

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE FORMATURA

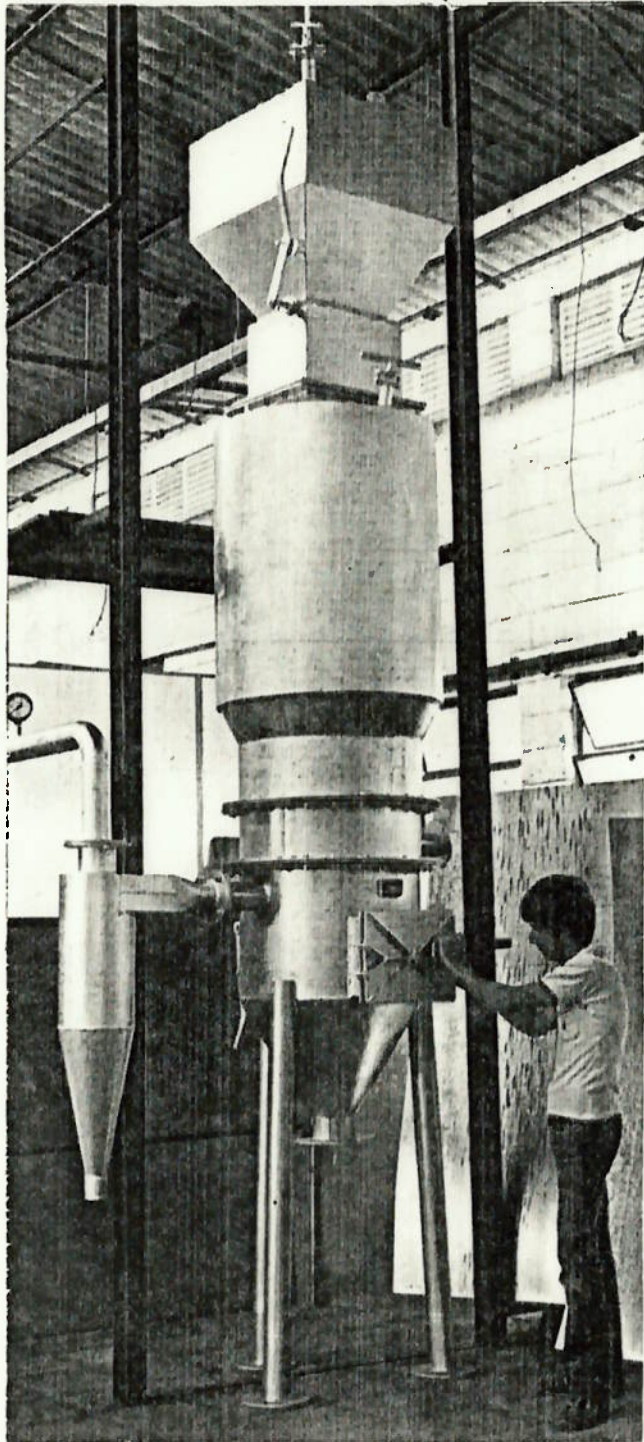
UM ESTUDO SOBRE A GASEIFICAÇÃO DA MADEIRA

AUTOR: URI STIUBIENER

Nº USP 7152285

ORIENTADOR: Eng. EURYALE J.G. DE JESUS ZERBINI

- 1 9 8 1 -



AGRADECIMENTOS

A todos que com sua ajuda e incentivo contribuíram para a realização deste trabalho, amigos, professores e colegas, quero registrar os meus mais profundos agradecimentos.

S U M Á R I O

É apresentada uma pequena análise econômica que justifica a utilização de gaseificadores em algumas aplicações. Além disso é apresentado um resumo do processo de gaseificação juntamente com uma apresentação dos equipamentos existentes para esse fim.

ÍNDICE

I. INTRODUÇÃO	1
II. MADEIRA: FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA	3
2.1. Uma Curta Análise Econômica	4
2.2. Fotossíntese: Mecanismo de Renovação de Fontes Energéticas	10
2.3. Química da Madeira	13
2.4. Propriedades da Madeira como Matéria-Prima para Gaseificação	17
III. PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DA MADEIRA	22
3.1. Reações que Ocorrem no Leito	23
3.1.1. Zona de Secagem	24
3.1.2. Zona de Destilação	25
3.1.3. Zonas de Oxidação e Redução	32
3.2. Características do Gás Resultante	39
3.3. Fatores que Influenciam o Processo de Gaseificação	47
3.3.1. Relação Ar-Material	48
3.3.2. Umidade	49
3.3.3. Vazão de Material	51
3.3.4. Granulometria	51
3.3.5. Pressão	52
IV. EQUIPAMENTO DE GASEIFICAÇÃO	55
4.1. O Gaseificador	56
4.1.1. Gaseificador de Leito Fixo e Fluxo Contracorrente	58
4.1.2. Gaseificador de Leito Fixo e Fluxo Co-corrente	63

4.1.3. Gaseificador de Leito Fixo e Fluxo Cruzado	67
4.1.4. Gaseificador de Leito Fluidizado	69
4.1.5. Gaseificador Elétrico	71
4.2. Equipamento de Limpeza e Condicionamento dos Gases	72
4.2.1. Torres de Lavagem	76
4.2.2. Ciclones	77
4.2.3. Lavadores Tipo Venturi	78
4.2.4. Torres de Enchimento	79
4.2.5. Filtros	79
4.2.6. Observações	80
V. BIBLIOGRAFIA	82
VI. ANEXOS	86

I - INTRODUÇÃO

I - INTRODUÇÃO

A pesquisa de fontes alternativas de energia, em particular fontes renováveis, nos leva a considerar a viabilidade econômica de tecnologia outrora abandonada.

A obtenção de gás pobre a partir de combustíveis sólidos é conhecida desde os primórdios da revolução industrial. No fim do século passado, antes do apogeu do petróleo, foram desenvolvidos veículos a gás pobre utilizando gasogênios pequenos e pouco sofisticados nos quais a admissão de ar se fazia utilizando a depressão no equipamento devido à ação do motor. O gás assim produzido denominava-se "motor gás".

Durante a 2ª Guerra Mundial, preocupando-se com eventual escassez de petróleo alguns países desenvolveram unidades industriais de gaseificação e converteram a maior parte de sua frota de veículos domésticos (civís) para gasogênio. O uso de gasogênios foi muito frequente na Alemanha, Dinamarca e Suécia.

Hoje, depois de termos esquecido essa tecnologia, estamos voltando-nos novamente para o seu desenvolvimento pois reconhecemos o seu valor. Pesquisas visando aprimorar o equipamento e melhorar seu desempenho estão sendo feitas nos Estados Unidos da América, Canadá, França, Alemanha, Brasil e outros países.

Com o intuito de facilitar o primeiro contato do engenheiro ou estudante de engenharia com a gaseificação da madeira, decidi fazer este trabalho. Não se pretende apresentar um roteiro para o cálculo dos diversos equipamentos que compõem uma usina de geração de gás pobre. O escopo deste trabalho é apresentar o equipamento e o processo para que o leitor possa escolher um gasogênio fabricado por outrem ou iniciar o projeto de uma unidade de gaseificação com alguma bagagem.

II - MADEIRA:

FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA

II - MADEIRA: FONTE ALTERNATIVA DE ENERGIA

2.1 - UMA CURTA ANALISE ECONÔMICA

No quadro de consumo mundial de energia encontramos uma situação curiosa: todos os países estão aumentando, ano após ano, as taxas de consumo de energia per capita. Este valor é utilizado também como índice de desenvolvimento de cada país. Por outro lado a nossa tecnologia está voltada para a utilização em larga escala de fontes energéticas não renováveis, como o carvão mineral e o petróleo, diminuindo as reservas dessas fontes na proporção direta do consumo.

O petróleo e seus derivados representam hoje uma importância sem precedentes na economia mundial. A tecnologia, atualmente mais evoluída, está apoiada principalmente sobre este recurso energético de modo que as decisões de cunho político de poucos países, possuidores de grandes jazidas de petróleo, tem exercido uma forte influência sobre a economia mundial. O consumo anual de petróleo é de $3,5 \times 10^9 \text{ m}^3$ (equivalente a 60 milhões de barris por dia), nestas condições as reservas provadas são suficientes para mais 30 anos de consumo. As reservas ainda não provadas, que representam cerca de 50% do total de petróleo no planeta, admite-se 1/3 em terra e 2/3 no mar.

O quadro a seguir representa a situação desta

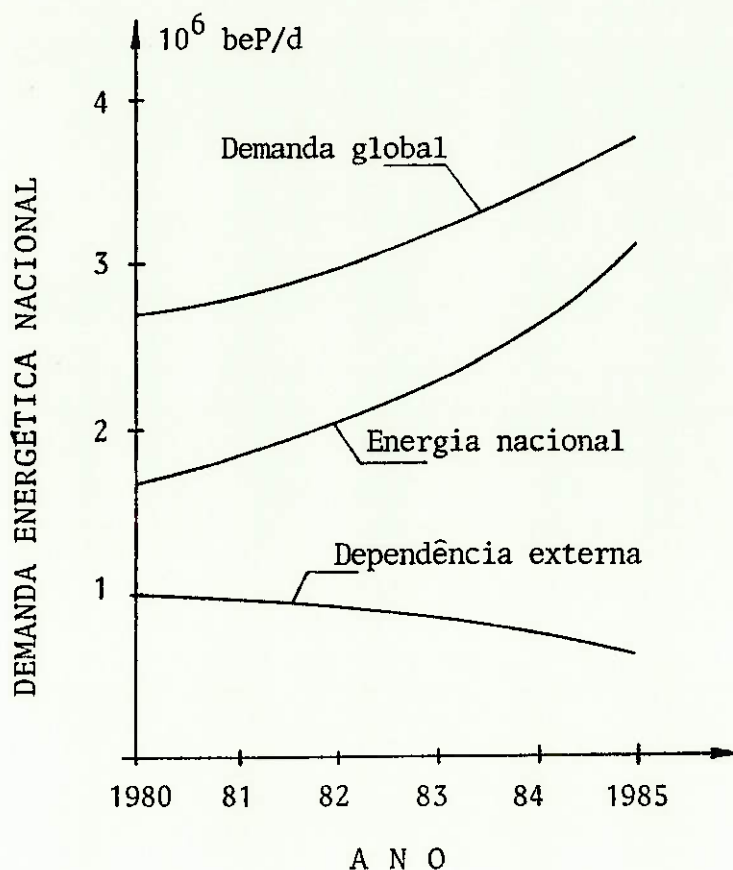
fonte, no tocante a sua distribuição geográfica, com base em dados de 1975:

Petróleo extraído:	$55 \times 10^9 \text{ m}^3$	17%
Reservas Provadas:		
OPEP	$73,0 \times 10^9 \text{ m}^3$	
América do Norte	$6,5 \times 10^9 \text{ m}^3$	
Países Comunistas	$18,0 \times 10^9 \text{ m}^3$	
Outras regiões	$9,5 \times 10^9 \text{ m}^3$	
Total	$107 \times 10^9 \text{ m}^3$	34%
Reservas Prováveis:	$155 \times 10^9 \text{ m}^3$	49%
Total	$317 \times 10^9 \text{ m}^3$	100%

As reservas provadas no Brasil, conforme dados publicados pelo Ministério das Minas e Energia em dezembro de 1979, são de $198 \times 10^6 \text{ m}^3$ representando cerca de 0,2% da reserva provada existente no mundo. Em 1980 o petróleo e seus derivados representaram 41,4% dos insumos energéticos brasileiros. Deste total 6,9% é petróleo nacional e os demais 34,5% foram importados, representando um grande peso econômico para o país e contribuindo para o agravamento da crise econômica existente.

Segundo os planos nacionais de desenvolvimento

to, a previsão do aumento das necessidades energéticas do Brasil nos próximos cinco anos é de 30% em relação às necessida-des vigentes atualmente. O quadro a seguir representa esta tendência:



A conclusão de que é necessário o desenvolvi-mento de tecnologia usando fontes alternativas de energia. O Brasil dispõe de uma área muito extensa e está situado numa região geográfica privilegiada (com grande incidência de ra-diação solar) a utilização de combustível vegetal (biomassa) pode ser a solução para uma parte da demanda energética do país diminuindo a dependência do petróleo.

Dentro desta categoria encontramos o álcool

produzido a partir de cana de açúcar e o aproveitamento do bagaço de cana como combustível. O álcool (anidro e hidratado) representa hoje 2,3% dos insumos energéticos do país, com o crescimento da necessidade energética está previsto um aumento da participação desta fonte de energia renovável para 3,9% em 1985. De uma maneira análoga o bagaço de cana que hoje representa 4,7% do total de insumos representará em 1985 cerca de 5,2%.

Ainda no mesmo quadro analisamos a participação da lenha na receita energética, hoje com 15,9% e em 1985 com 10,6% apenas, e a participação do carvão vegetal, hoje com 2,9% e em 1985 com 5,0%. Estes dados consideram a lenha como combustível direto apenas. O uso de gaseificadores em escala representativa não está previsto nos planos econômicos nacionais.

A adaptação de equipamento que utiliza combustível líquido ou gasoso, derivado do petróleo, como fonte de energia para o uso direto de lenha é complicado e envolve obras e despesas muito grandes. Há casos em que tal mudança é impossível por motivos técnicos como por exemplo inadequação do "lay out" da unidade e falta de espaço. A gaseificação da madeira permite contornar algumas dificuldades aqui apresentadas sem prejudicar o rendimento global de queima pois o rendimento de gaseificação e de queima do gás separadamente são superiores ao rendimento da queima direta de madeira de modo que somados os dois processos obtemos rendimentos equivalentes.

O uso de gaseificadores permite uma distribuição do combustível para os diversos queimadores da instalação com maior facilidade utilizando-se dutos tubulares sem haver necessidade de obras nas câmaras de combustão, facilita o controle do processo e garante a uniformidade da queima.

A produção do gás nas imediações da unidade consumidora elimina os custos de engarrafamento ligados à produção e consumo de gás natural e diminui consideravelmente o risco de transporte de um produto tóxico, inflamável e explosivo.

Uma última consideração a fazer leva em conta a viabilidade econômica de gaseificadores. É importante ressaltar que não se pretende substituir todos os derivados de petróleo por gás pobre de madeira, mas a substituição parcial de combustíveis nobres por combustíveis renováveis na natureza. Nas regiões próximas das áreas de floresta o custo da madeira é hoje, e continuará no futuro próximo, sensivelmente menor do que o preço do óleo combustível. Para se extrair uma potência efetiva de aproximadamente 100CV durante 6.500 horas (um ano) são necessários 2,25ha de floresta energética. Considerando que o tempo de crescimento de uma árvore é de aproximadamente oito anos, até estar pronta para corte, são necessários 18ha para se extrair continuamente a potência referida. A equivalência energética de 3,3Kg de madeira e 1Kg de óleo combustível, e supondo que 1ha de floresta energética produz cerca de 12 toneladas de madeira por ano, permite que se afirme que a substituição de todo o óleo combus-

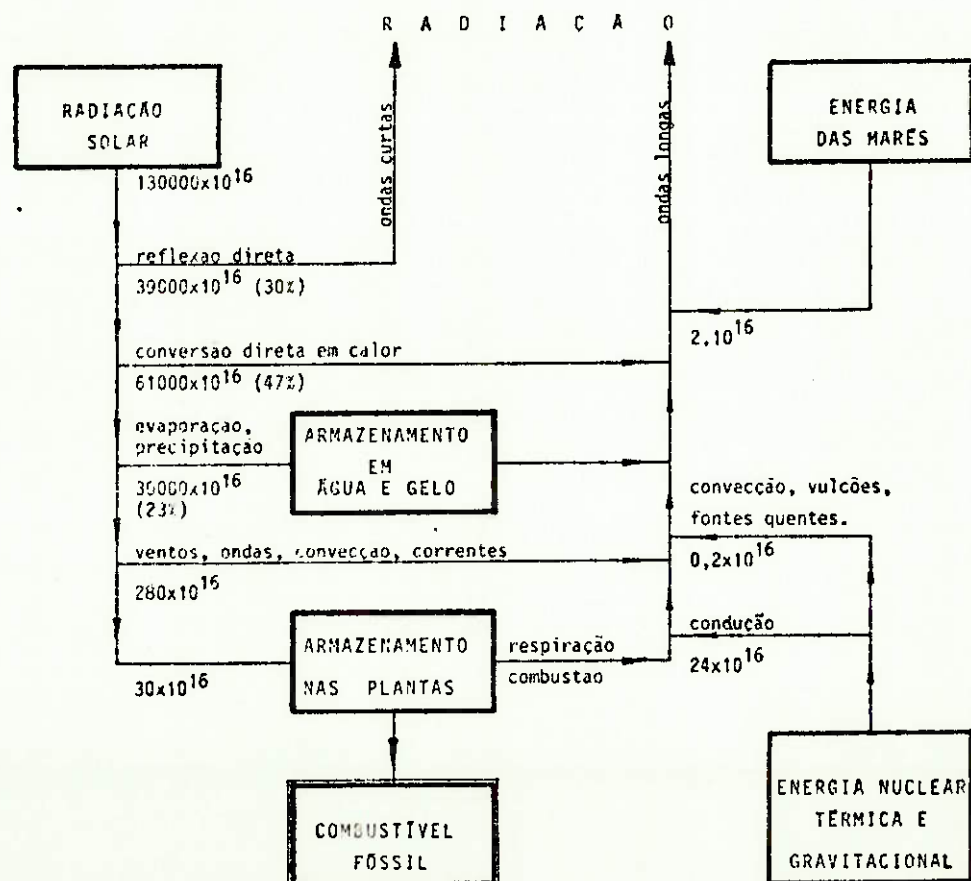
tível que foi consumido no país em 1980, poderia ser substituído por gás de madeira através da exploração de 60.000 Km² de floresta energética.

Este valor representa aproximadamente 1,7% da área total das florestas brasileiras que é cerca de quatro milhões de Km². Para uma produção contínua de uma quantidade equivalente de gás deveríamos ter uma floresta energética representando 13,5% do total da área florestal brasileira. Em vista dos enormes desmatamentos executados ano a ano, na região Amazônica, a maior parte da madeira é queimada na região de desmatamento por falta de recursos ou infra-estrutura. O alagamento do reservatório da barragem de Tucuruí irá cobrir uma vasta área florestal. O aproveitamento racional de toda esta madeira para a obtenção de madeira de lei, carvão vegetal e gás pobre constituiria uma fonte abundante de energia nestas regiões além de evitar consequências negativas sobre a estrutura bioquímica do solo amazonense ou sobre a qualidade (acidez) da água do reservatório da barragem de Tucuruí podendo até prejudicar o normal funcionamento das turbinas.

2.2 - FOTOSSÍNTESE: MECANISMO DE RENOVAÇÃO DE FONTES ENERGÉTICAS

A conclusão de que se deve achar os meios adequados e, adaptar a tecnologia neste sentido, para que as fontes de energia utilizadas sejam passíveis de regeneração pela natureza fechando um ciclo, nos leva a reconhecer a biomassa vegetal como fonte energética de maior importância.

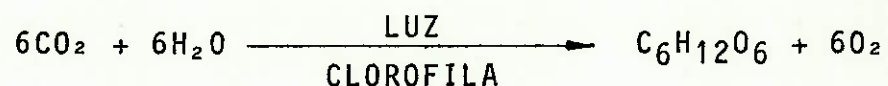
A quantidade de energia que atinge a camada externa da atmosfera terrestre é da ordem de 1350 Watt/m^2 . Grande parte desta energia é perdida por reflexão, conversão direta em calor re-irradiado em forma de ondas longas, evaporação de grandes massas d'água, etc. Apenas 1% deste total é armazenado na vegetação terrestre através da FOTOSSÍNTESE.



FOTOSSÍNTESE

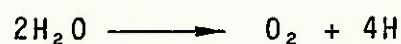
A fotossíntese é um fenômeno pelo qual a energia contida na radiação solar que atinge a Terra é transformada em energia química. Através de diversos fenômenos físicos e químicos esta energia química é utilizada para assimilar o dióxido de carbono (CO_2) em compostos orgânicos que por sua vez podem ser considerados um recurso energético.

A conversão de dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) para a forma de Glicose, requer, no mínimo, a absorção de uma quantidade de energia igual à quantidade de energia liberada quando a Glicose é oxidada e decomposta em dióxido de carbono e água. Assim:



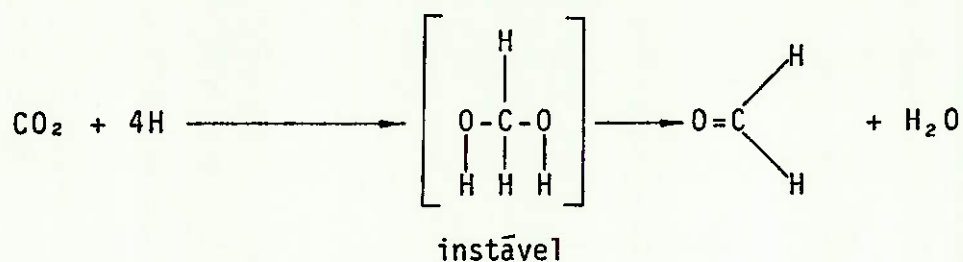
a energia para esta reação (endotérmica) é fornecida pela luz. Absorvida pelos pigmentos dos vegetais, fundamentalmente a CLOROFILA é transferida para uma forma química no ATP (trifosfato de adenosina). A reação de síntese da Glicose é na realidade a resultante de 3 reações fundamentais:

1. Remoção dos átomos de Hidrogênio da água e liberação de moléculas de oxigênio:



2. Transferência dos átomos de hidrogênio para um composto intermediário.

3. Conversão do dióxido de carbono em carboidratos pela redução por átomos de hidrogênio:



portanto:



Os carboidratos resultantes do processo de fotossíntese são utilizados em parte no processo em respiração dos vegetais (processo inverso da fotossíntese) e outra parte serve como matéria-prima destinada às transformações químicas dentre as quais a POLIMERIZAÇÃO é a mais comum.

São formados compostos que vêm a ser elementos estruturais das plantas (por exemplo: CELULOSE e LIGNINA) e compostos cuja função é participar do metabolismo dos vegetais como por exemplo: AMIDO, PROTEÍNAS, VITAMINAS, etc.).

2.3 - QUÍMICA DA MADEIRA

Uma análise química elementar nos mostra que os constituintes da madeira são basicamente carbono, oxigênio e hidrogênio com uma proporção de 50:44:6 em peso. Nitrogênio e outros elementos aparecem em quantidades não representativas. Independente da espécie, idade ou diferenças genéticas esta composição de átomos se mantém aproximadamente constante.

A separação analítica das substâncias individuais que compõem a madeira apresenta várias dificuldades, o número de substâncias possíveis de serem isoladas sem que ocorram modificações estruturais é pequeno. Quimicamente a madeira é heterogênea, constituída principalmente por três polímeros:

CELULOSE

HEMICELULOSE

LIGNINA

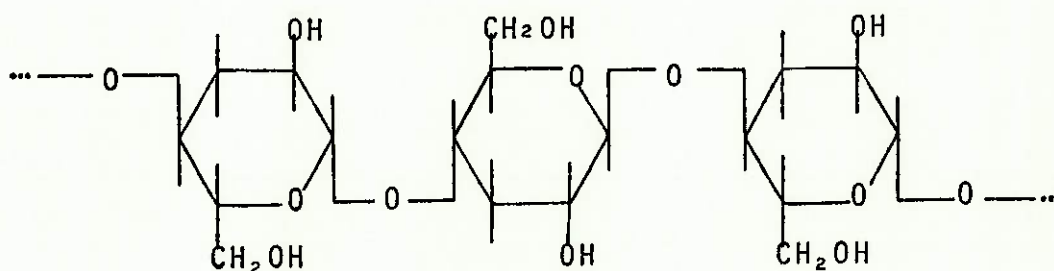
Estas substâncias aparecem na proporção aproximada de 50:20:30. Outros componentes como FENÓIS, TANINOS, ÓLEOS ESSENCIAIS, RESINAS, GRAXAS, CORANTES E TERPENOS são encontrados principalmente na casca e habitualmente são considerados em conjunto com a denominação de extrativos.

Um método analítico que permite isolar parte dos carboidratos sem alterar significativamente sua estrutu

ra química é tratamento da madeira moída e seca, isenta de extrativos, com cloro gasoso e uma subsequente extração dos carboidratos com solução de álcool-etanolamina. Os carboidratos assim processados são hidrolizados, com soluções diluídas de bases e ácidos, para a obtenção da CELULOSE. Este método tem sua precisão prejudicada, pois parte da HEMICELULOSE pode se decompor durante este processo de DESLIGNIFICAÇÃO.

CELULOSE

Constitui as paredes celulares das plantas, é o polissacarídeo mais abundante da natureza. A celulose é uma cadeia orgânica formada por unidades de glicose ($C_6H_{12}O_6$) unidas entre si por ligações β -1-4 glicosídicas. Estes polímeros alcançam elevado peso molecular, da ordem de 300.000 a 500.000.



Estes grupamentos funcionais justificam algumas propriedades físicas e químicas da celulose. O poli-álcool pode oxidar-se, os grupos carboxílicos tendem a esterificar-se.

HEMICELULOSE

As fibras de celulose são envolvidas pelas hemiceluloses que se diferenciam da celulose basicamente por apresentar várias unidades de açúcares diferentes, constituídos por cinco ou seis átomos de carbono, e por terem peso molecular consideravelmente inferior, de 25.000 a 35.000. Algumas substâncias pertencentes ao grupo das hemiceluloses são as XILANAS, as GALACTOGLUCOMANANAS e as ARBINOGLACTANAS.

LIGNINA

É uma mistura de substâncias de composições químicas semelhantes mas com estruturas diferentes. A lignina é um polímero heterogêneo, amorfo que envolve os polissacarídeos e caracteriza-se pelo elevado número de grupos —OH. É insolúvel na maioria dos solventes e o seu isolamento é muito complicado pois tem uma alta tendência de modificar a sua estrutura.

