

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
PRO-REITORIA PARA ASSUNTOS DO INTERIOR
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

+
GASEIFICADOR PARA USO EM IRRIGAÇÃO RURAL

JOSÉ DA SILVA QUIRINO

Campina Grande, Paraíba

Abril de 1988

JOSÉ DA SILVA QUIRINO

+
GASEIFICADOR PARA USO EM IRRIGAÇÃO RURAL

Dissertação apresentada ao Curso
de Mestrado em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal
da Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do Grau
de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETO DE PRODUTO MECÂNICO
- Gasogênios

PROFESSOR ORIENTADOR: KEPLER BORGES FRANÇA (Ph.D)

CO-ORIENTADOR: JÚLIO GOLDFARB (Ms.C)

Campina Grande, Paraíba

1988



Q8g Quirino, José da Silva.
Gaseificador para uso em irrigação rural / José da Silva Quirino. - Campina Grande, 1988.
73 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1988.
"Orientação : Prof. Dr. Kepler Borges França, Prof. M.Sc. Júlio Goldfarb".
Referências.

1. Gasogênicos - Combustíveis. 2. Gaseificadores - Irrigação Rural. 3. Gás Combustível - Baixo Custo. 4. Dissertação - Engenharia Mecânica. I. França, Kepler Borges. II. Goldfarb, Júlio. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 62-626:631.67(043)


GASEIFICADOR PARA USO EM IRRIGAÇÃO RURAL

JOSÉ DA SILVA QUIRINO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 29/04/1988


KEPLER BORGES FRANCA (Ph.D.)
Orientador


JULIO GOLDFARB (Ms.C)
Co-orientador


HARBANS LAL ARORA (Ph.D.)
Componente de Banca

Campina Grande, Paraíba

Abril de 1988

DEDICATÓRIA

À minha mãe

À minha irmã

Às minhas sobrinhas

Dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

pelo incentivo e auxílio financeiro

Ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS através dos engenheiros Nelito Gomes de Matos, Engenheiro Chefe da Divisão de Manutenção e Recuperação de Máquinas (DIBRA/Ro) e David Vieira de Almeida, Chefe da Oficina de Recuperação (DIBRA-Ro) do químico industrial Jemil Jesuino da Costa e dos técnicos Paulo Martins da Silveira e José Mendes e os demais que de uma maneira ou de outra tornaram o trabalho uma realidade

À Universidade Federal da Paraíba - UFPb

por intermédio do Departamento de Engenharia Mecânica nas pessoas dos coordenadores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, professores Marcino Dias de Oliveira Júnior e Ana Albertina Graca Branco, pela oportunidade e pelo incentivo, durante a realização deste trabalho

por intermédio do Núcleo de Energia - NERG, através do engenheiro eletricitista Pierre Macedo e do programador Jorge Eduardo de Jesus Serey Lopes pelos trabalhos em computação referentes ao soft de gráfico e ajuste linear

por intermédio do Departamento de Engenharia Química nas pessoas dos professores Kepler Borges Franca, orientador e Júlio Goldfaro, co-orientador

RESUMO

Um dos problemas cruciais da agricultura brasileira é o alto custo dos combustíveis líquidos -- diesel, gasolina e álcool -- que provocam a elevação do custo de todos os produtos agrícolas. O gasogênio pode ser uma das soluções para este problema, na medida em que gera dentro da propriedade rural um gás combustível de baixo custo -- o gás pobre.

O projeto desenvolvido é um gasogênio alimentado a carvão, de tipo contracorrente, rústico, resistente, de pouca manutenção, para operar nas condições do Nordeste brasileiro.

Avaliou-se o seu desempenho com um motor acoplado a uma bomba de água. O rendimento e funcionamento foram além da expectativa. O sistema possui potencial para ser repassado para o meio rural.

O seu desempenho pode ser assegurado por quatro meses de intensivos testes. Foram obtidos dados de eficiência, operação, manutenção e economicidade. Os gases gerados foram analisados, determinando-se os teores aproximados de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, gás carbônico e nitrogênio. Também foi igualmente determinada a performance do trocador de calor.

O desempenho deste gaseificador pode ser colocado no mesmo nível dos bons gaseificadores comerciais, do tipo contra-corrente. O custo de fabricação é relativamente baixo e está ao alcance de grande número de agricultores.

Abstract

One of the crucial problems of the Brazilian agriculture is the high cost of the liquid fuels like diesel, petrol, and alcohol which provokes an increase in the cost of all the agricultural products. The gasifier can have the solution for this problem as it produces a cheaper fuel gas in the rural area - say the poor gas.

