tínhamos pronto e da confiança no desempenho em cada um deles, visando sempre a facilidade na fabricação e montagem, e as limitações impostas pelos recursos disponíveis (material de consumo, - ferramental, mão-de-obra) e pelo tempo.

Assim, nos capítulos apresentados mais adiante está - detalhado o dimensionamento (quando necessário) das unidades componentes do sistema de gaseificação, cujo resumo vem a seguir.

2.1.2 - Características gerais finais.

2.1.2.1 - Gaseificador (Ver figuras, indicado com o nº 1)

Tipo fluxo ascendente com tiragem próxima a zona de - redução e cetilha de cobre, vertical, com grelha e cinzeiro. Equipado com tampa superior para alimentação e inferior para limpeza.

A zona de reação possui uma chapa adicional interna - ao corpo principal formando uma câmara por onde é feita a tiragem. O volume útil interno é 40 %. (aproximadamente 25 kg de carvão vegetal com diâmetro médio 30 mm).

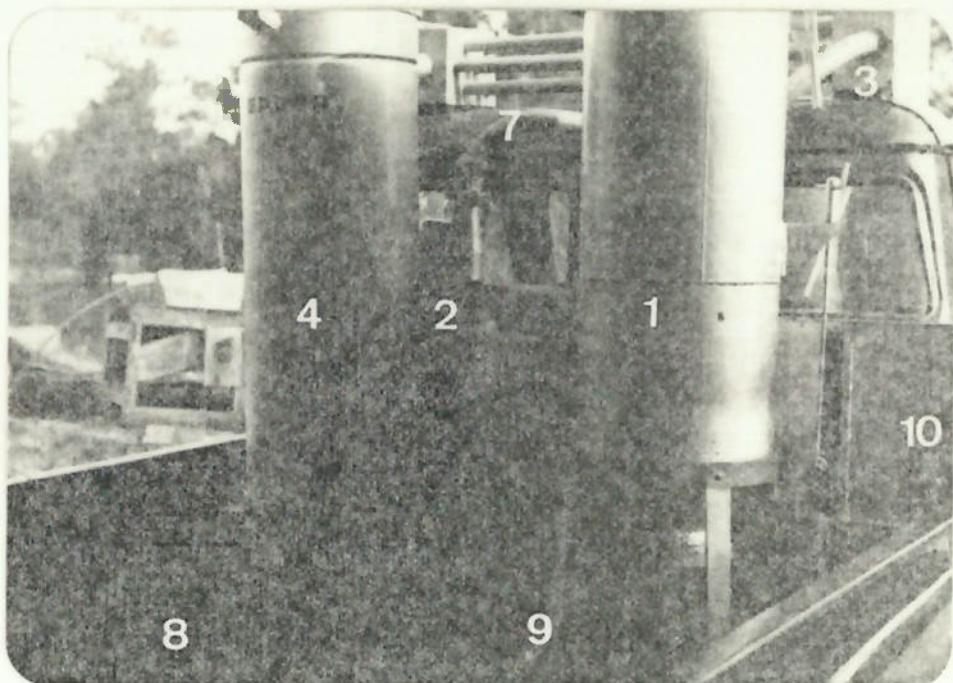


Fig. 2.1.7 - Vista geral do equipamento.

2.1.2.2 - Geradores de vapor (mostrado na secção de testes).

Utilizam o calor excedente do gaseificador para gerar vapor que é injetado na entrada da cetilha.

O reservatório de água em cada gerador possui 1,5 l. Este vapor, com sua vazão devidamente dosada, aumenta a porcentagem de hidrogênio no gás. O fluxo é regulado por uma válvula e o conduto é de cobre com diâmetro de 1/4".

2.1.3.3 - Filtro ciclone (indicado com o nº 2).

Dimensionado para uma boa eficiência mesmo a baixas

vazões, com formato segundo o ciclone Stairmand que permite boas performances aliadas a uma baixa perda de carga. Tampa para limpeza inferior com rosca.

Dados principais:

- diâmetro : 160 mm
- perda de carga a $Q = 96 \text{ m}^3/\text{h}$ (2000rpm): 0,70 in $H_2\text{O}$
- eficiência para partículas com $D_p = 25 \mu\text{m}$ a $Q = 94 \text{ m}^3/\text{h}$: 97,9%

2.1.2.4 - Trocador de calor (nº 3)

Colocado de forma a receber diretamente o fluxo de ar quando o veículo estiver em movimento. Possui duas câmaras de expansão nas extremidades e 6 tubos com diâmetro 25 mm. As tampas nas extremidades são removíveis para limpeza e há um purificador na segunda câmara.

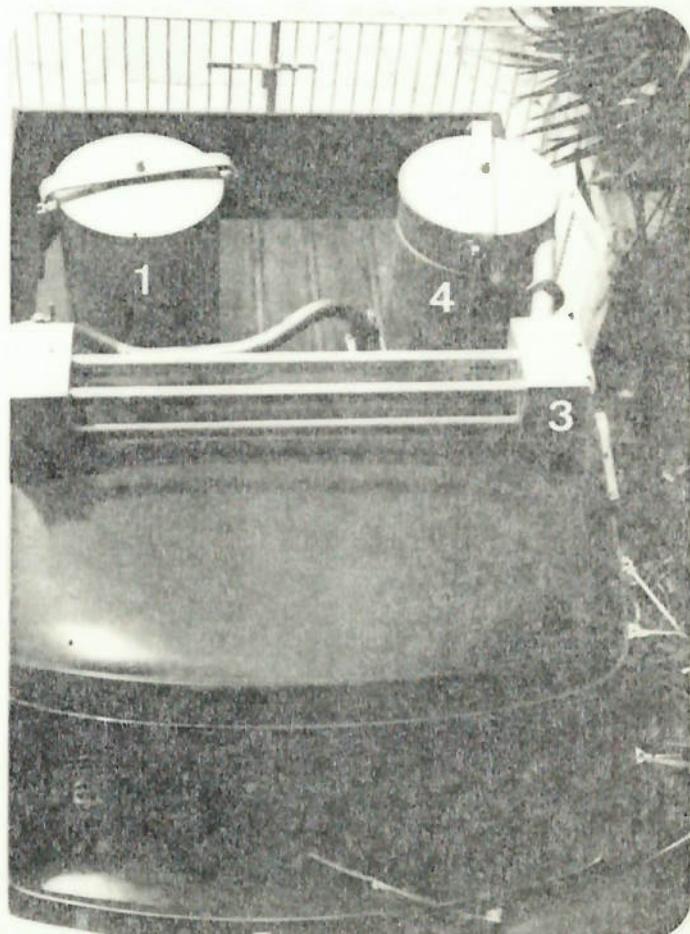


Fig.2.1.8 - Vista superior.

2.1.2.5 - Filtro de manga (nº 4)

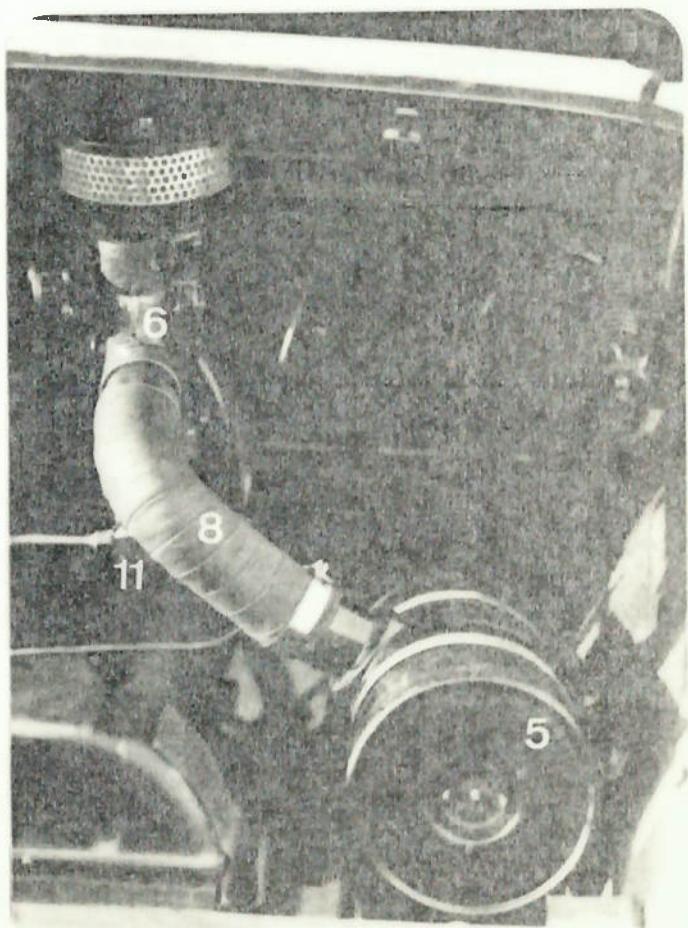
Tipo tiragem inferior equipado com duas mangas de poliéster, resistentes até a uma temperatura de 150 °C.

Possui uma tampa de inspeção superior e entrada de gás tangencial. A área das mangas é 0,8 e 1,0 m² respectivamente.

2.1.2.6 - Filtro de segurança (nº 5).

É um filtro de elemento de papel do tipo usado em veículos para limpeza do ar do carburador. Sua função é de facilitar a averiguação da eficiência de filtragem do sistema, e de impedir que uma falha na eficiência afete o motor. Seu elemento é retirável para permitir uma menor perda de carga, no caso de seu uso ser dispensável.

Fig.2.1.9- Detalhe da adaptação no motor.



2.1.2.7 - Misturador. (nº 6)

Sua função é direcionar os fluxos de ar e gás, permitindo o funcionamento com gasolina ou gás de gasogênio, e ainda, no caso do gás, dosar a mistura ar-gás para a combustão no cilindro. Ele é acoplado sobre o carburador que funciona normalmente com o combustível gasolina e faz a variação de carga no uso do gás. Sobre o misturador foi colocado o filtro de ar para a mistura ar-gasolina. A dosagem ar-gás é feita por uma válvula borboleta e o direcionamento efetua-se por um rotor perfurado.

2.1.2.8 - Tubulação.

A tubulação que conduz o gás de gasogênio no seu trajeto é feita por condutos metálicos (nº 7) e mangueiras de borracha e lona (nº 8) (do tipo usado em radiadores de automóvel).

Os tubos metálicos foram usados onde o gás se encontrava a temperatura mais elevada e nos locais favoráveis à troca de calor. As mangueiras posicionaram-se nos pontos onde o gás já estava a uma temperatura mais baixa e eram necessárias curvas e ajustes complexos, sem haver esforços mecânicos significativos.

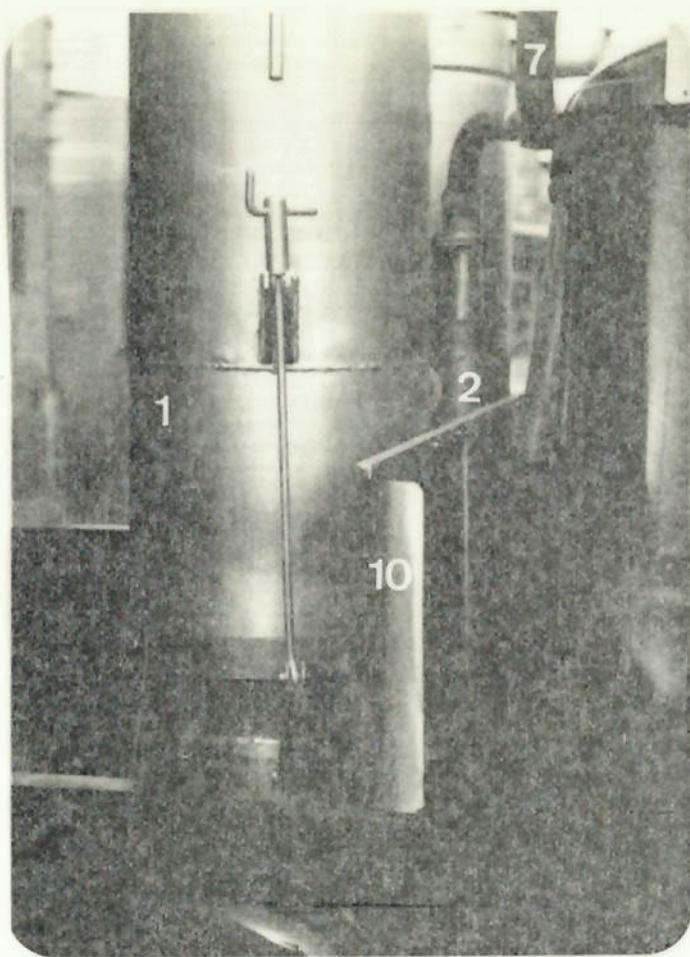


Fig. 2.1.10 - Detalhe lateral.

2.1.2.9 - Acessórios.

Além do que foi descrito existem os suportes flexíveis dos tubos do gaseificador e do filtro de manga (nº 9), a proteção metálica da cabina que também possui defletores para uma melhor refrigeração (nº 10), e a válvula e vias que permite o retorno da gasolina ao tanque (nº 11). O equipamento foi protegido contra corrosão e externamente recebeu pintura alumínio, resistente até a temperatura de 600 °C.

2.2 - GASEIFICADOR COM GERADORES DE VAPOR D'ÁGUA

O gaseificador utilizado por nós foi concebido à aproximadamente 3 décadas atrás, visando uma utilização estacionária. Portanto, o seu uso em veículos certamente implicou em limitações tanto na adequação física como na produção dos gases combustíveis. Mesmo assim, devido à pouca evolução técnica existente no setor de gaseificadores, as diferenças entre este projeto e os atuais que temos conhecimento, não resultaram em variações relevantes do desempenho.

2.2.1 - Adaptação do gaseificador.

Conforme a fig.2.2.1, o gaseificador é do tipo fluxo ascendente, com tiragem junto à zona de redução. Antes de sair, o gás percorre o interior de uma câmara anelar próxima ao chapeamento externo, onde se completam as reações de redução.

A entrada de ar e vapor d'água se dá pela parte inferior, através de uma grelha de cobre, que forma um conjunto com um cinzeiro e uma tampa, usado para limpeza.

As dimensões principais do gaseificador são:

- diâmetro D : \varnothing 385 mm
- altura L : 1240 mm
- diâmetro da tubulação de tiragem d : \varnothing 57 mm.

Um desenho esquemático do gaseificador é mostrado na fig.2.2.1.

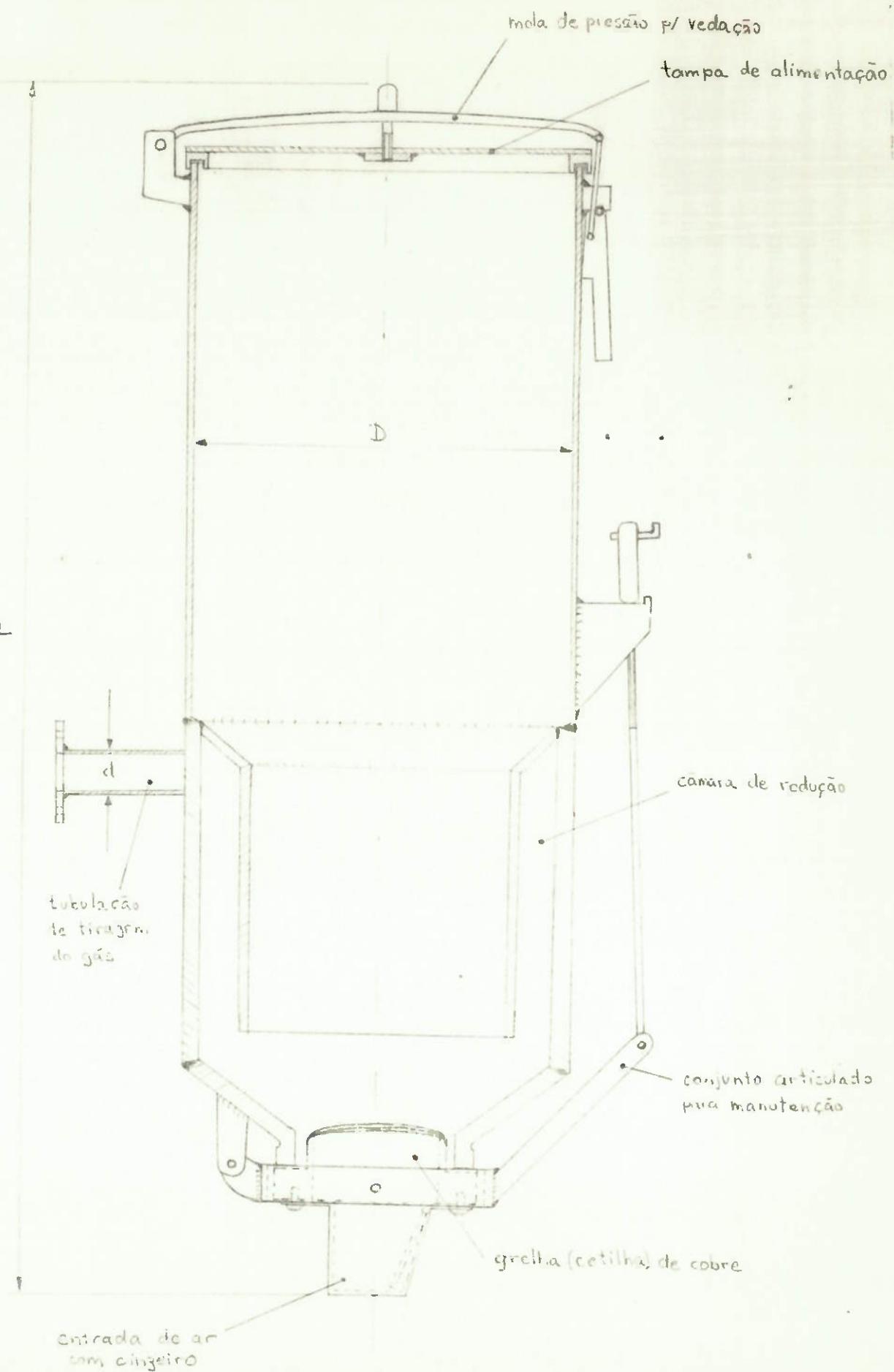


Fig.2.2.1- Corte do gaseificador.

A adequação do gaseificador às condições de uso se limitaram à limpeza dos resíduos de oxidação e posterior soldagem de uma chapa interior de reforço, pois já apareciam furos no corpo superior do equipamento.

Além disso, na adaptação ao veículo foram necessárias alterações nos suportes. A fixação do conjunto todo ao veículo recebeu um rudimentar sistema de suspensão constituído de tarugos de borracha entre a massa suspensa e a carroceria (fig. 2.2.2).

2.2.2 - Construção dos geradores de vapor

A finalidade da existência destas pequenas caldeiras é a produção de vapor d'água a partir do calor excedente nas paredes do gaseificador.

O vapor d'água, como já foi detalhadamente explicado, reage produzindo hidrogênio combustível, se estiver presente em níveis aceitáveis.

Como o sistema que tínhamos em mãos não previa a adição de vapor aos reagentes, surgiu a idéia de utilizar o calor - não aproveitado para evaporar água e injetá-la no leito.

Para isto foram idealizadas duas câmaras circundantes à região de maior fluxo térmico, possuindo cada qual uma válvula de gaveta regulável. A esta válvula ligava-se uma tubulação de cobre que circundava a região próxima à grelha, superaquecendo o vapor e injetando-o através do cinzeiro no leito, conforme mostra a fig. 2.2.2.

A regulagem do fluxo seria feita por meio de ensaios e seria adequada somente a uma vazão média de gás. Sistemas mais elaborados prevendo o controle de vapor foram imaginados, porém os fatores tempo e custo nos fizeram adotar esta solução.

Estes geradores de vapor também objetivaram a melhoria do conforto térmico, diminuindo a temperatura superficial do corpo perto da cabine do veículo, e portanto o calor transferido por radiação.

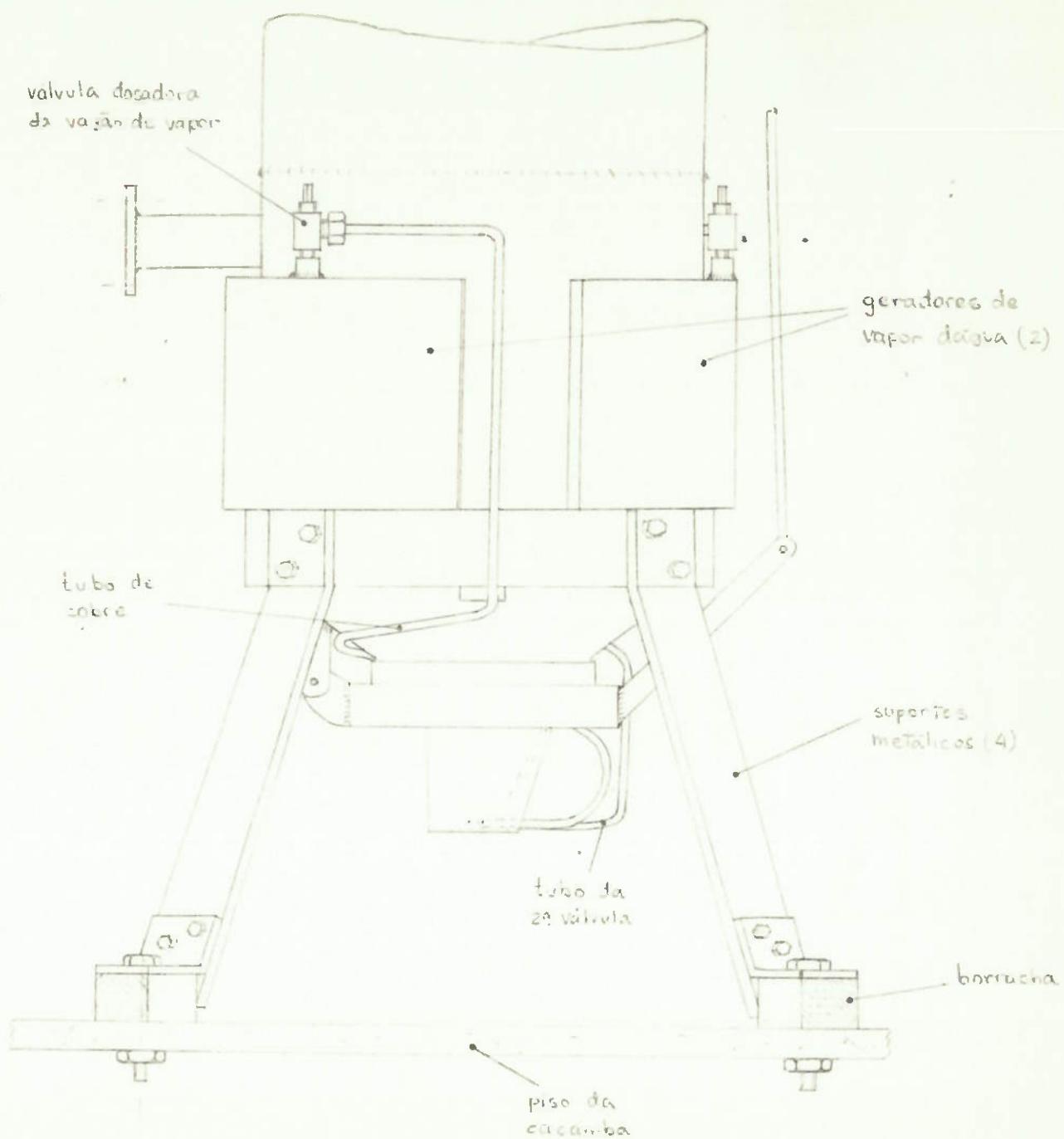


Fig.2.2.2 - Gaseificador com suportes e geradores de vapor.