EXTRATIVOS

Os principais extrativos são cadeias orgânicas de baixo peso molecular. São terpenos, ácidos graxos, compostos aromáticos e óleos voláteis cuja presença em maior ou menor porcentagem pode influir na escolha da madeira para determinados fins. No caso de gaseificação pouco influenciam.

É interessante para o nosso estudo, comparar a potencialidade energética entre duas espécies de árvores habituais no Sudeste Brasileiro:

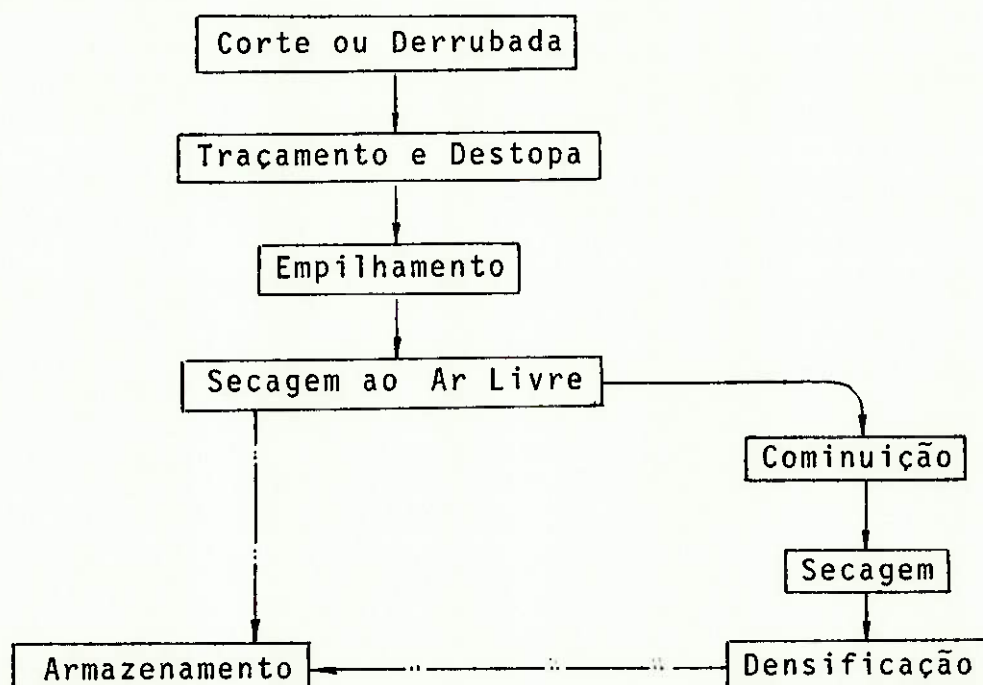
árvore	peso verde (50% de umid.)	litros de óleo árvore
eucaliptus soligna	175 Kg/árvore	46,9
pinus ocarpa	82 Kg/árvore	19,6

Ambas as árvores consideradas eram de oito anos de idade e haviam sido plantadas em florestas energéticas.

2.4 - PROPRIEDADES DA MADEIRA COMO MATÉRIA PRIMA PARA GASEIFICAÇÃO

Ao falar de "madeira" abstraímos o fato de se tratar de espécies distintas com propriedades diferentes, teores de umidade variados, etc. Uma análise detalhada de todos estes fatores não é escopo deste trabalho, algumas propriedades das madeiras, porém, têm muita influência sobre o processo de gaseificação e seus resultados, estas propriedades serão abordadas de uma maneira geral.

Há a necessidade de se preparar a madeira para o processo de gaseificação. A figura a seguir representa este processo:



a) Corte ou Derrubada

Esta operação é feita utilizando-se machados ou moto-serras. O uso de um ou outro equipamento depende de fatores econômicos e sociais tais como: disponibilidade de mão-de-obra, dimensões das árvores, custo de manutenção, produtividade, etc.

b) Traçamento e Destopa

Esta operação consiste em se tirar a casca da árvore e corte dos galhos deixando-se apenas os troncos e galhos desfolhados. Em caso de florestas para fins energéticos é às vezes suprimida.

c) Empilhamento

Para um bom aproveitamento da área, classificação da madeira e melhor administração da área de secagem, é necessário empilhar a madeira.

d) Secagem ao Ar Livre

A madeira simplesmente exposta às condições atmosféricas perde 1 a 3% de sua umidade por dia. Para economizar transporte é necessário reduzir a densidade da madeira. Em caso que se deseja a produção de cavaços, a secagem excessiva da madeira causa o endurecimento do tronco e, portanto, diminui a produtividade da cavaqueadora.

O grau de secagem depende, portanto, dos fatores acima descritos e da umidade residual necessária

para o processo de gaseificação, conforme será visto mais adiante esta umidade residual deve estar entre 10 e 25%.

e) Cominuição e Densificação

Para aproveitamento de serragem, cavacos e outros finos de madeira e diminuição dos custos de transporte, a madeira assim cortada sofre um processo de redução de dimensão (Cominuição) e, posteriormente um processo de densificação que pode ser:

PELETIZAÇÃO

BRIQUETAGEM

EXTRUSÃO

Este Processo facilita o transporte, acelera o processo de secagem e o manuseio do material. Para exemplificar*: 90m³ comportam 5000Kgf de madeira natural, o mesmo volume comporta 13000Kgf de cavacos, após densificação, o mesmo volume pode comportar até 25000Kgf. O custo de transporte pode ser assim reduzido até cinco vezes. O tempo de secagem pode ser reduzido até 20% do tempo necessário para secar a madeira em toras.

* Tópicos sobre Gaseificação e Gaseificadores, Set. 1981, IPT.

Algumas propriedades da madeira que podem ser importantes no processo de gaseificação são:

a) Umidade:

Matéria-prima	teor de umidade % (base úmida)
lenha	15 - 60
lascas de madeira	15 - 40
serragem	25 - 40

Para efeito de comparação, bagaço de cana tem um teor de umidade de 50% aproximadamente.

b) Poder calorífico superior:

Matéria-prima	PCS (Kcal/Kg)
eucalipto	3700
madeira seca	3700
lenha	3200
madeira verde	2500
casca de árvores	2250
serragem seca	3500
"pellets" de serragem	3800

c) Densidade:

Um valor típico para a densidade aparente (ou seja: a relação entre a massa e o volume ocupado real - incluindo os espaços vazios) de toras de madeira é 200Kg/m³. Um valor típico de densidade real das madeiras é em torno de 350-550Kg/m³.

ADEQUABILIDADE DE MADEIRA PARA O PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

	Preferível	Possível	não recomendado
tipo de madeira	madeira "dura"	qualquer tipo de madeira "morta"	madeira sem traçamento e destopa com muita casca.
forma	pedaços, cavaço, briquetes e pellets	tábuas de construção, dormentes de trilhos, etc.	galhos quebrados com diâmetro inferior a 2cm.
umidade	15%	seca ao ar livre ou em secadores 10% - 25%.	recém cortada, madeira "verde".
preparação	sem tintas, vernizes ou impregnantes	sem preparação especial.	madeira tratada com resinas e tintas, posteriormente prensada.

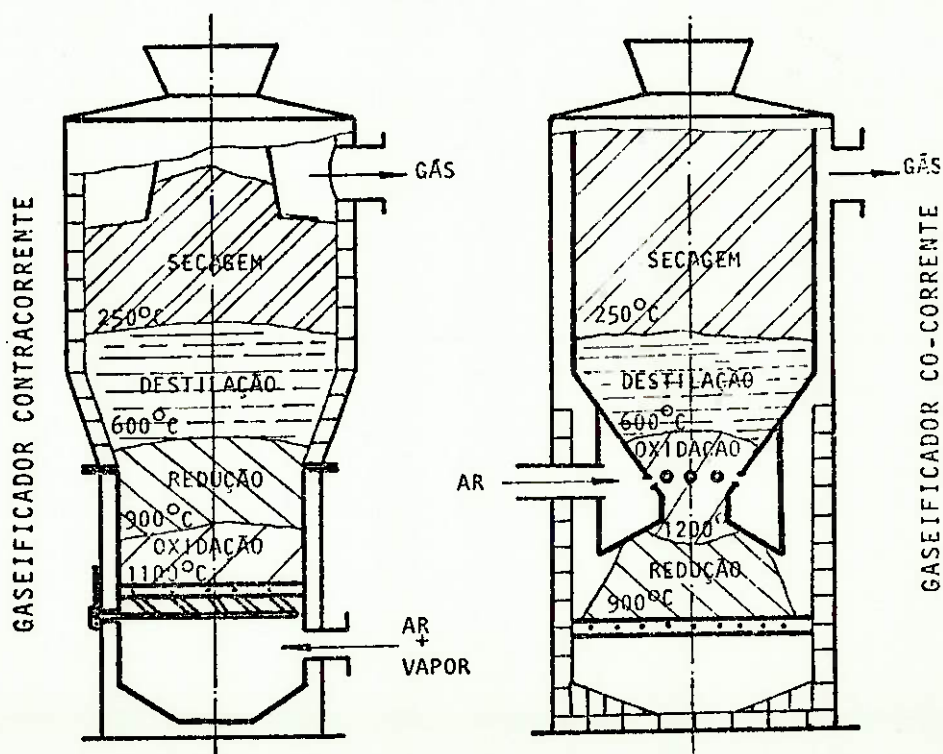
III - PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

III - PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DA MADEIRA

3.1 - REAÇÕES QUE OCORREM NO LEITO

No interior de um gaseificador típico, de leito fixo, encontramos zonas de reação bastante distintas ao longo do leito. A identificação precisa destas zonas, porém, é bastante difícil, pois as fronteiras entre uma e outra não são definidas, ocorrendo nelas fenômenos de transição.

Os esquemas a seguir apresentam as diversas zonas de reação. Para se definir as interfaces entre elas foram consideradas secções transversais do leito nas quais a temperatura média se encontra na região de transição entre um determinado e característico grupo de reações e de outro.



As quatro zonas de reação seriam portanto:

1. secagem
2. destilação
3. redução
4. oxidação

É importante observar que nos gaseificadores tipo contracorrente temos a grelha e as quatro zonas de reação acima da entrada de ar, ocorrendo a gaseificação da zona de oxidação em direção à zona de secagem sendo que os produtos de cada zona de reação escoam na direção de temperaturas mais baixas. Nos gaseificadores tipo co-corrente os produtos oriundos nas zonas de secagem e destilação são forçados a atravessar a região de altas temperaturas na zona de oxidação para depois passarem pela zona de redução. Esta diferença no processo acarreta consequências importantes sobre a natureza do gás produzido. A saída dos gases em gaseificadores co-corrente é feita abaixo da entrada de ar.

3.1.1 - ZONA DE SECAGEM DA MADEIRA

A madeira deve ser introduzida no gaseificador após um preparo prévio que será abordado mais adiante. É conveniente que a umidade do material esteja entre 15% e 25%.

A água contida na madeira apresenta-se em duas formas distintas:

a) água livre - aquela que se encontra ligada higroscopicamente.

b) água combinada - aquela que faz parte da constituição molecular da madeira.

A água na sua forma livre é retirada quando a madeira é submetida por um tempo suficientemente longo, sob pressões próximas da pressão atmosférica, a temperaturas de aproximadamente 100°C .

Na faixa de temperaturas entre 100°C e 250°C nota-se o desprendimento de água de constituição. Desde que o tempo de permanência seja suficiente, até 300°C aproximadamente, ocorre a secagem completa da madeira.

3.1.2 - ZONA DE DESTILAÇÃO DA MADEIRA

Nesta fase a madeira aquecida a temperaturas de 200°C a 650°C sofre reações liberando produtos orgânicos e inorgânicos que não água.

Podemos distinguir três sub-fases da destilação:

volatilização: - fase inicial na qual são desprendidos gases leves, oxigenados, através de reações endotérmicas.

- segunda fase na qual são desprendidos gases leves (hidrocarbonetos não oxigenados) através

de reações exotérmicas.

pirólise: - fase final na qual a liberação de gases é acompanhada de decomposição térmica do material originando hidrocarbonetos pesados (alcatrões).

Os quadros a seguir ilustram os processos que ocorrem na zona de destilação. É importante observar a impossibilidade de se definir uma fronteira exata para a zona, pois processos característicos de destilação ocorrem simultaneamente com processos característicos de secagem em regiões de transição bastante extensas. É razoável considerar que os fenômenos de destilação ocorrem entre 170°C e 650°C.

ETAPAS NO PROCESSO DE DESTILAÇÃO DA MADEIRA

Quadro I:

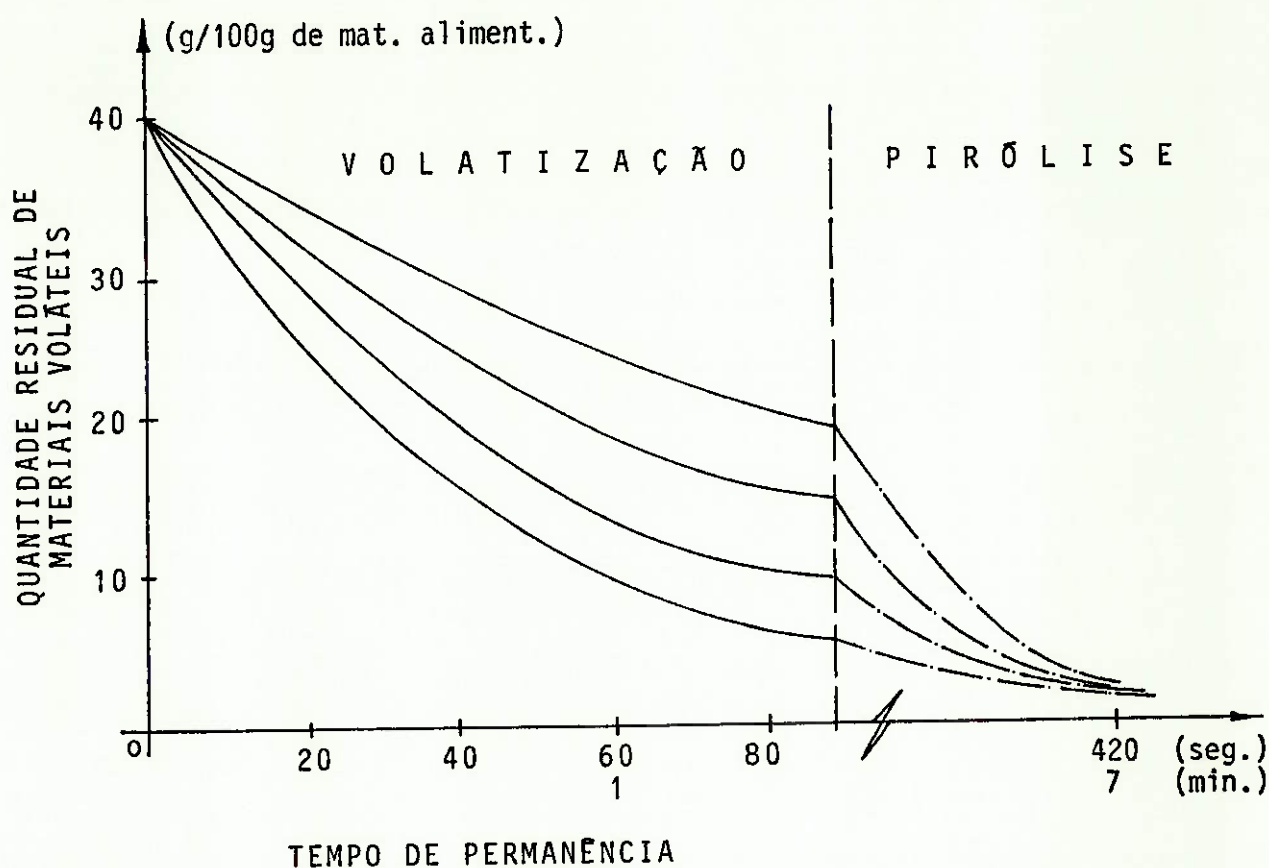
secagem	endotérmica	100°C - 200°C	H ₂ O
volatilização	endotérmica	170°C - 270°C	H ₂ O, CO, CO ₂ CH ₃ OH, CH ₃ COH CH ₃ COOH, etc.
	exotérmica	260°C - 280°C	H ₂ O, CO, CO ₂ H ₂ , CH ₄ CH ₃ , CH ₃ CHO CH ₃ COOH, etc
pirólise	exotérmica	280°C - 400°C	H ₂ , CO, CO ₂ Hidrocarbonetos

QUADRO II

	liberação de água	produção de gases oxidados	início de liberação de hidrocarbonetos	liberação de hidrocarbonetos	dissociação
temperaturas (%)	150 - 200°	200 - 280	280 - 380	380 - 500	500 - 700
teor de carbono (%)	60	68	78	84	89
gases não condensáveis (%):					
CO ₂	68	66.5	35.5	31.5	12.2
CO	30	30	20.5	12.3	24.6
H ₂	—	0.2	6.5	7.5	42.7
hidrocarbonetos	2	3.3	37.5	48.7	20.5

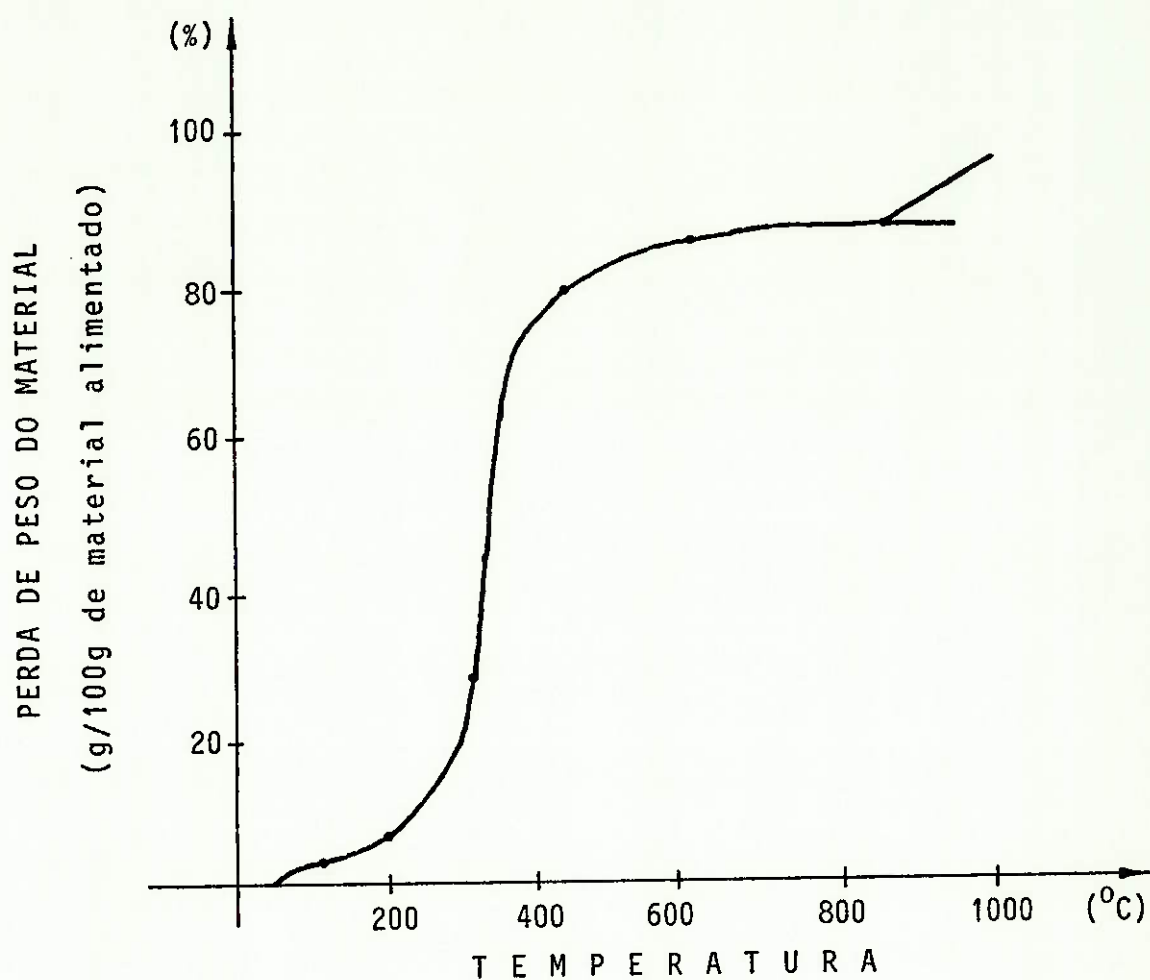
Fonte: Revista Fundação João Pinheiro, outubro de 1976.

As reações que ocorrem na fase de destilação envolvem fenômenos físicos e químicos de grande complexidade mas sua duração é relativamente curta. Verificamos que em menos de 10 min. de permanência da madeira seca em regiões de temperatura em torno de 600°C quase todo o material se decompõe (obtêm-se 90% de carbono fixo).



Fonte: FIELD M.A. e outros, Combustion of Pulverized Fuel, Brit. Coal Utiliz. Res. Assoc., Mon. Bull. 31 (6), 1967.

Ainda para ilustrar o processo de destilação temos o gráfico abaixo, obtido em análise termogravimétrica utilizando madeira "Pinus Sawdust".



Fonte: WENZEL H.F.J., The Chemical Technology of Wood, Academic Press, New York, 1970.

Em termos de massa o rendimento da destilação da madeira se ca (considerando a densidade média $\rho = 570 \text{ Kg/m}^3$) é apresentado na tabela a seguir:

PRODUTOS DA DESTILAÇÃO	Rendimento		
	Kg/m ³ madeira	Kg/ton madeira	gravimétrico (%)
Carvão	195	343	34.3
Água (de constit.)	114	254	25.4
Gases não condensáveis	120	208	20.8
Alcatrões e óleos	60	105	10.5
Ácido Acético, metanol, etc.	51	90	9.0
TOTAL	570	1000	100%

Fonte: Tarkow H., Carbonization of Wood -an energy and material balance, 1978.

A tabela a seguir mostra os principais produtos da destilação da madeira. Podemos separar até 200 substâncias distintas na destilação de algumas espécies de madeira, produtos estes variando de concentração conforme o tipo de madeira.

SERI

TR-239

SELECTED EXAMPLES OF WOOD PYROLYSIS
PRODUCTS UNDER CONDITIONS RANGING FROM
LONG RESIDENCE TIME TO FAST PYROLYSIS

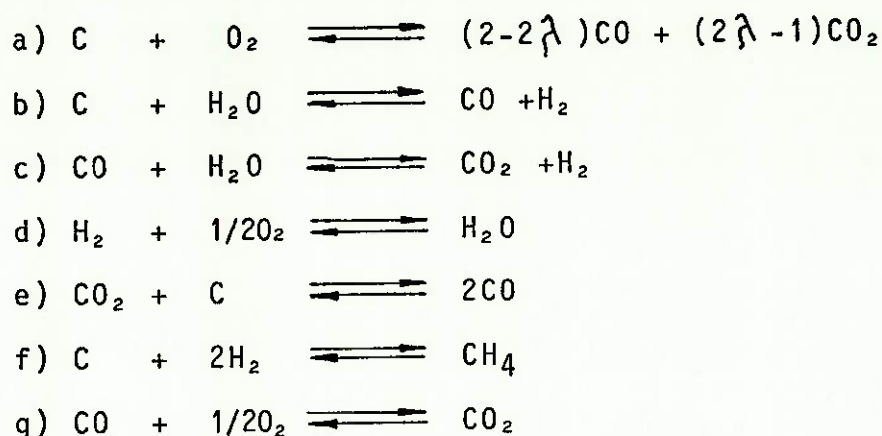
Species	Wt % Products		
	White Fir (Fast Heating) (Brink & Massoudi 1978)	Pine (Slow Heating) (Knight 1976)	Douglas Fir (Fast Heating) (Hileman et al. 1976)
Total Gases	69.0	25	
Char	5.7	32	
Tar	21.0	16	
Water	N/A	27	15.3
H ₂	0.1		
CH ₄	4.8 ^a	2.0	2.0
CO	42 ^a	7.3	21.2
CO ₂	22 ^a	14.2	5.7
C ₂ H ₄			1.0
C ₂ H ₆			0.3
C ₂ -C ₄ HC		2.2	
C ₃ H ₆			1.6
Methanol			0.4
Ethanol			1.4
2-Methyl Propene			0.3
Propenal			0.7
Furan			0.2
2-Oxopropanal			0.5
Hydroxyethanal			0.7
Ethanoic Acid			0.7
2, 3-Butanedione			0.3
2-Hydroxypropanol			0.5
Furfural			0.4
2, 3-Pentanedione			0.1
Furfuryl alcohol			0.2
2-Methyl-2-Butenal			0.1
o-Methoxyphenol			0.2
2-Methoxy-4-Methylphenol			0.4
2-Methoxy-4-Methylanisole			0.1
4-Oxopentanoic Acid			0.4
4-Hydroxy Pentanoic Acid			0.2
p-Methoxyacetophenone			0.2
2-Methoxy-4-Propenylphenol			0.1
5-Hydroxymethyl-2-Furaldehyde			0.2

^aUpper limits.

3.1.3 - ZONAS DE OXIDACAO E REDUCAO

Nas proximidades da ventoinha (entrada de ar) ocorrem reações de oxidação, logo após, na região onde o oxigênio se torna escasso ocorrem reações de redução, envolvendo basicamente carbono, ar, vapor d'água e gases (hidrocarbonetos) resultantes do processo de destilação.