The project developed is a gasifier fed with coal, of countercurrent type, rustic, resistant and requires cheap maintenance and operate in the Northeast Brazilian conditions.

Its performance was tested with engine connected with a water pump. The yield and working were beyond expectation. The system possesses potential to be transferred to the rural area.

Its performance was achieved in four months time of intensive tests. Efficiency, operation, maintenance and economy data were obtained.

An approximate analysis of the gases was done for carbon monoxide, hydrogen, methane, carbon dioxide and nitrogen. The heat exchange performance was also determined.

The performance of this gaseification system can be put to the level of the sophisticated countercurrent systems available in the market. The manufacturing cost is relatively low and is within the reach of most of the farmers.

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 4.1. Dados referentes às temperaturas de entrada e saída dos gases no trocador de calor, em função do tempo.	53
TABELA 4.2. Dados referentes às rotações do motor em função da vazão da água bombeada e vazão do gás gerado.	58
TABELA 4.3. Medidas de vazões do gás gerado em função da massa de carvão consumido.	59
TABELA 4.4. Valores obtidos do rendimento do gasogênio em função do volume do gás gerado e massa do carvão consumido.	60

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 01. Esquema de um gaseificador típico contra-corrente.	24
Figura 02. Esquema de um gaseificador típico concorrente.	24
Figura 03. Esquema de um gaseificador típico transversal.	24
Figura 04. Corte vertical do gaseificador contra-corrente Lurgi.	25
Figura 05. Corte vertical do gaseificador contra-corrente Siemens.	25
Figura 06. Esquema de um gaseificador típico de leito fluidizado.	28
Figura 07. Esquema de um gaseificador típico de leito em suspensão.	28
Figura 08. Diagrama de bloco do gasogênio construído.	32
Figura 09. Vista geral do gasogênio com a bomba de água e anexos.	33
Figura 10. Corte vertical e planta baixa do gaseificador.	34
Figura 11. Vista frontal e planta baixa da cetilha com detalhes do termosifão.	36

	Página
Figura 12. Corte vertical e detalhes da cetilha.	37
Figura 13. Vista frontal e planta do trocador de calor.	40
Figura 14. Vista frontal e planta baixa do gasômetro.	42
Figura 15. Vista frontal e planta baixa do filtro.	43
Figura 16. Vista frontal e planta baixa do ciclone.	44
Figura 17. Vista frontal e planta baixa da bomba de água.	46
Figura 18. Diagrama cartesiano das diferenças de temperatura de entrada e saída do gás no trocador de calor, em função do tempo.	54
Figura 19. Diagrama cartesiano das temperaturas de saída do gás no trocador de calor, em função do tempo.	56

NOTAÇÃO, NOMECLATURA E ABREVIACÕES

cc = Cilindradas cúbicas

C_d = Custo do desgaste do equipamento

C_i = Custo de investimento

cm = Centímetro

C_m = Custo de manutenção do gasogênio

C_v = Capacidade volumétrica, cilindradas do motor em litros por ciclo, que no motor Montgomery do projeto vale 0,477 l

CV = Cavalo vapor

H = Poder calorífico inferior da mistura gasosa, gerada no gaseificador

H_g = Poder calorífico inferior de cada gás componente da mistura gasosa gerada no gaseificador

T = Diferencial de temperatura ($T_f - T_i$)

E_c = Economia de combustível, diferença entre o custo total óleo diesel/dia e custo total carvão/dia

Galão = 3,785 l

h = Hora

ha = Hectare

H_g = Poder calorífico inferior típico da mistura gasosa em Nm^3

H_i = Poder calorífico inferior do carvão

kcal = Quilocaloria

kg = Quilograma

l = Litro

m = Metro

M = Quantidade de carvão em quilograma/hora

m^3/h = Metros cúbicos por hora

Nm^3 = Gás ou mistura gasosa nas condições normais de pressão
(1 atm), e temperatura ($0^\circ C$)

p. = Página ou páginas

PCI = Poder calorífico inferior

PCS = Poder calorífico superior

Q = Calor sensível do gás à temperatura de utilização em
 $kcal/Nm^3$

R = Rendimento do gaseificador

rpm = Rotações por minuto

S = Calor latente contido nos subprodutos (alcatrão e ácidos
pirolenhosos) em kcal/h

t = Tempo

T_a = Temperatura ambiente

T_i = Temperatura inicial

T_f = Temperatura final

$t_{(min)}$ = Tempo em minutos

T_R = Tempo de retorno do capital investido

V = Vazão do gás em metros cúbicos por hora

V_a = Vazão da água bombeada em metros cúbicos por hora

V_g = Vazão individual de cada gás da mistura gasosa gerada no
gaseificador

Vol = Volume (tomo)