Na construção foi utilizada chapa de aço nº 20, 2 válvulas de cobre próprias para vapor e tubulação também de cobre com diâmetro $\emptyset 1/4"$. Na soldagem utilizou-se a oxi-ace_{tilênica} com arame de aço em junções aço-aço e latão nas demais. A chapa foi cortada nas dimensões desejadas pela tesoura elétrica e pela manual (ver figuras).

Para acoplar as caldeiras ao gaseificador utilizou-se o próprio apoio deste e uma cinta de metal ajustada por parafuso.

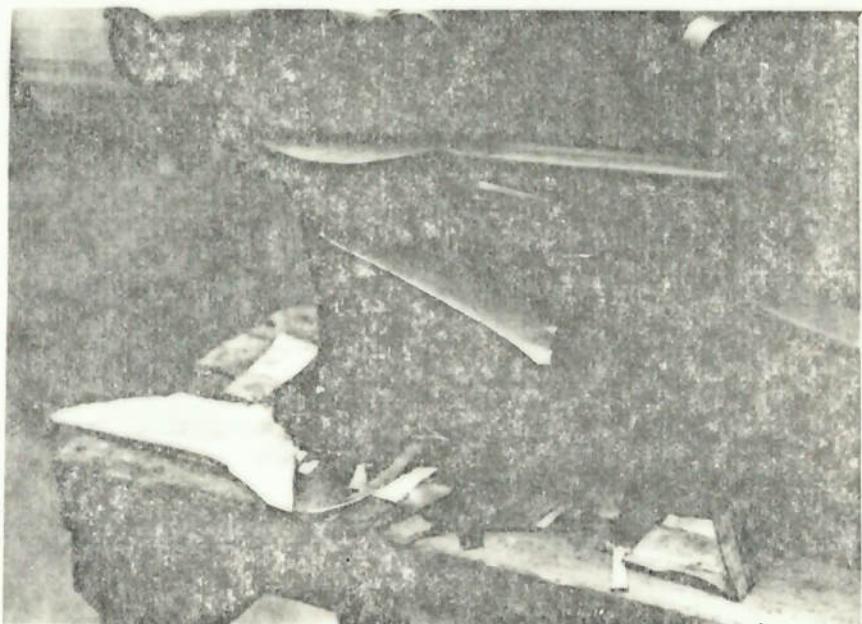


Fig. 2.2.3 - Corte de chapas na tesoura manual.



Fig. 2.2.4 - Corte de chapas na tesoura elétrica



Fig. 2.2.5 - Ponteamento para soldagem.



Fig. 2.2.6 - Soldagem oxi-acetilênica.

2.3 - CICLONE

2.3.1 - Projeto

2.3.1.1 - Introdução.

O ciclone é um tipo de filtro usado principalmente para separar partículas sólidas em suspensão no meio gasoso, fazendo-o percorrer uma trajetória espiral. A ação da força centrífuga faz com que as partículas sólidas colidam com a parede externa, limpando assim o gás. O valor desta força centrífuga chega ser muitas vezes maior que a força da gravidade.

Quando o projeto é bem feito, o controle das partículas se torna muito eficiente. A melhora de sua performance permite reduzir a necessidade de filtros secundários complicados.

As características que o tornam atraente na utilização como filtros primários de geradores de gás, a partir do carvão, são: simplicidade de construção, baixa energia necessária, bom desempenho a altas temperaturas e facilidade de limpeza e manutenção.

2.3.1.2 - Aproximação Teórica.

O procedimento para a otimização de um projeto de ciclone que vem a seguir foi extraído de um artigo da publicação Chemical Engineering conforme bibliografia. No trabalho de tradução apareceram alguns termos pouco comuns ao engenheiro mecânico, aos quais procuramos denominar da maneira mais lógica possível, podendo entretanto diferir dos verdadeiros nomes de algumas variáveis.

A aproximação teórica desenvolvida por Leith e Licht para o projeto de ciclones nos dá com uma boa precisão, as

eficiências relacionadas com as propriedades físicas e parâmetros do projeto. Entretanto, este modelo não é aplicado para altas velocidades ou vazões na tomada de gás, pois neste caso a eficiência chegaria a valores próximos de 100%, o que não ocorre na realidade.

Para uma melhor formulação teórica, foi utilizado o conceito de velocidade de sedimentação, proposto por Kalen e Zenz. A combinação destes modelos resulta em um projeto ótimo com um número mínimo de cálculos iterativos, sem que haja a necessidade de se elaborar programas de simulação.

2.3.1.2.1 - Cálculo da eficiência de retenção.

A aproximação proposta para o cálculo da eficiência de retenção é baseada no conceito de contínua mistura na direção radial das partículas não coletadas; junto ao cálculo da permanência média do gás no ciclone possuidor de entrada tangencial. A tabela 2.3.1 mostra um ciclone típico com as dimensões necessárias e seu relacionamento para vários projetos típicos.

O grau de eficiência pode ser calculado pela expressão:

$$\eta_i = 1 - \exp \left\{ -2 \left[\frac{G t_i Q}{D_c^3} (n+1) \right]^{\frac{0,5}{h+1}} \right\} \quad (1)$$

onde: $t_i = \rho_p (d_{p_i})^2 / 18 \mu$ (2)

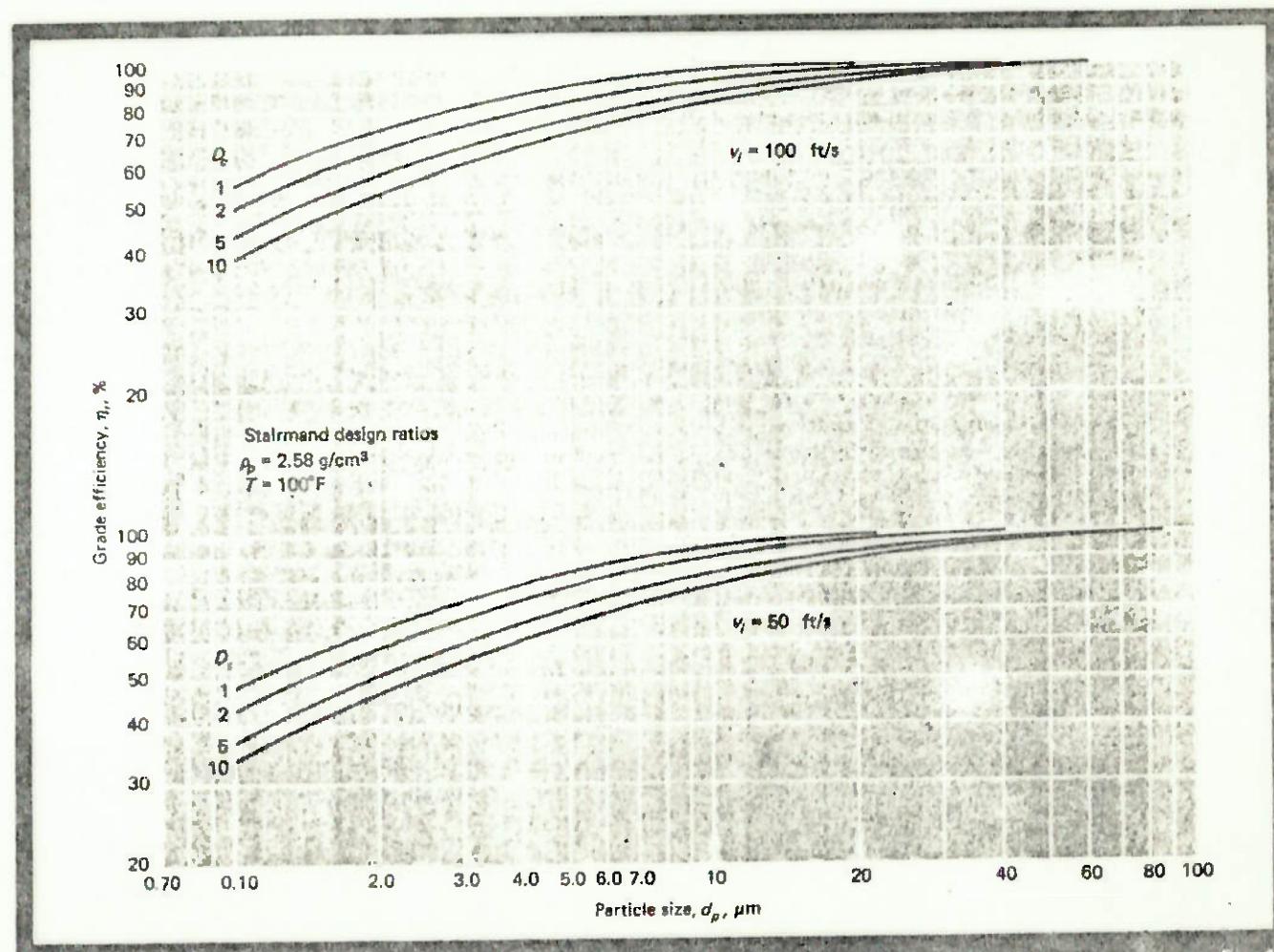
$$G = 8 K_c / K_a^2 \cdot K_b \quad (3)$$

Design configurations for tangential-entry cyclone

Table I

Nomenclature	High-efficiency			General-purpose	
	Stairmand [2]	Swift [5]	Lapple [4]	Swift [5]	Peterson & Whitby [8]
D_c body dia.	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
a inlet height	0.6	0.44	0.6	0.6	0.583
b inlet width	0.2	0.21	0.26	0.26	0.208
S outlet length	0.5	0.5	0.625	0.6	0.583
D_e outlet dia.	0.6	0.4	0.5	0.5	0.5
h cylinder height	1.5	1.4	2.0	1.75	1.333
H overall height	4.0	3.9	4.0	3.75	3.17
B dust outlet dia.	0.375	0.4	0.26	0.4	0.5
l natural length	2.48	2.04	2.30	2.30	1.8
G $8 K_c / K_d^2 / K_b^2$	551.3	699.2	402.9	381.8	324.8
N_H $16 ab / D_e^2$	6.40	9.24	8.0	8.0	7.76
G/N_H	86.14	75.67	50.38	47.7	41.86

Tabela 2.3.1



Grade efficiency of Stairmand cyclone correlated with particle size, inlet velocity and cyclone diameter

Fig. 1

Fig. 2.3.1

$$\eta = 1 - \left[1 - \frac{(12 D_c)^{0,14}}{2,5} \right] \left[\frac{T + 460}{530} \right]^{0,3} \quad (4)$$

Sendo:

- D_c = diâmetro do ciclone em ft
- d_p = diâmetro das partículas em ft
- ρ_p = densidade das partículas em lbm/ft^3
- T = temperatura em $^{\circ}\text{F}$
- μ = viscosidade do gás em lbm/ft.s
- Q = vazão em ft^3/s

O fator de configuração G é função apenas da geometria e é especificado pelas sete razões geométricas que descrevem sua forma (ver tabela 2.3.1)

Com estas relações o grau de eficiência pode ser calculado como função dos parâmetros de projeto e condições de operação. Numa eficiência global pode ser achada, para uma dada distribuição de partículas, pela equação (5)

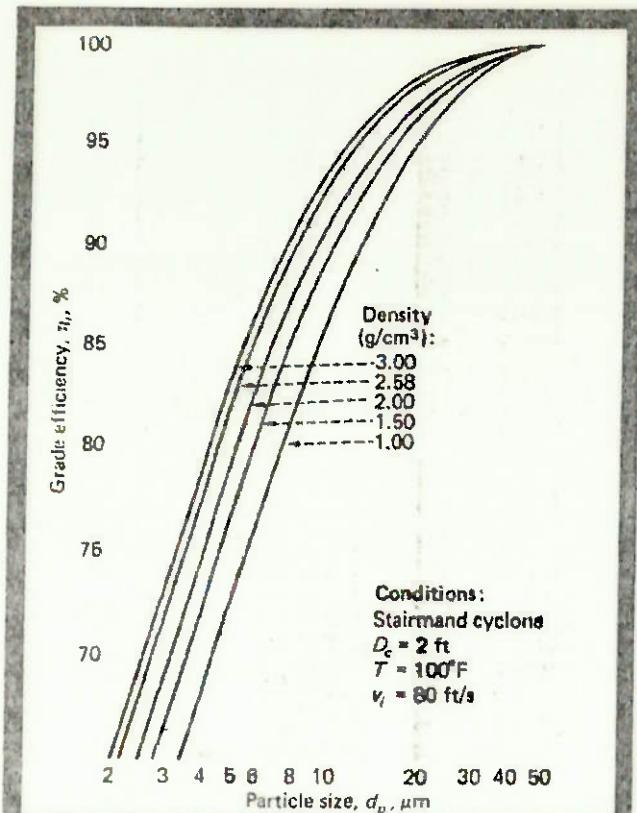
$$\eta_T = \sum m_i \eta_i \quad (5)$$

Deste modo, podemos prever ganhos em eficiência com valores crescentes de:

- densidades de partículas
- velocidade de entrada
- altura do corpo do ciclone;

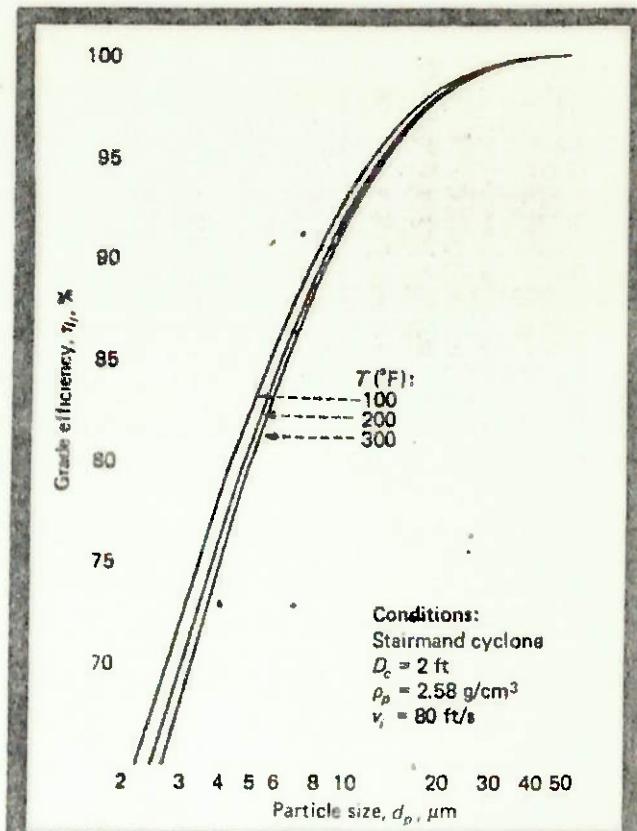
e perdas em eficiência para aumentos do:

- diâmetro do ciclone
- diâmetro de saída
- largura de entrada.



Grade efficiency related to particle density

Fig. 2



Heat affects efficiency less than density

Fig. 3

Fig. 2.3.2

Fig. 2.3.3

Particle size, μm	Percent by weight less than				Table II
	Superfine	Fine	Coarse	Example	
150	—	100	—	—	
104	—	97	—	—	
75	100	90	46	94	
60	95	80	40	92	
40	97	65	32	86	
30	96	55	27	79	
20	95	45	21	67	
16	94	38	16	58	
10	90	30	12	44	
7.5	85	26	9	34	
5.0	75	20	6	22	
2.5	66	12	3	8	

Tabela 2.3.2

As figuras 2.3.1, 2.3.2 e 2.3.3 mostram curvas típicas do grau de eficiência para o projeto básico Stairmand (tabela 2.3.1) como função do diâmetro de partículas, velocidade de entrada e diâmetro do ciclone; e a sua dependência da densidade das partículas e temperatura do fluido.

Embora aumente a eficiência com maiores densidades de partículas, os efeitos da temperatura são algo mais complicado. Num aumento de temperatura aumenta a viscosidade do fluido, o que diminui o tempo de relaxação τ . O expoente vórtice n também diminui, o que produz como resultado líquido uma menor eficiência.

As figuras 2.3.2 e 2.3.3 mostram que o efeito da temperatura na eficiência é bem menor que o da densidade. A importância de ambos os efeitos diminui com o aumento da partícula, como ilustra a fig.2.3.4.

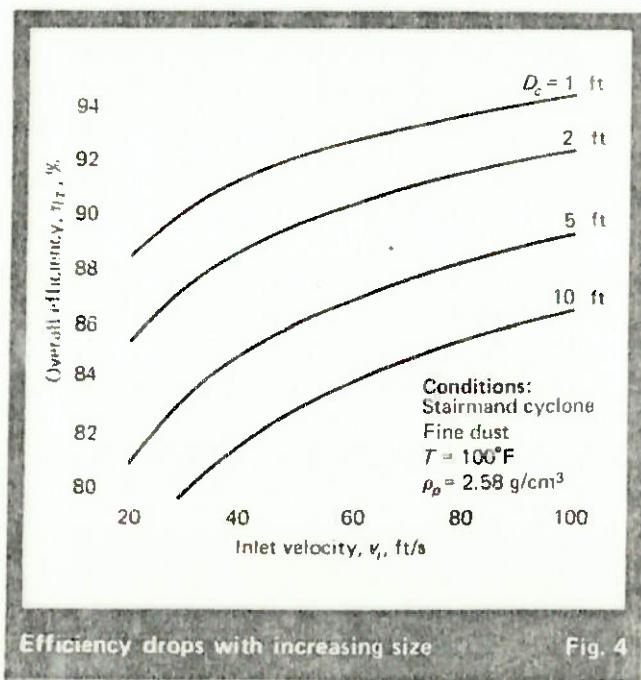


Fig.2.3.4 -

2.3.1.2.2 - Velocidade de arraste

Este conceito de arraste pode ser entendido como o -
transporte de sólidos em, por exemplo, tubos horizontais. A ve-
locidade de arraste pode ser definida de diversas maneiras, -
duas das quais se aplicam ao projeto do ciclone:

- A mínima velocidade do fluido necessária para evitar o assentamento das partículas sólidas carregadas na corrente.
- A velocidade necessária para levar partículas depositadas e transportá-las sem o seu assentamento.

Neste estudo a definição usada será a primeira, embora a segunda seja necessária na predição da velocidade máxima na entrada do ciclone. Zenz mostrou experimentalmente que a velocidade da segunda definição difere da outra por um fator 2 a 2,4. Ele desenvolveu uma relação entre a velocidade de arraste em tubulações e propriedades da partícula e do fluido.

$$v_s \omega = (\text{constante}) (S\Delta)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

onde a constante de arraste $S\Delta$ depende do tamanho e forma das partículas e ω e Δ são funções das propriedades das partículas e do fluido.

Para aplicar o conceito de arraste e relacioná-lo ao projeto, faremos as seguintes hipóteses:

- a) Não há deslizamento entre fluido e partículas
- b) A largura de entrada do ciclone é o diâmetro efetivo do tubo para o cálculo dos efeitos de arraste.
- c) A carga de partículas é menor que 10 part/ft³
- d) O efeito do diâmetro na velocidade de arraste é proporcional ao diâmetro.

nal à 0,4 potência da largura de entrada b .

Esta última hipótese representa uma aproximação que se torna mais precisa a medida que aumentamos a esfericidade da partícula.

Para aproximar a trajetória do fluido dentro do ciclone por um modelo de tubo em forma de mola, Kalen e Zenz desenvolveram a seguinte equação:

$$\frac{v_s}{\omega(n^{\circ} \text{ de } g's)^{1/3}} = 5,19 \cdot b^{0,4} \quad (7)$$

onde

$$\omega = \left[4 g \mu (\rho_p - \rho_f)/3 \rho_f^2 \right]^{1/3} \quad (8)$$

$$n^{\circ} \text{ de } g's = v_i/32,2 r \quad (9)$$

$$r = 1/2 (D_c - b) \quad (10)$$

Definindo a largura de entrada em termos de uma razão adimensional b/D_c , temos para a equação (7)

$$v_s = 2,055 \omega \left[\frac{b/D_c}{(1 - b/D_c)^{1/3}} \right] D_c^{0,067} \cdot r^{2/3} \cdot v_i \quad (11)$$

Temos então a velocidade de arraste como uma função das propriedades do fluido e da partícula e das dimensões do ciclone.

Dados experimentais demonstram que a máxima eficiência de "filtragem" ocorre para $v_i/v_s = 1,25$ e que a reentrada das partículas se dá para $v_i/v_s = 1,36$. A fig. 2.3.5 mostra o valor v_i/v_s calculado da equação (11) como função da velocidade de entrada e do diâmetro do ciclone para $b/D_c = 0,2$.

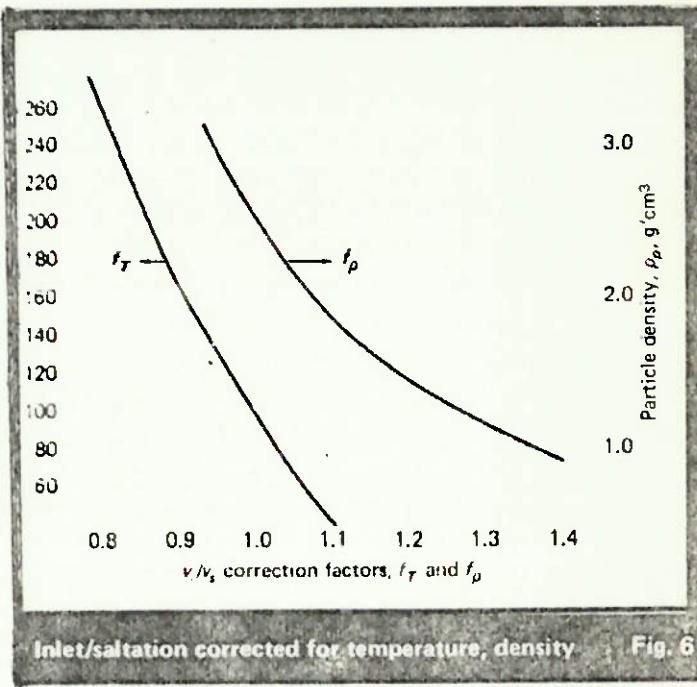
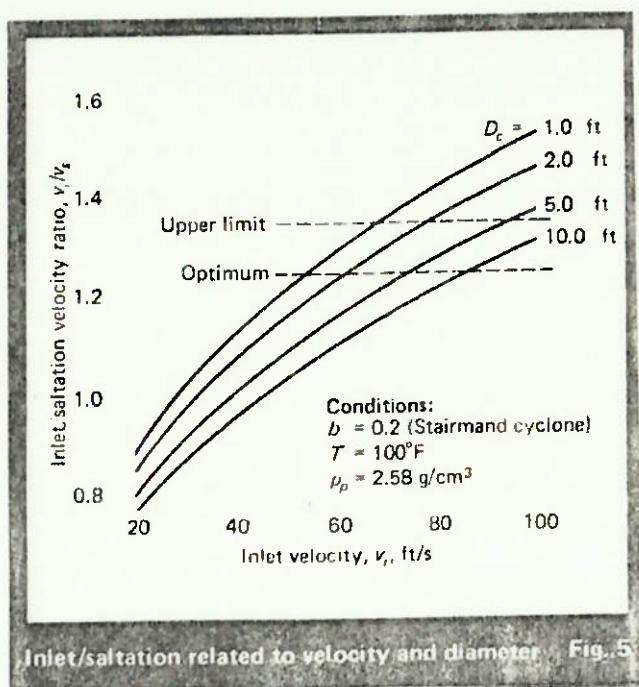


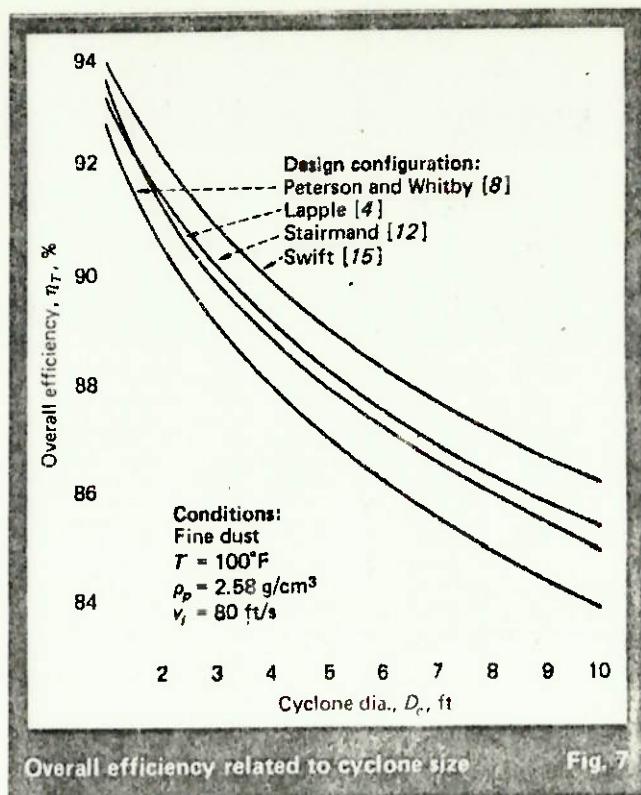
Fig. 2.3.5

Fig. 2.3.6

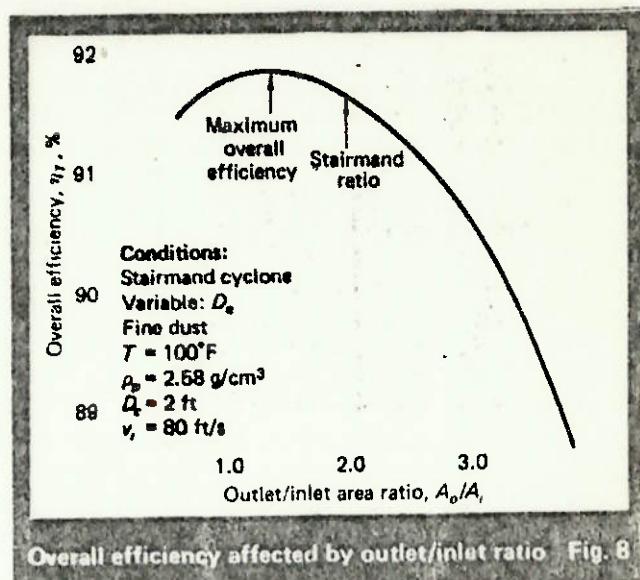
De modo geral, o intervalo de velocidades de entrada varia entre 50 e 90 pés/s, dependendo do diâmetro o que é consistente com estes resultados. A fig. 2.3.6 dá os fatores de correção da razão v_i/v_s para a temperatura e a densidade de partícula, usando $T = 100^\circ\text{F}$ e $\rho_p = 2,58 \text{ g/cm}^3$ como base. A razão correta pode ser calculada por:

$$v_i/v_s = f_T \cdot f_p (v_i/v_s) \quad (12)$$

onde f_T e f_p são os fatores de correção para a temperatura e a densidade, respectivamente.