As principais reações químicas que ocorrem nestas zonas são:



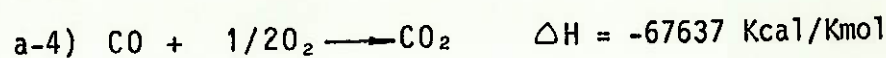
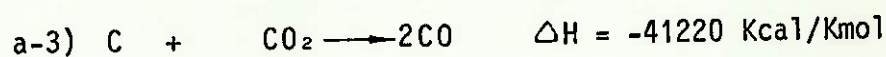
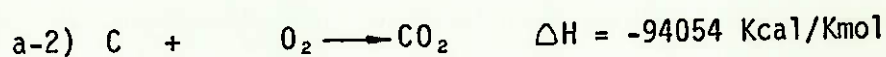
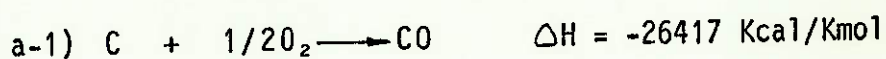
Estas reações são as principais responsáveis pela composição do gás resultante do processo e por parâmetros importantes na operação do gaseificador, dentre eles se destaca a temperatura máxima no leito. A influência de fatores físicos e geométricos sobre o equilíbrio destas reações será discutida mais adiante.

Dada a importância destas reações cada uma delas será analisada a seguir, as entalpias de reação serão consideradas com todos os produtos a 293 K.

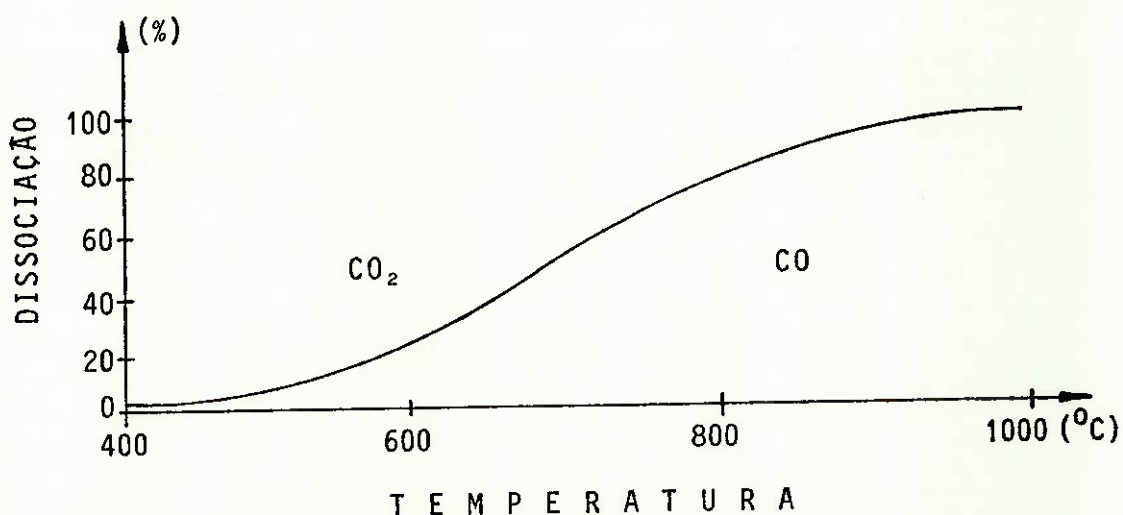
a) Reação carbono-oxigênio:

A reação de queima do carbono é altamente exotérmica produzindo monóxido de carbono (CO) e gás carbônico (CO₂) em equilíbrio, que a pressões próximas da pressão atmosférica, depende basicamente da temperatura na qual se encontram estes gases.

Esta reação é a resultante de quatro reações básicas, que caracterizam a zona de oxidação, quando ocorrem simultaneamente:



O gráfico a seguir representa a dissociação do gás carbônico à pressão atmosférica na presença de carbono e altas temperaturas.



O fator λ depende apenas da temperatura na qual ocorre a reação pois a relação entre as quantidades molares dos produtos (CO e CO₂) da queima do carbono é dada por:

$$\frac{2 - 2\lambda}{2\lambda - 1} = 2500 \times \left[e^{\left(-\frac{6240}{T} \right)} \right]$$

conforme:

ARTUR J.A., Reactions Between Carbon and Oxygen,
Trans. Faraday Soc. -47, 1951

e SMOOT and PROTT, Pulverized-Coal Combustion
and Gasification, Plenum Press, New York, 1979.

b) Reação carbono-água:

A reação de síntese de monóxido de carbono com liberação de hidrogênio é uma reação endotérmica responsável em grande parte pelo controle da temperatura máxima do leito. A entalpia desta reação é:

$$\Delta H_p = + 31382 \text{ Kcal/Kmol}$$

Esta reação é muito importante devido ao fato que todos os seus produtos são combustíveis podendo ainda haver combinação entre o hidrogênio liberado e o carvão incandescente formando gás metano conforme a reação (f).

c) Reação monóxido de carbono-água:

Esta reação também chamada "conversão do mo-

nóxido de carbono" ou "shift" é exotérmica com entalpia de reação:

$$\Delta H_c = - 160 \text{ Kcal/Kmol}$$

Sua importância se deve ao fato de converter parte de água em hidrogênio. Por sua vez esta reação diminui a concentração de CO e aumenta a do CO₂ (inerte).

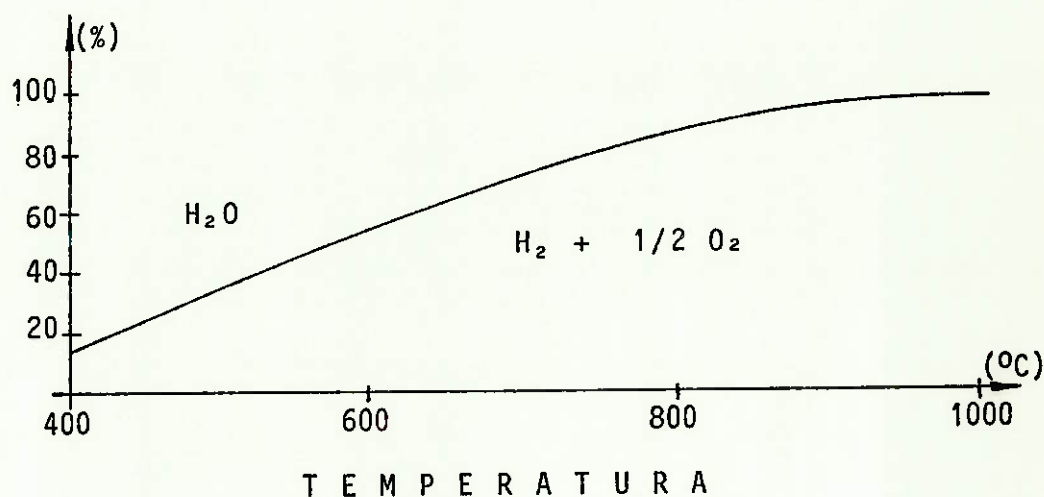
d) Reação hidrogênio-oxigênio:

A reação de síntese da água pode ser considerada desprezível por duas razões:

Primeiro: Embora apresente alta velocidade de reação, devido ao fato da produção de hidrogênio no processo pelas reações (b) e (c) ser bastante lenta em comparação com a queima do carbono pela reação (a), o hidrogênio produzido não encontra quantidade suficiente de oxigênio disponível para se combinar formando a água.

Segundo: Em altas temperaturas a água se dissocia favorecendo o deslocamento do equilíbrio da reação no sentido da formação de hidrogênio e oxigênio livres por reação de análise da água.

O gráfico a seguir representa a dissociação do vapor d'água em presença de carvão incandescente.



e) Reação dióxido de carbono-carbono:

Esta reação ocorre principalmente na região onde a concentração de oxigênio é muito baixa, ou seja na zona de redução. É importante por transformar parte do CO₂ (inerte) em CO (combustível) e principalmente por ser endotérmica com entalpia de reação:

$$\Delta H_r = + 41220 \text{ Kcal/Kmol}$$

sendo assim responsável, junto com a reação carbono-água (b) pelo controle da temperatura máxima no leito.

f) Reação carbono-hidrogênio:

Esta reação de síntese do metano aumenta a concentração deste gás no gás produzido (parte do metano é proveniente da fase de destilação). É uma reação exotérmica com entalpia de reação:

$$\Delta H_f = - 17895 \text{ Kcal/Kmol}$$

Quando se pretende gerar gás para sínteses químicas (por exemplo a do metanol) esta reação assume particular importância.

g) Reação monóxido de carbono-oxigênio:

A reação de queima total do monóxido de carbono é exotérmica de importância secundária pois na região de abundância de oxigênio (próximo da ventoíña) predomina a reação de queima do carbono, reação (a), que se processa numa velocidade muito maior do que a reação em questão. Deste modo o oxigênio reage preferivelmente com o carvão incandescente e muito pouco com o monóxido de carbono.

Estudos sobre a gaseificação mostram que os efeitos desta reação podem ser desprezados.

O Nitrogênio:

Este gás inerte introduzido no processo reage muito pouco produzindo pequenas quantidades de NO e NH₃. Estas reações porém são desprezíveis. A importância do nitrogênio se deve, no entanto, ao fato de existir em quantidades relativamente elevadas no ar e portanto ao ser aquecido até atingir as temperaturas reinantes no interior do gaseificador participa do processo físico atuando como controlador da máxima temperatura no leito.

Reação (*)	K _{0i} (**)		ΔH _i /R (K)	Relação com as Pressões parciais.	Referência
	Valor	Unidade			
(b)	3,139 · 10 ⁹	Pa	16344	$P_{CO} \cdot P_{H_2} \cdot P_{H_2O}^{-1}$	Hottel e Howard (1971)
(c)	0,0265	-	- 3958	$P_{CO} \cdot P_{H_2} \cdot P_{CO}^{-1} \cdot P_{H_2O}^{-1}$	Parent e Katz (1948)
(e)	1,238 · 10 ¹⁴	Pa	20294	$P_{CO}^2 \cdot P_{CO_2}^{-1}$	Parent e Katz (1948)
(f)	1,453 · 10 ⁻¹¹	Pa ⁻¹	- 11005	$P_{CH_4} \cdot P_{H_2}^{-2}$	Hottel e Howard (1971)
(**) $K_j = K_{0j} \exp \left(- \frac{\Delta H_j}{RT} \right)$					
(*) Para a reação (g) $K_i = P_{CO_2} \cdot P_{CO}^{-1} \cdot P_{O_2}^{-1/2} = 10^3 / 318,316 \text{ (Pa}^{-1/2} \text{)}$					
para $q = \frac{14733,3}{T} - 1,38 \log T + 6,102 \cdot 10^4 T - 6,772 \cdot 10^8 T^2 - 0,9383$					
Haslan e Russel (1926)					

CONSTANTES DE EQUILÍBRIO PARA ALGUMAS REAÇÕES CONSIDERADAS

3.2 - CARACTERÍSTICAS DO GÁS RESULTANTE

O gás resultante do processo de gaseificação de madeira é uma mistura de substâncias e contém principalmente:

	CO ₂
	CO
	H ₂
	N ₂
	CH ₄
	C ₂ H ₆
	Traços de H ₂ S, SO ₂ , NO e NH ₃
	alcatrões - constituídos basicamente de hidrocarbonetos de massa molecular relativamente elevada, álcoois, ácidos orgânicos, ésteres e óleos de creozoto.

A concentração destas substâncias no gás depende de:

- tipo de gaseificador usado;
- fatores externos responsáveis pelo deslocamento do equilíbrio das reações já vistas;
- tipo de matéria-prima utilizada para a gaseificação.

O tipo de madeira empregado na gaseificação é o que menos influi na composição dos gases extraídos apesar de que a composição química das cadeias orgânicas varia muito de um tipo de madeira para outro. A maior influência sobre o gás resultante se deve, portanto, ao tipo de equipamento empregado e aos fatores de operação como por exemplo: umi

dade da matéria-prima, relação ar/carga, pressão, etc.

A literatura indica, como sendo típicos para gás de gasogênio, os seguintes valores* para a composição dos gases:

CO	:	20	a	30%	
H ₂	:	10	a	25%	
CH ₄	:	0	a	4%	*valores em % volume
CO ₂	:	2	a	15%	
N ₂	:	45	a	60%	

Com relação ao PCI (PCI = poder calorífico inferior do gás: é a energia que se consegue liberar, por unidade de massa, ao proceder-se a combustão do gás, quando a água produzida na combustão se encontra toda na fase vapor), é indicada uma faixa de valores entre 900 e 1300 Kcal/Nm³. Este valor é baixo com relação aos gases de petróleo, por exemplo GLP, portanto o gás de gasogênio é também chamado de GÁS POBRE.

Alguns resultados para ilustrar a variação da composição dos gases são apresentados a seguir:

MATERIAL	GASEIFICADOR	GÁS RESULTANTE (% VOL.)					PCI (Kcal/Nm ³)	
		CO	H ₂	CH ₄	CnHm	CO ₂		N ₂
MADEIRA DURA ^(a)	CONTRACORRENTE	22.0	18.2	1.6	0.4	10.5	47.3	1250
MADEIRA MOLE ^(a)	CONTRACORRENTE	20.6	15.5	1.2	0.1	11.0	51.6	1145
MADEIRA - 15% umid. ^(b)	CO-CORRENTE	22.2	17.5	0.8	-	12.2	47.3	1190
MADEIRA - 25% umid. ^(b)	CO-CORRENTE	23.0	14.1	0.9	-	16.0	45.9	1130

Fonte: (a) DUBBEL H., Manual do Engenheiro Mecânico, Vol.II

Experiências feitas na Alemanha com madeira seca ao ar.

(b) SKOV N.A. & PAPWORTH M.L., The Pegasus* Unit, USA, 1974.

Para efeito de comparação foram coletados alguns dados de catálogos de fabricantes de gasogênios no Brasil e no exterior. A tabela a seguir apresenta estes dados:

EMPRESA	COMBUSTÍVEL	GÁS RESULTANTE (% VOL.)							PCI (Kcal/Nm ³)
		CO	H ₂	CH ₄	CnHm	CO ₂	N ₂	Out.	
CODEGÁS	LENHA	24.4	16.2	3.2	-	8.1	47.4	0.7	1430
CONTEC	LENHA	22.1	17.5	3.2	-	9.1	47.4	0.7	1390
HIMECA	LENHA	35.0	10.0	1.0	3.0	6.0	45.0	-	1600
TMO	LENHA	28.0	15.0		3.4	5.2	48.0	0.4	1525
CARBOGÁS	CARVÃO VEG.	27.0	17.0	4.0	0.5	8.0	41.5	2.0	1700
LORENZETTI	CARVÃO VEG.	23.9	18.6	1.2	-	7.7	48.6	-	1305
SWEDLUNF	CARVÃO VEG.	30.0	7.0	0.5	-	1.5	60.5	0.5	1130

Observa-se que os valores de PCI encontrados em catálogos de fabricantes são de 10% a 30% superiores aos valores publicados em literatura técnica.

Uma nota sobre algumas propriedades dos gases:

Substância	Massa Molecular (Kg/Kgmo1)	Densidade normal (m ³ /Kg)	Volume Molar (m ³ /Kgmo1)
Ar seco	28,97	1,293	22,41
O ₂	32,00	1,429	22,39
N ₂	28,02	1,250	22,42
CO ₂	44,00	1,977	22,26
CO	28,00	1,250	22,40
H ₂	2,016	0,090	22,40
CH ₄	16,03	0,717	22,36

a) Poder calorífico inferior:

O PCI de uma mistura gasosa combustível pode ser calculado como se segue:

$$PCI = 30,19(CO) + 25,8(H_2) + 85,76(CH_4) + \dots \text{ (Kcal/Nm}^3\text{)}$$

onde: (CO) = % Vol. na base seca de CO

(H₂) = % Vol. na base seca de H₂

(CH₄) = % Vol. na base seca de CH₄

etc. para todos os componentes combustíveis.

b) Calor específico:

O calor específico a pressão constante (C_p) de um gás, em função da temperatura (T), pode ser calculado por equações tais como:

$$C_p = a + bT + cT^2 + \dots$$

Na tabela a seguir temos os valores das constantes a , b e c para vários gases, com os quais se obtêm valores para C_p em (Kcal/Kgmol.K).

Gás	a	$b \cdot 10^8$	$c \cdot 10^8$	INTERVALO DE TEMPERATURAS (K)
CH ₄	5,34	11,50	-	273 - 1200
CO	6,60	1,20	-	273 - 2500
CO ₂	6,37	10,10	-3,405	300 - 1500
H ₂	6,62	0,81	-	273 - 2500
N ₂	6,30	1,82	-0,345	-
H ₂ O(vap.)	8,22	0,15	,34	300 - 2500
O ₂	6,26	2,75	-0,77	-

A avaliação do calor específico para uma mistura de n gases (C_{pm}) pode ser feita usando a fórmula:

$$C_{pm} = \sum_{i=1}^n f_i \cdot C_{p_i} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

onde f_i é a fração molar do gás i na mistura e C_{p_i} é o C_p molar do gás i na mistura.

c) Massa molecular equivalente:

A massa molecular equivalente de uma mistura de gases seca pode ser calculada como uma média ponderada das massas moleculares dos gases componentes:

$$M = \frac{1}{100} \sum M_i C_i \quad (\text{Kg/Kgmol})$$

com M_i ... massa molecular do gás i

C_i ... percentagem em massa do gás i

d) Densidade:

d-1) Densidade normal:

A densidade normal de uma mistura de gases seca pode ser dada por:

$$d = 0,044616 M \quad (\text{Kg/Nm}^3)$$

d-2) Densidade relativa:

Entende-se por densidade relativa ao ar de uma mistura seca de gases, a razão entre a densidade da mistura e a densidade do ar seco, ambos nas mesmas condições de temperatura e pressão e, sendo ambos considerados gases perfeitos.

Assim para medidas tomadas a 273K e 1,0 atm (101,325 KPa) temos:

$$d_{ar} = d/1,293$$

Valores típicos das propriedades vistas para o caso de gases de gasogênio são apresentados a seguir:

a) $M \approx 25,5$ (Kg/Kgmo1)

b) $d \approx 1,14$ (Kg/Nm³)

$d_{ar} \approx 0,88$

c) A temperatura adiabática de chama dos gases de gasogênio tem valores em torno de 1450°C.

3.3 - FATORES QUE INFLUENCIAM O PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

Antes de analisar a influência dos fatores vazão de ar, vazão de madeira, vazão de vapor, pressão e outros, sobre o processo, será analisado um parâmetro de extrema importância:

TEMPERATURA MÁXIMA NO LEITO

Sendo o processo de combustão do material, a reação (a) antes mencionada, exotérmico, o leito apresentará numa região relativamente estreita, ou seja na zona de oxidação, temperaturas relativamente altas de 900°C a 1500°C.

O controle deste parâmetro é vital para o funcionamento adequado do gaseificador pois se for atingida a temperatura de amolecimento e fusão das cinzas pode haver a formação de um bloco de material sinterizado que obstruirá o gaseificador impedindo o escoamento do material. Este parâmetro é crítico também em termos do projeto do reator pois o material de fabricação deve suportar o valor máximo de temperatura atingido o que nos leva a precisar utilizar materiais muito caros.

A seguir serão analisados os principais fatores que influenciam o processo. O controle adequado destes parâmetros permite a operação do sistema num ponto de maior rendimento possível. A determinação de um ponto de máximo

rendimento deve ser feita para cada equipamento através de uma série de testes ou através de simulação digital do processo em computadores.

3.3.1 - RELAÇÃO AR-MATERIAL

É a relação entre a vazão em massa do ar (ou comburente) injetado no gaseificador e a vazão em massa da lenha. Como a influência da umidade da lenha será considerada mais adiante referimo-nos aqui à vazão em massa da lenha seca.

Mantidas as demais variáveis constantes inclusive a vazão do material, o aumento desta relação deve levar a um aumento da temperatura máxima no leito que acarreta um aumento das relações CO/CO_2 e H_2/H_2O , produzindo um efeito benéfico na composição do gás resultante.

Aumento excessivo desta relação pode acarretar um aumento demasiado na temperatura máxima do leito com as consequências já comentadas. Por outro lado uma diminuição desta relação abaixa demais a temperatura do leito favorecendo a produção maior de CO_2 e menor de H_2 e ainda pode ocasionar uma falta de energia para que se processem as reações endotérmicas, principalmente a reação carbono-água, pois esta energia provém principalmente da reação de queima do carbono. Relações ar-material muito baixas podem levar a um aumento na quantidade de carbono não convertido ou mesmo in-

terromper as reações de gaseificação funcionando o gaseificador na melhor hipótese como forno de carvoejamento (ocorrendo apenas a secagem e a destilação).

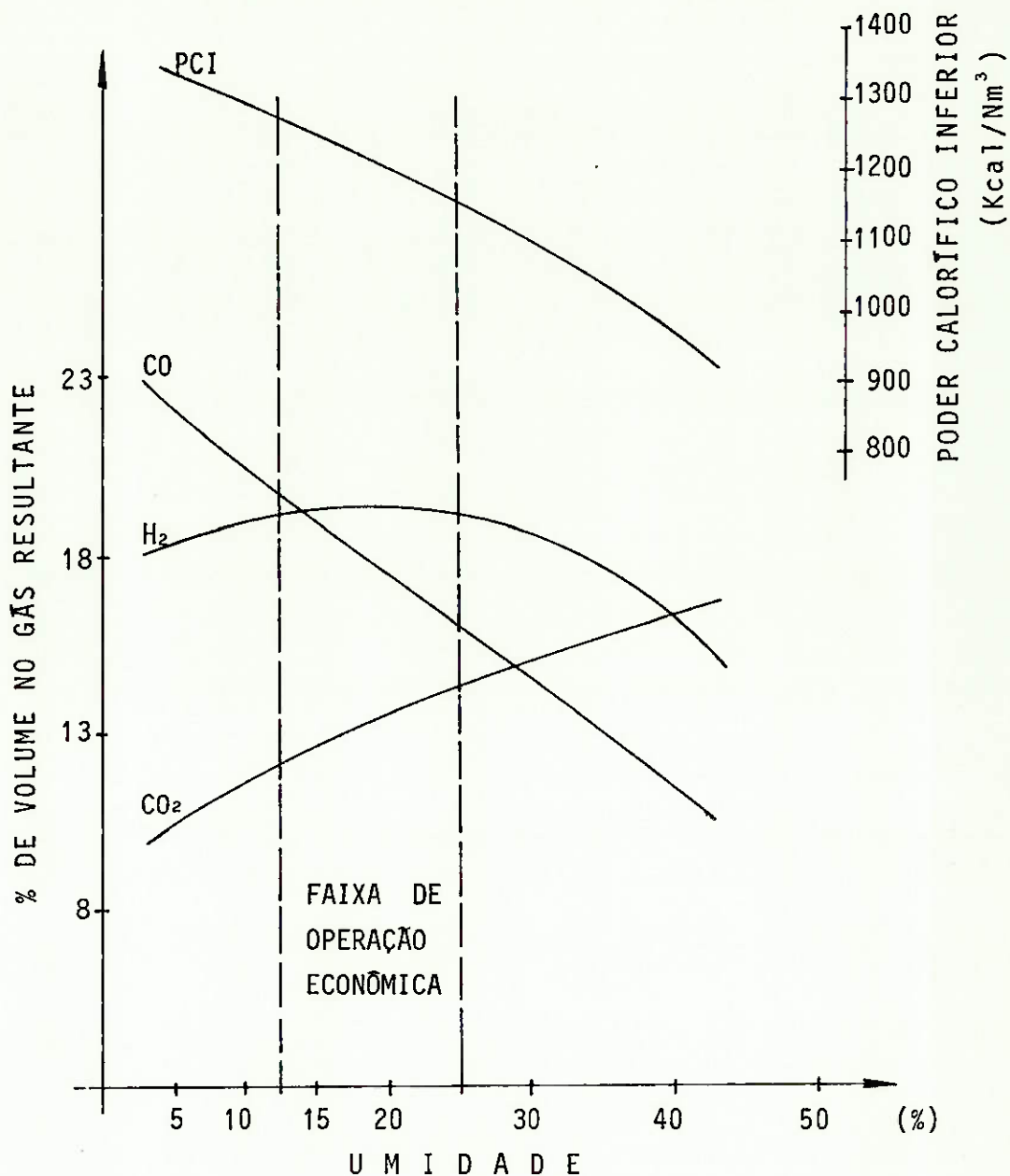
3.3.2 - UMIDADE

A umidade da lenha ao ser introduzida no gaseificador é muito importante pois a relação vapor d'água-material seco quando aumentada, mantidos os demais fatores constantes, acarreta a diminuição da temperatura média no leito. Isto pois a reação carbono-água (endotérmica) é favorecida. Deste modo aumenta a concentração de H_2 mas diminui a relação CO/CO_2 e a quantidade de CH_4 sintetizado aumenta, porém, não muito significativamente. A parcela de vapor não dissociado irá se somar aos gases resultantes que terão, portanto, um teor de umidade e um PCI mais baixo.

Alta umidade do material pode levar a um "resfriamento" demasiado do leito, aumentando a fração de carbono não convertido nas cinzas. Baixos valores da umidade devem aumentar a temperatura máxima do leito com as consequências já comentadas e ainda, as concentrações de H_2 e CH_4 no gás resultante serão muito baixas levando, portanto, à diminuição do poder calorífico deste.

O gráfico seguinte ilustra a influência da umidade da madeira sobre o gás resultante.

COMPOSIÇÃO E PCI DO GÁS DE MADEIRA
EM FUNÇÃO DA UMIDADE DO MATERIAL ALIMENTADO



Valores obtidos experimentalmente em gaseificador co-corrente

Fonte: Schlaepfer and Tobler, Teorische und Praktische Untersuchungen über den Betrieb von Motorfahrzeugen met Holzgas, Schweiz. Ges.Fid. Studium der Motorbrennstoffe, Ber n93, Bern, 1937.

3.3.3 - VAZÃO DE MATERIAL

O aumento da vazão do material (seco), mantidas as demais condições fixadas, deve levar a um aumento na fração não convertido no processo.