NOTAÇÃO NUMÉRICA REFERENTE A EQUAÇÃO (4.5)

0,4 = Fração combustível do gás no cilindro do motor

0,75 = Fator de alimentação do motor

2 = Fator de conversão para converter em 1 rotação, um ciclo completo para motores de 4 tempos, que se efetua em 2 rotações

60 = Conversão de rpm em rotações por hora

1000 = Fator para converter cilindrada de litro para metro cúbico.

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUÇÃO	
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	
2.1. Antecedentes históricos	3
2.2. Combustíveis dos gasogênios	5
2.3. Reações químicas nos gasogênios	7
2.3.1. Zona de combustão	8
2.3.2. Zona de gaseificação	9
2.3.3. Zona de destilação destrutiva	10
2.3.4. Zona de desidratação	11
2.4. Gaseificadores	
2.4.1. Comburente	12
2.4.1.1. Gás de ar	12
2.4.1.2. Gás de água	14
2.4.1.3. Gás misto	15
2.4.2. Fonte de energia para o processo de gasei- ficação	15
2.4.3. Pressão de operação do gaseificador	16
2.4.4. Movimento relativo da corrente de gases em relação à corrente do combustível no gaseificador	16
2.4.4.1. Gaseificadores de fluxo contra- corrente (up draft)	16
2.4.4.2. Gaseificação de fluxo concorrente (down draft)	20

	Página
2.4.4.3. Gaseificador de fluxo transversal .	22
2.4.5. Tipos de leito	23
2.4.5.1. Gaseificador de leito fixo	23
2.4.5.2. Gaseificador de leito fluidizado ..	26
2.4.5.3. Leito em suspensão	27
2.4.6. Grelhas	27
2.5. Segurança	29
2.5.1. Toxicidade	29
2.5.2. Explosividade	30
2.6. Gasogênio desenvolvido	30

3. SISTEMA E MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1. Descrição do sistema	31
3.1.1. Gaseificador com cetilha e anexos	31
3.1.1.1. Gaseificador	31
3.1.1.2. Cetilha	35
3.1.2. Trocador de calor de tubos retos - gases versus água	38
3.1.3. Gasômetro	41
3.1.4. Filtro	41
3.1.5. Ciclone	41
3.1.6. Motor, bomba de água e anexos	45
3.1.6.1. Motor	45
3.1.6.2. Anexos	47
3.2. Método experimental	47
3.2.1. Operações do gasogênio	47
3.2.2. Manutenção do gasogênio	49
3.2.3. Instrumentação	49

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	
4.1. Determinação dos gases gerados	51
4.2. Relação entre a variação de temperatura dos gases na entrada e saída do trocador de calor com o tempo	52
4.3. Eficiência do sistema	55
4.3.1. Determinação dos volumes de gás gerado correspondentes a diversos rpm do motor ..	57
4.3.2. Determinação da massa (M) de carvão consumido para diferentes vazões de gás	58
4.3.3. Determinação do rendimento do gasogênio ..	59
4.4. Custo do gasogênio	61
4.4.1. Custos comparativos entre o consumo de óleo diesel e carvão	61
4.4.2. Amortização do capital investido	62
5. CONCLUSÃO	65
6. SUGESTÕES	67
BIBLIOGRAFIA	68
APÊNDICE	74

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho destina-se a resolver em parte o problema energético nos perímetros irrigados, onde o consumo de óleo diesel torna antieconômica a agricultura, determinando um alto custo dos produtos agrícolas. É imperativo a substituição do óleo diesel por um combustível economicamente viável e renovável.

O projeto desenvolvido é um gaseificador rústico, operado a carvão vegetal, para ser utilizado na irrigação rural da Paraíba ou em outras regiões em condições semelhantes. O gasogênio foi construído com o apoio da Universidade Federal da Paraíba - UFPb, Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, e pretende servir de modelo para os agricultores do Nordeste.

A pesquisa buscou três parâmetros fundamentais: a) Economicidade, b) Facilidade de operação e manutenção e c) Segurança. Os custos de fabricação do gasogênio são relativamente baixos devidos aos materiais serem simples e facilmente encontrados no comércio local. Com orientações técnicas, a operação e a manutenção do gasogênio podem ser realizadas por qualquer agricultor. A questão de segurança, que não tem sido devidamente considerada em outros trabalhos, foi exaustivamente alertada; usados dentro das normas de segurança, os problemas da explosividade e toxidez são evitados.