Overall efficiency related to cyclone size



Overall efficiency affected by outlet/inlet ratio Fig. 8

Fig. 2.3.7

Fig. 2.3.8

2.3.1.2.3 - Perda de carga estimada.

Uma estimativa de perda de carga através do ciclone é necessária para uma melhor aproximação do ponto ótimo. Um valor de até 10 pol H_2O (0,25 m H_2O) é aceitável para operações normais. Nas previsões para a perda de carga as relações usadas são totalmente empíricas.

A aproximação escolhida nesta estimativa, o foi por motivos de simplicidade e precisão comparável a outras mais complexas. A perda de carga, segundo Shepperd and Lapple, é dada por:

$$\Delta P = (\rho_f v_i^2 / 2g) (N_H / \rho \text{H}_2\text{O}) \quad (13)$$

$$N_H = K(a b / D_e^2) \quad (14)$$

O parâmetro N_H varia somente com 3 razões geométricas. Se não houver pás na entrada toma-se $K = 16$ e se há um direcionamento neutro, $K = 7,5$.

ou

$$\Delta P = 0,003 \rho_f v_i^2 N_H \quad (13.a)$$

Como ΔP aumenta rapidamente com a velocidade de entrada, é óbvio que altas velocidades não só causam reentrada como também excessiva perda de carga.

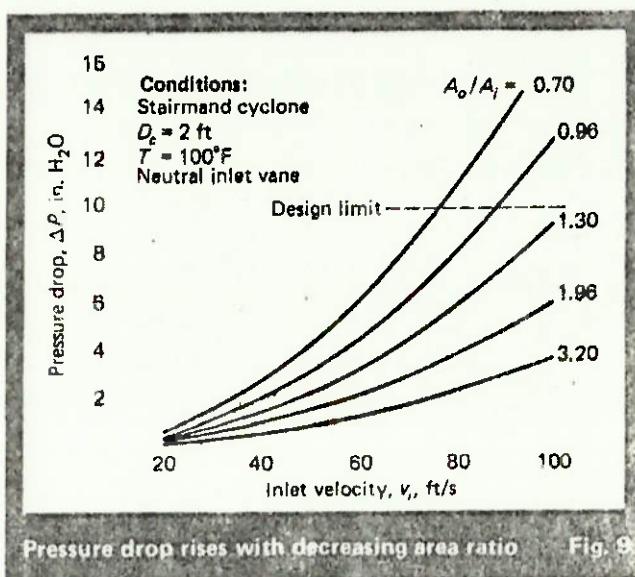


Fig.2.3.9

2.3.1.2.4 - Comparação entre diversos projetos.

Para comparar projetos aceitáveis, as distribuições - Stairmand (padrão) de partículas "gasosas" "finas" e "superfírias" foram testadas no ciclone de alta eficiência Stairmand.

As figuras 2.3.4, 2.3.10, 2.3.11 e 2.3.12. mostram os resultados.

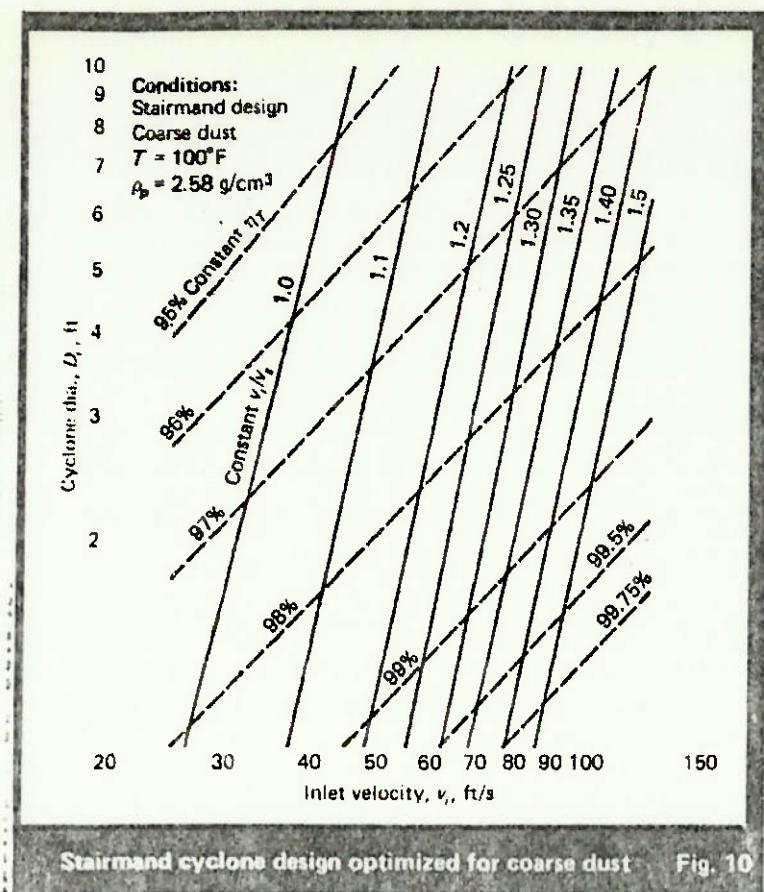


Fig. 2.3.10

Stairmand cyclone design optimized for coarse dust

Fig. 10

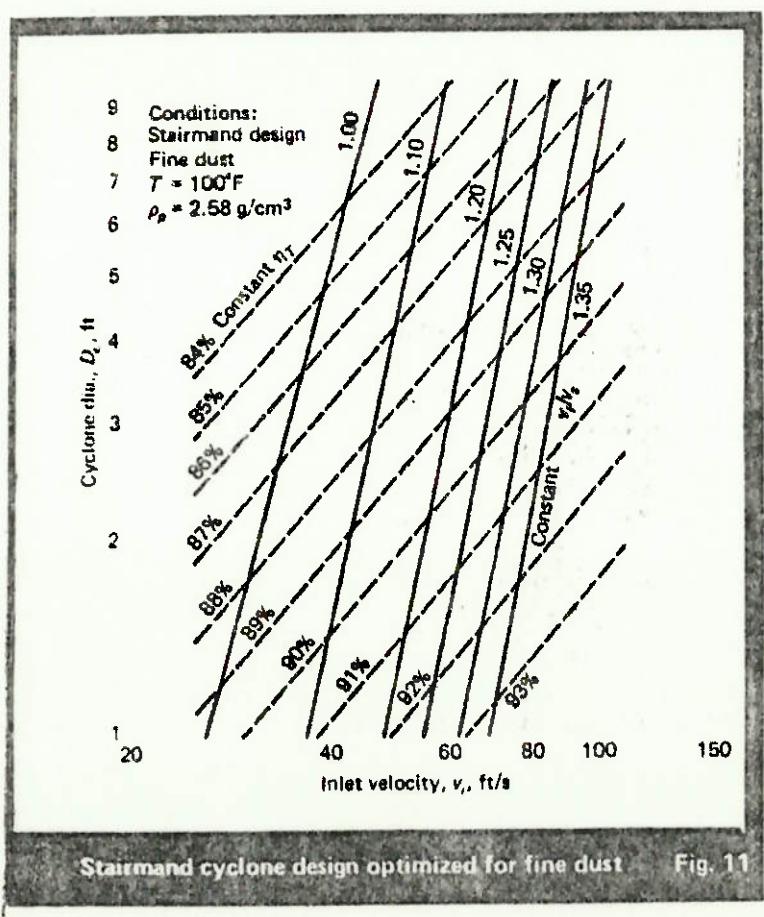


Fig. 2.3.11

Stairmand cyclone design optimized for fine dust

Fig. 11

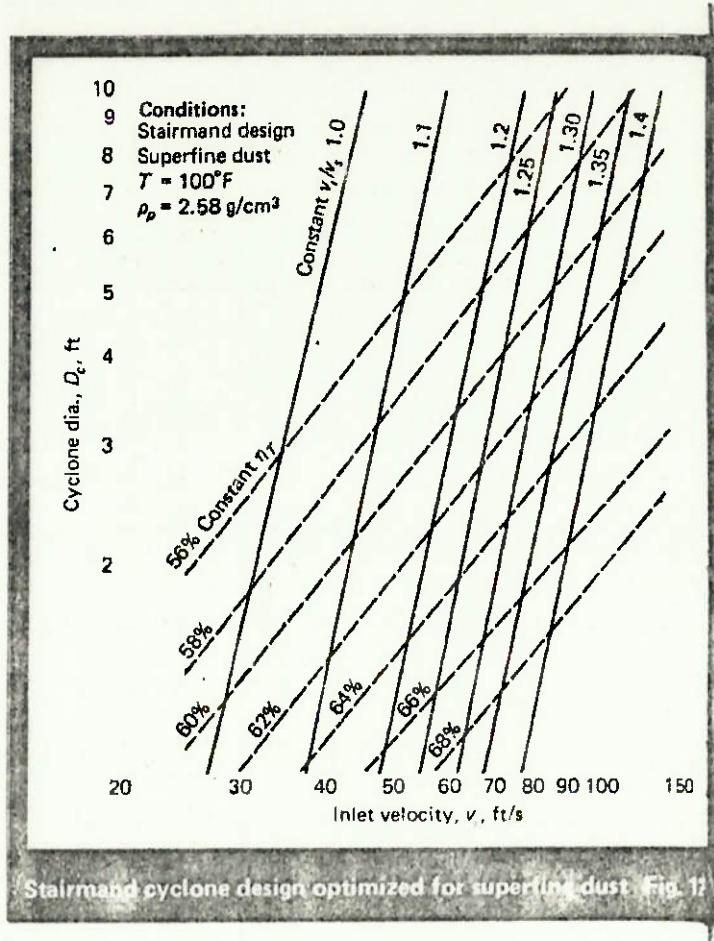


Fig. 2.3.12

Stairmand cyclone design optimized for superfine dust. Fig. 11

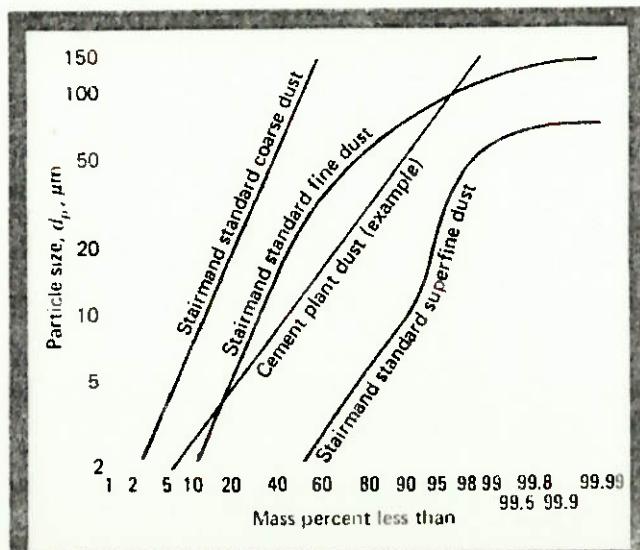


Fig. 2.3.13

Particle size distribution of sample aerosols Fig. 13

Além disso a distribuição "fina" foi usada em outros tipos de ciclone, de alta eficiência ou não.

As configurações básicas dos ciclones testados estão na tabela 2.3.1 e as distribuições básicas de partículas são apresentadas na tabela 2.3.2. e fig.2.3.13.

A fig.2.3.7 apresenta o resultado dos testes com as partículas "finas", dando a eficiência global. Como era esperado, a eficiência depende do valor de G . Portanto, para a otimização, poderíamos maximizar G . Entretanto, a perda de carga também deve ser levada em conta. No caso, o valor de N_H é diretamente proporcional a perda de carga e também é função dos parâmetros de projeto. Uma boa estratégia, portanto, seria maximizar a razão G/N_H , na escolha das dimensões básicas.

Usando o modelo de Leith e Licht, com a configuração da fig.2.3.1, encontramos valores da eficiência que passam por um ponto de máximo em função da razão (área de saída)/(área de entrada), conforme fig.2.3.8.

Foi notado que os valores da eficiência decrescem pouco a esquerda do ponto de máximo. Análise do modelo mostram que o volume no comprimento natural, V_ℓ , possui comportamento crescente/decrescente, indicando também que este efeito é observado somente em ciclones de comprimento natural $\ell < (H - S)$. A fig. 2.3.9 mostra que o valor de ΔP cresce apreciavelmente com menores razões A_s/A_e , o que indica o motivo de usarmos, às vezes, razões maiores que a correspondente a máxima eficiência.

2.3.1.2.5-Cálculo do fator de configuração G .

Para adequadamente descrever um ciclone, devemos especificar sete razões geométricas em termos do diâmetro do ciclone:

$$\frac{a}{D_c}, \frac{b}{D_c}, \frac{D_c}{D_c}, \frac{C}{D_c}, \frac{h}{D_c}, \frac{H}{D_c}, \frac{B}{D_c}$$

Para simplificar, só a dimensão principal será usada nas equações seguintes. É admitido um diâmetro unitário do ciclone.

As restrições que devemos observar para o projeto ser operacional são as seguintes:

- a) $a < S$ (para prevenir curto-circuito)
- b) $b < 1/2 (D_c - D_e)$ (para evitar contração)
- c) $S + \ell < H$ (para manter o vórtice dentro)
- d) $S < h$
- e) $h < H$
- f) $\Delta P < 10 \text{ in H}_2\text{O} (0,25 \text{ m.c.a})$
- g) $v_i/v_s \leq 1,35$ (para prevenir reentrada)
- h) $v_i/v_s \approx 1,25$ (para eficiência ótima)

Depois de determinadas estas razões, o fator G deve ser calculado para obter o grau de eficiência da equação (1). Para tanto são necessários os seguintes valores:

(i) Comprimento natural ℓ

$$\ell = 2,3 D_e (D_c^2 / ab)^{1/3} \quad (15)$$

• Para $\ell < (H - S)$, calcula-se o volume do ciclone no comprimento natural $V_{n\ell}$:

$$V_{nl} = \frac{\pi D_c^2}{4} (h - S) + \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) \times \left(\frac{\ell + S + h}{3} \right) \left(1 + \frac{d}{D_c} + \frac{d^2}{D_c^2} \right) - \frac{\pi D_e^2 \ell}{4} \quad (16)$$

onde

$$d = D_c - (D_c - B) \left[(S + \ell - h) / (H - h) \right] \quad (16.a)$$

• Para $\ell > (H - S)$, calcula-se o volume abaixo do duto de saída, V_H :

$$V_H = \frac{\pi D_c^2}{4} (h - S) + \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \right) \left(\frac{H - h}{3} \right) \left(1 + \frac{B}{D_c} + \frac{B^2}{D_c^2} \right) - \frac{\pi D_c^2}{4} (H - S) \quad (17)$$

ii) Constante do volume do ciclone K_c (usando V_{nl} ou V_H) :

$$K_c = (2V_s + V_{nl,H}) / (2 D_c^3) \quad (18)$$

onde

$$V_s = \left[\pi (S - a/2) (D_c^2 - D_e^2) \right] / 4 \quad (18.a)$$

iii) Tomando $K_a = a/D_c$ e $K_b = b/D_c$, o fator G pode ser calculado pela equação (3).

Note que $\ell < (H - S)$ para todos os fatores de configuração dos projetos testados que estão na tabela 2.3.1. Em poucos casos acontece do comprimento natural ℓ ser muito maior que $(H - S)$. Nestas ocasiões, a diferença relativa $\ell - (H - S)$ pode implicar em valores negativos para V_H .

2.3.1.2.6 - Procedimento sugerido para o cálculo.

Para facilitar o projeto inicial, são dados as eficiências de retenção de partículas para os três tipos básicos. Os resultados estão nas figuras 2.3.10, 2.3.11 e 2.3.12 como velocidade de entrada x diâmetro do ciclone para eficiências e razão v_i/v_s constantes.

Os dados necessários são as propriedades físicas das partículas e do gás, temperatura, distribuição de partículas e vazão.

- (a) Calcular a eficiência geral necessária
- (b) Comparar com os tipos básicos, tomando a distribuição de partículas que mais se assemelha (figs. 2.3.13 e tabela 2.3.2).
- (c) Corrigir a eficiência geral tomando como base 100 °F e $\rho_p = 2,58 \text{ g/cm}^3$ usando as figs. 2.3.2 e 2.3.3, e o diâmetro da partícula.
- (d) Corrigir a razão $v_i/v_s = 1,25$ para as condições atuais usando a fig. 2.3.6 e a equação (12).
- (e) Usando as figs. 2.3.10, 2.3.11 ou 2.3.12 (já selecionado o tipo básico) e com o n_T e v_i/v_s , achar D_c e v_i
- (f) Tomar as dimensões do ciclone observando as restrições das.
- (g) Calcular a vazão por ciclone ($Q_i = a b v_i$) e se há necessidade de mais de um colocado em paralelo

- (h) Calcular v_s com equação (11) ou fig. 2.3.5
- (i) Se $v_i/v_s > 1,35$ recalcular as dimensões e v_i
(sugestão: reduzir $N_o = Q/Q_i$ e aumentar D_c e/ou v_i)
- (j) Calcular n , G e t pelas equações (2), (3) e (4)
- (h) Calcular o grau de eficiência pela equação (1)
- (l) Para outros diâmetros de partículas refazer etapas (j)e(h)
- (m) Calcular eficiência geral pela equação (5) e comparar os resultados com a eficiência desejada
- (n) Calcular a perda de carga pela equação (13.a) ou fig. 2.3.9
- (o) Caso haja necessidade, ajustar os valor A_o/A_i , v_i , D_c e outras dimensões, recalculando a partir da etapa (e)

Para o projeto do nosso ciclone foi utilizada uma sequência de cálculos distinta desta acima, pelo fato de faltarem dados precisos nas tabelas.

2.3.1.3 - Cálculos Iniciais.

Pelo fato de termos uma variação de alguns parâmetros importantes no dimensionamento, como a vazão, a temperatura e propriedades químicas dos gases, além de alguns de difícil medição, optamos por calcular as dimensões do ciclone usando um método simplificado, utilizando como parâmetros valores médios das grandezas principais.

A seguir passaremos aos cálculos destes parâmetros e a formulação das hipóteses simplificadoras.

2.3.1.3.1 - Vazão aspirada pelo motor.

A eficiência de filtragem do ciclone varia bastante com a velocidade das partículas, ou seja, com a vazão do gás. Se calcularmos o ciclone para ter uma boa eficiência em vazões médias, ocorrerá o seguinte:

- (a) Nas vazões menores, a quantidade de partículas que passa no circuito por intervalo de tempo é menor, o que facilita a retenção nos filtros posteriores.
- (b) Nas vazões maiores, por ser o ciclone um filtro que utiliza a ação da força centrífuga para fazer com que as partículas colidam com as paredes, a maior velocidade do gás - faz com que mais partículas sejam afetadas por este efeito, apesar de termos maior possibilidade de reentrada do pó - filtrado. Usando um formato adequado para o ciclone, esta reentrada só ocorre para vazões bem maiores que a de projeto.

Portanto a vazão a ser adotada nos cálculos deve estar entre os valores máximo e mínimo da rotação do motor. Para o nosso dimensionamento vamos utilizar duas rotações do motor, 1000 e 2000 rpm, a segunda sendo um valor médio e a primeira - um pouco abaixo, pelo fato do funcionamento normal do motor - ser predominantemente em rotações mais baixas.

A eficiência volumétrica do motor deve ser avaliada considerando-se as condições de entrada do gás de gasogênio. O gás chega ao coletor de admissão a uma temperatura acima do - que chegaria o ar da mistura, e, pela perda de carga ser maior,

a uma pressão abaixo do normal. Por isso, a eficiência volumétrica é menor e o valor adotado será então: $\eta_v = 0,65$.

Temos então

$$Q_M = \frac{\text{rotação}}{2} \times \frac{V_d}{1000} \times \eta_v \times 60 \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (19)$$

onde

$$Q_M = \text{vazão aspirada pelo motor em m}^3/\text{h}$$

$$\text{rotação} = 1000 \text{ rpm} / 2000 \text{ rpm}$$

$$V_d = 4,2 \text{ l}$$

$$\eta_v = 0,65$$

daí

$$Q_{M1} = \frac{2000}{2} \times \frac{4,2}{1000} \times 0,65 \times 60$$

$$Q_{M1} = 164 \text{ m}^3/\text{h} \quad (46 \text{ l/s}) \quad (A)$$

e

$$Q_{M2} = \frac{1000}{2} \times \frac{4,2}{1000} \times 0,65 \times 60$$

$$Q_{M2} = 82 \text{ m}^3/\text{h} \quad (23 \text{ l/s}) \quad (B)$$

2.3.1.3.2 - Vazões de gás e ar.