Esta vazão é normalmente levada em consideração num parâmetro do gaseificador:

TAXA DE GASEIFICAÇÃO

Este parâmetro tem unidade ($\frac{\text{Kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$) e se refere à vazão de material que passa na secção mais estreita das zonas de oxidação e redução. Valores comuns para a taxa de gaseificação de gasogênios comuns são da ordem de 0,20Kg/m².s. Taxas de gaseificação muito baixas podem levar a uma sub-utilização do equipamento.

3.3.4 - GRANULOMETRIA

A granulometria do material a ser alimentado no gaseificador é um parâmetro a ser analisado com cuidado.

- partículas muito pequenas podem ser arrastadas com os gases.
- pedaços muito grandes exigem um tempo de secagem demasiadamente longo, implicando em necessidade de se construir gaseificadores muito altos e, ainda resultam em muito carbono não convertido no processo, caso não te-

nham tempo de retenção suficiente. Recomenda-se pedaços com dimensão em torno de 50 x 50 x 150mm e uma banda estreita de variação.

Pequenas granulometrias, embora exijam tempos de retenção menores permitindo operar com maiores taxas de gaseificação, podem acarretar o bloqueio do gaseificador além de causar altas perdas de carga nos gases, exigindo altas potências nos ventiladores de insuflamento de ar. Considerando que materiais de pequena granulometria reagem com maior velocidade, a operação nestas condições pode levar a altos valores da temperatura máxima no leito.

3.3.5 - PRESSÃO

Os gaseificadores convencionais operam com pressões próximas de pressão atmosférica. Alguns gaseificadores de grande porte que visam a produção de gás de sínteses químicas a partir do metano operam a pressões relativamente altas, em torno de até 70Kgf/cm²

O efeito do aumento de pressão é o deslocamento do equilíbrio das reações nas zonas de oxidação e redução, principalmente da reação (f) favorecendo a produção de metano. Ademais a elevada pressão e conseqüentemente a maior concentração de gases por unidade de volume permite conseguir taxas de reação relativamente altas mesmo a temperaturas moderadas, evitando altas temperaturas máximas no leito com sinterização ou fusão de cinzas.

Mantidas constantes as demais condições, o aumento de pressão deve levar a uma diminuição de concentração de CO e H₂, aumentar a de CO₂ e aumentar fortemente a de CH₄.

O resultado é um gás com maior entalpia de combustão por unidade de massa e uma melhora no rendimento do equipamento com minimização da fração de carbono não convertido. Por outro lado, gaseificadores operando a altas pressões necessitam de sistemas especiais de segurança além de exigirem altos investimentos em materiais e altos custos operacionais.

Observação: Gaseificadores de alta pressão são resfriados por camisa d'água pois o risco de queda de parede de refratário expondo a chapa a altas temperaturas e pressões é consideravelmente grande.

COMPORTAMENTO PROVÁVEL DE VÁRIOS PARÂMETROS DE PROCESSO FRENTE A VARIÁÇÕES EM ALGUNS FATORES DE OPERAÇÃO.

Parâmetro influenciado (*) aumento no fator de operação (**)	Temperatura máxima no leite	Composição do Gás Produzido					Fração de Carbono Convertido	Observação quanto ao aumento excessivo	Observação quanto a redução excessiva
		CO	CO ₂	N ₂	H ₂	CH ₄			
Relações entre variações de ar/material	+	+	-	+	+	+	+	Podem aumentar muito o carbono não convertido ou extinguir o leite.	
Relação entre variações de vapor/material	-	-	+	+	+	+	+	Podem aumentar muito a temp. máx. no leite e fundir cinzas. O poder calorífico do gás cairá muito.	
Taxa de gaseificação	+	+	-	+	+	+	-	Leva a operação muito abaixo da capacidade do equipamento.	
Granulometria do material	-	-	+	+	+	+	-	Podem levar a altas perdas de carga nos gases, bloqueios no leite e aumenta a temperatura máx.ima.	
Pressão	-	-	+	+	+	+	+	Podem levar à extinção da operação. Pressões abaixo da ambiente não são usadas.	

(**) supõe aumento não excessivo em relação a uma condição estável e julgada boa de operação e que os outros fatores permaneçam constantes. Condição boa de operação é considerada aqui como condição em que o rendimento a frio esteja em torno de 70%.

(*) sinal (+) = aumento ; (-) = diminuição;

(±) = influência não nitidamente verificada ou depende da fixação de outras condições ou de simulação do processo.

IV - EQUIPAMENTO DE GASEIFICAÇÃO

IV - EQUIPAMENTO DE GASEIFICAÇÃO

4.1 - O GASEIFICADOR

O gaseificador é constituído basicamente de um cilindro vertical dotado de sistemas para introdução do material, retirada de cinzas, insuflamento de ar e captação dos gases. Em seu interior se mantém o leito de material em processamento.

Em primeira análise distinguimos entre gaseificadores de leito fixo* e gaseificadores de leito fluidizado. Nos gaseificadores de leito fixo o material é alimentado pelo topo do equipamento e se move lentamente no sentido descendente sendo que as cinzas são retiradas em sua base. O ar pode ser introduzido em diversas posições e o mesmo ocorre em relação à captação dos gases. O movimento relativo entre o material sólido e o fluxo gasoso permite a subdivisão dos gaseificadores de leito fixo em:

- a) gaseificadores de fluxo contracorrente ("UPDRAFT")
- b) gaseificadores de fluxo co-corrente ("DOWNDRAFT")
- c) gaseificadores de fluxo cruzado ("CROSSDRAFT")

Nos gaseificadores de leito fluidizado o mate

* Alguns autores chamam o gaseificador de leito fixo de "gaseificador de leito móvel (moving bed) devido ao deslocamento do material no interior do equipamento.

rial é geralmente introduzido numa posição intermediária e o ar é insuflado sempre pela base. O processo de gaseificação se desenvolve no leito em suspensão sem haver distinção entre as diversas zonas de reação e o gás resultante é retirado no topo do gaseificador.

4.1.1 - GASEIFICADOR DE LEITO FIXO E FLUXO CONTRACORRENTE (UPDRAFT)

Neste tipo de equipamento o ar é insuflado por debaixo da grelha e atravessa o leito no sentido ascendente paralelamente ao fluxo de material sólido, em sentido oposto a este. A zona de oxidação situa-se imediatamente sobre a grelha de modo que os gases e alcatrões produzidos na zona de destilação atravessam apenas a zona de secagem sendo captados no topo do equipamento. As baixas temperaturas reinantes na zona de secagem não são suficientes para que ocorra o processo de craqueamento ("cracking" = quebra das cadeias orgânicas compridas dos alcatrões) e portanto o gás resultante é rico em vapor d'água e produtos da destilação da madeira.

O vapor d'água resultante da secagem da madeira é retirado junto com os gases fazendo com que o PCI abaixe e ainda tornando necessária a injeção de vapor d'água na base do equipamento para poder participar das reações que ocorrem na zona de redução.

Em função do destino da unidade de gaseificação a existência de alcatrões pode ser tanto benigna como maligna. Se junto a unidade de gaseificação há uma unidade de processamento do líquido piro-lenhoso (alcatrão) com a finalidade de separar os produtos da destilação da madeira - alguns deles de elevado valor econômico - a existência de uma quantidade de vapores de alcatrão no gás gerado é benigna.

Neste caso, este tipo de equipamento é o mais recomendável. Este tipo de equipamento é habitualmente refrigerado com camisa d'água pois o vapor produzido é utilizado para injeção no leito. Quando, porém, o gás produzido é destinado à movimentação de turbinas a gás, substituição de combustíveis líquidos em motores de combustão interna ou queima direta em fornalhas, a existência de alcatrões é extremamente maligna. Os alcatrões são produtos extremamente corrosivos pois contêm ácido acético e diversos óleos creozotos e ainda podem polimerizar formando crostas de material e entupindo válvulas e bicos de queimador.

Uma variante deste tipo de gaseificador permite a obtenção de um gás isento de alcatrões para uso em motores de combustão interna, turbinas e queimadores. Neste equipamento o gás captado no topo é reciclado e introduzido novamente na base do equipamento. Deste modo os produtos da destilação são forçados a atravessar a zona de oxidação na qual, devido as altas temperaturas reinantes, ocorre o processo de craqueamento. A injeção de vapor d'água torna-se desnecessária pois a água liberada na secagem da madeira participa dos processos na zona de redução e a "camisa d'água" pode ser substituída por tijolos isolantes e refratários. O gás é retirado do equipamento numa região abaixo da zona de destilação. O reciclo dos gases é uma alternativa que acarreta um rendimento térmico maior do equipamento e o gás, que é extraído com temperaturas mais elevadas, apresenta particulares vanta

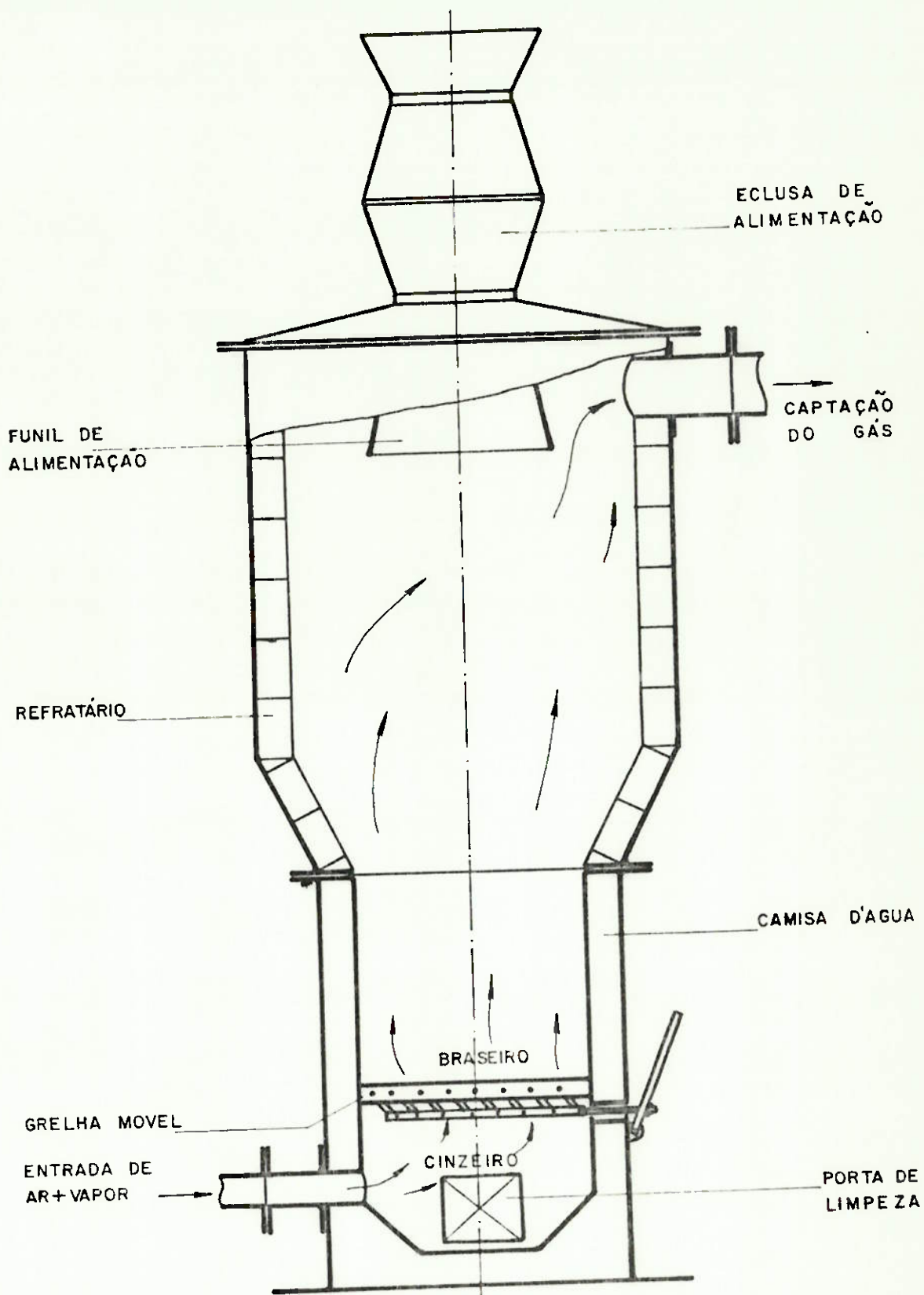
gens para uso em turbinas e queimadores. O reciclo do gás pode ser feito utilizando-se ventiladores centrífugos ou ejetores com ar comprimido. O uso de ventiladores não é aconselhável, pois é de baixa eficiência para gases a altas temperaturas e ainda o alcatrão contido no gás condensa devido a centrifugação e por ser corrosivo danifica o rotor e os mancais em pouco tempo, ademais o custo de ventiladores fabricados de materiais resistentes à corrosão é sensivelmente alto. É, pois, recomendado o uso de ejetores que são um equipamento mais simples e muito mais barato.

Os gaseificadores de fluxo contracorrente são os mais antigos e portanto mais abundantes. A versão com reciclo de gases é recente sendo, porém, mais promissora para o futuro. O gás resultante apesar de isento de alcatrões contém cinzas arrastadas e portanto é necessária sua limpeza em ciclones e filtros antes da alimentação de motores e turbinas.

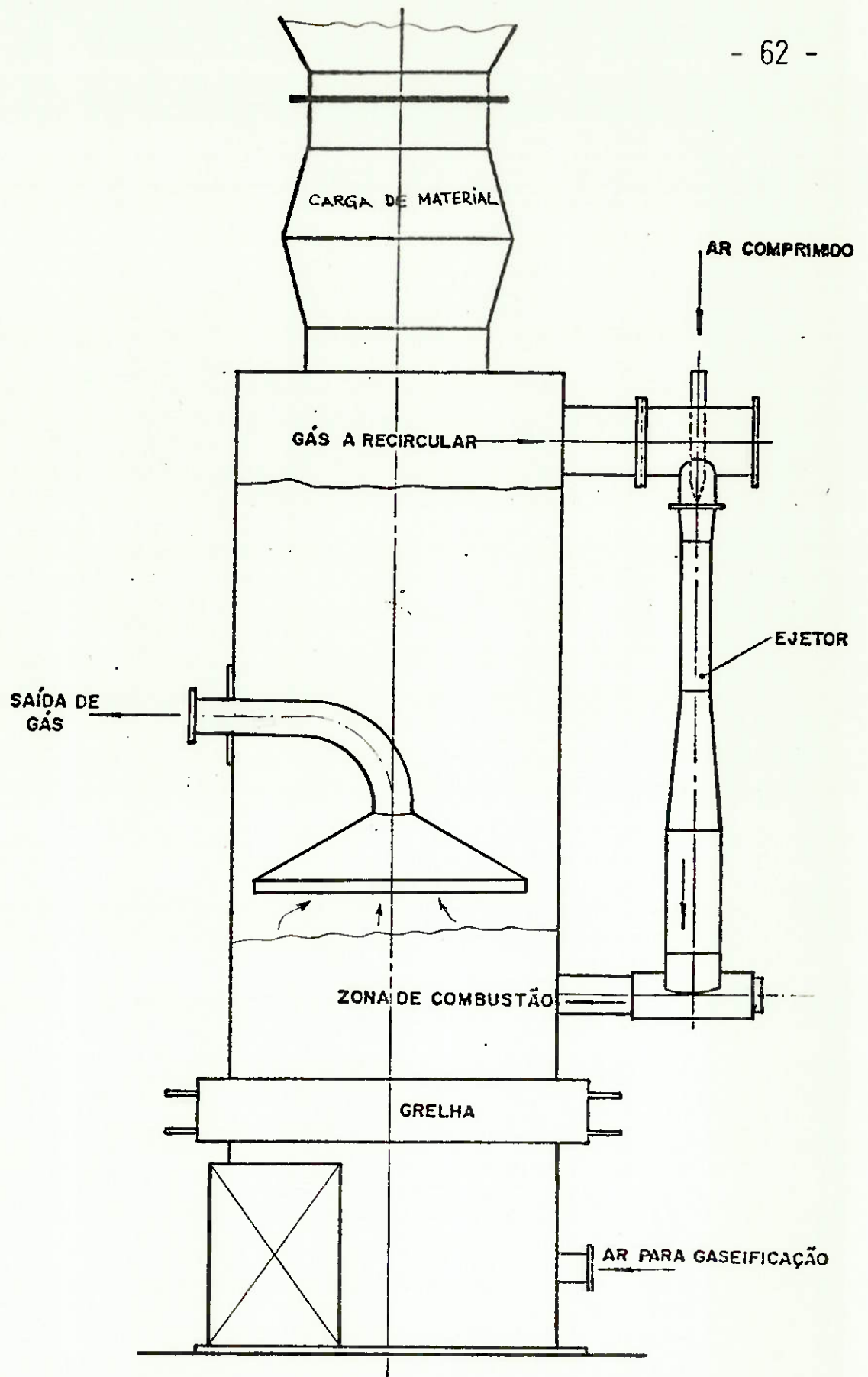
A capacidade típica de um gaseificador de leito fixo e fluxo contracorrente de 3m de diâmetro é cerca de 6,000Nm³/h de gás frio com PCI de 1.200Kcal/Nm³ ou seja:

$$Q \approx 7.200\text{Gcal/h}$$

em regime contínuo de operação.



GASEIFICADOR DE LEITO FIXO E FLUXO CONTRACORRENTE



GASEIFICADOR DE FLUXO CONTRACORRENTE COM RECICLAGEM DE GASES POR EJETOR E CAPTAÇÃO ABAIXO DA ZONA DE DESTILAÇÃO

4.1.2 - GASEIFICADOR DE LEITO FIXO E FLUXO COCORRENTE (DOWNDRAFT)

Neste tipo de equipamento há uma região com restrição de área denominada REATOR. O ar é insuflado na parte superior do reator e a captação dos gases é feita abaixo do reator próximo da base do equipamento de modo que o fluxo de gás atravessa parte do leito em sentido descendente paralelamente ao fluxo de material sólido. Os vapores d'água liberados na zona de secagem e os produtos da destilação são forçados a escoar através do reator atravessando a região de alta temperatura da zona de oxidação e posteriormente a zona de redução. O gás obtido é quase isento de alcatrões pois estes são craqueados ao atravessar a zona de oxidação (braseiro).

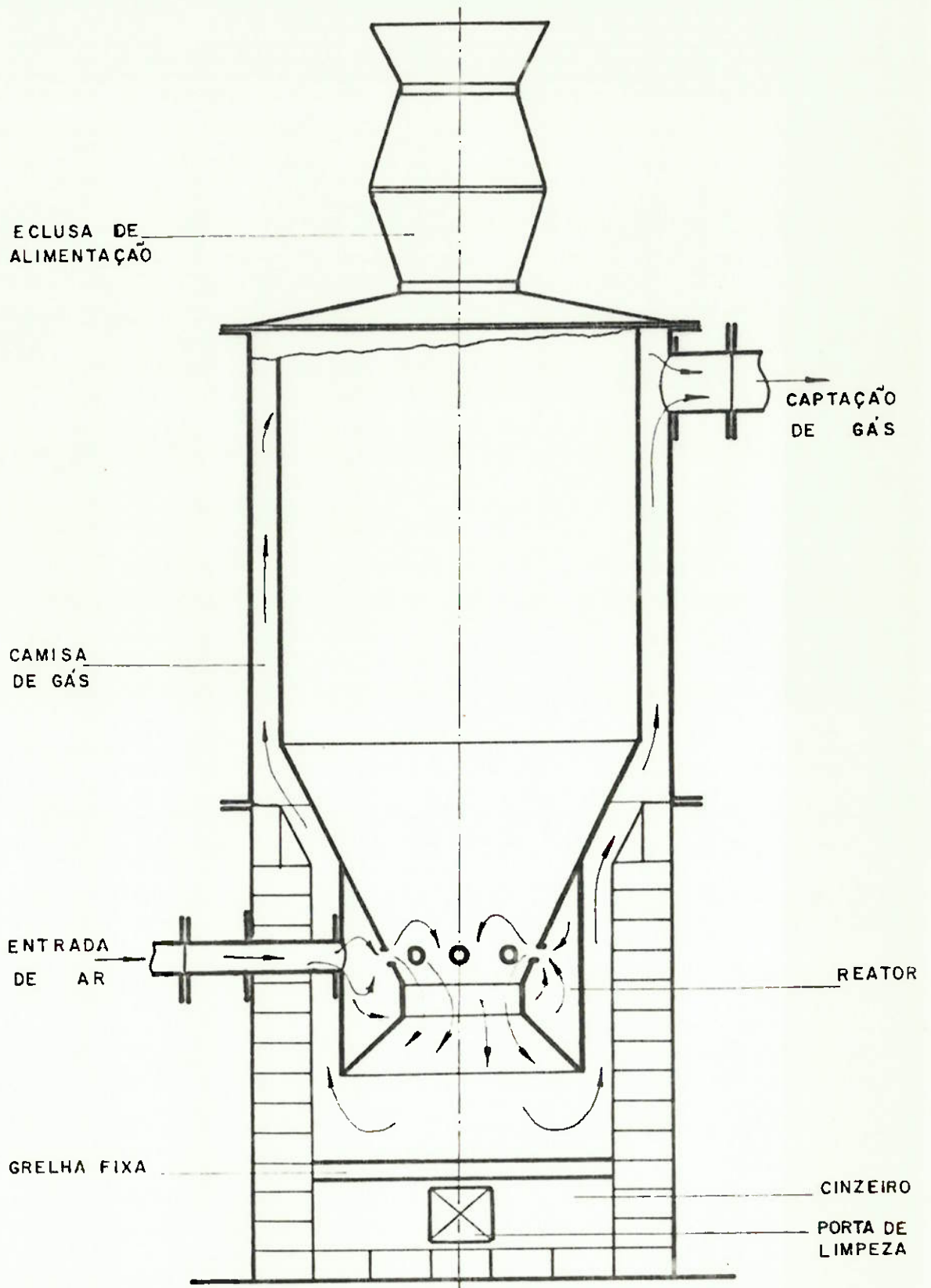
Este tipo de equipamento é mais recente e apresenta a vantagem de produzir gás sem alcatrões. No entanto temos algumas desvantagens:

- a) A existência do reator limita a capacidade do equipamento. Para garantir que todos os produtos da destilação atravessam uma região na qual a temperatura é suficientemente elevada para ocorrer craqueamento, a literatura indica como máximo diâmetro da região mais estreita do reator o valor de 400mm. A capacidade deste equipamento é restrita a:

$Q \approx 1.000 \text{Gcal/h}$ em regime contínuo de operação.

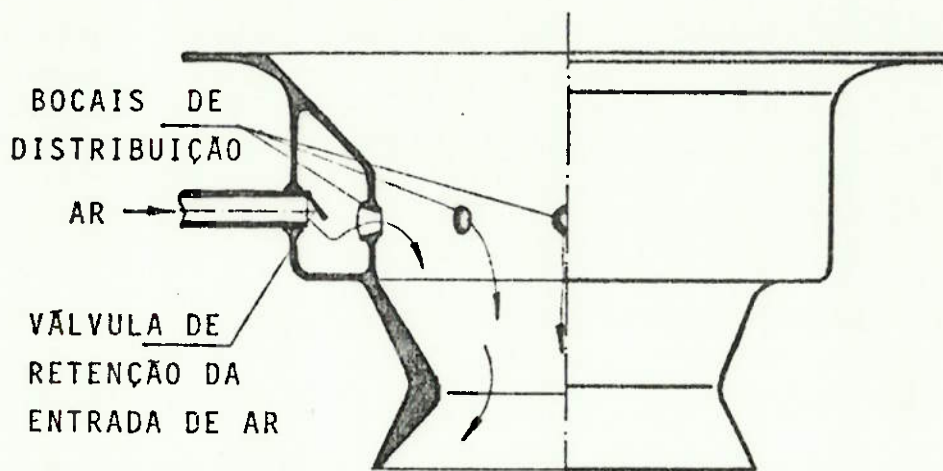
b) No reator se desenvolvem temperaturas altas atingindo valores da ordem de 1.500°C . Para evitar a fusão de cinzas não se deve operar este equipamento com material contendo altos teores de cinzas. Outrossim, ao projetar o reator, se deve utilizar materiais que resistam às altas temperaturas desenvolvidas, à corrosão dos alcatrões e à pressão exercida pelo leito. São utilizados aços inoxidáveis refratários ou materiais cerâmicos, em ambos os casos de custo elevado.

Normalmente neste tipo de equipamento há recirculação do gás pelas paredes externas do equipamento para facilitar a secagem e a destilação aproveitando o calor sensível do gás produzido.

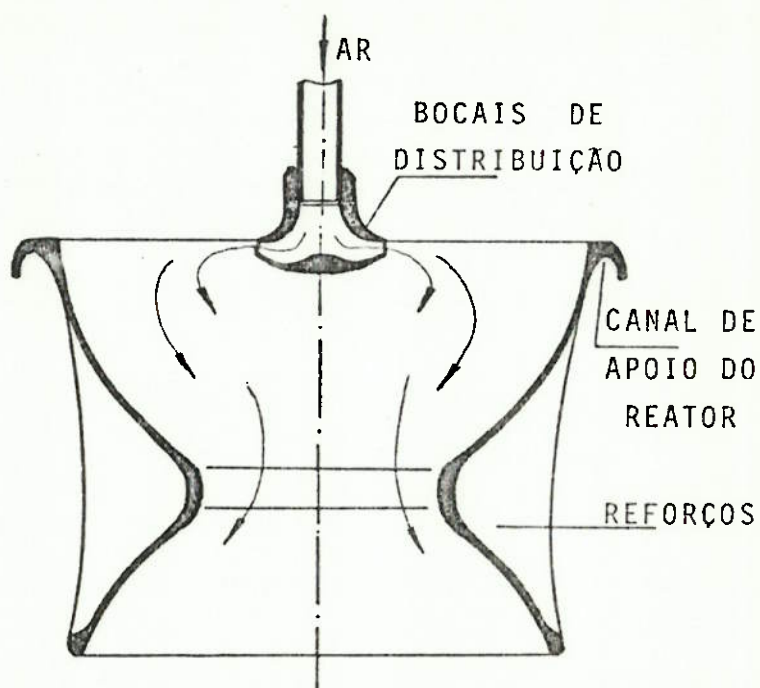


GASEIFICADOR DE LEITO FIXO E FLUXO CO-CORRENTE

TIPOS DE REATORES



REATOR DE AÇO FUNDIDO FLANGEADO
COM ENTRADAS DE AR RADIAIS



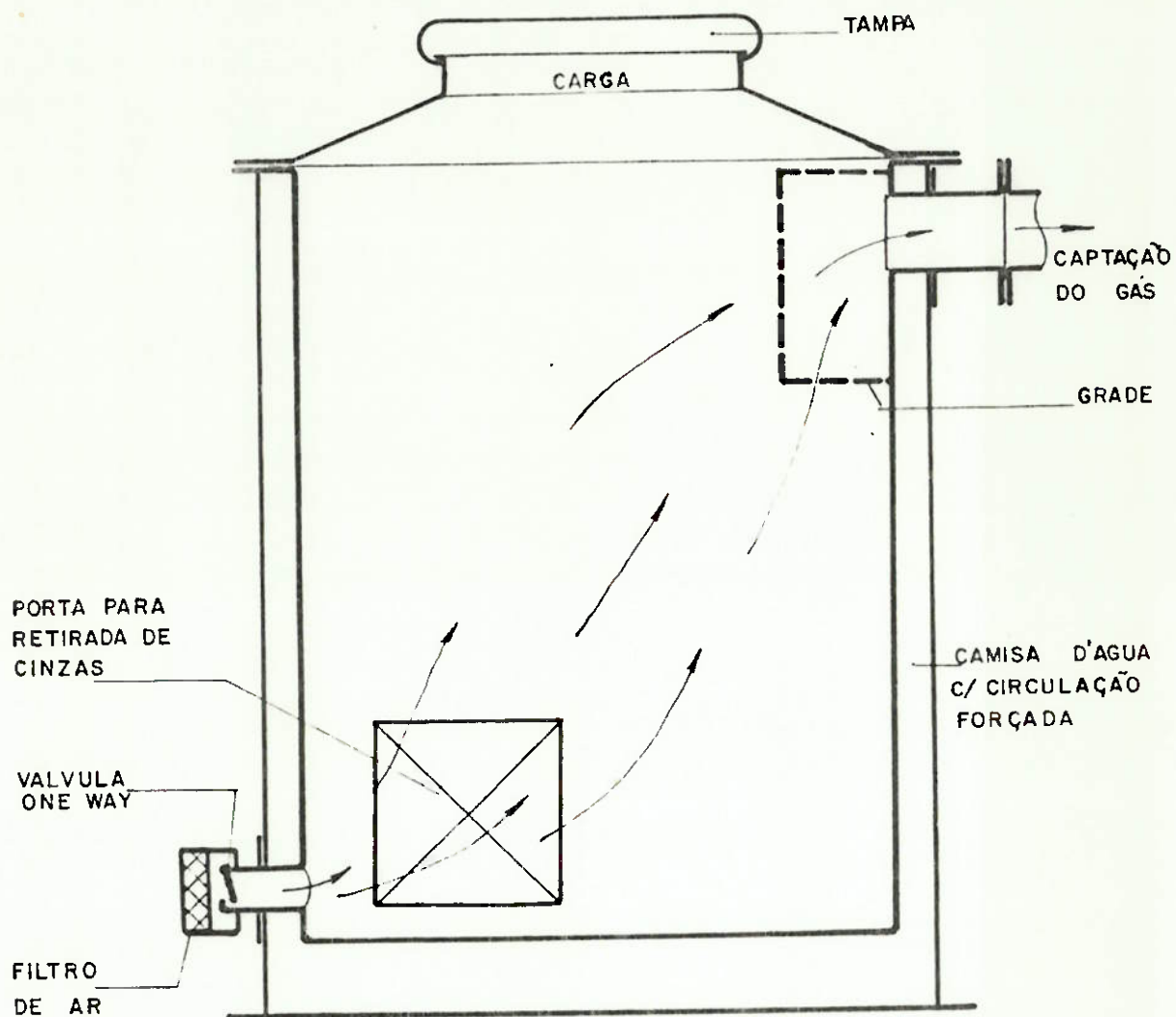
REATOR DE AÇO FUNDIDO TIPO SEMI-ESFÉRICO APOIADO
COM ENTRADA DE AR CENTRAL POR CIMA

4.1.3 - GASEIFICADOR DE LEITO FIXO E FLUXO CRUZADO (CROSSDRAFT)

Neste tipo de equipamento o ar é insuflado próximo à base do gaseificador, acima da grelha. O gás é retirado do lado oposto da entrada de ar em uma secção do gaseificador que pode ser no mesmo nível, abaixo ou acima da entrada de ar. Deste modo o fluxo de gases é perpendicular ou oblíquo em relação ao fluxo de material sólido.

A reação ocorre na direção e sentido do fluxo gasoso exigindo portanto uma distância mínima de equipamento para se processar eficientemente. Permite a utilização de equipamento não cilíndrico com largura maior do que a espessura, fato vantajoso quanto a aplicação automobilística, acomodando-se melhor atrás da cabine de caminhões ou ônibus.

A capacidade deste tipo de equipamento é reduzida portanto não encontra muita aplicação industrial.



GASEIFICADOR DE FLUXO CRUZADO QUE ATUA COM DEPRESSÃO GERADA POR UM MOTOR À GÁS.

4.1.4 - GASEIFICADOR DE LEITO FLUIDIZADO

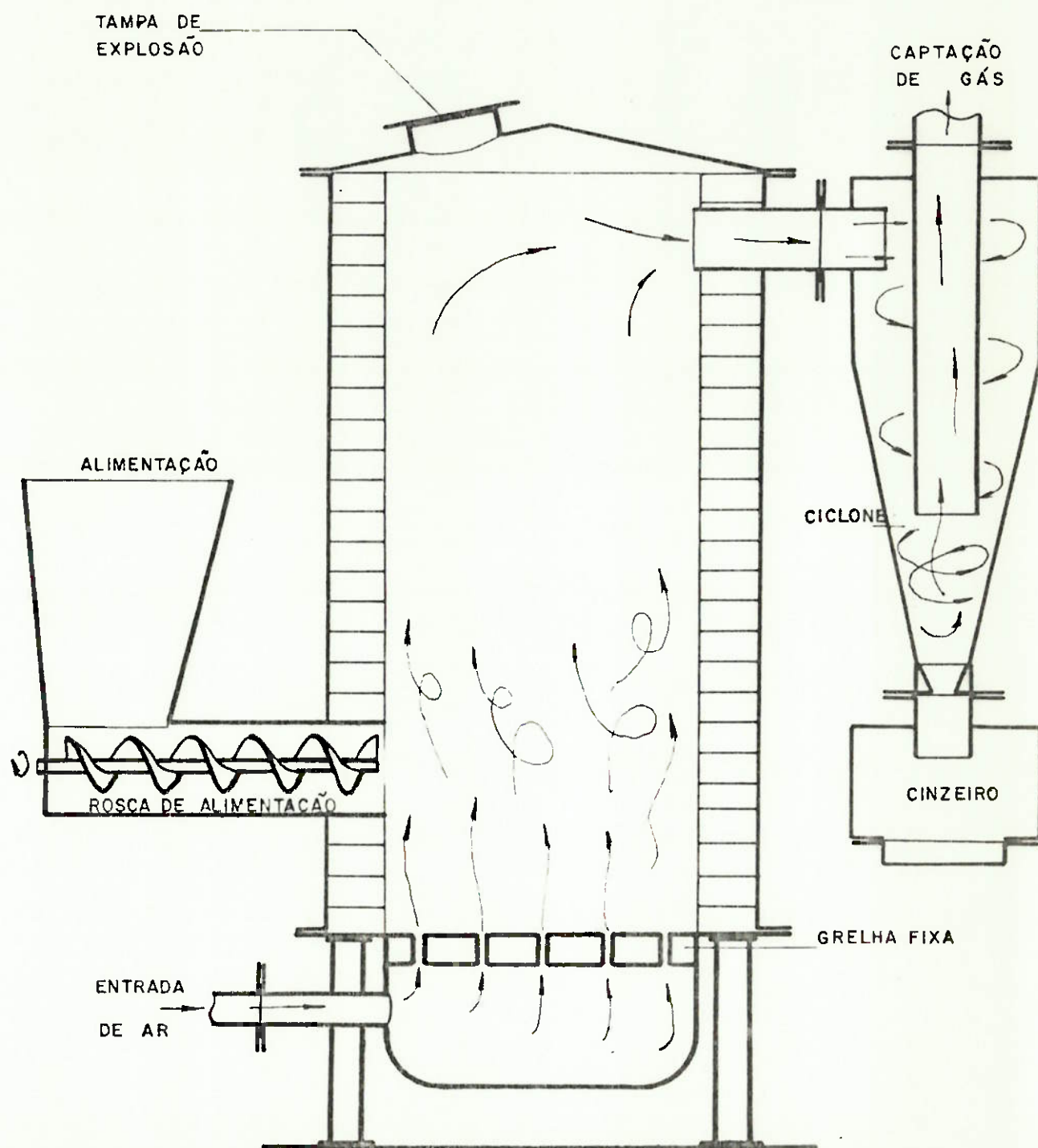
Neste tipo de equipamento o material é introduzido em uma posição intermediária e o ar é insuflado pela base com velocidade tal que é atingido o estado de fluidização do leito. Devido a turbulência no leito fluidizado as reações de gaseificação ocorrem em qualquer secção do leito sem haver caracterização de zonas. No equipamento de leito fixo o principal responsável pela troca térmica é o fenômeno de condução ao posto que nos equipamentos de leito fluidizado o mecanismo de transmissão de calor é diferente sendo o fenômeno de convecção responsável pela maior parte da troca térmica e devido à turbulência a temperatura média em todo o leito é constante.

O gás é captado no topo do equipamento e arrasta consigo as cinzas. A separação das cinzas só é possível com um ciclone na saída de gases e um sistema de filtração. A incidência de alcatrões no gás é baixa e pode ser eliminada nos equipamentos de retenção de cinzas.

Este equipamento é o mais recente dentre os que são tratados neste trabalho. A tecnologia de leitos fluidizados começou a ser desenvolvida na segunda metade deste século e ainda encontra-se em fase de desenvolvimento.

Os rendimentos de gaseificadores de leito fluidizado são melhores do que os rendimentos de gaseificadores de leito fixo, porém este equipamento exige sistema de con-

controle mais sofisticado e sua é mais complexa. As primeiras unidades industriais foram instaladas nos E.U.A em 1979, no Brasil ainda não hã equipamento de gaseificação de leito fluidizado.



GASEIFICADOR DE LEITO FLUIDIZADO

4.1.5 - GASEIFICADOR ELÉTRICO

Para a produção de gás de síntese química deseja-se que os teores de metano nos gases resultantes seja elevado e que o teor de gases inertes, principalmente o nitrogênio, sejam muito baixos.

Em função desta necessidade o processo de gaseificação é feito sem a presença de ar, substituindo-se o processo de oxidação por uma destilação para a qual é fornecido apenas vapor e calor por efeito joule (por um arco voltaico criado entre os pólos de eletrodos).

A CESP está testando um equipamento destes em Corumbataí. Um relatório sobre a operação deste equipamento em várias corridas realizadas este ano (1981) está anexo no final deste trabalho.

4.2 - EQUIPAMENTO PARA LIMPEZA E CONDICIONAMENTO DOS GASES

O gás produzido apresenta uma quantidade variável de produtos indesejáveis. Em função da unidade de gaseificação temos um teor de alcatrões sendo carregado pelos gases. Toda unidade de gaseificação tem uma série de equipamentos, destinados à limpeza dos gases, instalados em série com o gaseificador.

A limpeza total dos gases envolve consideráveis dificuldades. A heterogeneidade das substâncias que compõem o assim chamado alcatrão, pontos de ebulição diferentes, corrosividade alta e outros fatores, implicam na necessidade de lavadores, torres de enchimento, resfriadores e condensadores, ventiladores ou compressores para (suprir a perda de carga devida a todos estes equipamentos em série).

Habitualmente temos um condensador, um ciclone e um filtro em série. Para a produção de gás cuja função é a queima em fornalhas esta série de equipamentos é suficiente. O uso de um ventilador após o ciclone é encontrado em algumas instalações, centrifugação facilita a separação. Devido à corrosividade do alcatrão há uma rápida danificação do rotor e da carcaça e é necessária uma boa vedação e materiais especiais para a fabricação deste equipamento.

O resfriamento do gás até temperaturas abaixo de 0°C, utilizando resfriadores com circuitos de salmoura

permite uma condensação eficiente dos alcatrões. É utilizada quando se deseja a recuperação dos alcatrões para posterior destilação fracionada e separação dos componentes nobres.

Quando a recuperação dos alcatrões não é desejada e a unidade de gaseificação é de porte suficientemente grande, são usados lavadores, torres de enchimento com chuveiros, ciclones com "Scrubers", etc. para se efetuar uma "limpeza molhada" dos gases. Ao atravessar as correntes de água os vapores de alcatrão condensam devido a troca de calor com a água e também devido ao choque de pequenas gotículas com as gotas de água. A água de lavagem destas unidades tem características poluidoras e deve ser tratada quimicamente antes de ser despejada na rede de esgoto urbano ou industrial. Em condições muito especiais pode haver a mistura desta água com o esgoto urbano desde que represente menos de 2% deste.

O resfriamento dos gases no processo de limpeza, por outro lado, se traduz numa perda de energia havendo a necessidade de aumento na demanda de gás para compensar as perdas do resfriamento. Em compensação o custo total de operação do equipamento se reduz pois os problemas de corrosão são sensivelmente reduzidos após a limpeza. Para utilização dos gases de gasogênio em queimadores não é necessária uma limpeza rigorosa do gás, apenas deve-se evitar o entupimento e a corrosão dos queimadores. Para uso do gás em motores de combustão interna, estacionários ou automotivos, esta limpeza é obrigatória pois os danos que o alcatrão causa em par-

tes vitais do motor (pistão, válvulas, anéis, etc) são muito graves.

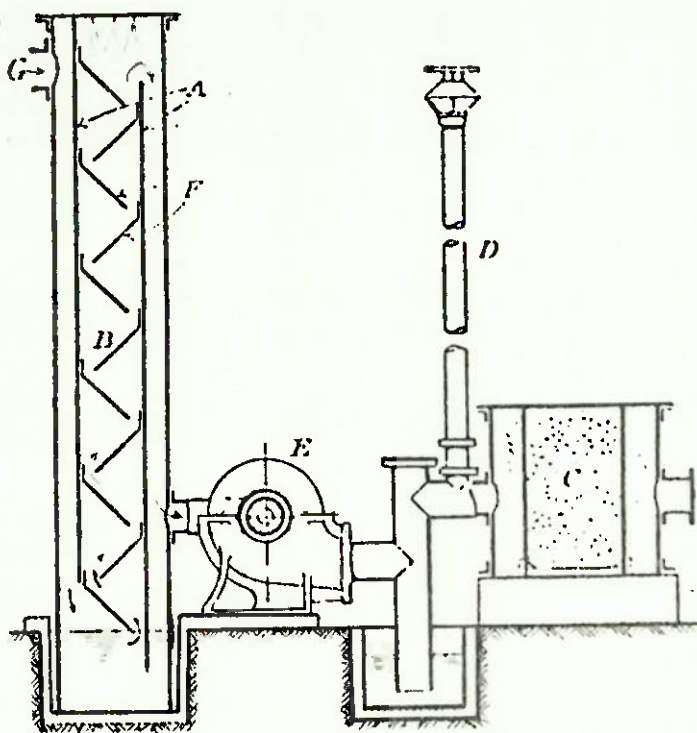
Como foi ressaltado, o problema de alcatrão no gás resultante é mais grave nas instalações que utilizam gaseificadores do tipo contracorrente. Uma solução para este problema é o reciclo do gás pela base do gaseificador e sua captação é feita após passar pela região de mais alta temperatura. A tabela a seguir compara o processo de lavagem dos gases com o processo de reciclo.

COMPARAÇÃO ENTRE LAVAGEM E RECIRCULAÇÃO DOS GASES À ZONA DE COMBUSTÃO EM GASEIFICAÇÃO DE CONTRACORRENTE

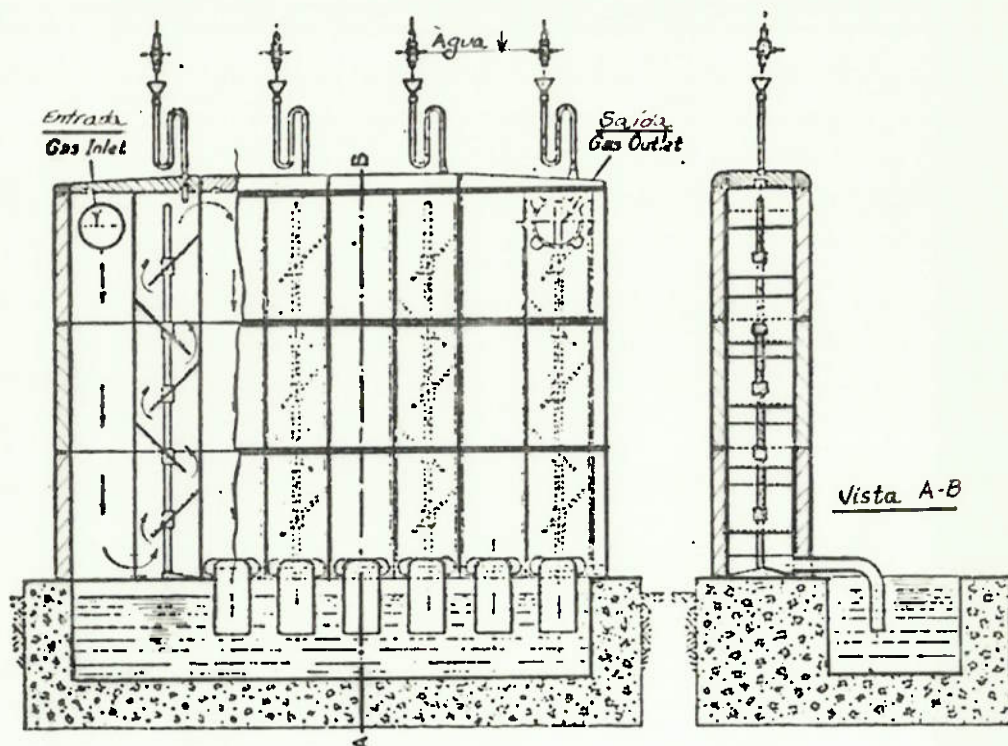
RECIRCULAÇÃO DOS GASES À ZONA DE COMBUSTÃO		LAVAGEM		DOS GASES	
VANTAGEM	DESvantAGEM	VANTAGEM	DESvantAGEM		
	Gas produzido sai a alta temperatura (500°C)	Gas produzido sai a baixa temperatura (em geral 60°C)			
Gas pode sair com umidade relativamente baixa			Gas sai saturado d'agua		
possibilita utilizar umidade da carga como agente de gaseificação			necessita da geração de vapor externa por meios próprios		
rendimento do processo e alto devido à conversão de alcatrões			a não conversão dos alcatrões abaixa o rendimento		
	velocidades maiores na zona de comb.e gaseificação implicam arraste considerável de finos e fuligem	baixo teor de sólidos no gás, mesmo antes da lavagem			
potencia instalada em motores é baixa					considerada a lavagem dos gases e tratamentos de águas, resulta potência em motores mais alta
pequena area ocupada pelos equipamentos					com o sistema de lavagem + tratamento de água, a área ocupada é grande
nao gera problemas de higiene industrial e poluição ambiental					apesar de tratamento da água, gera problemas de higiene industrial e poluição ambiental
poucos problemas de manutenção					problemas serios de manutenção em bombas, agitadores do sist.de trat. d'agua, etc.
custo relativamente baixo					custo alto, por motivos óbvios
	e necessario limitar a umidade máxima do material (secagem)				
					saõ mais longos os limites de umidade do material

4.2.1 - TORRES DE LAVAGEM

Torres de lavagem em cascata de um ou vários passes como nas figuras a seguir tem eficiências de separação relativamente baixas, não separam partículas abaixo de 10μ . sua principal função é de resfriar o gás. Para sólidos em suspensão, com exceção de fuligem a eficiência de separação é relativamente alta. As tores de lavagem de vários passes economizam altura do equipamento.



TORRE DE LAVAGEM DE UM ÚNICO PASSE.

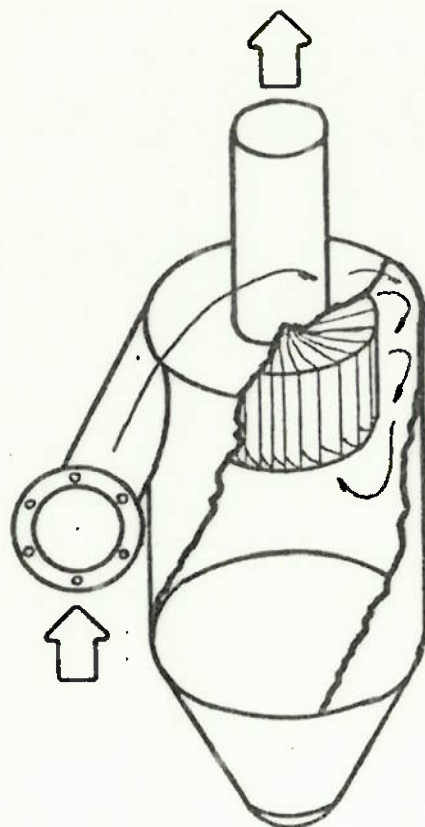


TORRE DE LAVAGEM DE QUATRO PASSES

4.2.2 - CICLONES

Ciclones como na figura a seguir são utilizados como separadores centrífugos. O gás chega a atingir velocidades muito elevadas, superiores a 150m/s, e as partículas mais pesadas se depositam na parte inferior e escoam para um recipiente coletor. A eficiência destes equipamentos depende da perda de carga por eles proporcionadas. Em qualquer situação ciclones não conseguem separar partículas menores de 10μ pois estas são arrastadas pelo gás devido ao baixo peso.

CICLONE
COM
FILTRO



A principal vantagem dos ciclones é o fato que podem operar com gases a altas temperaturas.

4.2.3 - LAVADORES TIPO VENTURI

É mais eficiente do que os anteriores; sua eficiência global na separação dos alcatrões por atingir 95%.

Funciona de acordo com o seguinte princípio: A água injetada na garganta do venturi é dividida em partículas muito pequenas devida a alta velocidade dos gases; a dis

persão destas partículas pelo gás é uniforme. Deste modo há choques entre as partículas de água e as partículas de alcatrão, gerando partículas maiores pelo fenômeno do coalescimento. Estas partículas maiores podem ser separadas num separador centrífugo (ciclone) a jusante do venturi. A perda de carga que este tipo de lavadores provoca é consideravelmente grande (de 500 a 1200 mmCA).

4.2.4 - TORRES DE ENCHIMENTO

Basicamente a torre de enchimento é um leito vertical de partículas através do qual se faz escoar o gás "contaminado" em sentido ascendente e a água de lavagem (ou outro fluido) em fluxo descendente. O papel desempenhado pelas partículas do enchimento é fornecer área de contato entre o líquido e as partículas de alcatrão, as quais aderem à superfície molhada sendo em seguida removidas desta pela renovação de película de líquido.

A forma dos elementos de enchimento é muito variada, desde pedaços amorfos de material (coque, pedregulhos, etc.) até anéis de Rashig, passando por elementos tubulares de cerâmica, etc.

4.2.5 - FILTROS

Vários tipos de filtros são usados, normalmen

te no final da série de equipamentos de limpeza do gás. O elemento filtrante pode ser de diversos materiais desde chapas perfuradas e telas de aço inox, passando por lã e fibra de vidro, até papel. Quando o gás é destinado a motores de combustão interna sempre é utilizado filtro antes de entrada de gás no motor.

4.2.6 - OBSERVAÇÕES

- 1) Devido à alta corrosividade do alcatrão os trechos de tubulação e os equipamentos utilizados antes de se ter um gás "limpo" devem ser de material especial. É recomendado o uso de aço inoxidável pois a sua resistência à corrosão do alcatrão é maior.
- 2) Normalmente são empregados vários equipamentos dentre os apresentados, em série, para melhorar a eficiência de limpeza.

A escolha do equipamento mais adequado para cada etapa do processo de limpeza exige a consideração de alguns fatores, a saber:

- a) concentração de sólidos arrastados pelo gás e sua distribuição granulométrica;
- b) concentração de alcatrão no gás e sua distribuição granulométrica;
- c) concentrações máximas permitidas, de sólidos e alcatrões, no gás "limpo";

- d) perda de carga admitida em cada fase do processo;
- e) potência exigida pelos vários equipamentos passíveis de serem utilizados;
- f) custo de implantação (compra + instalação) do equipamento e tempo útil de vida.

3) Um equipamento que propositadamente não foi mencionado, pois o seu custo é muito alto e sua indicação na literatura é pouco frequente, é o FILTRO ELETROSTÁTICO.

A separação das partículas é feita atraindo-as, após polarizadas, a um pólo de um campo eletrostático. Este tipo de equipamento é utilizado mais para limpeza de ar ou de gases antes de sua descarga na atmosfera em unidades de porte muito grande.