Tomemos a seguinte amostra padrão de gás de gasogênio proveniente da utilização de carvão vegetal:

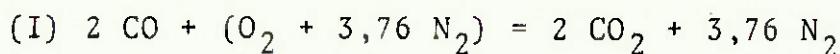
CO : 27% (combustível da reação (I))

H₂ : 4% (combustível da reação (II))

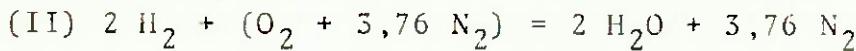
N_2 : 65% (inerte)

CO_2 : 4% (inerte)

Este gás chega aos cilindros onde queima na presença de ar atmosférico já dosado pelo misturador. Supondo que estas reações sejam estequiométricas temos:



- nº de moles de combustível : 2,0
- nº moles de combustível + ar : 6,76
- aumento de volume pela adição de ar: $\frac{6,76}{2,0} = 3,38$



- analogamente o aumento de volume é: $\frac{6,76}{2,0} = 3,38$

Estes acréscimos de volume pela mistura ar-combustível devem ser considerados no cálculo da vazão forçada pelo circuito. Isto é feito na equação seguinte:

$$\frac{CO}{[0,27 \times 3,38]} + \frac{H_2}{[0,04 \times 3,38]} + \left[\frac{N_2 + CO_2}{0,69} \right] = 1,74$$

Portanto o volume de gás de gasogênio é aumentado de 74% pela adição do ar da mistura. Então, do gás que chega aos cilindros, 18% em volume é combustível ($CO + H_2$), 42% é ar atmosférico e 40% são gases inertes (N_2 e CO_2).

Temos então que a vazão do gás de gasogênio na tubulação é cerca de 58% da vazão aspirada pelos cilindros. Isto é válido se não houver entrada de ar falso no trajeto.

Denominando de Q_c o valor da vazão de gás que -

atravessa o ciclone temos:

$$Q_C = 0,575 Q_M \quad (20)$$

Então

$$Q_{C1} = 0,575 \times Q_{M1} = 0,575 \times 164$$

$$Q_{C1} = 94 \text{ m}^3/\text{h} \quad (C)$$

e

$$Q_{C2} = 0,575 \times Q_{M2} = 0,575 \times 82$$

$$Q_{C2} = 47 \text{ m}^3/\text{h} \quad (D)$$

2.3.1.3.3 - Propriedades do gás.

É necessário fazermos uma avaliação de algumas características do gás que atravessará o ciclone. Para tanto estimamos a temperatura local do gás em 400°C e a sua pressão (vácuo) como praticamente a atmosférica.

A viscosidade líquida do gás pode ser calculada como a média ponderada das diversas viscosidades dos gases puros a 400°C , utilizando a composição gasosa usada no item 2.3.1.3.2.

Assim procedendo chegamos a

$$\mu = 0,072 \frac{1\text{b}}{\text{ft} \cdot \text{h}} = 2,98 \times 10^{-4} \text{ poise} \quad (E)$$

Por cálculo análogo, a densidade do fluido a 400°C pode ser tomada como

$$\rho_f = 0,039 \text{ lb/ft}^3 = 6,2 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3 \quad (F)$$

2.3.1.3.4 - Características das partículas.

a) Densidade média

Foi encontrado o valor $\rho_p = 1.25 \text{ g/cm}^3$ ($78,0 \text{ lb/ft}^3$) (G) obtido pesando-se uma quantidade de pó de carvão e medindo-se o volume de álcool deslocado.

b) Diâmetro médio

Por teste de sedimentação foi verificado que a velocidade de sedimentação em álcool de quase todo o pó é superior a 48 cm/h . Portanto, pela lei de Stokes, temos:

$$D_p = \sqrt{\frac{18 \cdot \mu \cdot v \cdot 10^8}{(\rho_p - \rho_f) \cdot g}} \quad (21)$$

onde:

D_p = "diâmetro" médio da partícula (μm)

μ = viscosidade líquida (poise)

v = velocidade de sedimentação (cm/s)

ρ_p = densidade da partícula (g/cm^3)

ρ_f = densidade do fluido (g/cm^3)

Substituindo os valores obtidos, temos:

$$D_p = \sqrt{\frac{18 \times 2,98 \times 10^{-4} \times 48 \times 10^8}{3600 \times (1,25 - 0,00062) \times 9,8}}$$

$$D_p = 24 \text{ } \mu\text{m} \quad (H)$$

2.3.1.4 - Dimensionamento.

Para efetuarmos o nosso dimensionamento simplificando das diversas grandezas do ciclone necessitamos obedecer às seguintes restrições mencionadas no item 2.3.1.2.5

- (a) $a < s$ (para prevenir curto-circuito)
- (b) $b < \frac{1}{2} (D_c - D_{c'})$ (para evitar contração)
- (c) $s + l < h$ (para manter o vórtice dentro)
- (d) $s < h$
- (e) $h < H$
- (f) $\Delta P < 10 \text{ pol H}_2\text{O}$ ($0,25 \text{ m H}_2\text{O}$)
- (g) $v_i/v_s < 1,35$ (para prevenir reentrada)
- (h) $v_i/v_s \approx 1,25$ (para eficiência ótima)

Estas dimensões são referentes às que constam na fig.2.3.14. O formato do ciclone de entrada tangencial foi escolhido baseando-se na configuração do ciclone de alta eficiência Stairmand (tabela 2.3.1)

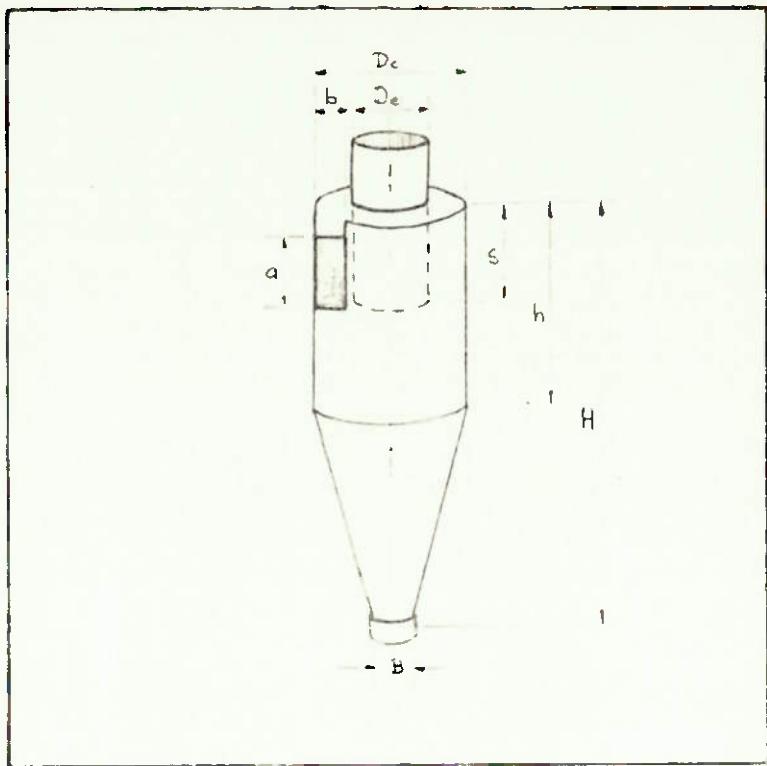


Fig.2.3.14 - Dimensões principais do ciclone.

Os coeficientes de forma adotados são, portanto, praticamente iguais ao modelo padrão, à excessão do comprimento de saída S , que é 20% maior.

São eles (fig.2.3.14):

- | | |
|---------------------------|-------------|
| . diâmetro do ciclone | $D_C = 1,0$ |
| . altura da entrada | $a = 0,5$ |
| . largura da entrada | $b = 0,2$ |
| . comprimento da saída | $S = 0,6$ |
| . diâmetro da saída | $D_C = 0,5$ |
| . altura do cilindro | $h = 1,5$ |
| . altura total | $H = 3,75$ |
| . diâmetro da saída do pó | $B = 0,37$ |

Todas estas dimensões são encontradas a partir do diâmetro D_C , que por sua vez é calculado usando os valores já calculados nas seguintes equações do item 2.3.1.2.

$$\omega = \left[4 \cdot g \cdot \mu (\rho_p - \rho_f) / 3 \rho_f^3 \right]^{1/3} \quad (8)$$

$$v_s = 2,055 \cdot \omega \cdot \left[\frac{b/D_C}{(1 - b/D_C)^{1/3}} \right] \cdot D_C^{0,067} \cdot v_i^{2/3} \quad (11)$$

$$(v_i/v_s)^1 = f_T \cdot f_p \cdot (v_i/v_s) \quad (12)$$

Usando os valores aproximados das propriedades do gás e do pó temos para a equação (8):

$$g = 32,2 \text{ ft/s}^2$$

$$\mu = 2,98 \times 10^{-4} = 2,0 \times 10^{-5} \text{ lb/ft.s} \quad (E)$$

$$\rho_f = 0,039 \text{ lb/ft}^3 \quad (F)$$

$$\rho_p = 78,0 \text{ lb/ft}^3 \quad (G)$$

dai

$$\omega = 3,5 \text{ ft/s} \quad (I)$$

A equação (12) expressa a alteração da razão entre a velocidade de entrada e a velocidade de arraste, devido a variações na temperatura e na densidade da partícula em relação às hipóteses feitas.

Estas correções são obtidas pelas figs. 2.3.2. e 2.3.3.

a) correção da temperatura (750°F) : - 2,0%

b) correção da densidade ($1,25 \text{ g/cm}^3$) : -4,5%

Daí pela fig. 2.3.6 temos

$$f_T = 0,7$$

$$f_p = 1,27$$

Portanto a equação (12) resulta em

$$(v_i/v_s)^1 = 0,7 \times 1,27 \times (1,25) = 1,09 \quad (\text{J})$$

Para usarmos como variável a vazão Q na equação (11), podemos considerar a seguinte equação para a velocidade de entrada:

$$v_i = \frac{9,11 \cdot Q_c}{a \cdot b} \quad (22)$$

onde

v_i = velocidade de entrada em ft/s

Q_c = vazão em m^3/h

$a \cdot b$ = área da secção de entrada em cm^2

Com o objetivo de acharmos uma expressão para o diâmetro do ciclone D_c em função de variáveis convenientes, vamos reordenar a equação (11) como segue:

$$\frac{v_s}{v_i} = 2,055 \times \omega \times \left[\frac{b/D_c}{(1 - b/D_c)} \right]^{1/3} D_c^{0,067} \times v_i^{-1/3}$$

Substituindo a equação (18) e os resultados (I) e (J) temos:

$$0,92 = 2,055 \times 3,5 \left[\frac{b/D_c}{(1 - b/D_c)} \right]^{1/3} D_c^{0,067} \times \left(\frac{a \cdot b}{9,11 \times Q_c} \right)^{1/3}$$

Efetuando e reagrupando temos:

$$D_c = \left(\frac{0,215}{b/D_c} \right)^{1,364} \left(\frac{Q_c (1 - b/D_c)}{a/D_c \cdot b/D_c} \right)^{0,455} \quad (23)$$

Esta equação nos dá o diâmetro do ciclone em função dos coeficientes de forma da entrada e da vazão, já considerando parâmetros relativos às propriedades das partículas e do gás, inclusive temperatura.

Para os coeficientes a/D_c e b/D_c vamos adotar os mesmos valores de ciclone de alta eficiência Stairmand, respectivamente 0,5 e 0,2.

Para a vazão usaremos os valores já calculados (C) e (D). Temos então dois diâmetros:

$$D_{c1} = \left(\frac{0,215}{0,2} \right)^{1,364} \left(\frac{94 \times 0,8}{0,1} \right)^{0,455}$$

$$D_{c1} = 22,5 \text{ cm} = 0,74 \text{ ft} \quad (K)$$

e

$$D_{c2} = \left(\frac{0,215}{0,2} \right)^{1,364} \left(\frac{47 \times 0,8}{0,1} \right)^{0,455}$$

$$D_{c2} = 16,3 \text{ cm} = 0,53 \text{ ft} \quad (L)$$

Portanto, com este dimensionamento obtemos o diâmetro $D_{c1} = 22,5$ cm referente à vazão de gás com rotação 2000 rpm e $D_{c2} = 16,3$ cm referente à rotação 1000 rpm. Sendo estes dois valores adequados às condições existentes, procederemos agora aos cálculos das eficiências e perdas de carga de ambos, com a finalidade de analisarmos os seus desempenhos nas diversas condições.

2.3.1.5 - Análise de Desempenho dos ciclones.

A função de um filtro ciclone consiste em retirar - da corrente gasosa a maior parte possível das partículas sólidas nela existentes, sem, contudo, induzir uma perda de carga excessiva no circuito. Consequentemente, seu desempenho deve - ser avaliado pela sua eficiência de filtragem para os diversos "diâmetros" de partículas e rotações, além da perda de pressão na linha.

2.3.1.5.1 - Perda de carga.

Segundo o item (2.3.1.2.3.), uma boa estimativa da perda de carga pode ser conseguida pelas equações

$$\Delta P = 0,003 \rho_f \cdot v_i^2 \cdot N_H \quad (13.a)$$

$$N_H = K \left(a \cdot b / D_e^2 \right) \quad (14)$$

A equação (14) é função apenas do formato do ciclo ne, sendo

$$K = 16 \text{ (não há direcionamento)}$$

$$a \cdot b = 0,1$$

$$D_e = 0,5$$

Dai

$$N_H = 6,4 \quad (M)$$

As vazões a serem consideradas nos cálculos, segundo as equações (18) e (19), são referentes a quatro rotações do motor.

As velocidades são calculadas usando a equação (21), sendo que as áreas da secção de entrada são

$$\text{CICLONE 1 } (D_{c1}) : \quad a_1 = 11,3 \text{ cm} \quad a_1 \cdot b_1 = 50,6 \text{ cm}^2 \\ b_1 = 4,5 \text{ cm}$$

$$\text{CICLONE 2 } (D_{c2}) : \quad a_2 = 8,2 \text{ cm} \quad a_2 \cdot b_2 = 26,6 \text{ cm}^2 \\ b_2 = 3,3 \text{ cm}$$

As perdas de carga para as velocidades consideradas em ambos os ciclones estão comparadas na tabela seguinte:

TABELA 2.3.3

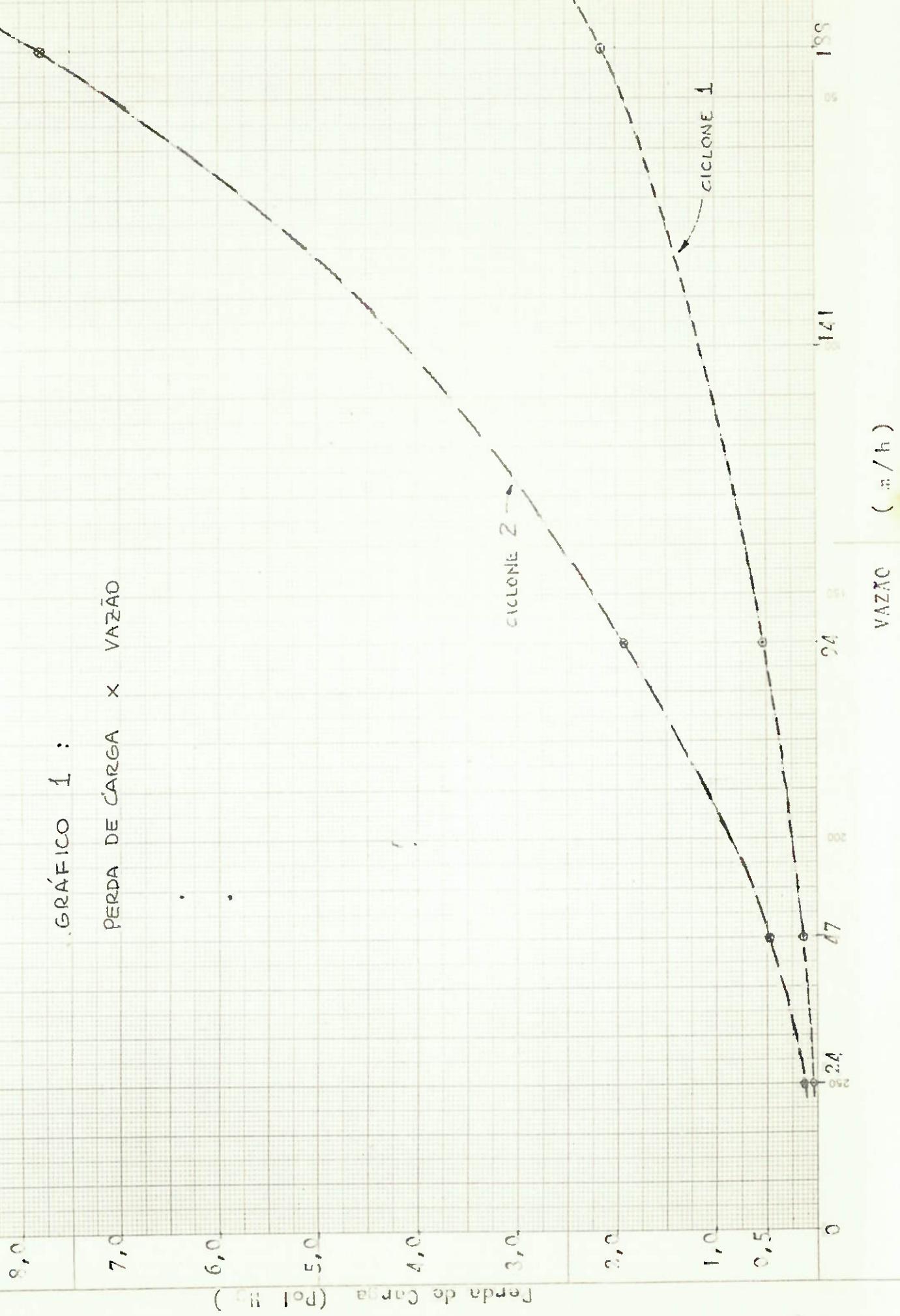
rotação (rpm)	vazão (m ³ /h)	CICLONE 1		CICLONE 2	
		v _{i1} (ft/s)	ΔP _i (in H ₂ O)	v _{i2} (ft/s)	ΔP ₂ (in H ₂ O)
500	24	4,3	0,03	8,2	0,13
1000	47	8,5	0,14	16,1	0,49
2000	94	16,9	0,53	32,2	1,94
4000	188	33,9	2,15	64,5	7,79

Podemos observar que a máxima queda de pressão na linha é $\Delta P = 7,79 \text{ in H}_2\text{O}$ ($\sim 0,20 \text{ m.c.a}$) obtida no ciclone 2. Este valor é bastante aceitável pois o máximo recomendado para operações normais é $10 \text{ in H}_2\text{O}$ ($\sim 0,25 \text{ m.c.a}$). Além disso, as condições de operação do equipamento sugerem baixas rotações.

Estes resultados estão no gráfico (1) anexo.

GRÁFICO 1 :

PERDA DE CARGA X VAZÃO



2.3.1.5.2 - Eficiência de retenção

O equacionamento da aproximação da eficiência foi feita no ítem 2.3.1.2.1, resultando as equações (1), (2), (3), (4), além das equações auxiliares (15), (16), (16.a), (17) (18) e (18.a).

As equações mostram que a eficiência de retenção das partículas é influenciada pelos seguintes fatores:

- formato e tamanho do ciclone
- viscosidade e temperatura do gás
- densidade e diâmetro das partículas
- vazão no circuito

Estando todos estes parâmetros definidos no nosso modelo, passemos aos cálculos. Analisaremos, para cada ciclone, a influência do diâmetro das partículas e da vazão na eficiência global. Os demais parâmetros ou tem pouca influência (temperatura) ou não se alteram significativamente na amostra gem (densidade das partículas e viscosidade do gás).

O fator tamanho será verificado na comparação entre os dois ciclones, que possuem o mesmo formato.

a) CICLONE 1

a.1) Dimensões

$$D_{c1} = 0,74 \text{ ft} \quad S = 0,37 \text{ ft}$$

$$D_{c1} = 0,37 \text{ ft} \quad h = 1,11 \text{ ft}$$

$$a_1 = 0,37 \text{ ft} \quad H = 2,98 \text{ ft}$$

$$b_1 = 0,15 \text{ ft} \quad B = 0,28 \text{ ft}$$

a.2) Fator de configuração G

. equação (15)

$$\ell_1 = 2,3 D_{c1} (D_{c1}^2/a_1 b_1)^{1/3}$$

$$\ell_1 = 1,83 \text{ ft}$$

$$H_1 - S_1 = 2,61 \text{ ft}$$

Como $\ell_1 < H_1 - S_1$, calculamos o $V_{n\ell 1}$

. equação (16)

$$V_{n\ell 1} = \frac{\pi D_{c1}^2}{4} (h_1 - S_1) + \frac{\pi D_{c1}^2}{4} \left(\frac{\ell_1 + S_1 + h_1}{3} \right) \left(1 - \frac{d_1}{D_{c1}} + \frac{d_1^2}{D_{c1}} \right) - \frac{\pi D_{e1}^2 \ell_1}{4}$$

onde

$$d_1 = D_{c1} - (D_c - B_1) \left[(S_1 + \ell_1 - h_1) / (H_1 - h_1) \right]$$

$$d_1 = 0,47 \text{ ft}$$

daí

$$V_{n\ell 1} = 0,441 \text{ ft}^3$$

. equação (18.a)

$$V_{s1} = \left[\pi (S_1 - a_1/2) (D_{c1}^2 - D_{e1}^2) \right] / 4$$

$$V_{s1} = 0,060 \text{ ft}^3$$

. equação (18)

$$K_{c1} = (2 V_{s1} + V_{n\ell 1}) / (2D_{c1}^3)$$

$$K_{c1} = 0,692$$

Sendo

$$K_{a1} = a_1/D_{c1} = 0,5$$

$$K_{b1} = b_1/D_{c1} = 0,2$$

temos:

. equação (3)

$$G_1 = 8 K_{c1}^2 / K_{a1}^2 K_{b1}^2$$

$$G_1 = 554$$

a.3) Eficiência

Tomando os valores

$$\rho_p = 78 \text{ lbm/ft}^3$$

$$\mu = 2,0 \times 10^{-5} \text{ lbm/ft.s}$$

$$T = 750^\circ \text{F}$$

$$d_p = 25 \text{ }\mu\text{m} = 8,2 \times 10^{-5} \text{ ft}$$

$$Q_1 = 94 \text{ m}^3/\text{h} = 0,922 \text{ ft}^3/\text{s}$$

Temos as equações:

• equação (2)

$$\tau_1 = \rho_p (d_{pi})^2 / 18 \mu$$

$$\tau_1 = 1,46 \times 10^{-3} \text{ seg.}$$

• equação (4)

$$n_1 = 1 - \left[1 - \frac{(12 D_{c1})^{0,14}}{2,5} \right] \left[\frac{T + 460}{530} \right]^{0,3}$$

$$n_1 = 0,415$$

• equação (1)

$$\eta_1 = 1 - \exp \left\{ -2 \left[\frac{G_1 \tau_1 Q_1}{D_{c1}^3} (n_1 + 1) \right]^{0,5/(n_1 + 1)} \right\}$$

$$\eta_1 = 94,4 \%$$

Esta é a eficiência de retenção do ciclone para o diâmetro médio $d_p = 25 \mu\text{m}$ e vazão $Q_1 = 94 \text{ m}^3/\text{h}$. Variando estes dois parâmetros montamos a tabela 2.3.4.