V - BIBLIOGRAFIA

V - BIBLIOGRAFIA

LIVROS:

CONN, E.E. & STUMPF, P.K. Introdução à bioquímica. 4ª ed. São Paulo, Ed. Edgard Blucher, 1980.

DUBBEL. Manual do engenheiro mecânico. São Paulo, Hemus Livraria Editora. 1979.

EARL, D.E. Forest energy and economic development. Oxford, Canadian Press, 1975.

FAIRBRIDGE, C. & ROSS, R.A. The chemical reactivity of wood waste systems. Wood Science Technology, 1978.

GOLDSTEIN, J.S. Wood technology: Chemical aspects. Washington, American Chemical Society, 1977.

RABINOVITCH, E.I. Photosynthesis and related processes. New York, Interscience, 1969.

SKOV, N.A. & PAPWORTH, M.L. The Pegasus* unit. U.S.A., 1975.

SMOOT, L.D. & PRATT, D.T. Pulverized coal combustion and gasification. New York, Plenum Press, 1979.

WENZEL, H.F.J. The chemical technology of wood. New York, Academic Press, 1970.

PERIÓDICOS:

ARTUR, J.A. Reaction between carbon and oxygen.
Trans. Faraday Soc., 47, 1951.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanco Energético Nacional. Brasília, fev., 1981.

ENERGIA. São Paulo, APC - Assessoria de Promoção e Cultura, 13 e 14, 1981.

FIELD; GILL; MORGAN & HANKLEY. Combustion of pulverized fuel. Brit. Bal. Utiliz. Res. Assoc. Mon Bull., 31 (6), 1976.

REVISTA FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Belo Horizonte, out., 1976

SOLAR ENERGY RESEARCH INSTITUTE - SERI, Directory of air biomass gasifiers in the United States and Canada. Washington, fev. 1979.

SURVEY OF WORLD ENERGY RESOURCES. CIM Bulletin. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, jul., 1973.

TARKOW, H. Carbonization of wood an energy and material balance, 1978

EVENTOS:

SEMINÁRIO SOBRE UTILIZAÇÃO DO GASOGÊNIO INDUSTRIAL, 1, Anais, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, FAPESP, out., 1981.

SIMPÓSIO FRANCO-BRASILEIRO SOBRE ENERGIA DE BIOMASSA E ECONOMIA DE ENERGIA. Anais. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, set., 1981.

TÓPICOS SOBRE GASEIFICAÇÃO E GASEIFICADORES. Anais. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, out., 1981.

CATALÓGOS DE FABRICANTES DE GASOGÊNIO:

Alemanha Ocidental:

IMBERT - ARNSBERG

Brasil:

CARBOGÁS - São Bernardo do Campo - SP

CODEGÁS - Campinas - SP

CONTEC - Jundiaí - SP

HIMECA - Recife - PE

INDUSTRIAL CONVÊNIO - Criciúma - SC

LORENZETTI - São Paulo - SP

SECURIT - São Paulo - SP

TERMOAIRE - São Paulo - SP

TMO - Curitiba - PR

Canadá:

OMNIFUEL - Toronto

Suécia:

SWEDLUNF - Karlstad

VI - A N E X O S

ANEXO I

Relatório da Companhia Energética de São Paulo - CESP sobre o andamento das pesquisas efetuadas para a produção de gás de síntese a partir da madeira.

Seminário realizado na Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP - em 30-10-81.

Miguel Kubicki

I SEMINÁRIO SOBRE UTILIZAÇÃO DO GASOGÊNIO INDUSTRIAL

30 de outubro de 1981

CENTRAIS DE GASEIFICAÇÃO DE MADEIRAS

Dr. Antonio José Ayres Guidetti Zagatto

Dr. Cláudio Paiva de Paula

Companhia Energética de São Paulo - CESP

PROMOÇÃO:

- SECRETARIA DE ESTADO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
- Coordenadoria da Indústria e Comércio
- Programa Estadual para o Desenvolvimento do Gasogênio Industrial - PRÓ-GASOGÊNIO
- PROMOCET - Companhia de Promoção de Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de São Paulo

COLABORAÇÃO:

- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - IPT
- Companhia Energética de São Paulo - CESP
- Sindicato da Indústria de Cerâmica para Construção do Estado de São Paulo

I - INTRODUÇÃO

CESP Companhia Energética de São Paulo vem pesquisando e promovendo novas alternativas energéticas, desde 1977. Dentre os vários programas desta área, destaca-se o Programa Metanol, onde se promove a utilização e a produção deste álcool a partir do eucalipto. Esta espécie vegetal, como fonte renovável de matéria-prima, se enquadra perfeitamente no escopo do programa, sendo encontrada em reservas de vulto, não só no Estado de São Paulo, como em áreas limítrofes.

O Programa Metanol da CESP é construído em função da gaseificação do eucalipto. A síntese catalítica do metanol é processo amplamente conhecido e competitivo. Da mesma forma o manejo, transporte e processamento da madeira são processos perfeitamente equacionáveis. Urge, portanto, ajustar o elo que falta ao programa, que é o desenvolvimento tecnológico da gaseificação da madeira, transformando-se a matéria vegetal (lenha ou carvão vegetal) no mesmo gás de síntese obtido nos processos tradicionais de produção de metanol.

O esforço neste desenvolvimento produzirá, como consequência importante, o aparecimento de famílias de gaseificadores que podem gerar gás alternativa-mente utilizável como gás de síntese ou como gás de baixo poder calorífico para aquecimento industrial. Na área de gás de síntese, as possibilidades se abrem para amônia, hidrocarbonetos sintéticos, álcoois superiores, GLP e olefinas, além do metanol, evidentemente. Na área de aquecimento industrial, a principal contribuição será a possibilidade de construção de equipamentos de grande capacidade unitária, viabilizando utilizações que seriam impossíveis anteriormente.

V - DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO DE MADEIRA

A tecnologia de gaseificação de madeira já é conhecida há vários anos. De maneira geral partiu-se de técnicas desenvolvidas para carvão mineral, adaptando-as ao uso de madeira como matéria-prima. A rigor não são dificuldades de caráter técnico e sim de escala de processo. Existiram e existem até hoje gaseificadores para madeira que operam a capacidades pequenas e com rendimentos menores. Como se deseja capacidades e rendimentos em escalas superiores, retomou-se a análise dos projetos existentes com vista a uma melhoria da concepção, do equipamento auxiliar, de materiais e componentes, e de instrumentação.

A forma escolhida pela CESP para implementar estas pesquisas na área de gaseificação foi a construção de três sistemas de gaseificação em escala de demonstração industrial para desenvolver, através de testes e ensaios, tecnologias de gaseificação de madeira em equipamentos de porte compatível com as necessidades das instalações futuras que a CESP pretende construir. Estes três gaseificadores serão construídos em Jupiã, na fronteira dos Estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul, ao lado da hidroelétrica lá existente e próximo dos recursos madeireiros. Os sistemas foram planejados para gerar gás suficiente à síntese de 100 t/dia de metanol cada um, adiando-se, no entanto, a construção desta área de síntese para uma segunda etapa do desenvolvimento. São os seguintes os sistemas a serem experimentados.

V.1 - Gaseificador de leito fixo - tipo Davy

a) alimentação de madeira e de cinza artificial.

Torretes de 250 mm de comprimento, num total de até 350 t/dia, são introduzidos num silo com capacidade de armazenamento de cerca de 6 horas. Desse silo, a madeira é transportada por correias (ou correntes) de forma descontínua ao topo do gaseificador, onde cai numa eclusa dosadora de alimentação. O excesso de madeira retorna a uma pilha situada ao nível do solo. À cada ciclo, o gás que ocupa a eclusa é purgado com nitrogênio.

Madeira contém baixo teor de cinzas. Então, há necessidade de se introduzir, juntamente com ela, cinza artificial para proteção da grelha. Cinza artificial constitui-se, basicamente, de pedaços de refratário com granulometria adequada. Esta cinza mais a cinza da madeira são descarregadas periodicamente da eclusa de cinzas no fundo do gaseificador. Esta cinza é peneirada,

e o material com a granulometria conveniente (5 a 7 cm) é conduzido por um elevador de canecas ao topo do gaseificador, e reintroduzido juntamente com a madeira.

b) gaseificação.

O gaseificador é um vaso de aço carbono, refratado na parte superior, tendo uma camisa d'água em sua parte inferior. Vapor e oxigênio são introduzidos através da grelha rotativa excêntrica, que serve também para remoção de cinzas e homogeneização da carga.

A madeira inicialmente passa pelas fases de secagem e carbonização; o calor para estas reações é fornecido pelo calor sensível dos gases que são produzidos na zona de gaseificação. O gás produzido é, então, uma mistura de produtos da gaseificação propriamente dita, produtos de pirólise e vapor da secagem da madeira.

c) lavagem e resfriamento do gás.

O gás passa inicialmente por uma câmara de "spray" tipo "downcorner", onde é resfriado a menos de 100° C. Daí o gás entra num lavador de cascata (lymwasher), onde é removida grande parte dos alcatrões e óleos do gás. O gás sai do lavador a cerca de 35° C, atravessa um "seal tank", passa por um soprador e atinge o limite de bateria a uma pressão da ordem de 500 mm coluna d'água.

A água proveniente do "downcorner" e do "lymwasher" é coletada num tanque separador. Deste vaso, a água é bombeada novamente, recirculando. O fluxo principal passa por um resfriador, que é, em última análise, quem retira toda a carga térmica do gás. Um fluxo secundário é purgado, de forma a balancear o sistema, com a água que lhe é introduzida, proveniente da secagem e pirólise da madeira.

V.2 - Gaseificador eletrotérmico

a) manuseio e preparação da madeira.

As toras de madeira (cerca de 250 t/dia) são picadas em picador de facas, ingressam em um ciclone que as descarrega numa peneira classificadora. Nesta, os finos são separados dos cavacos e são enviados a um silo de finos que alimentará um combustor. Os cavacos (com umidade entre 30 e 50% base úmida) são levados a um secador, que reduz sua umidade a 10% mediante contac

to direto com o gás quente produzido no combustor de finos. A secagem pré via da madeira é feita por duas razões principais:

- se a madeira entra úmida, ela irá necessariamente secar usando um calor muito "nobre", que é o calor produzido por energia elétrica;
- a madeira entrando no gaseificador com umidade controlada facilita sobremneira o controle do aparelho.

b) gaseificação.

O sistema de gaseificação deste projeto será bastante flexível; pode rá operar "up draft" ou "down draft", mediante substituição do fundo do gaseificador. Inicialmente, a operação prevista será "down draft", modo já testado satisfatoriamente em Corumbataí, e que apresenta um gás produto em condições melhores, isento de alcatrões e produtos de pirólise. O esquema do gaseificador é basicamente o mesmo testado em Corumbataí, apenas de porte significativamente mais elevado.

c) sistema de recuperação de calor.

O gás bruto efluente do gaseificador a temperaturas de 800 - 900°C será resfriado em caldeira de recuperação de calor. O vapor assim gerado é utilizado no processo, sendo o balanço global de vapor positivo (sobram 5 a 6 t/h de vapor). Como o gás deverá arrastar alguma quantidade de material sólido fino, bem como de alcatrões pesados, foi adotada caldeira vertical que facilita os trabalhos periódicos de limpeza.

V.3 - Gaseificador tipo Winkler de alta temperatura

a) preparação e manuseio da madeira.

A madeira (cerca de 300 t/dia) é picada em picador de tambor em cavacos de cerca de 30 mm. Os cavacos devem ser secos até umidade de cerca de 10%, em secador rotativo, a gás quente (400°C) em co-corrente, queimando cavacos finos provenientes do picador. Os cavacos secos são, em seguida, transportados por correias de forma contínua até o sistema de alimentação do gaseificador. Este sistema constitui-se de três eclusas superpostas (altura total da ordem de 60 m), colocadas ao lado do gaseificador. A primeira eclusa, na realidade um silo dosador, recebe continuamente a madeira. A cada 30 minutos, descarrega os cavacos para uma segunda eclusa, inicialmente a pressão atmosférica. Esta segunda eclusa, uma vez cheia, é fechada e pressurizada com nitrogênio, até a pressão de operação do gaseificador (10 bar). Uma vez pressurizada, descarrega o material numa terceira eclusa, que opera con

tinuamente a 10 bar, e que alimenta uma rosca sem fim que transporta os cavacos até o gaseificador.

b) gaseificação e tratamento de gás.

O gaseificador é um vaso de aço carbono, refratado internamente, com cerca de 20 m de altura e 1,8 m de diâmetro interno. O gás é retirado na parte superior, e passa pelos dois ciclones, passa por caldeira de recuperação de calor, "quençh" e lavador venturi. A vantagem principal deste processo é que o gás sai bastante limpo, sem apresentar quaisquer quantidades de alcatrões ou outros produtos pirolenhosos.

V.4 - Características significativas dos sistemas

Os gaseificadores de Jupiã foram planejados para gerar gás de síntese, por isso serão basicamente ensaiados com oxigênio, a exceção do eletrotérmico. Isto não impedirá que se efetuem testes com ar e nem que estes equipamentos possam ser utilizados como geradores de gás combustível, alimentados com madeira e ar.

Como no dimensionamento dos gaseificadores considerou-se o uso do oxigênio como parâmetro básico, as características técnicas principais esperadas destes equipamentos foram calculadas em função deste parâmetro.

O Quadro A, a seguir, compara as características de cada gaseificador. Sob o ponto de vista de rendimento térmico, consumo de madeira e qualidade de gás, o gaseificador eletrotérmico se mostra mais interessante; no entanto, consome energia elétrica, que é considerada um insumo mais nobre. Certamente em projetos específicos de menor capacidade terá sua viabilidade garantida, pois o custo de uma fábrica de oxigênio de pequena capacidade oneraria sobremaneira o custo do projeto.

V.5 - Resultados conseguidos em Corumbataí

No caminho para Jupiã passa-se por Corumbataí, que é o local onde construiu-se uma instalação capaz de gerar 1 t/dia de metanol a partir de carvão vegetal ou madeira pelo sistema eletrotérmico. Como se disse anteriormente, em Corumbataí há três gaseificadores, sendo dois deles a corrente alternada e utilizando carvão vegetal, e o outro para madeira, a corrente contínua, com

QUADRO A

UNIDADES DE GASEIFICAÇÃO DE JUPIÁ
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PRINCIPAIS DOS GASEIFICADORES
TAMANHO PADRÃO = GÁS PARA 100 T/DIA DE METANOL

Discriminação	Unidade	Gaseificador		Gaseificador Winkler	CBS.
		Elotrótermico	Leito Fixo		
Consumo de madeira - base seca	kg/h	6.300	10.720	8.320	
Consumo unitário por ton. de metanol	kg/kg MeOH	1,51	2,57	2,00	
Vapor de partida	kg/h	1.640	3.920	1.000	
Consumo de vapor em regime	kg/n	(4.550)	3.090	(5.500)	(Exportação de vapor)
Consumo de oxigênio	kg/h	-	2.320	2.090	
Potência elétrica necessária	kW	7.600	-	-	
Vazão de gás gerado	Nm ³ /h	11.600	10.600	14.400	
Composição volumétrica provável:					
- teor de CO	%	37,4	37,7	30,5	
- teor de H2	%	48,6	33,1	29,5	
- teor de CO2	%	5,8	19,7	11,0	
- teor de CH4	%	0,1	3,4	1,2	
- teor de H2O	%	8,1	5,6	26,8	
- teor de N2	%	-	0,3	0,8	
- teor de outros	%	-	0,2	0,2	
Poder calorífico provável	kcal/Nm ³	2.583	2.444	1.910	
Energia produzida	Mcal/h	29.963	25.906	27.504	
Rendimento térmico	%	82	51	69	

PCI madeira seca: 4.770 kcal/kg

150 kVA de potência.

A gaseificação eletrotérmica da madeira tem como característica principal a supressão da reação de combustão do carvão. Nos processos usuais a energia necessária às reações de gaseificação, que são endotérmicas, provém de reações de combustão, gerando-se calor e CO_2 . Na gaseificação eletrotérmica, a têm de se ter um menor volume de gases gerados, transfere-se energia pela passagem da corrente na massa de carvão aquecida por simples efeito joule. Desta maneira, a principal reação ocorrida é a de formação de gás d'água, sendo o vapor d'água o principal agente gaseificante. Com o reduzido volume de CO_2 formado na zona de pirólise da madeira e de gaseificações em zonas de alta temperatura, gera-se ainda pequenas quantidades adicionais de CO. A oxidação do CO por reação shift só ocorre em pontos mais frios isolados, da mesma forma que a reação do metano. O Quadro B resume estas reações.

A figura 7 mostra um corte do gaseificador de madeira construído em Corumbataí. Seu fluxo de corrente é axial, fechando-se em circuito elétrico entre o eletrodo do fundo e o feixe de três eletrodos superiores de grafite. Possui também um sistema de reciclo de gás de pirólise, injetando-os na zona de fogo, craqueando-se os pirólenhosos formados e transferindo calor para a zona de pirólise. Por ser um gaseificador de pesquisa, permite a retirada do gás em vários níveis, assim como pode-se instalar os eletrodos superiores em dois patamares. Também a injeção de vapor é possível de ser efetuada em vários níveis. Possui um dispositivo de retirada de cinzas por lavagem, sendo o eletrodo de fundo metálico, refrigerado, isolado da carcaça. O mesmo gaseificador foi adaptado para a versão "down draft", com a eliminação do reciclo, como se vê na figura 8. A energia requerida na zona de pirólise passa a ser transferida por radiação e por convecção natural dos gases formados.

Uma série de testes e campanhas foram realizados em Corumbataí, gerando-se alternativamente gás de síntese de metanol. Com a fonte de corrente contínua existente de 150 kVA, nem sempre se conseguiu atingir toda potência disponível, dado o limite de 1 000 A existente no equipamento, e a resistividade do meio.

A primeira campanha realizada em dezembro/80 foi efetuada com o gaseificador montado, conforme figura 7, com reciclo operando. Mostrou uma qualidade de gás bastante satisfatória, superior à dos gaseificadores a leito fixo e o Winkler. O gás, no entanto, mostrou-se relativamente contaminado por pirólenhosos. Devido às dificuldades operacionais, aliás esperadas, não se conse

QUADRO B

GASEIFICAÇÃO ELETROTÉRMICA

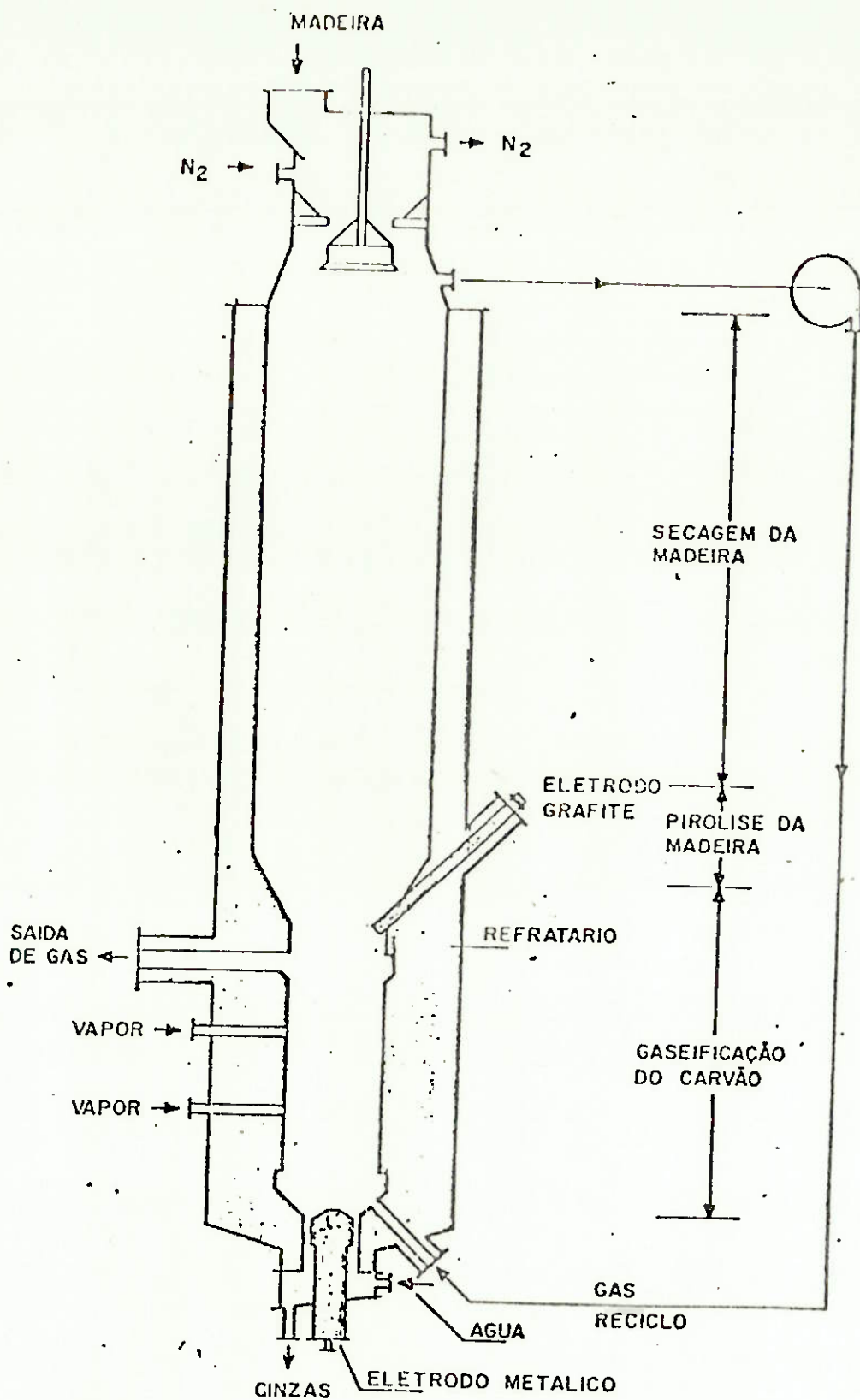
<u>Principais reações</u>	<u>Entalpia de formação (kcal/mol)</u>	<u>Temperatura mais favorável de reação (°C)</u>
$C + H_2O \rightleftharpoons CO + H_2$	$\Delta H = + 28,2$	700 (reação gás d'água)
$C + 2 H_2O \rightleftharpoons CO_2 + 2 H_2$	$\Delta H = + 19,2$	900
$C + CO_2 \rightleftharpoons 2 CO$	$\Delta H = + 38,2$	900 (reação de Boudouard)
$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$	$\Delta H = - 10,0$	500 (reação shift)
$C + 2 H_2 \rightleftharpoons CH_4$	$\Delta H = - 21,2$	600

Insumos das reações

- C
- CO₂
- Energia
- H₂O

Fontes dos insumos

- Pirólise da madeira
- Pirólise da madeira - gaseificação em alta temperatura e reação shift
- Energia elétrica fornecida - reações exotérmicas
- Pirólise da madeira - gerado externamente



G. 7 - GASEIFICADOR ELETROTÉRMICO (TIRAGEM SUPERIOR)

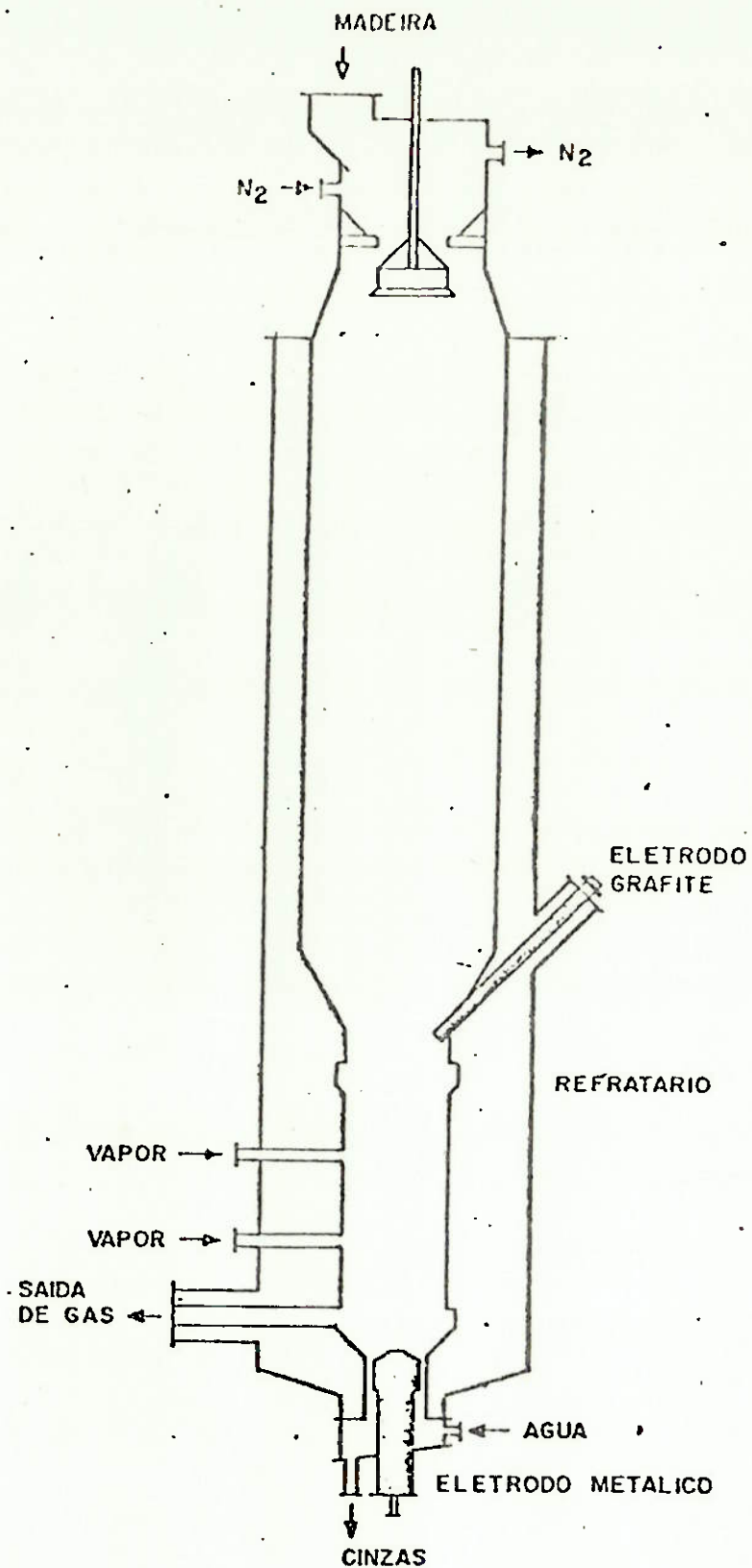


FIG. 8 - GASEIFICADOR ELETROTÉRICO (TIRAGEM DESCENDENTE)

guiu obter dados médios mais confiáveis.

A segunda campanha, em fevereiro/81, passou a operar na versão "down draft", conforme figura 8. Melhorou substancialmente a qualidade do gás, como também o nível de transferência de energia à massa em gaseificação. Devido ao tipo de equipamento, tem-se uma temperatura de saída de gás mais elevada. Também encontrou-se dificuldades insuperáveis, perdendo-se dados médios importantes. O gás obtido foi o melhor de todas as campanhas.

A terceira campanha, em março/81, apresentou resultados mais satisfatórios, com um esquema de gaseificador semelhante ao anterior. Conseguiu-se alta taxa de transferência de energia, porém com um consumo unitário de energia por unidade de gás seco gerado pior. Este fenômeno foi decorrente da maior umidade da madeira.

A quarta campanha, em maio/81, melhor preparada, atingiu eficiências maiores, em decorrência da utilização de madeira mais seca, com umidade da ordem de 10% b.s. Obteve-se a maior taxa de grelha e o melhor índice de consumo unitário de energia.

A quinta e última campanha, em junho/81, foi realizada com carvão vegetal, para ajuste e comparação dos resultados anteriores. Piorou a qualidade do gás e o consumo energético unitário, diminuindo, no entanto, o consumo de vapor. O Quadro C resume estes testes e campanhas.

Em função destes testes e das baixas taxas de grelhas obtidas, passou-se a pesquisar equipamentos mais evoluídos de gaseificação eletrotérmica. Pretende-se testar duas novas concepções, conforme as figuras 9 e 10. A primeira delas seria um gaseificador com eletrodo único central, direcionando melhor o fluxo de corrente e evitando-se os gradientes de temperatura, podendo operar com madeira ou carvão vegetal. A segunda opção seria a utilização de eletrodos horizontais, formando-se uma zona de transferência intensa de energia, simulando melhor um gaseificador "down draft" clássico. Com estas duas opções testadas e avaliadas encontrar-se-á a CESP em condições de projetar com segurança o gaseificador eletrotérmico de Jupia, de capacidade de 100 t/dia de metanol equivalente. Pelas vantagens demonstradas e possibilidades indicadas, este sistema de gaseificação terá certamente um lugar destacado nos programas de implementação de novas fontes energéticas baseadas em recursos nacionais renováveis.

QUADRO C

GASEIFICADOR ELETROTÉRMICO DE CORUMBATAI
RESULTADOS SIGNIFICATIVOS DAS CAMPANHAS REALIZADAS

Discriminação	Unidade	I dez/81	II fev/81	III mar/81	IV mai/81	V jun/81
Material gaseificado	-	madeira	madeira	madeira	madeira	carvão
Potência elétrica média	kW	N.D.	57,5	60,3	44,3	36,8
Consumo médio de material	kg/h	26,2	N.D.	24,5	36,6	13,8
Vazão média de vapor	kg/h	16,0	19,0	18,5	21,2	13,3
Vazão média de gás seco	kg/h	N.D.	50,0	44,3	70,9	41,2
Temperatura média	°C	430	660	563	550	890
Composição volumétrica média:						
- teor de CO	%	36,5	34,6	37,3	38,0	43,5
- teor de H2	%	52,6	57,2	53,6	52,0	50,9
- teor de CO2	%	4,0	5,2	6,0	6,5	2,1
- teor de CH4	%	2,4	1,2	1,4	2,5	0,5
- teor de outros	%	4,5	1,8	1,7	1,0	3,0
Taxa de grelha	kg/m ² h	52,1	N.D.	48,7	72,8	27,4
Consumo unitário de energia	kWh/Nm ³ gás	N.D.	1,15	1,36	0,62	0,89

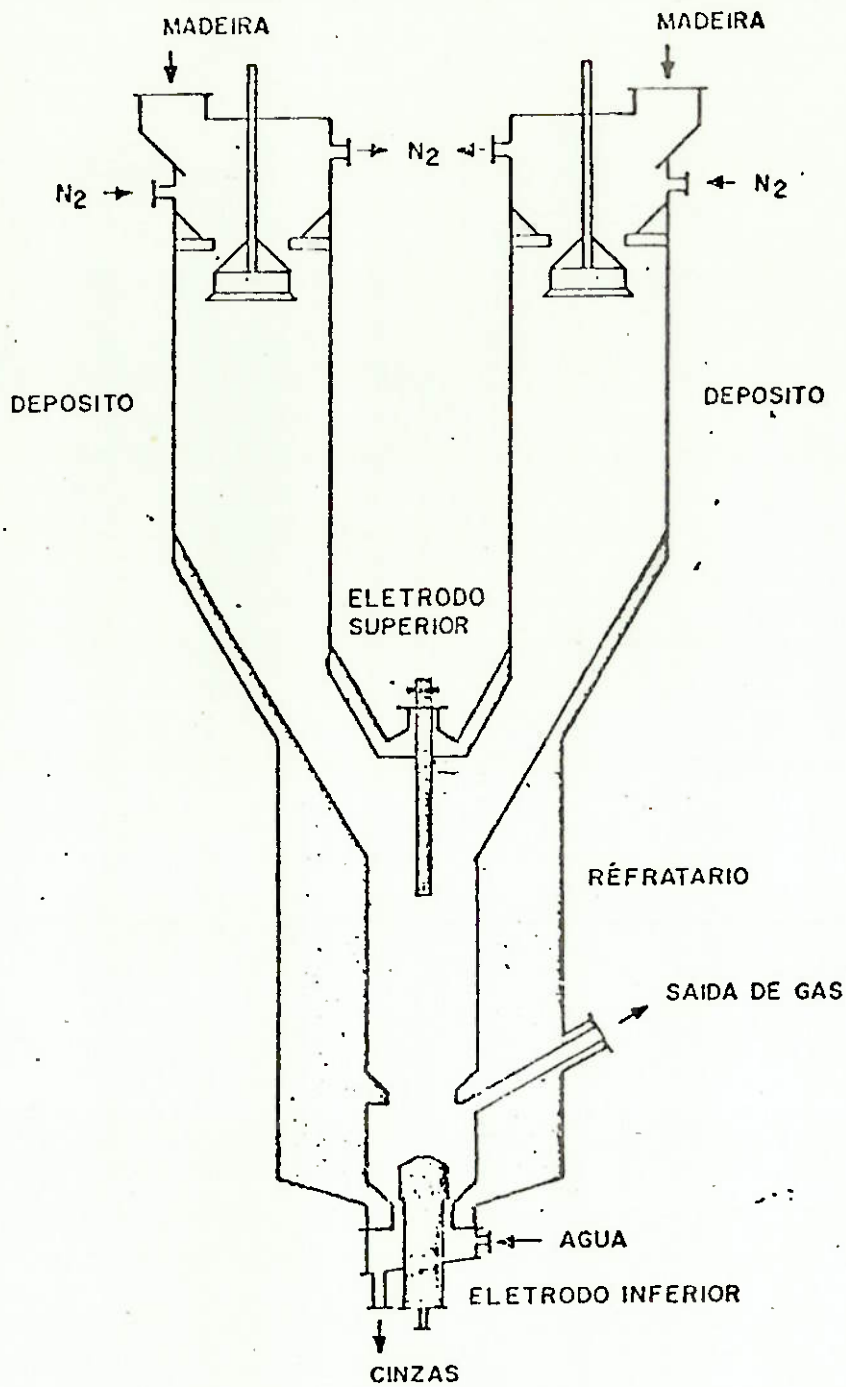


FIG. 9 - GASEIFICADOR ELETROTÉRMINICO (ELETRODO VERTICAL)

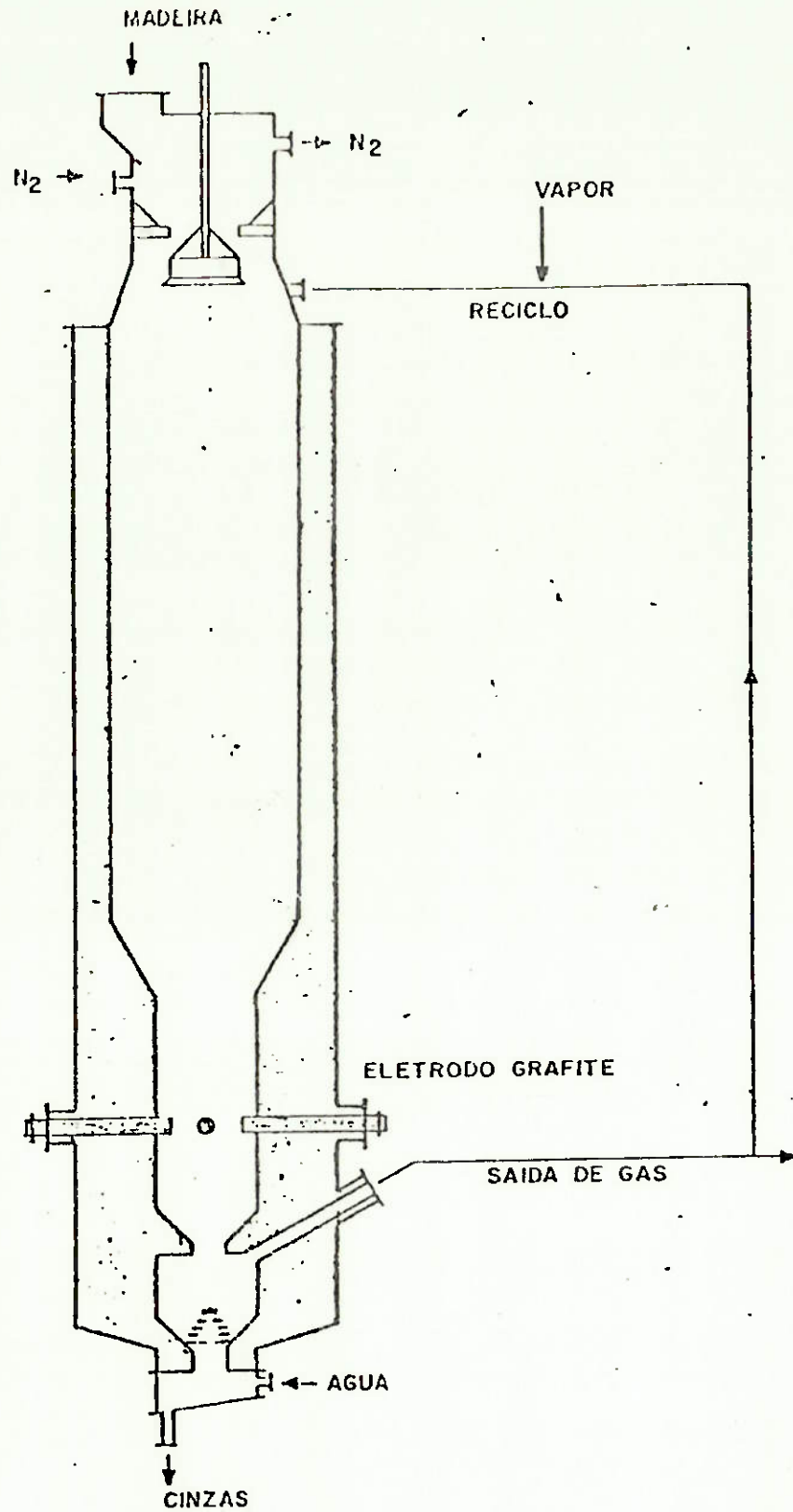


FIG.10 - GASEIFICADOR ELEOTERMICO (ELETRODOS HORIZONTAIS)

VI - CONCLUSÕES FINAIS

A gaseificação da madeira em grande escala é um processo viável, de bom rendimento global, permitindo a obtenção de um gás útil energeticamente, a custo viável.

Muitos estudos envolvendo os mais diversos conceitos de gaseificação têm sido realizados. Pouco, porém, existe de concreto, além dos processos tradicionais (leito fixo, com vapor e ar ou oxigênio), quer desenvolvidos para madeira, quer desenvolvidos para carvão mineral e adaptados para madeira.

Gaseificadores de madeira de médio e grande porte ainda não estão suficientemente comprovados experimentalmente. Não são esperados obstáculos técnicos sérios ao seu desenvolvimento. O fato de estarem ainda pouco desenvolvidos é devido ao pouco interesse relativo dos países industrializados na gaseificação da madeira, porque em geral dispõem de reservas abundantes de carvão mineral e, quando não é o caso, não dispõem também da madeira nos volumes adequados.

Na área de demonstração industrial, a CESP em São Paulo dispõe do maior programa de desenvolvimento tecnológico no Brasil, com o apoio dos governos estadual e federal, de institutos de pesquisa e de diversas empresas de consultoria.

O programa, que visa obter gás de síntese, deverá fornecer seus primeiros dados a partir de final de 1982, quando posta em marcha de sua primeira unidade.

A evolução da conjuntura e os resultados favoráveis até então obtidos impulsionaram a CESP no caminho de novas experimentações e pesquisas. A médio prazo, com a entrada em operação de grandes unidades gaseificadoras de madeira, transformações sensíveis deverão ocorrer na indústria em geral e na indústria química em particular. Por um lado possibilitará o surgimento de uma química baseada no gás de síntese, e por outro viabilizará o emprego de madeira como insumo energético em variadas utilizações.

VII - BIBLIOGRAFIA

1. ASSUMPTÃO, Rosely M.V. Gaseificação de materiais lignocelulósicos. São Paulo, 1979.
2. EPRI. The real costs of synthetic fuels. 1981.
3. WEISZ, B.P. & MOARSHALL, J.F. Fuels from biomass: a critical analysis of technology and economics. Princeton, Mobil Research and Développement Corporation, 1980.
4. MOREIRA, J.R. et al. Energy balance for production of ethyl and methyl alcohol. São Paulo, IFUSP, 1979.
5. DAVY MCKEE INTERNATIONAL. Eucalyptus wood gasification plant. São Paulo, CESP, 1981.
6. ENGEVIX. Unidade de gaseificação de madeira - Jupia: gaseificador eletrotérmico. São Paulo, CESP, 1981.
7. BROCKWELL, et al. The biggest wood fuel producer gas plant in the world. Londres, Institution of Chemical Engineers, 1949.
8. LE METANOL du bois, s.n.t.
9. INTER-UHDE. Metanol a partir da madeira: projeto básico. São Paulo, CESP, 1980.
10. YANG, V. Wood gasification for methanol production. MIT, 1980.

ANEXO II

Esquemas dos sistemas utilizados no passado na produção de gás pobre para alimentação de motores de combustão interna, conforme o livro: "The Pegasus* Unit" de autoria de Skov N.A. & Popworth M.L., USA, 1974.

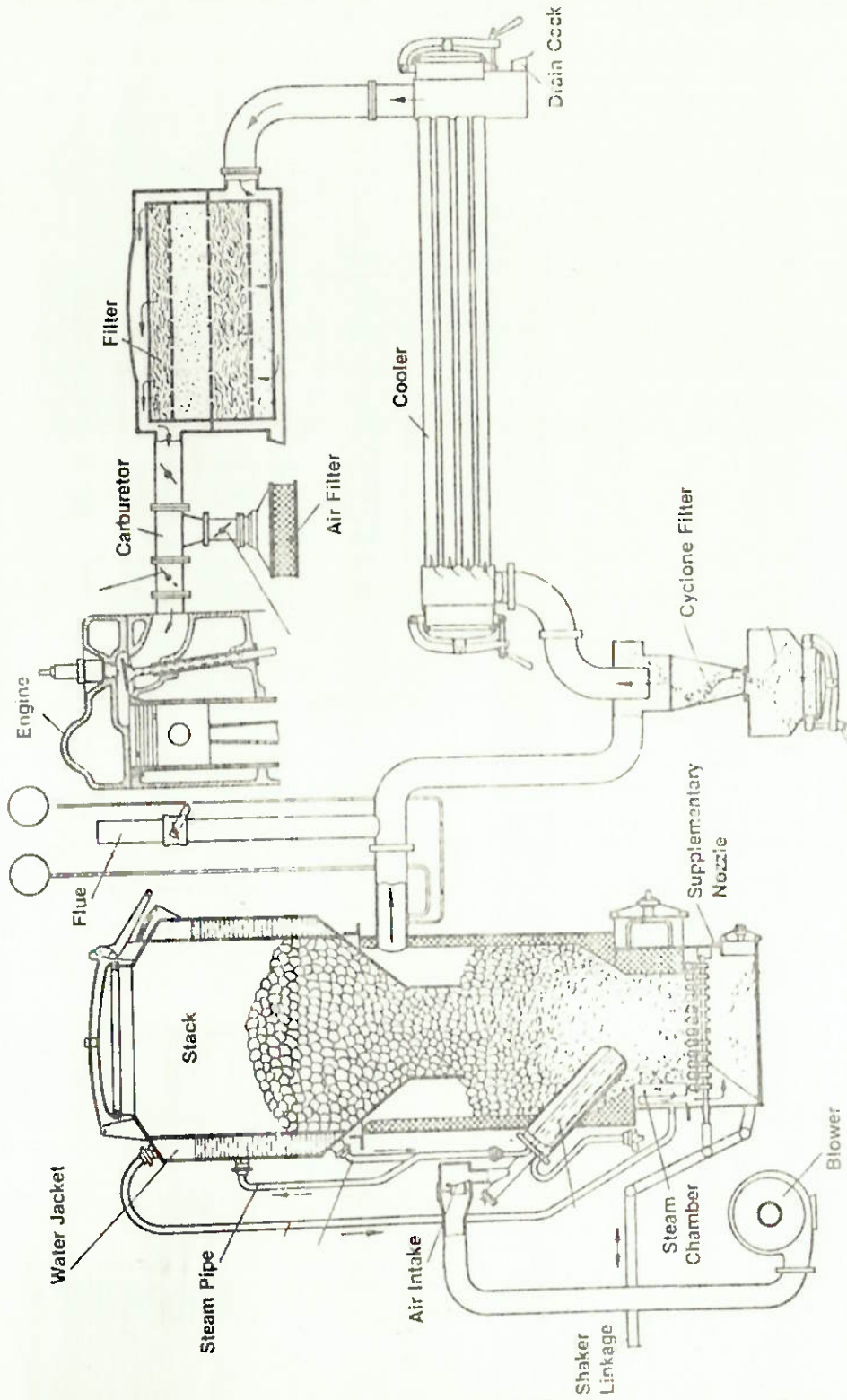


FIG. 43 PEGASUS OF HENSCHEL DESIGN

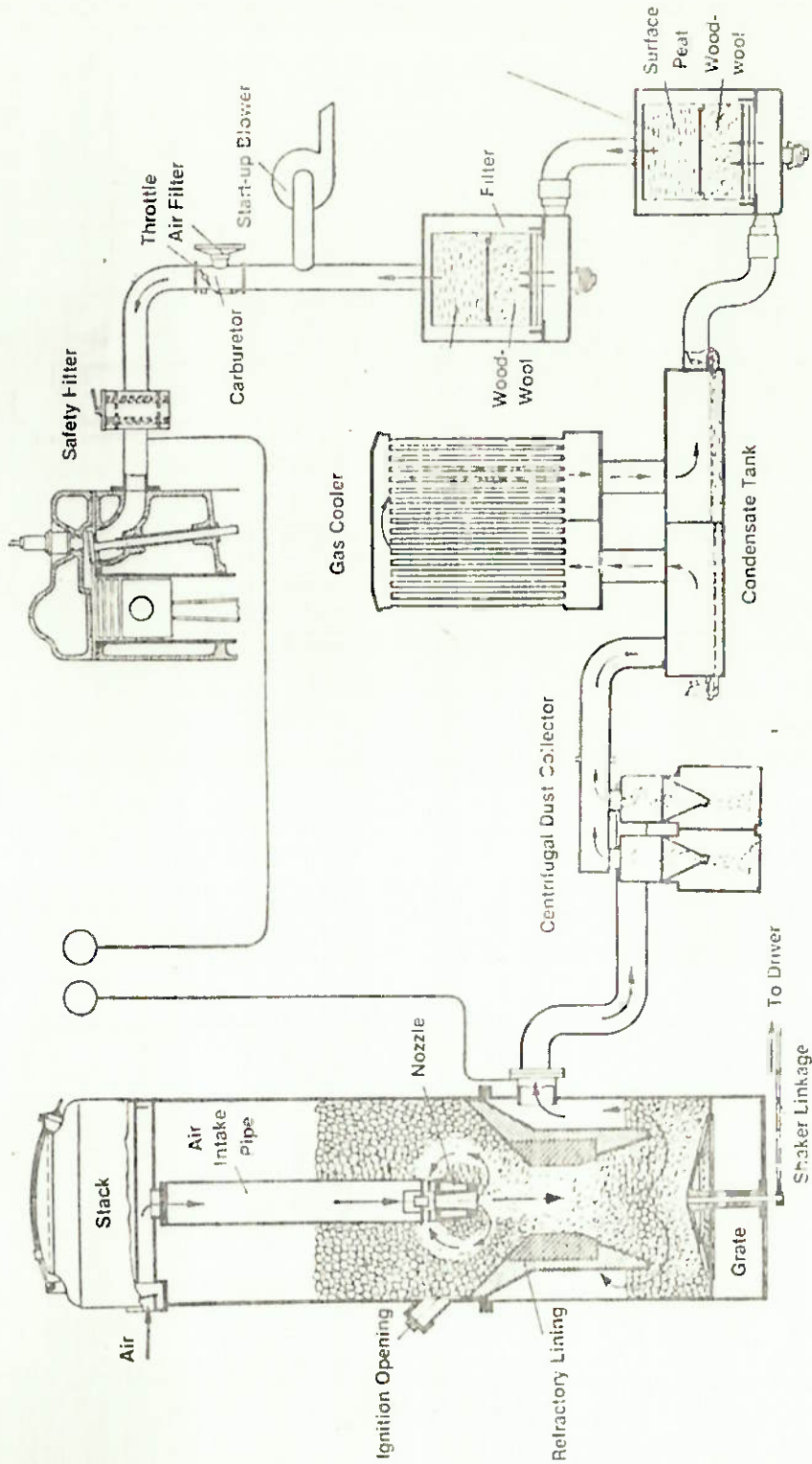


FIG. 44: PEGASUS OF ZEISSL DESIGN.

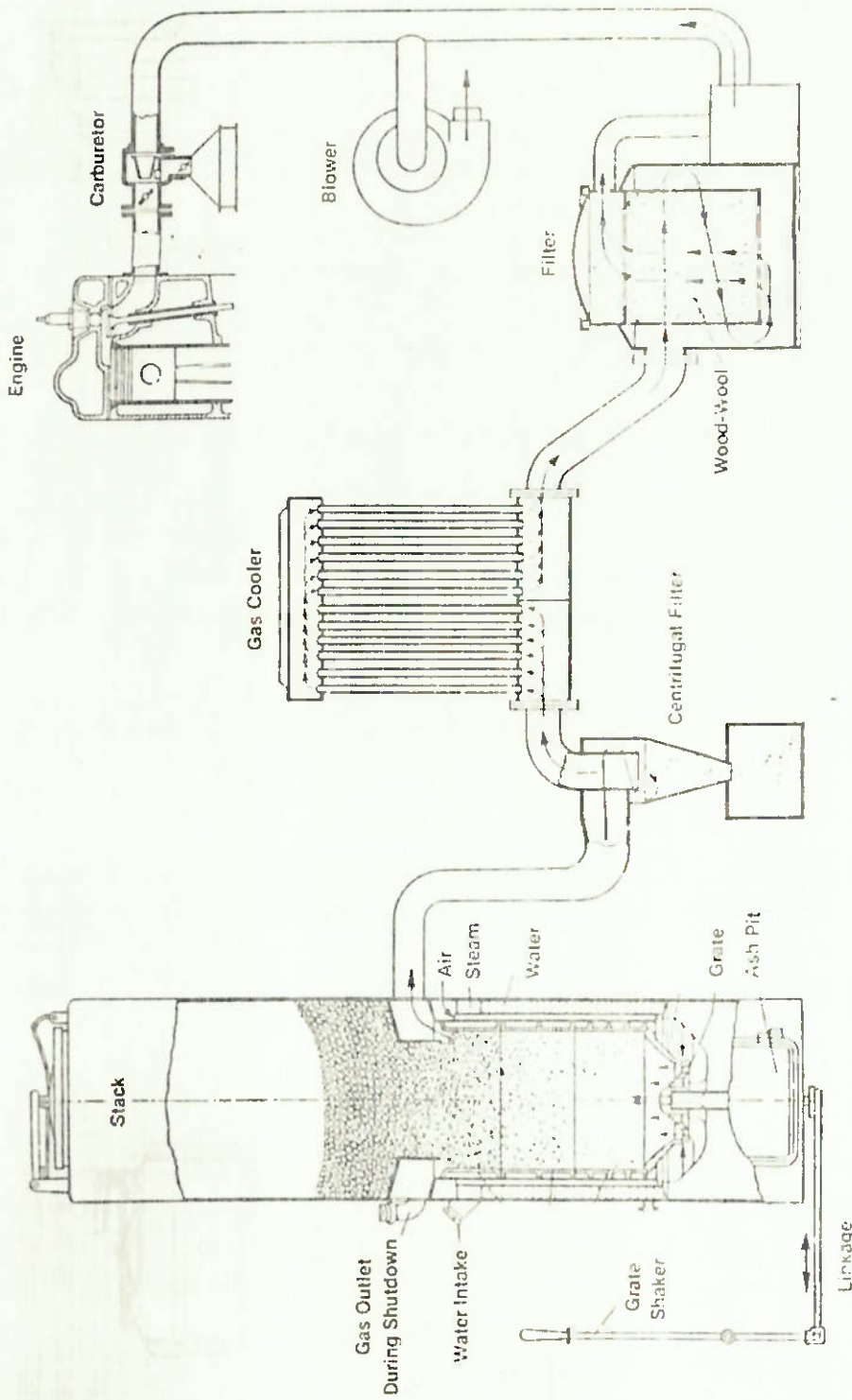


FIG. 45: PEGASUS OF GRUNERT DESIGN.