TABELA 2.3.4
Eficiência do ciclone 1

Vazão Q m^3/h	ft^3/s	d _p						
		2 μm	5 μm	15 μm	25 μm	35 μm	45 μm	55 μm
24	0,231	25,6	43,2	70,8	82,9	89,4	93,1	95,4
47	0,461	31,4	51,4	79,2	89,5	94,3	96,7	98,1
94	0,922	38,3	60,3	86,6	94,4	97,3	98,7	99,4
188	1,844	46,0	69,3	92,3	97,5	99,1	99,6	99,8

b) CICLONE 2

b.1) Dimensões

$$D_{c2} = 0,53 \text{ ft}$$

$$S_2 = 0,27 \text{ ft}$$

$$D_{e2} = 0,27 \text{ ft}$$

$$b_2 = 0,80 \text{ ft}$$

$$a_2 = 0,27 \text{ ft}$$

$$H_2 = 2,12 \text{ ft}$$

$$b_2 = 0,11 \text{ ft}$$

$$B_2 = 0,20 \text{ ft}$$

b.2) Fator de configuração G

Analogamente, temos

$$l_2 = 1,31 \text{ ft} < H_2 - S_2 = 1,85 \text{ ft}$$

$$V_{n\ell 2} = 0,158 \text{ ft}^3$$

$$V_{s2} = 0,022 \text{ ft}^3$$

$$K_{c2} = 0,679$$

e

$$G_2 = 543$$

b.3) Eficiência

Tomando os mesmos dados de (a.3), temos

$$\tau_2 = \tau_1 = 1,46 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

$$n_2 = 0,383$$

e

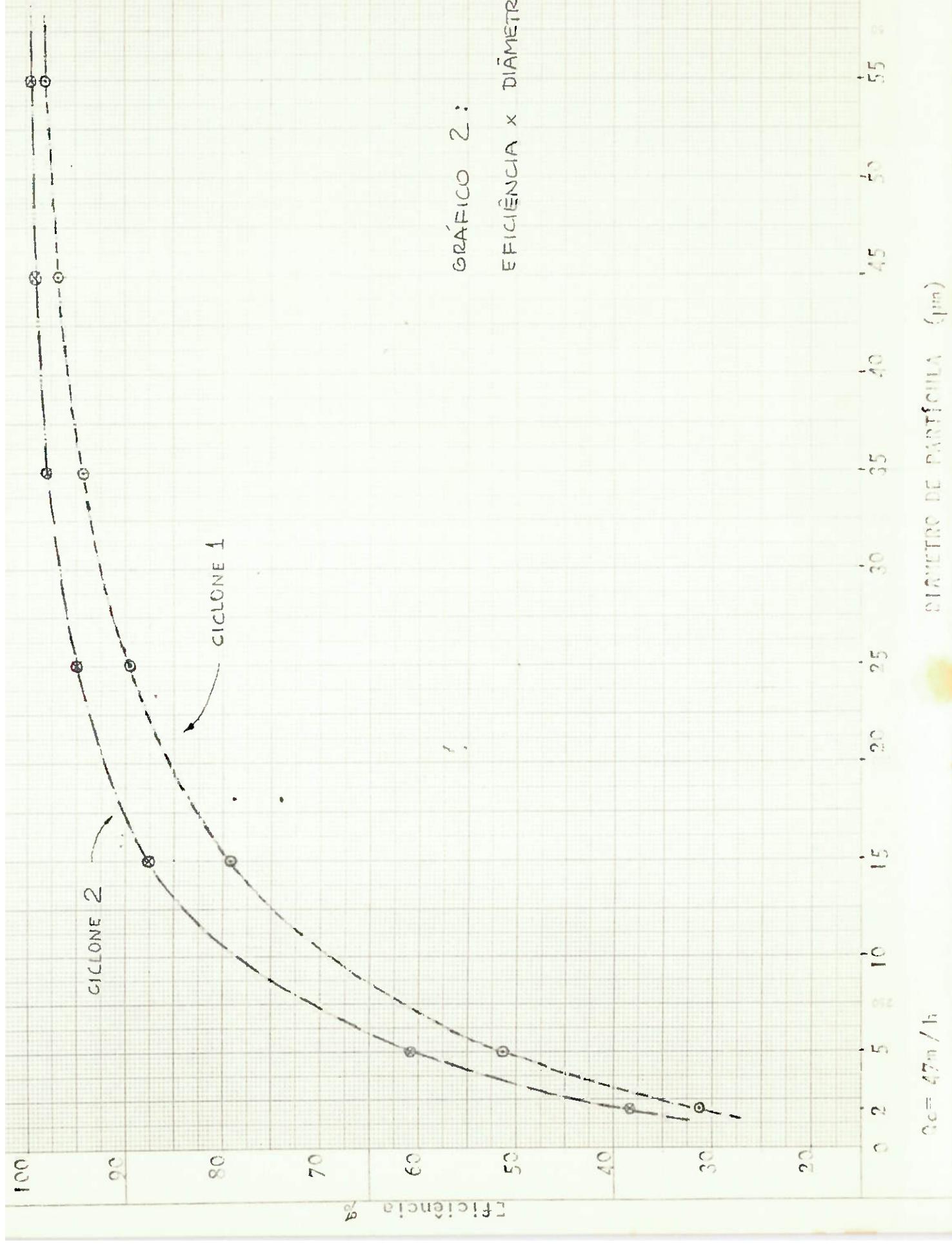
$$\eta_2 = 97,9 \%$$

Podemos notar que a eficiência de retenção no ciclone 2 foi maior que no ciclone 1, para as mesmas condições. Com o intuito de verificarmos as variações nesta eficiência, em função da vazão e diâmetro de partículas, calculamos a tabela 2.3.5 abaixo.

TABELA 2.3.5
Eficiência do Ciclone 2

Vazão Q m^3/h	ft ³ /s	d _p						
		2 μm	5 μm	15 μm	25 μm	35 μm	45 μm	55 μm
24	0,231	31,4	51,8	80,2	90,4	94,9	97,2	98,4
47	0,461	38,3	60,9	87,5	95,0	97,8	99,0	99,5
94	0,922	46,3	70,0	93,1	97,9	99,3	99,7	99,9
188	1,844	55,0	78,7	96,8	99,3	99,8	99,9	99,97

Como esperávamos, a eficiência do ciclone 2 ficou acima da eficiência conseguida pelo ciclone anterior, em todas as faixas (acentuadamente nas baixas vazões), conforme demonstra melhor os gráficos (2) e (3), anexos. Isto se deve ao fato de existirem maiores valores de força centrífuga nos menores diâmetros. Contudo, a perda de carga no ciclone 2 foi superior à do ciclone 1, pelas maiores velocidades impostas. Sendo os valores da queda de pressão bastante aceitáveis, principalmente nas baixas vazões, escolheremos para construção o ciclone 2, de maior eficiência e menor custo.



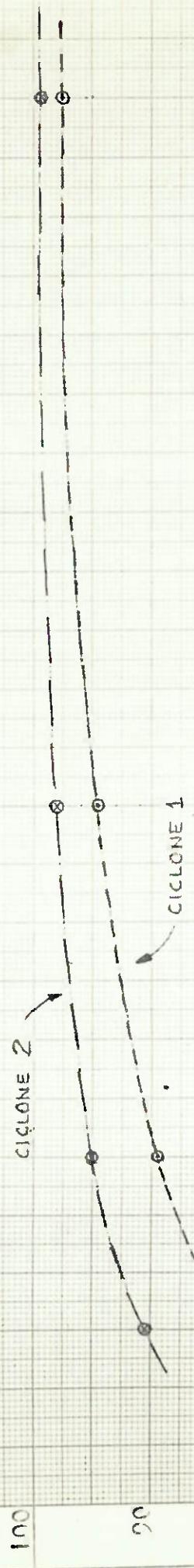


GRÁFICO 3:
EFICIÊNCIA X VÁZQUE

$D_p = 25 \text{ }\mu\text{m}$ VÁZQUE (m^3/h)

100 90 80 70 60 50 40 30 20 10 0

2.3.2 - Construção.

O ciclone foi construído utilizando os seguintes materiais:

- chapa 20 (espessura ~ 1 mm)
- conexão de ferro galvanizado com tampa rosada Ø 2"
- flanges de aço com espessura de 5 mm

Inicialmente traçamos no papel, em escala natural, o desenvolvimento plano das formas desejadas do ciclone. Em seguida, cortamos as chapas com tesoura elétrica e tesoura manual. Mais adiante, as partes cilíndricas e cônicas foram calandradas até o seu diâmetro de projeto, quando possível. As peças com diâmetro inferior ao da calandra foram trabalhados manualmente até o formato desejado (ver figura). O furo com Ø 80 mm foi feito com um bits especial adaptado à furadeira de topo. O duto de entrada, com secção circular passando para retangular, foi moldado com a ajuda de martelo e bigorna. Para unir as peças, foi utilizada a soldagem oxi-acetilênica - após a devida ajustagem (ver figura). A conexão de ferro galvanizado foi adaptada no torno (ver figura) e soldada com latação. Depois algum tempo de uso, o filtro recebeu, externamente, pintura com tinta à base de alumínio, própria para altas temperaturas (600 °C).

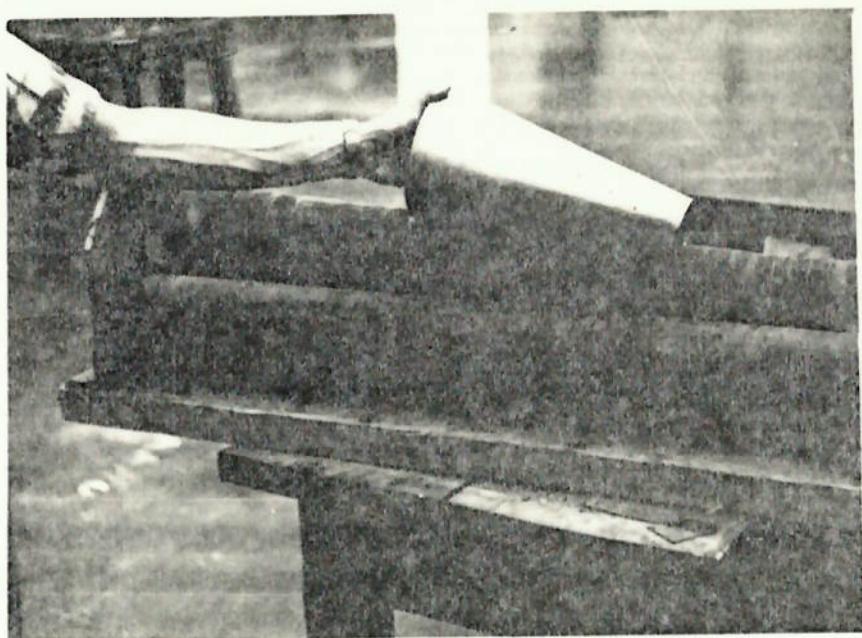


Fig.2.3.15 - "Calandragem" da parte cônica.

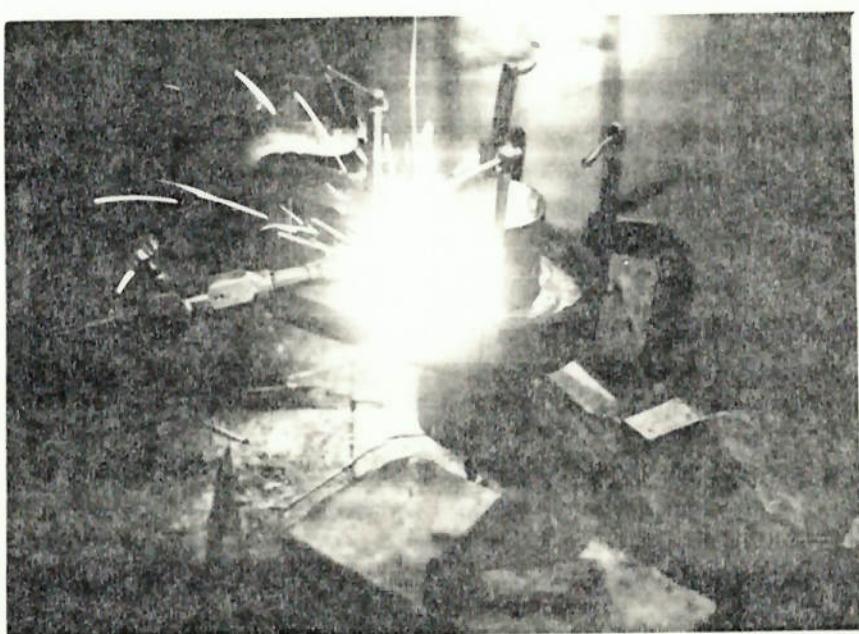


Fig.2.3.16 - Soldagem da tampa superior



Fig.2.3.17 - Ajustagem do duto de entrada

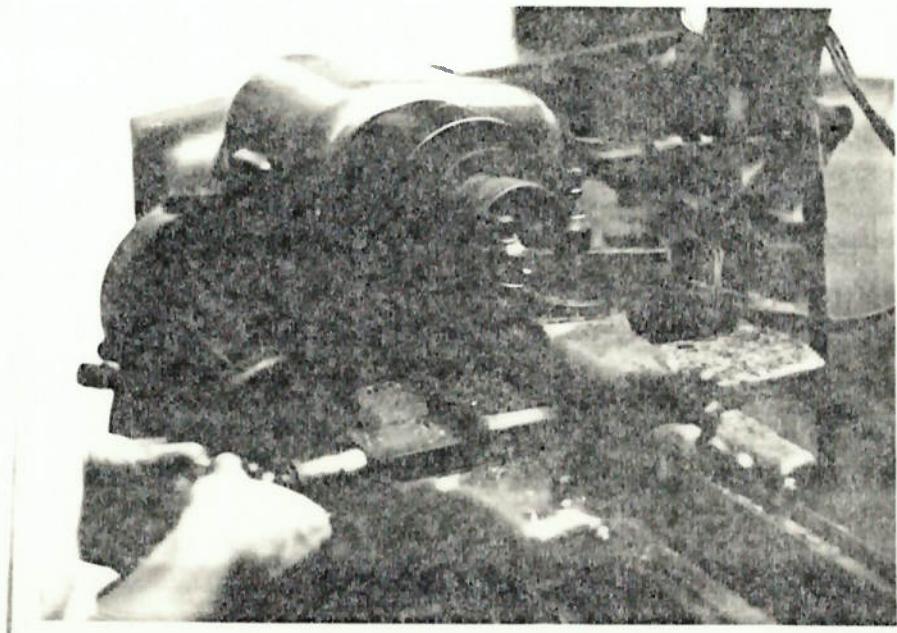


Fig.2.3.18 - Ajustagem da tampa inferior no torno.

2.4 - FILTRO DE MANGA

2.4.1 - Considerações para projeto.

A eficiência dos filtros é afetada pelo tamanho das partículas contidas no gás, já que filtrar partículas torna-se progressivamente mais difícil na medida que o tamanho das partículas decresce. A eficiência é afetada também pela velocidade do gás.

Na seleção de um filtro, um elemento fundamental a ser levado em conta é o grau de limpeza do gás que se deseja.

As três características operativas de filtros de ar são a eficiência, a queda de pressão ou a resistência à passagem do gás e a vida útil, que está relacionada com a capacidade de sustentação de pó.

A eficiência mede a habilidade do filtro em reter partículas. A queda de pressão é a diferença de pressão estática através de um filtro para uma determinada vazão de gás, aumentando com o aumento desta. No caso de filtros estáticos a queda de pressão aumenta diretamente com o tempo, e quanto menores as partículas, mais rápido é o aumento da queda de pressão.

A capacidade de armazenamento ou de sustentação é definida como a quantidade em peso do pó que um filtro armazena quando o mesmo está saturado, que quer dizer quando a queda de pressão é tal que ao limitar a vazão, obriga a que o filtro seja limpo ou trocado.

Os filtros de mangas são ótimos separadores de partículas de pó fino, sendo suas eficiências altas, ainda que para partículas do tamanho de 1 micron e superiores.

Se bem que aparentemente o mecanismo de filtragem é dado pelo efeito de intercepção produzido pela tela, já foi comprovado que sua eficiência aumenta a medida que vai sendo usado, devido ao acúmulo de pó sobre as mangas, pó este que fecha ainda mais a trama têxtil, melhorando o seu desempenho. São notáveis os aumentos de eficiência nas telas depois de um certo tempo de uso em relação ao seu estado inicial.

Sua eficiência está baseada em fazer passar o ar através das telas, que são bem fechadas, com baixa velocidade. O pó fica acumulado sobre a superfície. Depois de um certo tempo, o fluxo é interrompido para a agitação das mangas.

A prioridade com que são sacudidos esses filtros, depende de cada equipamento ou da quantidade de pó, devendo evitar-se assim que a acumulação do mesmo sobre as mangas aumente por demais a queda de pressão, restringindo o fluxo de gás.

As telas são normalmente de algodão tecido ainda que lã, papel, fibra de vidro e fibras sintéticas possam ser usadas em certas aplicações.

Esses coletores estão limitados para a condição de ar não excessivamente úmido, para evitar a condensação de umidade sobre a tela.

As temperaturas máximas não devem superar, em média, a 90 °C. Para telas de algodão, a temperatura máxima deve ser 85 °C; para telas de lã, 95 °C. Admite-se ainda temperaturas mais altas usando-se telas de fibras sintéticas.

No caso do uso de filtro em gasogênios, a escolha do material da tela deve ser feita com muito critério. Isto se deve ao material estar sujeito a altas temperaturas, além de poder haver um elevado grau de umidade no gás. A eficiência do filtro em qualquer condição deve ser satisfatória, de modo a não permitir a entrada de pó na câmara de combustão. Se por acaso houver passagem deste pó, e ele se acumular no cilindro,

o motor corre sério risco pois este material é abrasivo.

2.4.2 - Seleção do Material e Construção

Visando uma boa escolha do material para a tela foram consultadas diversas fontes. Alguns dos tipos utilizados em filtros de manga e suas propriedades estão colocadas nas tabelas 2.4.1 e 2.4.2.

TABELA 2.4.1

Propriedades relativas de algumas fibras sintéticas em ordem de performance.

Resistance to
Abrasion (Wet & Dry)

Nylon 6,6 & 6
Polypropylene/Polyesters
"Nomex" nylon
Acrylics & Modacrylics
"Teflon"
Rayon
Vinyon

Resistance to
Dry Heat

"Teflon"
"Nomex" nylon
Polyesters
Acrylics/Rayon
Nylon 6,6
Nylon 6
Polypropylene
Modacrylics
Vinyon

Resistance to
Moist Heat

"Teflon"
"Nomex" nylon
Acrylics
Nylon 6,6 & 6
Rayon
Polyesters
Polypropylene
Modacrylics
Vinyon

Resistance to
Acids

"Teflon"
Polypropylene
Vinyon
Modacrylics
Acrylics
Polyesters
"Nomex" nylon
Nylon 6,6 & 6
Rayon

Resistance to
Alkalies

"Teflon"
Polypropylene
Vinyon
Modacrylics
Nylon 6,6 & 6
"Nomex" nylon
Polyesters
Rayon
Acrylics

Resistance
to Oxidizing and
Reducing Agents

"Teflon"
Polypropylene
"Nomex" nylon
Modacrylics
Polyesters
Acrylics
Nylon 6,6 & 6
Vinyon
Rayon

Tensile
Strength

Nylon 6,6 & 6
Polyesters
Polypropylene
"Nomex" nylon
Rayon
Acrylics & Modacrylics
Vinyon
"Teflon"

Max. Recommended
Operating Temp. (F.)
For Continuous Service

"Teflon" 500°
"Nomex" nylon 450°
Polyesters 300°
Acrylics (homopolymers) 284°
Acrylics 275°
Rayon 275°
Nylon 6,6 250°
Nylon 6 250°
Polypropylene 225°
Modacrylics 180°

Price Relationship
(Per Pound)**
(Highest to Lowest)

STAPLE	FILAMENT
"Teflon"	"Teflon"
"Nomex" nylon	"Nomex" nylon
Nylon 6,6 & 6	Acrylics
Polyesters	Modacrylics
Acrylics	Polyesters
Modacrylics	Nylon 6,6 & 6
Vinyon (Rhovyl)	Vinyon (Rhovyl)
Polypropylene	Polypropylene
Viscose Rayon	Viscose Rayon

* Características mais importantes para a utilização em gasogênio.

TABELA 2.4.2

Propriedades de outros materiais disponíveis

Tecido	Temperatura de fusão	Máxima temperatura de operação	Resistência a ácidos	Resistência a alcalinos	Abrasão
Algodão	Decompõe-se a 302 °F	180 °F	Pobre	Muito bom	Muito bom
Lã	Queima a 572 °F	200 °F	Muito bom	Pobre	Razoável a bom
Nylon 6,6	480 °F	200 °F	Razoável	Excelente	Excelente
HT-1	Queima a 700 °F	400 °F	Melhor que o níilon, pior que Dacron e Orlon	Pior que o níilon, melhor que Dacron e Orlon	Bom
Dacron	482 °F	275 °F	Bom para a maioria dos ácidos minerais. Dissolve-se parcialmente em ácido sulfúrico	Bom em bases fortes, razoável em bases fortes	Muito bom
Orlon	Amolece a 482 °F	260 °F	Bom a excelente em ácidos minerais	Razoável a bom em bases fortes	Bom
Cetina	Amolece a 475 °F	280 °F	Bom em ácidos minerais	Bom em bases fortes	Bom
Dyne	Amolece a 325 °F	180 °F	Excelente a mesmo a altas concentrações	Insuficiente a mesmo a altas concentrações	Excelente
Polipropileno	333 °F	200 °F	Excelente	Excelente	Excelente
Teflon	Decompõe-se a 750 °F	Emite gases tóxicos a 450 °F	Insuficiente exceção do flúor	Insuficiente exceção do cloro, trifluoreteto de metila, ácido sulfúrico	Excelente
Flanelas Flannel	1470 °F	550 °F	Excelente a bom	Excelente a bom	Excelente
Filtor	Amolece a 505 °F	270 °F	Bom a excelente	Bom	Bom a excelente

Levando-se em conta os diversos fatores já mencionados e o preço das fibras sintéticas e dos tecidos, decidiu-se pela aquisição do poliéster DP-118, que tem máximas temperaturas de funcionamento por volta de 140 °C, além de boas características gerais conforme constam nas tabelas. Se houvesse garantias que o desempenho de um material mais barato como a flanelas fosse satisfatório, esta poderia ser usada. Temos notícias que a flanelas e a lã funcionam bem em instalações de pequeno porte, ou seja, vazões menores.

O desempenho real do filtro escolhido será avaliado na fase de testes.

Algumas das características do material utilizado constam de um folheto do fabricante, que está reproduzido na tabela 2.4.3 anexa.

TABELA 2.4.3

Propriedades do poliéster utilizado segundo o fabricante (Duráveis-Equipamentos de Segurança Ltda.)

— TECIDO FILTRANTE — D.P. 118 F.

TIPO DE FILTRAGEM:	— Utilizados em filtros de ar para separação de pós, gases industriais, resíduos poluentes, etc.
	— As mangas coletoras de pó confeccionadas com este material são utilizadas nos seguintes tipos de indústria: CIMENTO — FUNDIÇÕES — ADUBOS FERTILIZANTES — AMIANTO — MADEIREIRAS (pó de lixadeiras), etc.
FIBRA:	— 100% Polyester
PERMEABILIDADE AO AR:	— 40 cfm/ft ² a 1/2" H ₂ O
ABSORÇÃO DE UMIDADE: 20/25°C — C — 65% UR:	— 0,5%
RESISTÊNCIA À RUPTURA:	— Trama 80 Kg/Poli ² — Urdume 133 Kg/Poli ²
RESISTÊNCIA TÉRMICA:	— Início de encolhimento 165°C — Ponto de amolecimento 238°C 240°C — Ponto de fusão 260°C — Faixa térmica, recomendável, até 110°C, para longos períodos de trabalho, com subidas rápidas até 145°C.
RESISTÊNCIA QUÍMICA:	— Boa resistência contra a maioria dos ácidos orgânicos e inorgânicos excluídas altas concentrações de ácido sulfúrico e nítrico. — Exposto ao contato com agentes oxidantes, apresenta ótima resistência química. — Resiste à maioria dos solventes orgânicos.

Com o objetivo de se poder avaliar como as alterações na eficiência de filtragem afetam o desempenho do veículo, foram confeccionados dois elementos para serem colocados em série (maior eficiência e perda de carga) ou usar apenas um no circuito.

Para tanto, dimensionamos as duas mangas de modo a se superporem sem haver qualquer contato a menos da parte superior, como mostra a fig.2.4.1.

Para o cálculo da área mínima, usamos a permeabilidade dada pelo fabricante, sabendo que é um dado aproximado e que varia conforme as partículas se fixam entre as fibras.

Para uma área de 1 ft^2 e uma diferença de pressão de 0,5 pol H_2O , a vazão máxima permitida é:

$$Q = 40 \text{ ft}^3/\text{min} = 68 \text{ m}^3/\text{h}$$

A máxima vazão no circuito ocorre a 4000 rpm :

$$Q_c = 188 \text{ m}^3/\text{h}$$

Portanto a área mínima é :

$$A_{\min} = 2,76 \text{ ft}^2 = 0,26 \text{ m}^2$$

Os dois elementos foram dimensionados de modo a utilizar ao máximo o volume interno do corpo metálico do filtro, resultando em áreas de aproximadamente $1,0$ e $0,8 \text{ m}^2$, bem acima da área mínima.

Para a fixação das mangas usamos uma grade metálica, colocada sobre as bordas do tecido.

A vedação é garantida pela própria tampa que, ao fechar, pressiona um tarugo de madeira colocado sobre a grade (fig.2.4.1)

A tampa inferior do cilindro estava oxidada, como todo o equipamento antigo, possuindo furos, o que exigiu reparos.

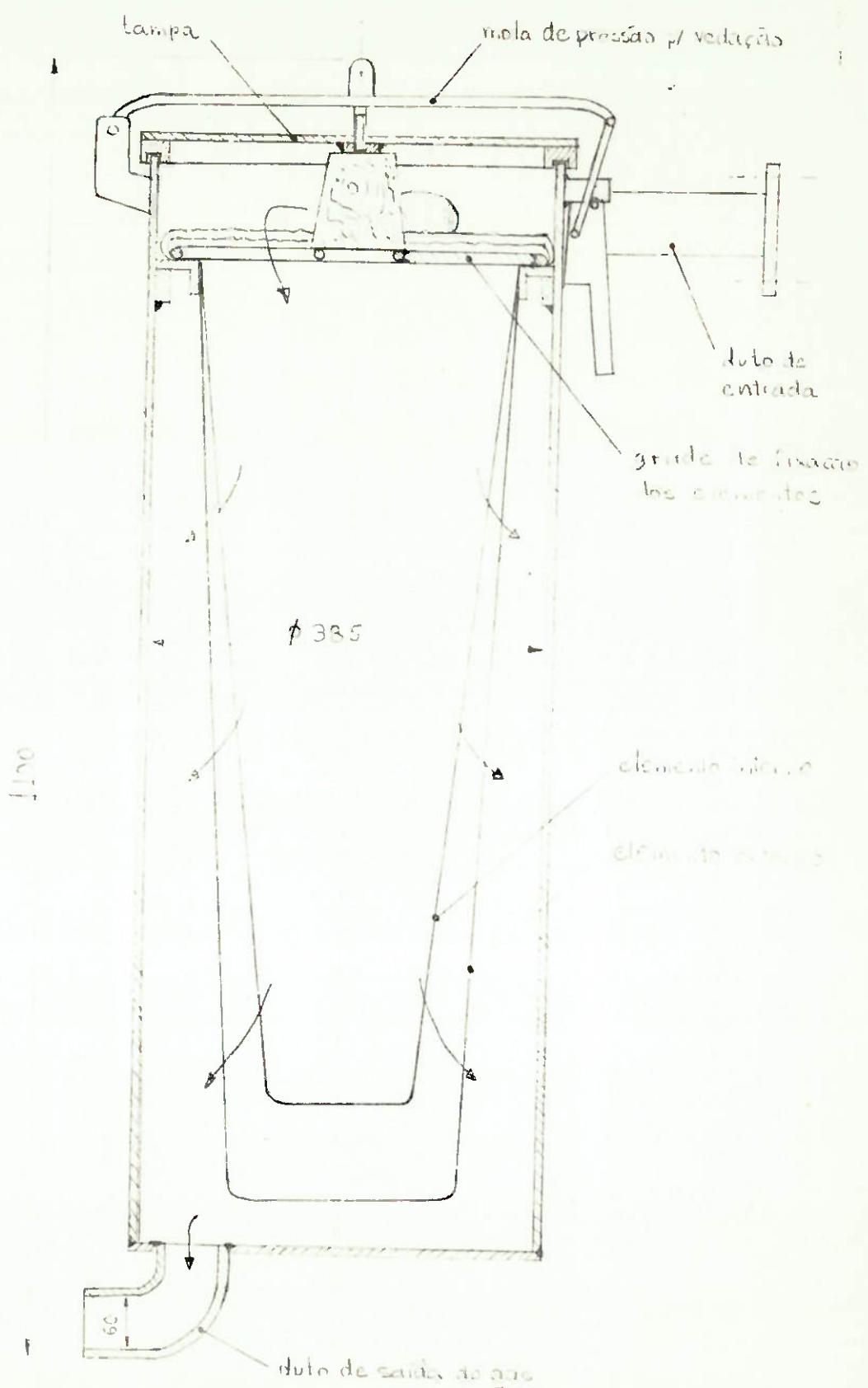


Fig. 2.4.1 - Corte do filtro de manga.

2.5 - TROCADOR DE CALOR

2.5.1 - Projeto

2.5.1.1 - Dados:

(a) vazão em volume de monóxido de carbono: $Q_{CO} = 96 \text{ m}^3/\text{h}$

(cálc. a partir de rotação do motor e sucção pelos cilindros).

(b) Temp. de entrada do gás : $T_e = 300^\circ\text{C}$

(c) " " saída " " : $T_s = 200^\circ\text{C}$

(d) " " entrada do ar (estimativa): $T_{ar} = 26^\circ\text{C}$

(e) Diâmetro dos tubos de passagem do gás: 25 mm (1")

2.5.1.2 - Propriedades dos gases envolvidos:

ar (a 40°C) : $\rho = 1,09 \text{ kg/m}^3$

$C_p = 0,241 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$

CO (a 100°C): $\rho = 0,886 \text{ kg/m}^3$

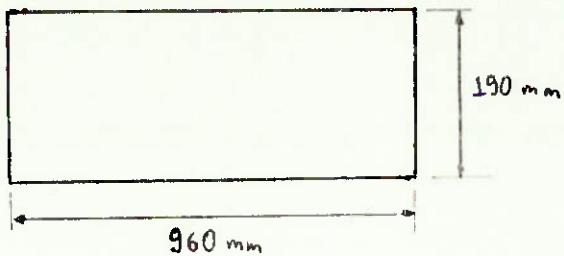
$C_p = 0,25 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}$

2.5.1.3 - Cálculo da vazão em massa de ar.

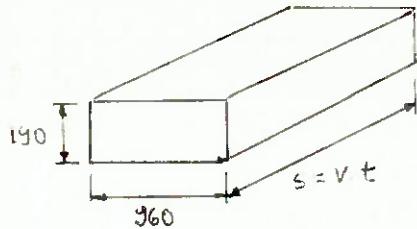
(a) Hipóteses:

- velocidade média do carro: $v = 50 \text{ km/h}$

- área teórica útil de passagem do ar pelo trocador: (região de passagem do ar)



Assim, supondo que o ar se desloca relativamente ao carro com $V = 50 \text{ km/h}$ e passa pela área acima estabelecida, temos a seguinte vazão em volume de ar:



$$Q_{ar} = V \cdot S \quad \therefore$$

$$Q_v = \frac{50.000}{h} \times 0,19 \times 0,96 = 9120 \text{ m}^3/\text{h}$$

2.5.1.4 - Estimativa da temperatura de saída do ar.

$$m_{CO} C_{p_{CO}} \Delta T_{CO} = m_{ar} C_{p_{ar}} \Delta T_{ar}$$

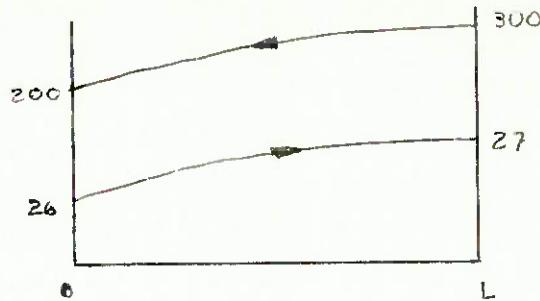
$$\underbrace{(96 \times 0,886)}_{Q_m} \times 0,25 \times (300 - 200) = (1,09 \times 9120) \times 0,241 \times (T_s - 26)$$

$$Q_m = \rho \times Q_v$$

$$\therefore T_s = 27^\circ\text{C}$$

2.5.1.5 - Calor trocado.

Utilizando-se uma distribuição de temperatura num trocador de calor de correntes opostas (e depois utilizar o fator de correção para correntes cruzadas), temos:



Assim, a partir da temperatura média logarítmica, obtemos:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{LN}$$

$$\Delta T_{LN} = \frac{\Delta T_O - \Delta T_L}{\ln \frac{\Delta T_O}{\Delta T_L}}$$

$$\Delta T_O = 200 - 26 = 174 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_L = 300 - 27 = 273 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\therefore \Delta T_{LN} = \frac{174 - 273}{\ln \frac{174}{273}} = \frac{-99}{-0,45} = 220 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para a correção para correntes cruzadas, temos:

$$T_1 = 26^{\circ}\text{C}$$

$$P = \frac{200 - 300}{26 - 300} = \frac{-100}{-274} = 0,36$$

$$T_2 = 27^{\circ}\text{C}$$

$$\begin{aligned} t_1 &= 300^{\circ}\text{C} \\ t_2 &= 200^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$R = \frac{26 - 27}{200 - 300} = \frac{-1}{-100} = 0,01$$

Entrando com esses dados no diagrama de correntes cruzadas, obtemos o fator de correção

$$F = 1$$

$$\begin{aligned} \therefore Q &= U \cdot A \times 220 = m_{\text{CO}} \times C_{p_{\text{CO}}} \times \Delta T_{\text{CO}} = \\ &= (96 \times 0,886) \times 0,25 \times (300 - 200) = 2.126,4 \text{ kcal/h} \end{aligned}$$

2.5.1.6 - Cálculo do Número de Reynolds.

$$\underline{\text{Ar:}} \quad \text{Re} = \frac{VD}{v}$$

$$V = 50 \text{ km/h} = 14 \text{ m/s}$$

$$D = 0,025 \text{ m}$$

$$v = 0,14 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\therefore \text{Re} = \frac{14 \times 0,025}{0,14 \times 10^{-4}} = 0,025 \times 10^6 \rightarrow \text{Re} = 2,5 \times 10^4$$

$$\underline{\text{Co:}} \quad \text{Re} = \frac{VD}{v}$$

$$V = Q/\text{s} = \frac{96 \text{ m}^3/\text{h}}{6 \times \frac{\pi D^2}{4}} = 32\ 594 \text{ m/h} = 9,05 \text{ m/s}$$

$$D = 0,025 \text{ m}$$

$$v = 0,234 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\therefore \text{Re} = \frac{9,05 \times 0,025}{0,234 \times 10^{-4}} \Rightarrow \text{Re} = 0,97 \times 10^4$$

2.1.5.7 - Coeficiente Global de Troca de Calor.

Para o cálculo do coeficiente global de troca de calor (U), utiliza-se o número de Nusselt, calculado abaixo:

. para o ar, convecção forçada externa:

$$Nu = \frac{hD}{k} = C \cdot Re^n$$

. para Re entre 4.000 e 40.000 $\left\{ \begin{array}{l} C = 0,174 \\ n = 0,618 \end{array} \right.$

$$\therefore \frac{hD}{k} = 0,174 \times (2,5 \times 10^4) = 90,88 \approx 91$$

. para o ar a 20°C : $k = 0,0221 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$

$$\therefore h = \frac{91 \times 0,0221}{0,025} = 80,4 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$$

Para o monóxido de carbono, convecção forçada no interior de tubo, temos:

Fórmula de Dittus-Boelter: ($0,7 < \text{Pr} < 100$)

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0,023 \times Re^{0,8} \times \text{Pr}^n$$

onde $n = 0,3$ para resfriamento:

$$Nu = 0,023 \times (0,97 \times 10^4)^{0,8} \times 0,71^{0,3} = 32,1$$

$$\therefore h = \frac{32,1 \times 0,0262}{0,025} = 33,64 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$$

Para o tubo de aço, temos a seguinte resistência para transferência do calor:

$$R_k = \frac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi k \ell}$$

onde: $\phi_e = 25 \text{ mm} \quad \therefore r_e = 12,5$

$\phi_i = 23 \text{ mm} \quad \therefore r_i = 11,5$

$k = 31,2 \text{ kcal/h m } ^\circ\text{C}$

$\ell = 0,96 \text{ m}$

$$\therefore R_k = \frac{\ln(\frac{12,5}{11,5})}{2\pi \times 31,2 \times 0,96} = 0,01 \frac{\text{h } ^\circ\text{C}}{\text{kcal}}$$

Assim, temos o coeficiente global de transferência de calor:

$$U = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{\frac{1}{80,4} + \frac{1}{33,6} + 0,01}$$

$$U = 20 \text{ kcal/m}^2 \cdot ^\circ\text{C.h}$$

2.1.5.8 - Cálculo do número de tubos.

$$A = \frac{Q}{U \times 220} = \frac{2126,4}{20 \times 220} = 0,48 \text{ m}^2$$

para 1 tubo, temos a área de:

$$A = 2\pi R \cdot \ell = 2\pi \times 0,0125 \times 0,96 = 0,08 \text{ m}^2$$

O número de tubos é :

$$n = \frac{0,48}{0,08} = 6 \text{ tubos.}$$

2.5.2 - Construção

Para sua construção foram utilizados:

- chapa aço # 20 (~ 1 mm)
- tubos tipo conduite \emptyset 1"
- parafusos \emptyset 4 x 15
- torneira de cobre \emptyset 1/2"
- junta de amianto prateado
- tinta à base de alumínio resistente até 600 °C

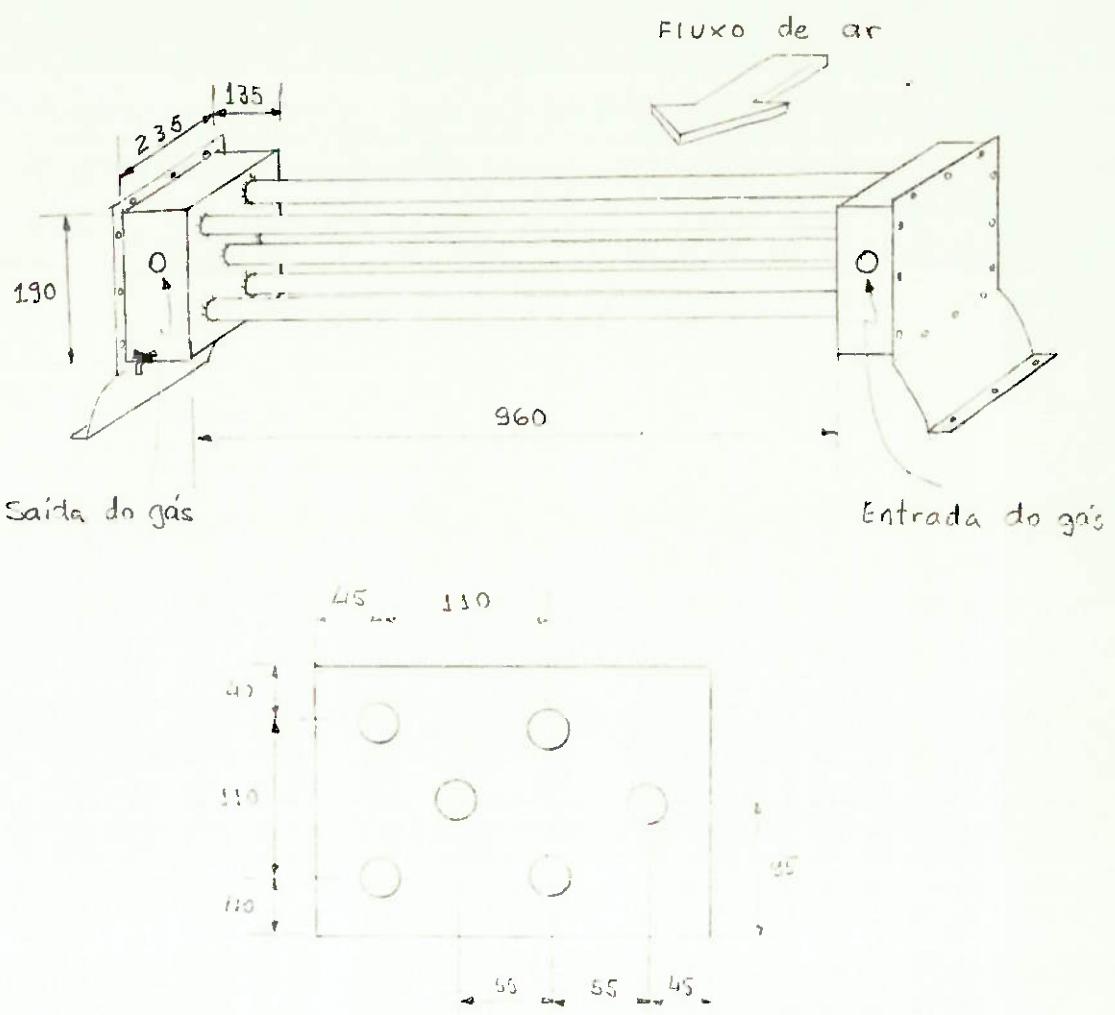


Fig.2.5.1 - Dimensões principais do trocador de calor.

Para a construção do trocador, foram utilizados os recursos disponíveis na oficina da faculdade. Assim, para dobrar as laterais das caixas utilizamos a dobradiça existente. Todos os cortes de chapas foram realizados na guilhotina de açãoamento elétrico. Os furos nas tampas, onde foram soldados os tubos de 1", foram feitos na furadeira de topo, por intermédio de um bitz adaptado no mandril, que assim funcionou como uma espécie de mandriladora (vide figs.1.5.2. e 1.5.3).

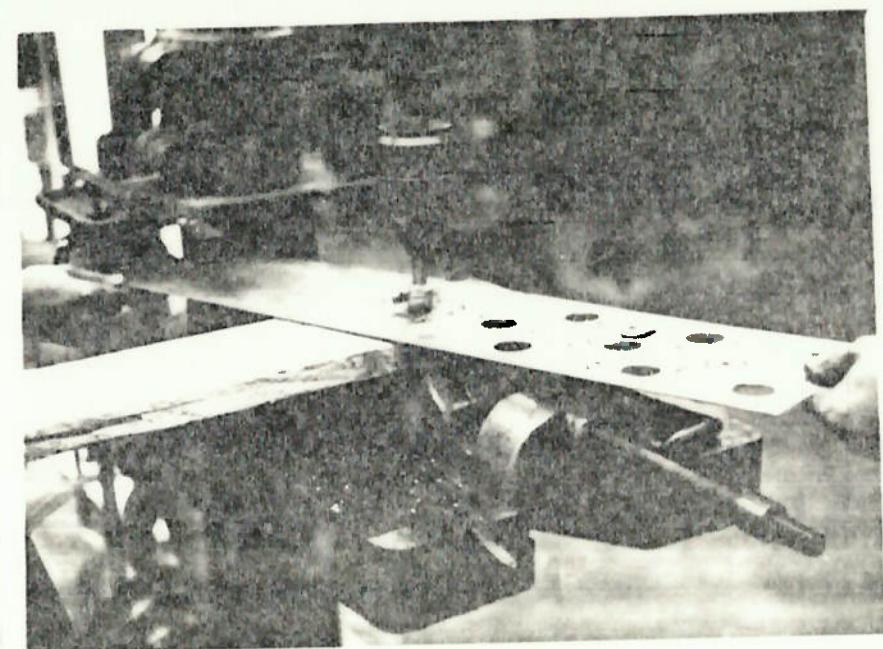


Fig.2.5.2 - Furação das tampas internas

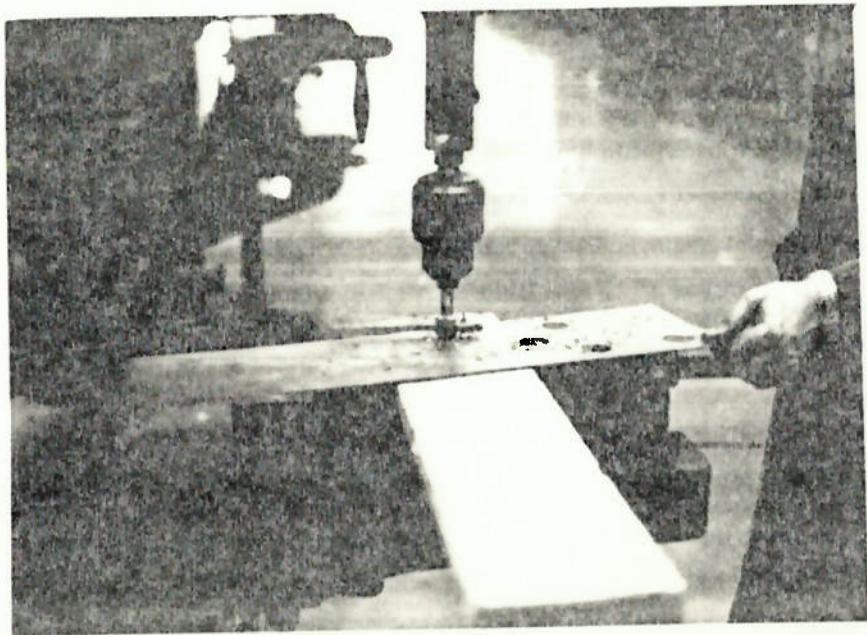


Fig.2.5.3 - Detalhe do bitz adaptado ao mandril.

Desta maneira, com as chapas dobradas, foi utilizada solda oxi-acetilênica para união das laterais, tampas internas e tubos. As tampas externas foram parafusadas, e entre caixa e tampa empregou-se junta de amianto prateado para boa vedação e resistência ao calor. Na base do trocador adaptou-se a -

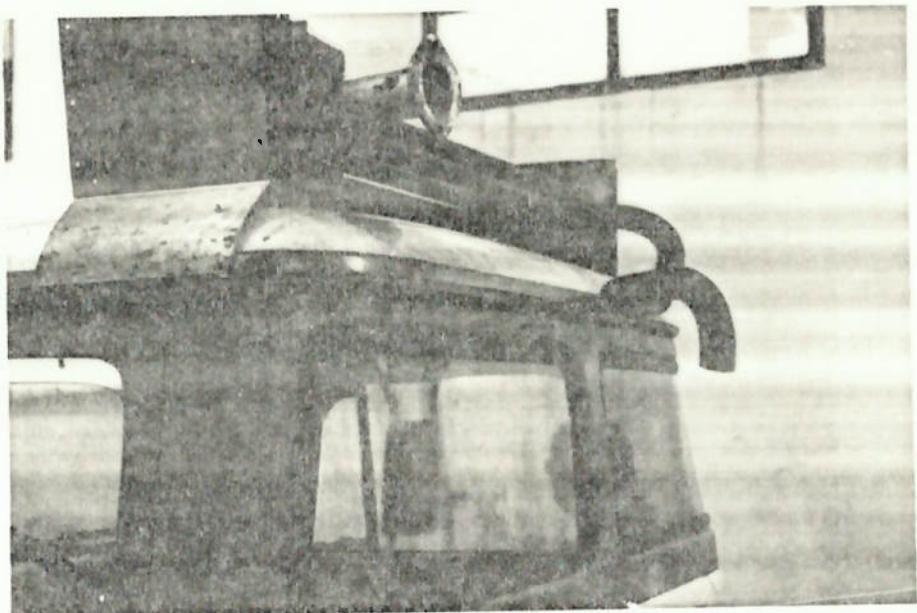


Fig.2.5.4 - Montagem do trocador no veículo.

torneira para possibilitar a retirada dos condensados da câmera. Após, isto, foi aplicada a tinta especial à base de alumínio, para resistir à temperatura que ainda é alta na entrada do trocador.