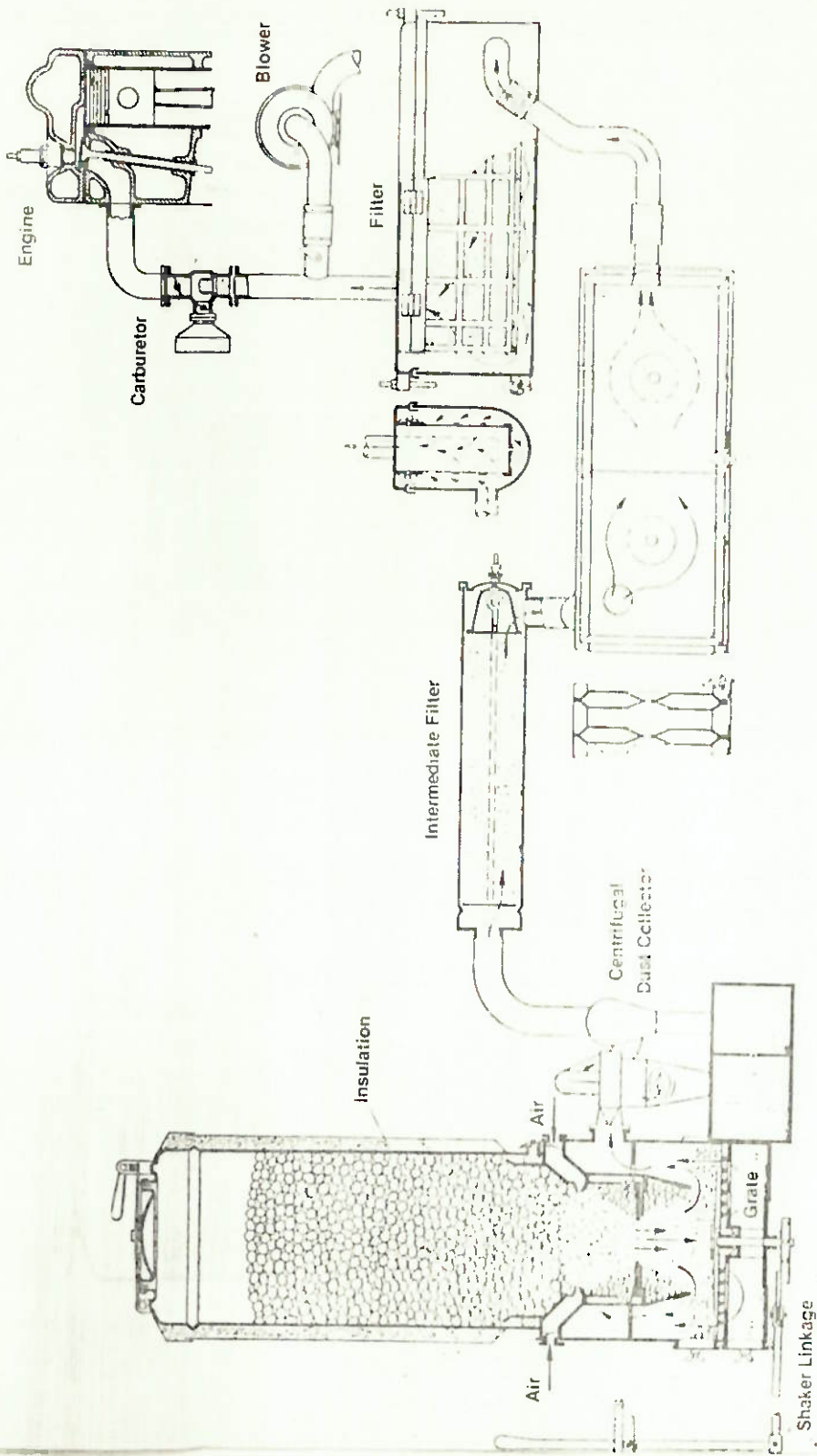


FIG. 46 PEGASUS OF ZEUCH DESIGN

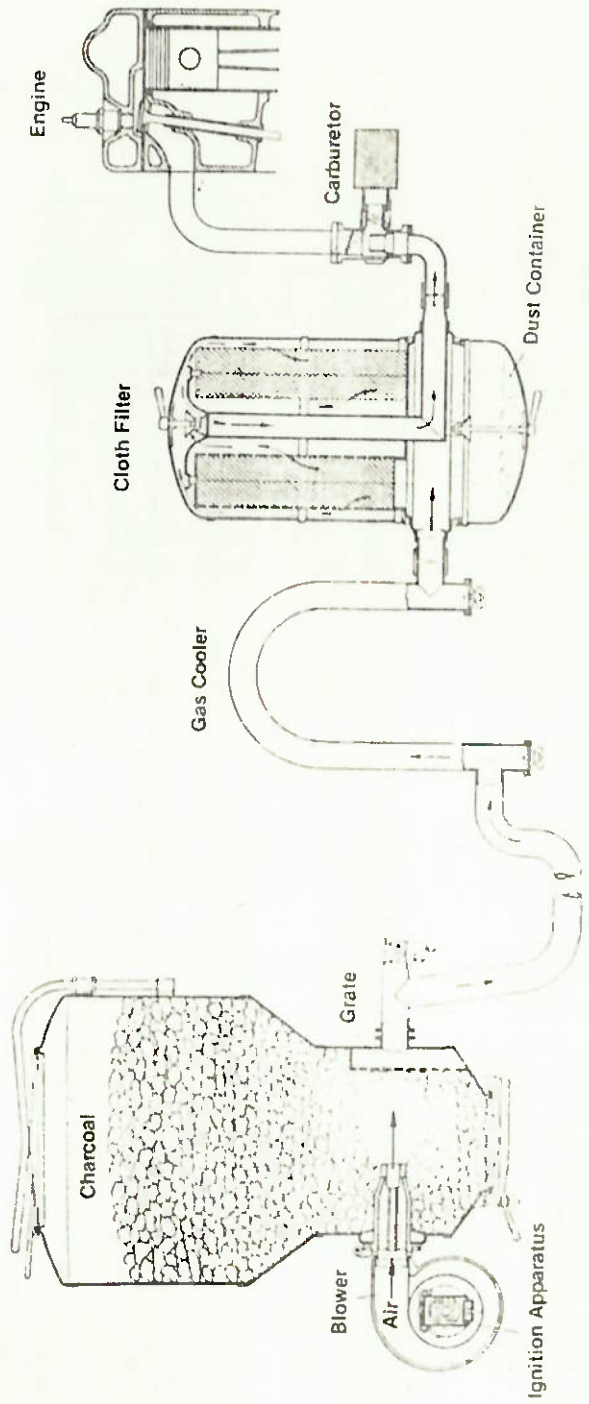


FIG. 47 PEGASUS OF MERCEDES—BENZ DESIGN

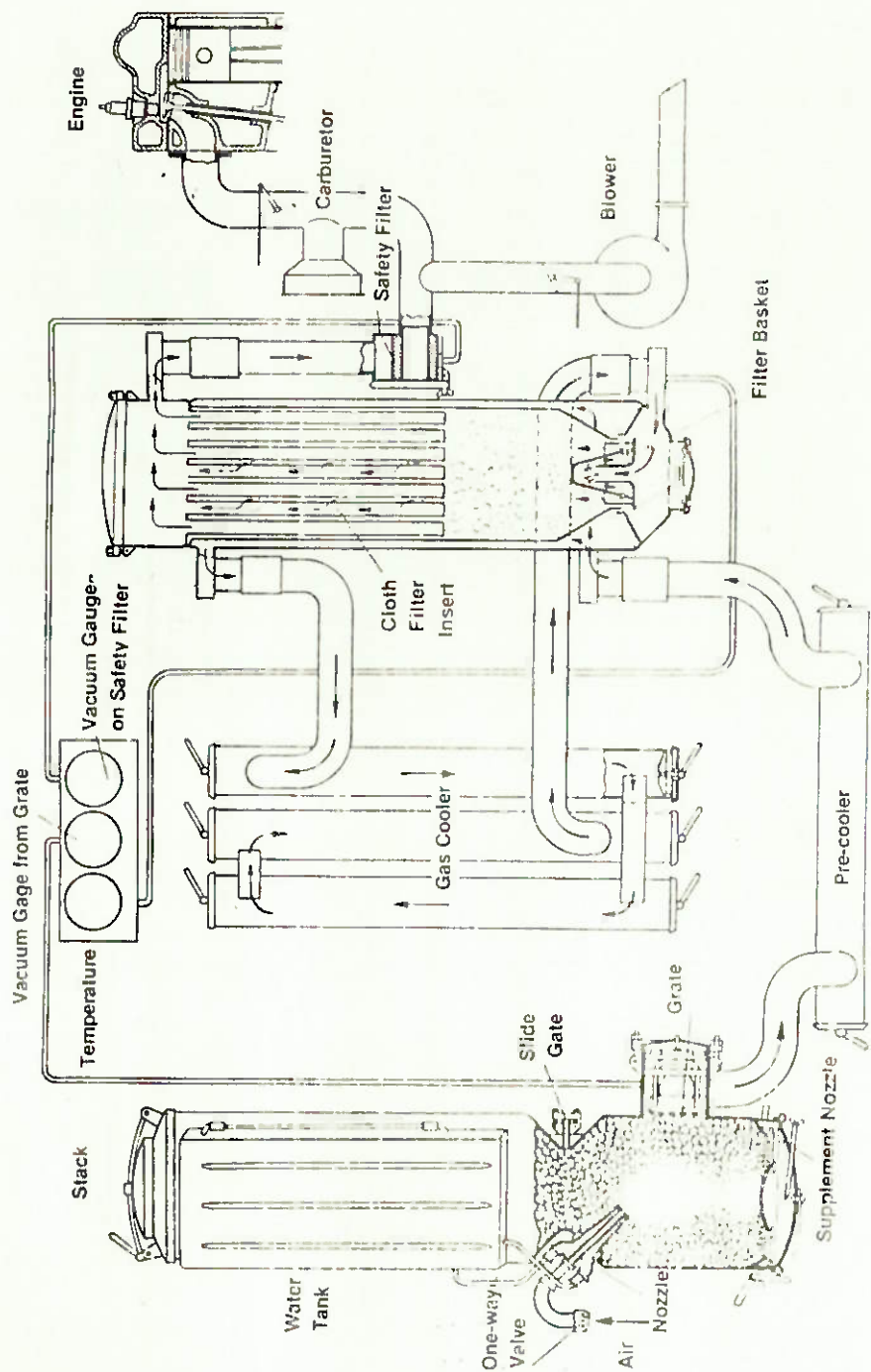


FIG. 48 PEGASUS OF MERCEDES — BENZ DESIGN

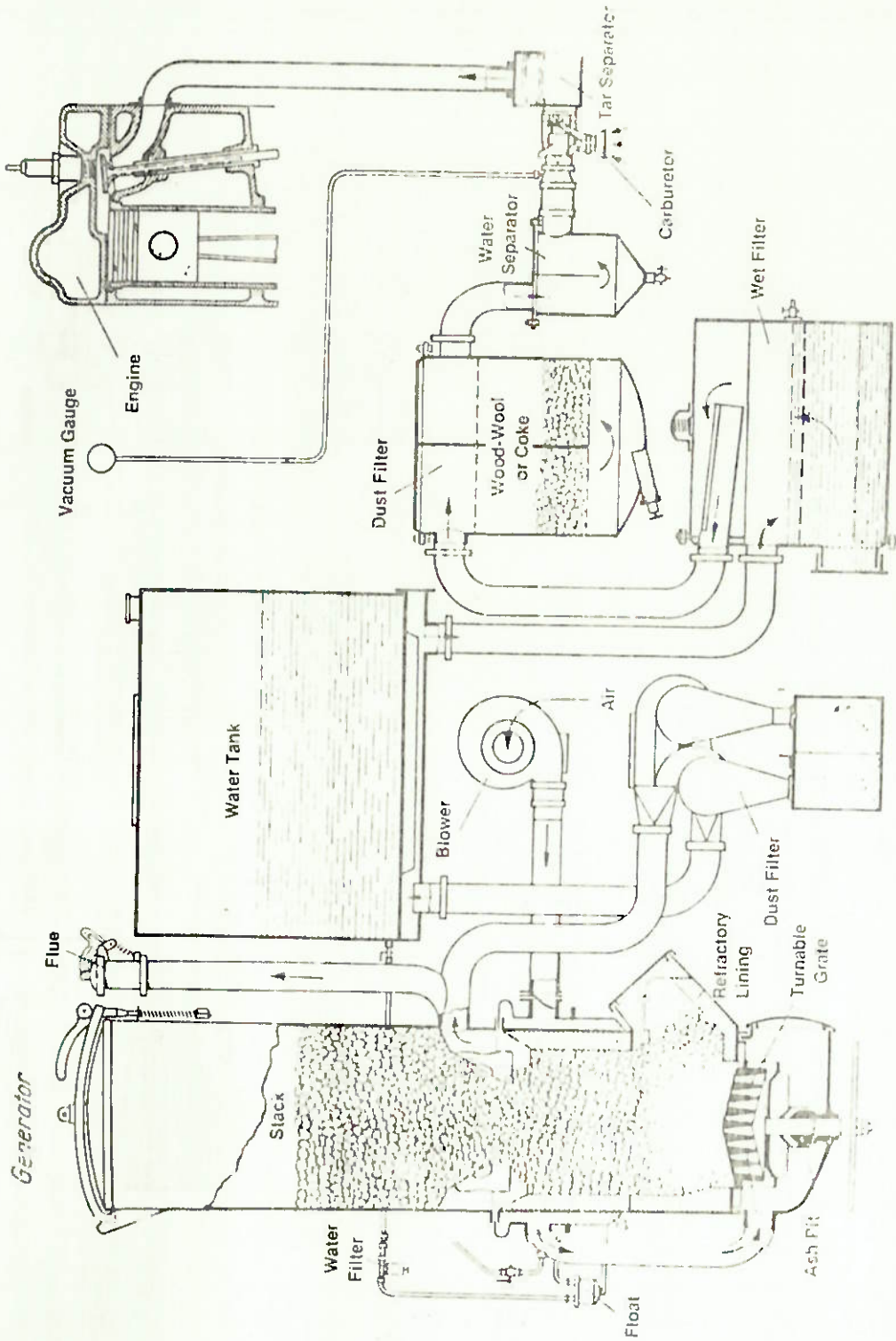


FIG. 49: PEGASUS OF STINNES DESIGN

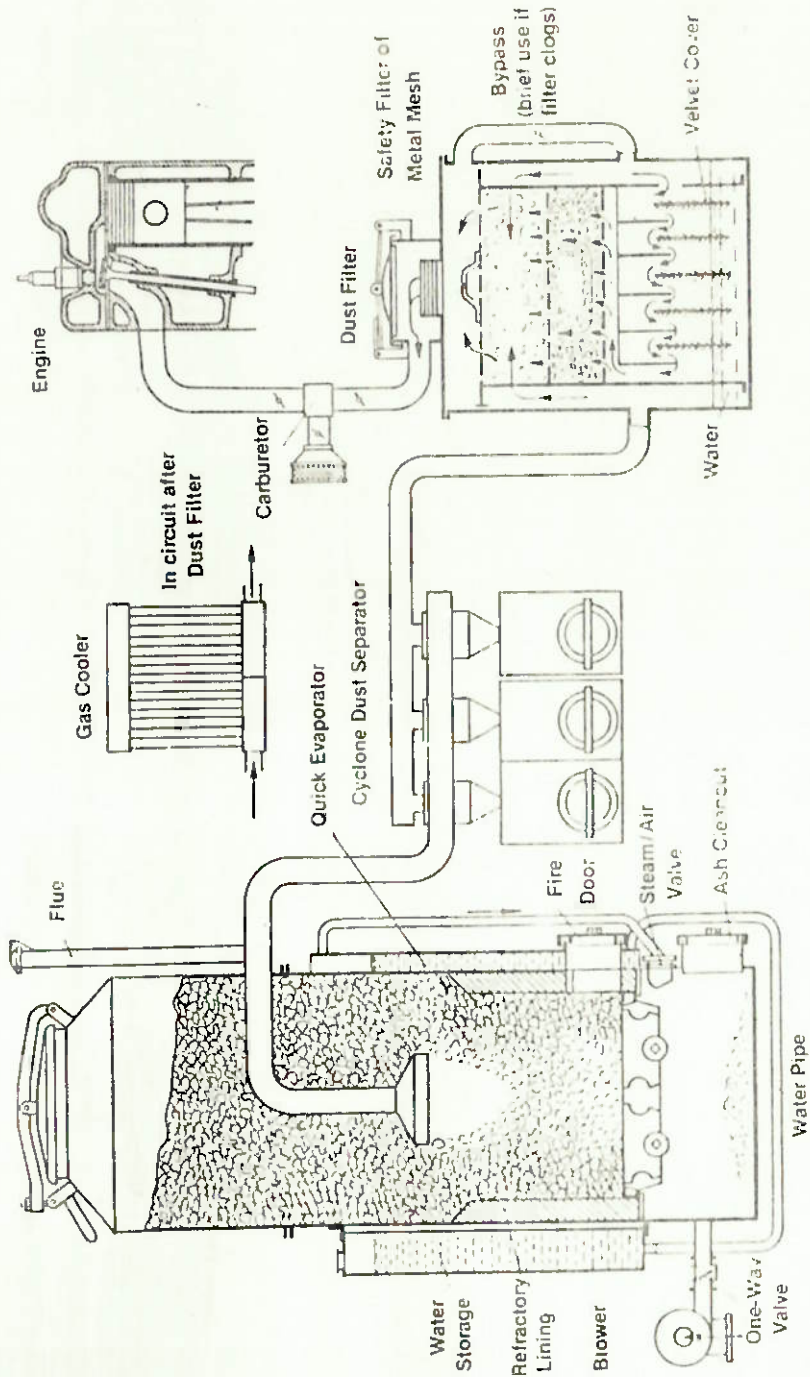


FIG. 50: PEGASUS OF AGM DESIGN.

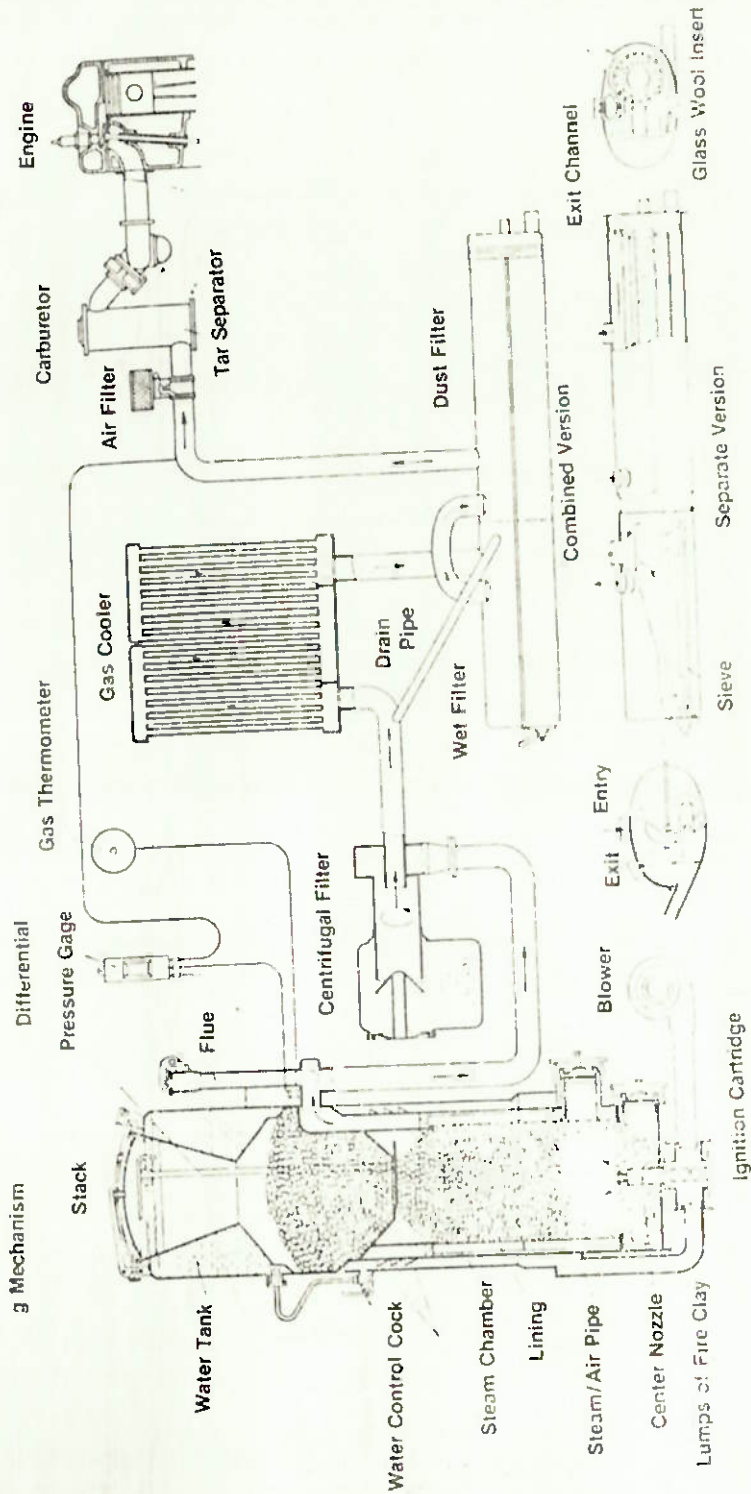


FIG. 51: PEGASUS OF DEUTZ DESIGN, WET GASIFICATION

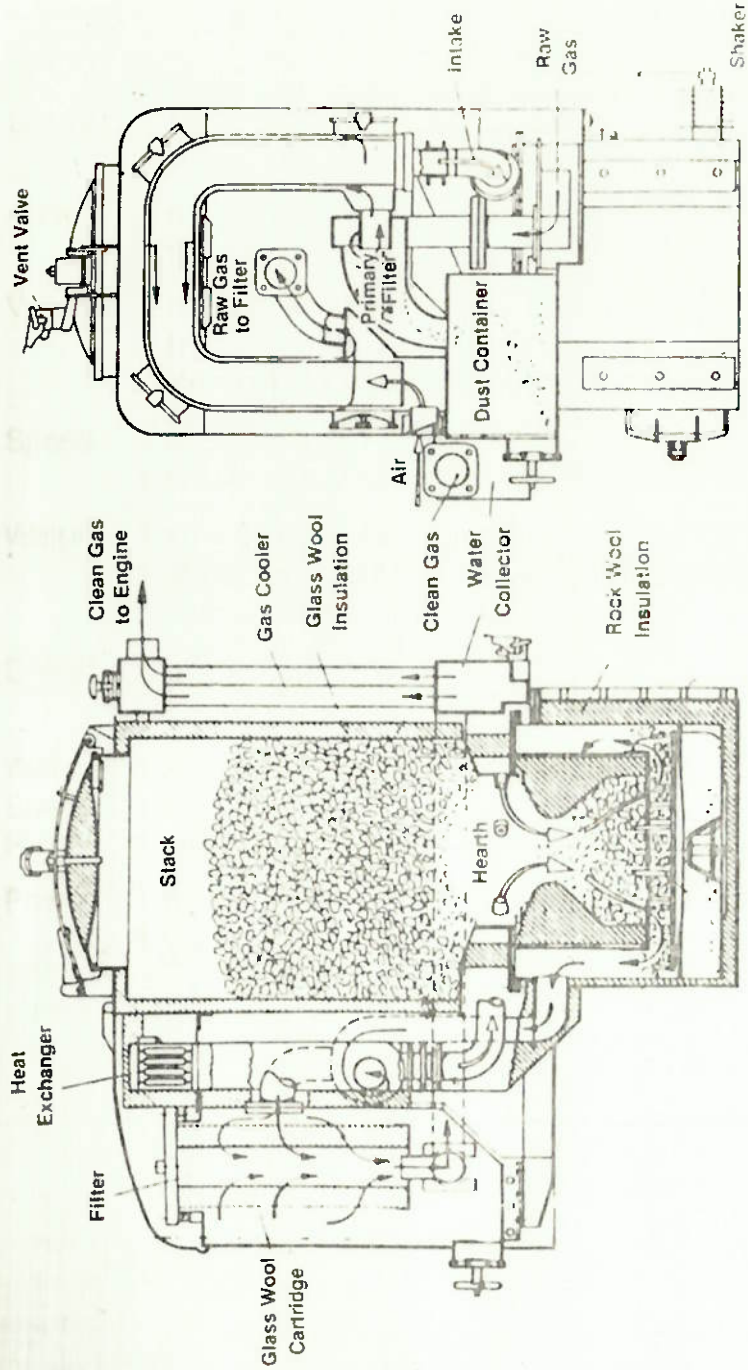


FIG. 52: WOOD BURNING PEGASUS.