2.6 - MISTURADOR

2.6.1 - Desempenho Desejado.

Como já mencionado anteriormente, a função do misturador é fornecer ao motor a mistura adequada de gás e ar para completa combustão nos cilindros. No nosso caso, como o carburador não foi retirado (para permitir seu uso na partida ou nos casos necessários onde houver perda de potência), o misturador também terá a função de selecionar o modo de operação, ou seja, só com ar para o carburador, só com a mistura gás-ar, ou ainda numa situação intermediária entre ambos, que será explicado - adiante. Abaixo está esquematizado o misturador utilizado no - veículo, de propriedade da escola.

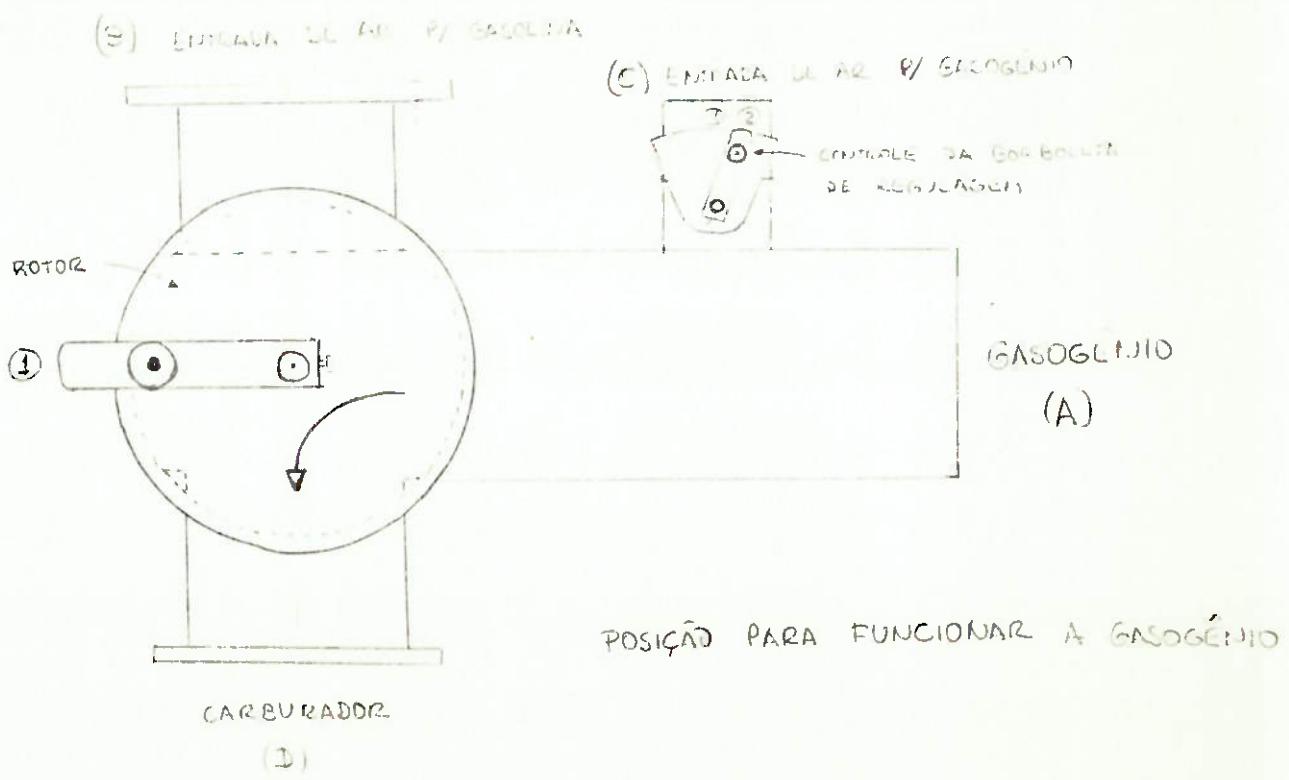


Fig.2.6.1 - Esquema do misturador utilizado.

2.6.2 - Funcionamento do misturador.

A entrada (A) está conectada com a tubulação que vem do gerador de gás. Este gás será misturado com o ar proveniente da entrada (C) que possui uma válvula borboleta acionada pela alavanca (2), a qual regula a proporção correta ar-gás. A regulagem fina é feita pela abertura de pequenos furos na parte superior. A entrada (B) permite a passagem de ar filtrado direto ao carburador, que está fixado na saída (D). Assim, por meio da válvula (rotor) acionada pela alavanca (1), teremos ou ar passando pela saída (D) ou uma mistura gás-ar proveniente das entradas (A) e (C). O controle da quantidade da mistura ar-gás é feito pelo carburador em função da necessidade do veículo.

Quando o motor funciona a gasolina, o rotor do misturador veda a entrada de gás ao mesmo tempo que abre a entrada (B) de ar. O carburador recebe gasolina normalmente.

Na operação a gás, o rotor fecha (B) e abre (A) e (C). Além disso a válvula de três vias faz a gasolina bombeada voltar para o tanque e o carburador recebe apenas o gás misturado.

2.6.3 - Adaptação no veículo.

Para adaptar o misturador ao veículo, primeiro foi necessário aumentar o furo na entrada (A). (fig.2.6.2), para podermos colocar uma conexão de conduite que permitisse adaptar a mangueira que vem do filtro de segurança. Também a base na saída (D), teve que ser esmerilhada para permitir a colocação de uma cinta que tem como função prender o misturador ao carburador, com auxílio de uma braçadeira. Na parte superior foi adaptado o filtro de elemento (papel).

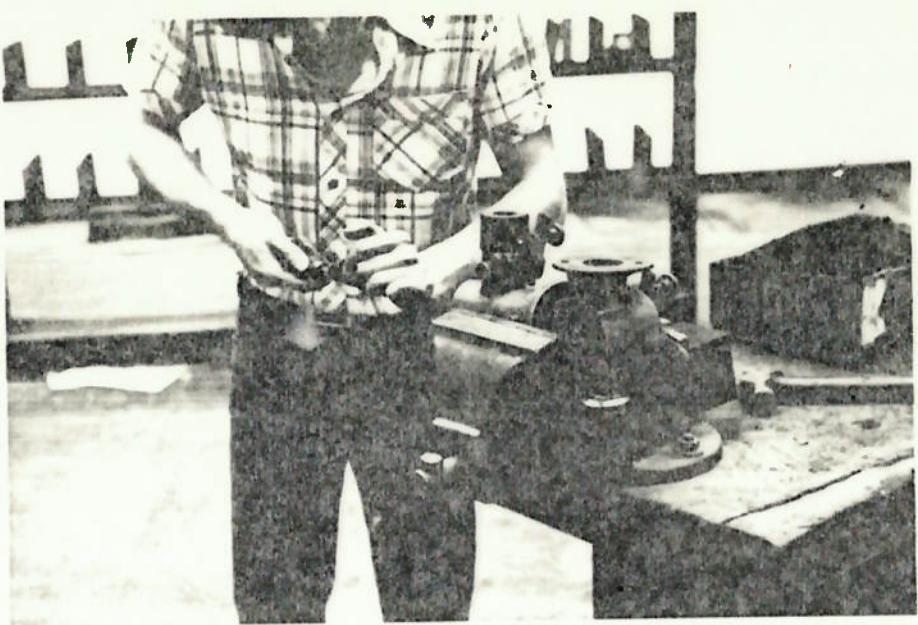


Fig.2.6.2- Adaptação do furo de entrada

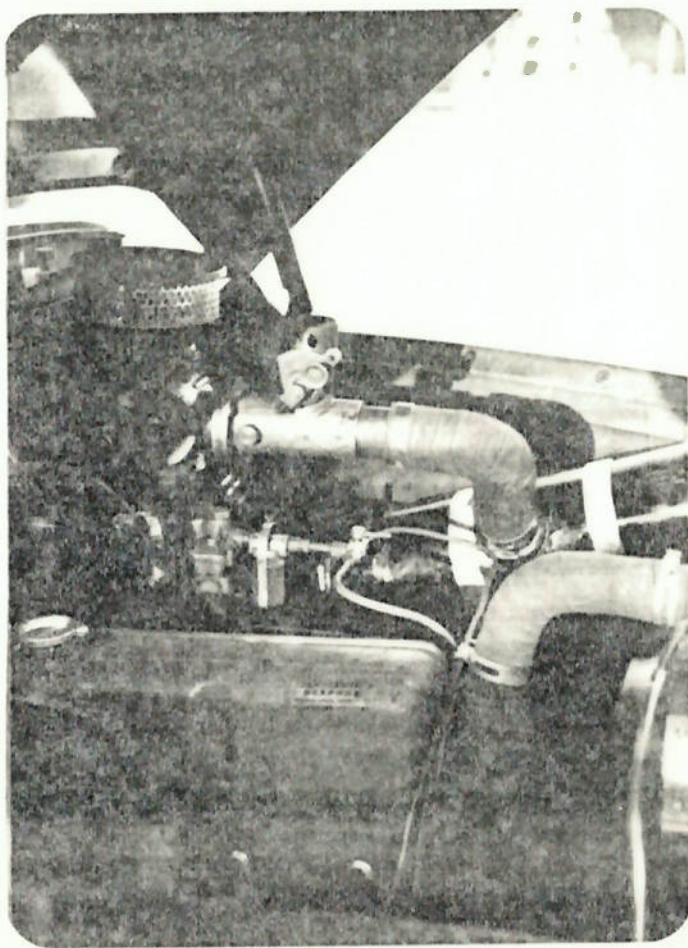


Fig.2.6.3- Misturador montado no veículo

2.7 - OPERAÇÃO DO EQUIPAMENTO

Este capítulo foi incluído para dar uma idéia dos problemas encontrados na utilização de veículos a gasogênio, baseado na nossa experiência pessoal.

2.7.1 - Partida

Funciona-se o motor a gasolina a aproximadamente 1500 rpm. Em seguida molha-se uma estopa ou um pano com álcool ou outro combustível, colocando-se no interior do cinzeiro do gaseificador (ver fig.2.7.1, nº 1). Desloca-se o rotor do misturador para uma posição que permita a continuidade do funcionamento com uma parte da vazão aspirada passando pelo circuito do gás.

Isso faz com que a estopa, já incendiada, comece a queimar (posição 2) o carvão acima dela. Depois de algum tempo (5 a 10 minutos) gira-se mais o rotor (posição 3), abre-se o retorno da gasolina e regula-se a mistura na borboleta. Se os gases combustíveis (CO e H₂ principalmente) já estão sendo produzidos, o motor funcionará normalmente.

Uma vez feita a regulagem, ela dificilmente se altera durante o percurso.

2.7.2 - Operação

O carvão vegetal a ser utilizado deve possuir um tamanho médio de aproximadamente 30mm, para permitir uma boa reatividade, sem aumentar a perda de carga e sem produzir muito pó. Os pedaços maiores não queimam com a rapidez suficiente, alterando bastante a composição do gás nas elevações da vazão.

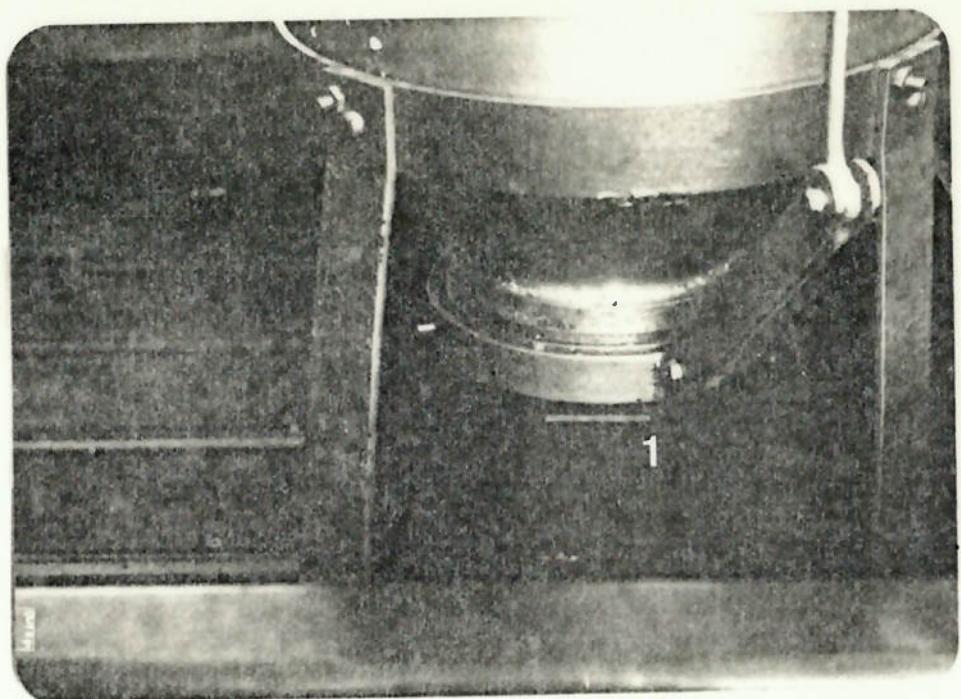


Fig. 2.7.1- Gaseificador aceso

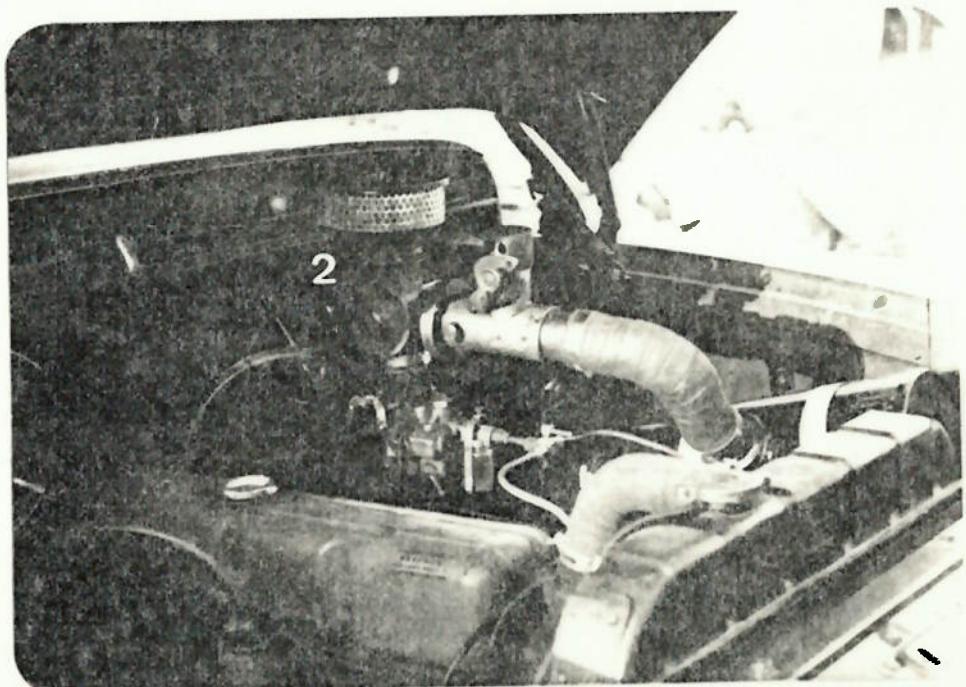


Fig. 2.7.2- Misturador na posição intermediária

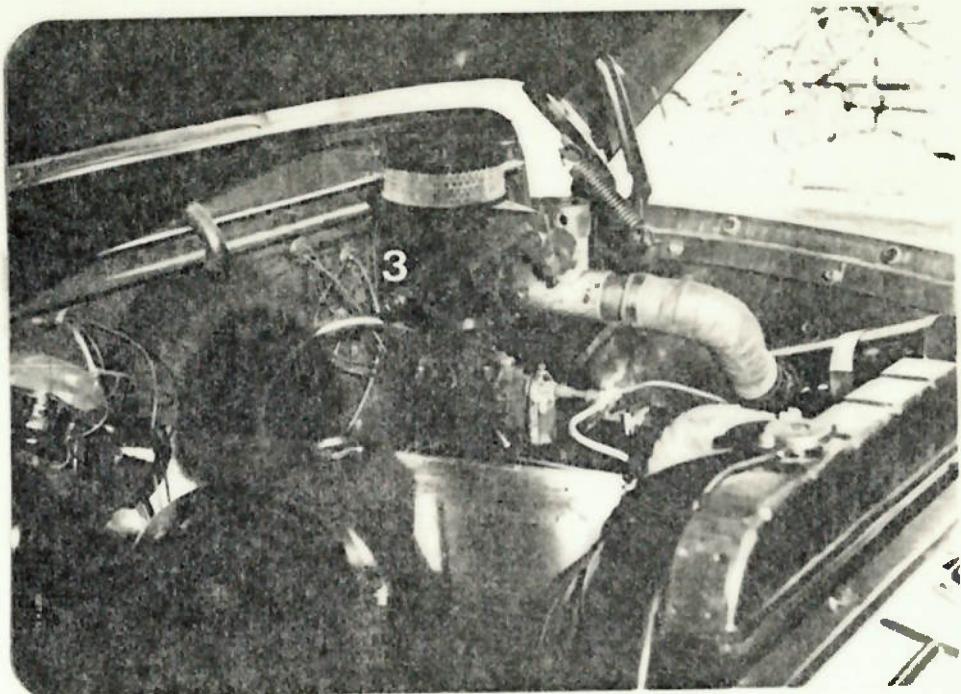


Fig.2.7.3- Posição de funcionamento com gás.

Mesmo utilizando a granulometria correta, não se pode aumentar rapidamente a rotação do motor, pois a aspiração de um excesso de ar frio pela cetilha desloca as reações de redução do CO contrariamente ao desejado.

Portanto a rotação de marcha lenta deve ser mantida um pouco elevada e os aumentos de giro devem ser graduais. Se houver alguma alteração no funcionamento deve-se verificar se não houve mudança na regulagem do ar, causada talvez por uma entrada de ar falso, ou um princípio de entupimento de algum filtro.

Caso o percurso a ser percorrido seja curto e houver um intervalo razoável até a próxima partida, não se deve carregar todo o carvão de uma vez, pois ele pode continuar queimando durante o intervalo. O uso do gasogênio é recomendado para percursos médios e longos (acima de 20 km).

2.7.3 - Manutenção e limpeza.

O filtro ciclone deve ser esvaziado após o consumo de aproximadamente um reservatório. Para tanto basta abrir a tampa inferior e bater ou mexer por dentro, caso haja umidade.

As mangas devem ser sacudidas após um período semelhante ou quando ficarem enegrecidas.

O purgador do trocador de calor deve ser aberto e esvaziado se for o caso.

O filtro de segurança deve estar sempre limpo e só deve ser retirado após certificar-se que o gás continuará limpo no período.

A manutenção mais complexa como limpeza da cetilha, da tubulação do trocador de calor, etc, devem ser feitas após aproximadamente 1000 km ou longos períodos sem uso, pois os gases formados aliados à alta temperatura aceleram o processo de corrosão.

3.7.4 - Observações sobre segurança.

(a) Nunca é demais lembrar que os gases produzidos por este equipamento são altamente tóxicos, mesmo em doses minúsculas. Entretanto não há perigo de vazamento durante o funcionamento normal (sistema a vácuo).

(b) Toda a tubulação e aparelhos que se localizam anteriormente ao filtro de manga (gaseificador, ciclone, trocador de calor, geradores de vapor, defletores e protetores) estão a temperaturas que variam de 100 a 900 °C.

(c) Os geradores de vapor possuem uma válvula cada um, que regula a vazão. Esta válvula não pode ficar totalmente fechada pois o gerador poderia explodir quando aquecido.

(d) Depois de desligado o motor, ou mesmo com ele funcionando, se for aberta a tampa superior do gaseificador, a chama será engolida, ocasionando uma pequena explosão. Isto ocorre por haver gases combustíveis na parte superior do gaseificador, acumulados durante o funcionamento.

PARTE III

ENSAIOS DOS GASES E DO VEÍCULO

3.1 - ANÁLISE DOS GASES PRODUZIDOS

3.1.1 - Introdução

Logo após decidirmos fazer o nosso Trabalho de Formatura sobre gasogênios utilizando como base o equipamento da escola, surgiu a questão: estaria o gaseificador produzindo - uma porcentagem aceitável de gases combustíveis? Este problema era crítico para o sucesso do nosso projeto, pois não adiantaria um bom esquema de instalação se os gases fossem inadequados desde a geração. Além disso, com a idéia de acoplarmos geradores de vapor, deveríamos ter uma idéia das vazões necessárias ao leito para um melhor poder calorífico. Optou-se então por um ensaio inicial do gaseificador e geradores de vapor .

3.1.2 - Geração dos gases

Para procedermos ao ensaio era necessário forçar - uma vazão de ar pelo gaseificador durante o período desejado e, além disso, eliminarmos os gases nocivos produzidos.

O sistema concebido é mostrado na figura 3.1.1.

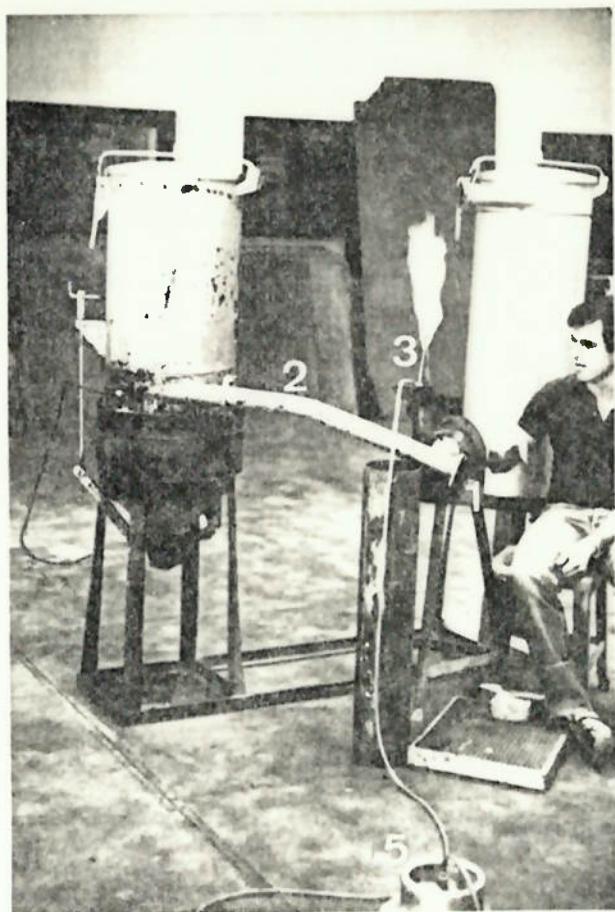


Fig. 3.1.1 - Equipamento em operação (vazão baixa).

O combustível utilizado foi o carvão vegetal, em pedaços com o diâmetro médio de 20 mm.

Para controlarmos a vazão, foi acoplado um soprador (1) com acionamento manual por manivela logo após o tubo de tiragem do gaseificador (2). Assim, a rotação do rotor expulsa o gás tangencialmente e admite axialmente direto do gaseificador.

Como havia perigo de intoxicação, principalmente pelo monóxido de carbono, instalamos na saída do separador - um duto com afunilamento que permite a queima do gás (figura 3.1.2, nº 3). Para manter a chama acesa durante todo o ensaio,

usamos uma chama piloto. Ela foi obtida por um bico de Bunsen(4), alimentado por G.L.P. de um botijão de 5 kg(5).

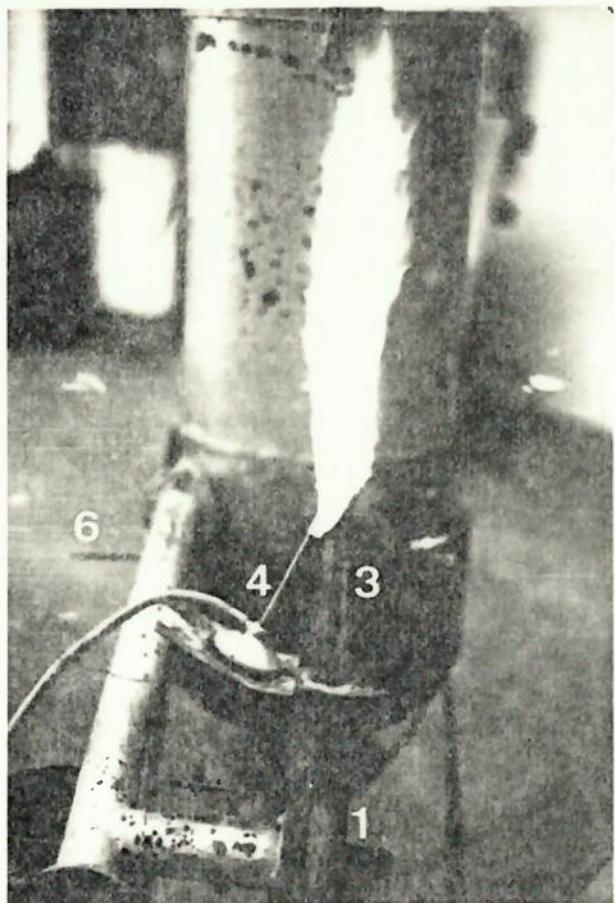


Fig.3.1.2 - Funcionamento com alta vazão.

O recolhimento de gás para o ensaio foi feito por um outro tubo (6), com diâmetro 1/4", instalado perpendicular ao tubo de tiragem. O gás era recolhido em um frasco de vidro, utilizando-se a diferença de pressão obtida pelo escoamento - de um líquido contido no frasco para outro abaixo dele.

3.1.3 - Observação da chama

O equipamento foi posto para funcionar inicialmente sem a injeção de vapor. Após cerca de 10 minutos pudemos observar que o gás expelido já queimava, indicando a presença de inflamáveis. A chama aumentou em luz e tamanho até estabilizar-se. Já em regime, se parávamos a rotação, a chama extinguia-se.

Em seguida, o vapor gerado foi injetado no leito - por meio de dois tubos de cobre, como mostra a figura 3.1.3, - nº 7. A vazão foi regulada pelas válvulas (8) dos geradores. A escassez de tempo e material limitou nossas amostras a duas, - uma com vapor e outra sem.

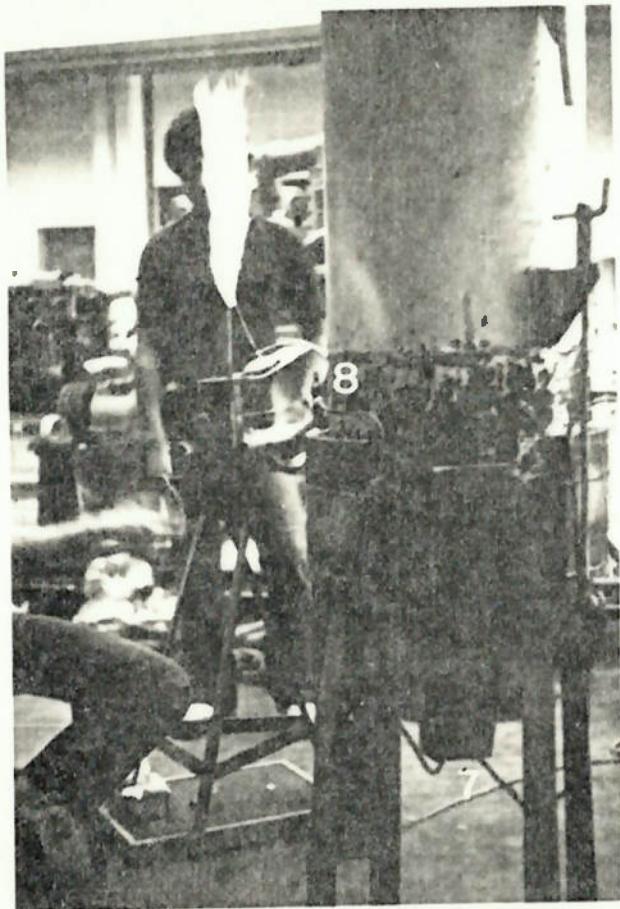


Fig.3.1.3 - Operação com vapor.

O vapor injetado aumentou o volume e o brilho da chama, além de permanecer acesa mesmo sem haver rotação na ma nivela conforme a figura 3.1.4.

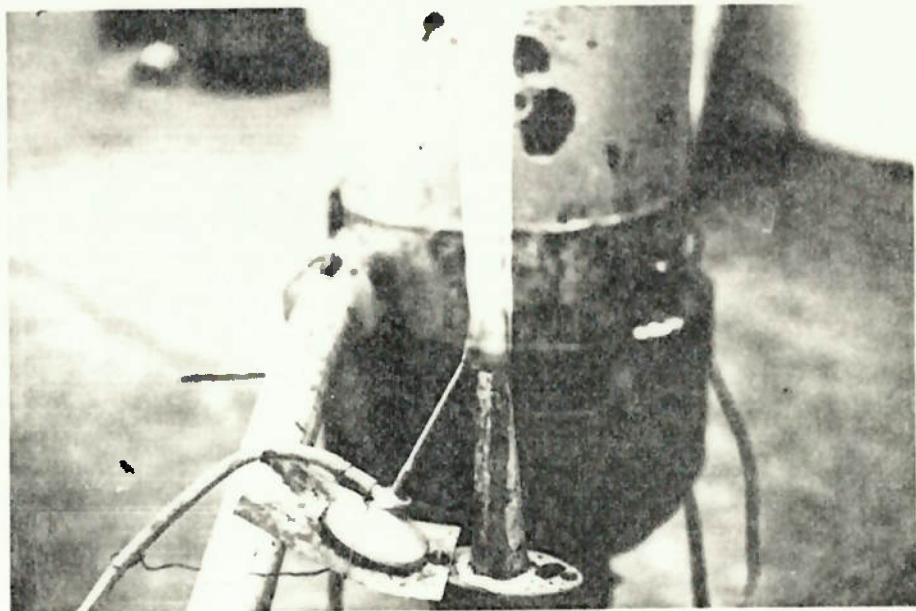


Fig.3.1.4 - Chama laminar (leito com vapor)

Foi observado também o comportamento da chama com apenas um dos injetores de vapor sendo usado (fig.3.1.5), mas nada se pode concluir pois o leito já estava úmido e a quantidade de carvão pouca.

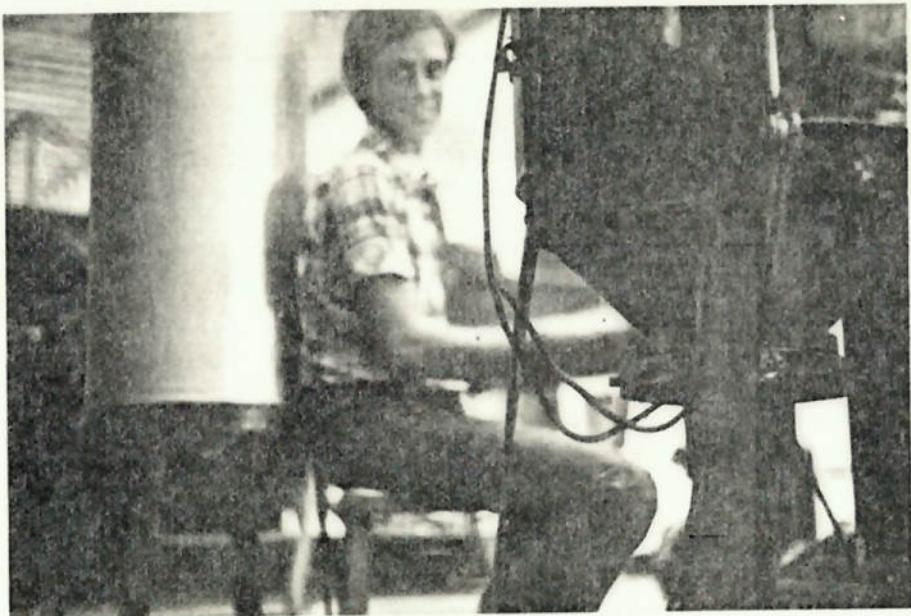


Fig.3.1.5 - Utilização de apenas um injetor.

3.1.4 - Análise dos gases pelo Orsat

Os gases recolhidos nos frascos foram analisados em um equipamento ORSAT pertencente ao IPT (figura 3.1.6).

Este ensaio consiste em fazer um certo volume de gás ser absorvido por reagentes específicos para CO_2 , O_2 e CO , descobrindo-se por diferença de volume as porcentagens destes gases presentes.

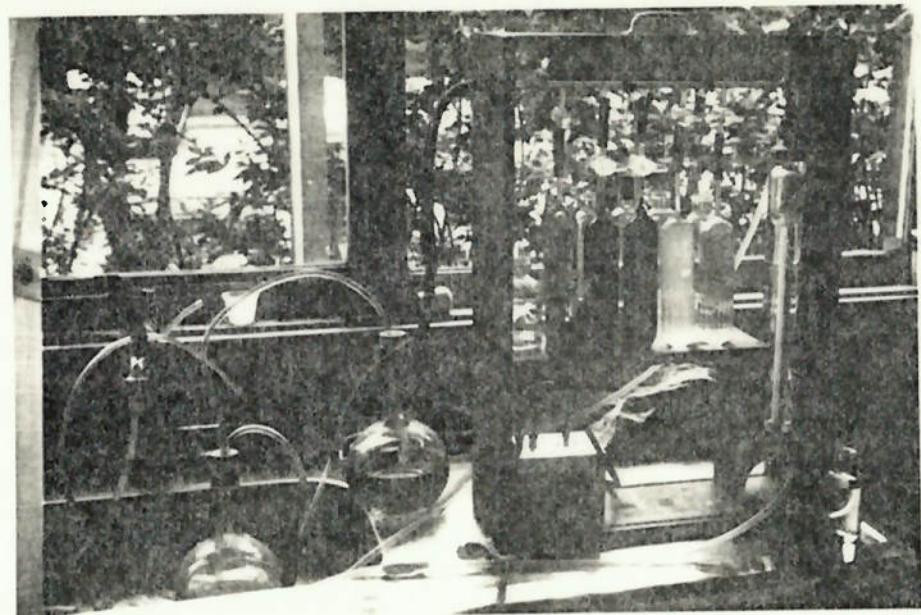


Fig. 3.1.6 - Teste no equipamento ORSAT

Em seguida procede-se a uma combustão (figura 3.1.7) e a novas absorções, descobrindo-se os teores de CH_4 (ou outros hidrocarbonetos) e H_2 , sendo que o restante supõem-se ser N_2 .

Ao final verifica-se se o valor do nitrogênio confere com o valor teórico esperado, sendo admitido pequenas variações. No nosso ensaio com vapor, a diferença foi excessiva, indicando que esta amostra apresentou problemas, talvez pela pouca quantidade de carvão presente.

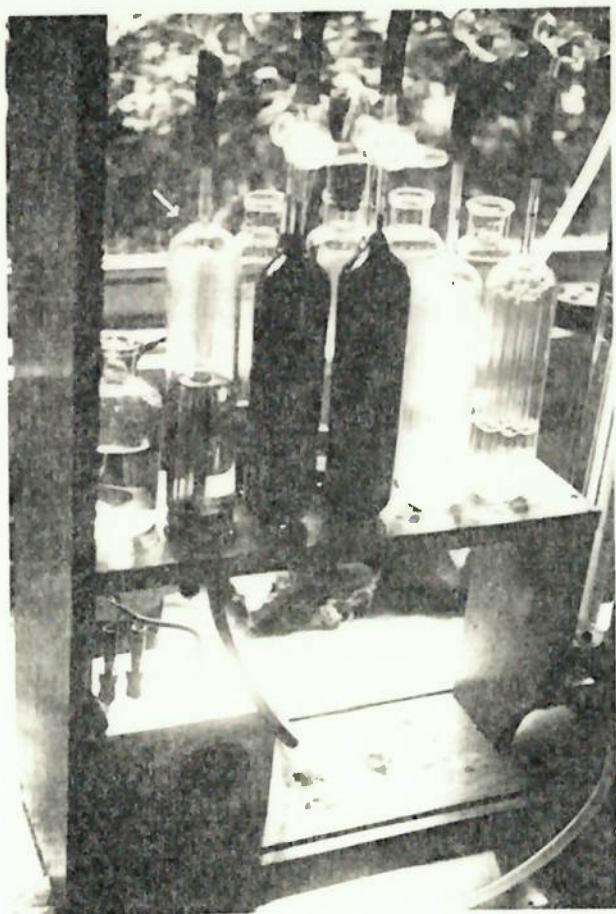


Fig.3.1.7 - Queima do CH_4 e H_2 .

Os resultados obtidos nos dois testes (com e sem vapor) acompanhados da sequência de passos executada vem a seguir.

Os ensaios mostram que os teores da amostra sem vapor estão razoáveis, sendo suficientes para um bom desempenho do motor.

Observa-se também que o vapor injetado foi excessivo pois houve resfriamento do leito. Isto é notado pelo deslocamento de equilíbrio da reação de produção de CO que é altamente endotérmica, diminuindo o volume de CO e aumentando levemente o de CO₂ (ver item 1.5.1.1). O excesso de vapor aumentou de modo não significativo o teor de H₂, mostrando que devemos utilizar menores vazões de H₂O.

AMOSTRA N° 1 (Sem vapor)

COLETA: 14/NOV/80

ANÁLISE: 17/NOV/80

1.	CO ₂	4p - 95,6	V _O = 100 ml
		8p - 95,6	4,4% CO ₂
2.	O ₂	3p - 95,4	
		6p - 95,4	0,2% O ₂
3.	CO	3p - 84,2	12 p - 70,2
		6p - 74,6	
		9p - 70,2	25,4% CO
4.	QUEIMA	V ₃ = 70,2 V ₃ _q = 50,0 V _{O₂} _q = 50,0	$f = \frac{V_3}{V_{3q}} = \frac{70,2}{50,0} = 1,404$

$$V_{T_i} = V_{3q} + V_{O_2} = 100$$

$$V_{T_F} = 95,2$$

$$V_{\text{contração}} = V_{T_i} - V_{T_F} = 4,8$$

$$- \text{Após absorção de CO}_2 : V_4 = 94,8$$

$$V_{CO_2} (\%) = V_{CH_4} (\%) = (V_{T_i} - V_4) \cdot f = 0,4 \times 1,404 = 0,6 \% \text{ CH}_4$$

$$V_{H_2} (\%) = \frac{V_{\text{contração}} \cdot f \cdot 2 - V_{CH_4} (\%) \cdot 4}{3} =$$

$$= \frac{4,8 \times 1,404 \times 2 - 0,6 \times 4}{3} = 4,40 \text{ } 4,40 \% \text{ H}_2$$

$$V_{N_2} (\%) = 100 - \sum V_{x_i} = 100 - 34,8 \quad 65,2 \% \text{ N}_2$$

$$N_2_{\text{teórr.}} (\%) = 64,7$$

AMOSTRA Nº 2 (Com vapor)

COLETA: 14/nov./80
ANÁLISE: 17/nov./80

1. CO ₂	4P - 91,4	V _o = 100 ml
	8P - 91,4	8,6% CO ₂
2. O ₂	3P - 90,8	
	6P - 90,8	0,6% O ₂
3. CO	3P - 80,4	12P - 70,0
	6P - 70,4	
	9P - 70,0	20,8% CO
4. QUEIMA	V ₃ = 70,0 V _{3q} = 50,0 V _{O₂} = 50,0	$f = \frac{V_3}{V_{3q}} = \frac{70,0}{50,0} = 1,40$

$$V_{T_i} = V_{3q} + V_{O_2} = 100$$

$$V_{T_F} = 93,6$$

$$V_{\text{contração}} = V_{T_i} - V_{T_F} = 6,4$$

Após absorção de CO₂: V₄ = 93,4

$$V_{CO_2} (\%) = (V_{T_F} - V_4) \cdot f = (93,6 - 93,4) 1,40 = 0,3 \% CH_4$$

$$V_{H_2} (\%) = \frac{V_{\text{contração}} \cdot f \cdot 2 - V_{CH_4} (\%) \cdot 4}{3} = \frac{6,4 \times 1,4 \times 2 - 0,3 \times 4}{3} \\ 5,6 \% H_2$$

$$V_{N_2} (\%) = 100 - \sum V_{x_i} = 64,1 \quad 64,1 \% N_2$$

$$N_2_{\text{teórr.}} (\%) = 73,7$$

3.2 - CONSUMO E DESEMPENHO DO VEÍCULO

Os testes previstos de consumo e desempenho de nossa caminhonete adaptada deveriam ser completos, incluindo a obtenção da curva de potência no dinamômetro de chassis, a utilização de diversos tipos de carvão, o valor ótimo da quantidade de vapor injetado entre outros.

No entanto, para se conseguir fazer com que o veículo rodasse satisfatoriamente, gastou-se praticamente todo o tempo disponível e um pouco mais. Assim, os testes realizados foram apenas aqueles que não necessitavam de muito tempo e obtenção de equipamento.

3.2.1 - Consumo

O consumo do veículo a gasolina era cerca de 5 km/l. Portanto, o valor obtido para o consumo de carvão deve ser comparado com este valor.

TABELA 3.2.1 - Consumo em vários percursos

Percorso (km)	Local	Massa de carvão consumida (kg)	Consumo (km/kg)
21	Cidade	~5	4,2
112	Estrada	~22	5,1
60	Misto	~15	4,0
33	Cidade	~8	4,1

A média ponderada do consumo foi 4,2 km/kg. Nesta avaliação não foi considerada a perda envolvida em queimas posteriores ao percurso. Podemos considerar isto como aproximadamente 10% do to-

tal em média. Portanto o consumo real deve ser 3,8 km/kg.

Considerando que o preço do carvão é aproximadamente 25% do preço da gasolina (se obtido do produtor) temos um custo de

$$0,25 \times \frac{5}{3,8} = 0,33 \quad \Rightarrow \quad 33\%$$

O custo do quilômetro rodado, devido ao combustível, é apenas 33% do custo usando gasolina.

3.2.2 - Perda de potência

Como foi explicado^{*} da curva de potência do motor - usando o gasogênio e compará-la à curva utilizando gasolina. Haviaíamos também programado testes para avaliar o desempenho global do veículo, ou seja, verificar as mudanças de aceleração - devido à menor potência e ao maior peso. Isto poderia ser feito com o uso de uma 5^a roda, , que mediria com razoável precisão a velocidade, registrada por um plotter.

Novamente recorremos a um método mais simples. Sabemos que a aceleração pode ser equiparada ao tempo para se atingir determinada velocidade. Assim fixamos três velocidades, 40, 60 e 80 km/h e cronometramos o tempo para atingi-las a partir da imobilidade. A pista usada era reta e sem aclives. A medida da velocidade foi tirada a partir do próprio velocímetro, cuja imprecisão não afetava muito os valores comparativos dos tempos medidos para gasolina e gás de gasogênio.

^{*}..Não houve tempo hábil para promover o levantamento...

TABELA 3.2.2 - Tempo para atingir velocidades

Medida	Velocidade 40 km/h		Velocidade 60 km/h		Velocidade 80 km/h	
	gasolina	gasogênio	gasolina	gasogênio	gasolina	gasogênio
t_1 (s)	5,0	9,0	8,5	14	11,0	45
t_2 (s)	5,0	8,5	8,0	13	10,5	42,5
t_3 (s)	4,5	8,0	7,0	14	11,0	44
t_4 (s)	4,5	7,0	7,0	14,5	9,5	41,5
Tempo médio (s)	4,8	8,1	7,6	13,9	10,5	43,3

Medimos também, de modo semelhante a velocidade máxima. Neste caso o erro da medida pode existir pois o velocímetro é impreciso e trepidava bastante. Os valores aproximados obtidos foram:

(a) Gasolina: velocidade máxima - 150 km/h

(b) Gasogênio: " " - 90 km/h

A tabela 3.2.2 mostra os resultados.

Com estes valores podemos plotar o gráfico da velocidade em função do tempo. Tendo as curvas destes gráficos (anexo) podemos traçar a aceleração em função do tempo. Contudo, como temos poucos pontos a curva da velocidade não é confiável e faremos apenas uma tabela com os valores médios da aceleração - nos intervalos.

TABELA 3.2.3 - Aceleração entre velocidades

Velocidades (km/h)	Aceleração (m/s ²)		Redução (%)
	gasolina	gasogênio	
0 - 40	2,3	1,4	- 41%
40 - 60	2,0	1,0	- 52%
60 - 80	1,9	0,2	- 90%
0 - 60	2,2	1,2	- 45%

Para relacionarmos a aceleração a potência que chega às rodas, escrevemos a equação de equilíbrio para um veículo em movimento sem aclives. Temos

$$F_T = \frac{N}{v} = R_R + R_a + M_{eq} \cdot a$$

onde: N = potência nas rodas

v = velocidade do veículo

R_R = resistência ao rolamento

R_a = resistência aerodinâmica

M_{eq} = massa equivalente

a = aceleração

A resistência ao rolamento somada à resistência aerodinâmica não chegam a 10% do total (em velocidades até 60 km/h) o que nos permite relacionar, para uma certa velocidade, a potência e a aceleração.

As quedas de aceleração entre as velocidades de 0 a 60 km/h são mais representativas, pois o veículo trabalhou nas mesmas marchas (1º e 2º) para ambos os combustíveis e as velocidades ainda não estavam próximas às máximas.

Podemos então aproximar a queda de potência pela redução na aceleração nesta faixa de 0 a 60 km/h, ou seja:

QUEDA DE POTÊNCIA ESTIMADA = 45%.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cluniau,J.C., "Gasógenos para Automotores", Aristides Quillet S.A., Buenos Aires, 1944.
2. "Producer gas: its potential and application in developing countries", Tropical Products Institute,Londres, 1979
3. Goldman,B. e Jones,N.C.; "The Modern Portable Gas Producer", Journal of the Institute of Fuel nº 12, 1939
4. Oleson,A.P. e Wiebe,R.; "Thermodynamics of Producer Gas Combustion", Ind. and Eng. Chemistry, vol.37,nº 7,1945.
5. Middleton,F.A. e Bruce,C.S.; "Engine Tests with Producer Gas", Journal of the National Bureau of Standards,Vol.36, 1946
6. "Gasogênios", publ. da Socony-Vacuum Oil Company, Inc., 1943
7. Queiroz,H.C., "Gasogênio", 1943
8. Siciliano,L.B.; "Utilização do Gasogênio", publ. da revista Máquinas e Construções, 1945.
9. Ozisik,M.N.; "Basic Heat Transfer", McGraw-Hill,Kogakusha, Ltd., 1977
10. Silva,R.B.; "Tubulações", 2^a ed., DLP, 1967
11. Kreith,F.; "Princípios de Transmissão de Calor",trad. da 3^a ed.americana,Editora Edgard Blucher Ltda, 1977.

12. Kelly,J.J. e Marchello,J.M.; "Collection and Mechanical Separation", Gas Cleaning for Air Quality Control
13. "Industrial Ventilation"; American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 14^a ed.
14. Koch,W.H. e Licht,W.; "New Design Approach Boosts Cyclone Efficiency", Chemical Engineering, nov/1977.
15. Goldemberg,J.; "Energia no Brasil", publicação ACIESP nº 2, São Paulo, 1976
16. Wilson,C.L.; "Energia: Estratégias Globais 1985-2000", relatório do Grupo de Estudos de Estratégias Energéticas, M.I.T., 1977.