A questão do desmatamento ocasionada pelo consumo do

carvão deve ser considerada. É importante assinalar que o consumo do carvão pelo gaseificador é desprezível, em comparação com o consumo de lenha atualmente realizado pelas caldeiras das indústrias, fornos de cal, fornos de padarias e indústrias cerâmicas. O problema de desmatamento no Nordeste brasileiro só pode ser resolvido por um programa de reflorestamento, com variedades vegetais apropriadas, tais como: algaroba, leucena e outras.

Atualmente, o gasogênio tem uma penetração quase que exclusiva no meio industrial, onde já existem diversos modelos em operação. O uso do gasogênio no meio agrícola ainda não está otimizado.

Esperamos que o modelo de gasogênio ora desenvolvido, juntamente com outros realizados pelos centros de pesquisas do Nordeste possam contribuir efetivamente para uma introdução no meio rural (5 e 31).

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. Antecedentes históricos

A tecnologia de gaseificação pode ser definida como a transformação de um combustível sólido em combustível gasoso sob a ação combinada do calor e de uma fase gasosa contendo uma certa proporção de oxigênio, livre ou combinado. Sabe-se há mais de dois mil anos que a madeira carbonizada em condições especiais gera um gás venenoso que pode provocar acidentes fatais, porém foi somente em fins do século XVII que o gás da madeira foi estudado e caracterizado como gás combustível. Em 1792, o pesquisador inglês WILLIAM MURDOCK realizou com êxito a primeira experiência, visando a produção de gás a partir do carvão; desta forma foi possível iluminar a gás as ruas de Londres em 1812. Nos Estados Unidos fizeram-se esforços idênticos em 1796 na Filadélfia, e a partir desta época surgiram companhias de gás explorando comercialmente o gás da madeira (35).

A utilização do gasogênio em motores fixos iniciou-se em fins do século XIX. A partir da primeira guerra mundial fizeram-se experiências práticas visando-se a utilização dos gasogênios em motores fixos e móveis. Iniciam-se em 1920 com os industriais franceses BERLIET, PANHARD e RENAULT pesquisas e testes, com excelentes resultados do gasogênio em motores móveis. Com automóveis alimentados a gás pobre conseguiram-se médias de 90 km/h no autódromo de Montllery, em percurso de 500 km. Na Itália o professor FERRAGUTTI conseguiu simplificar e reduzir seus gasogênios, tendo inclusive empregado o turbo compressor nos carros "Fiat-Ballila" e "Alfa-Romeu" esporte de

1750 cc, com sucesso (37). Com a redução constante do preço do petróleo foi abandonado o uso do gasogênio. Na segunda guerra mundial, na década de 40, o gasogênio foi muito empregado, suas instalações desenvolvidas e muitos trabalhos técnicos foram executados e escritos sobre os sistemas de gaseificação para fins automotivos.

No Brasil, em 1940, a falta absoluta do petróleo conduziu à criação da Comissão Nacional do Gasogênio, destinada a incrementar o uso de fabricação e a elaboração das normas técnicas para o uso do gasogênio em veículos automotivos. Em 1945, no término da segunda guerra mundial existiam no país, cerca de 20.000 veículos a gás pobre (36). Após este período volta a circular o petróleo com os preços cada vez mais baixos e o uso do gasogênio é novamente abandonado.

Após a crise do petróleo de 1973 retornam novamente os estudos e pesquisas para o uso do gasogênio. Durante a década de 70 instalam-se no país cerca de 60 fabricantes de gaseificadores; devido à recessão, hoje restam no país cerca de 10 indústrias de gasogênio (43).

As pesquisas de gasogênio para usos rurais, a partir da década de 80 estão sendo coordenadas pela EMBRATER. Foram feitos progressos nesta área com o projeto e construção de gasogênios rústicos de alvenaria destinados ao uso rural (31) - (7). O protótipo desenvolvido nesta pesquisa insere-se nesta direção e é destinado a aplicações rurais nas condições do Nordeste brasileiro (16).

2.2. Combustíveis dos gasogênios

As matérias primas mais indicadas para a gaseificação, empregada em motores são: a madeira, o carvão vegetal e os derivados de ambos. A madeira seca apresenta geralmente a seguinte composição típica ponderal:

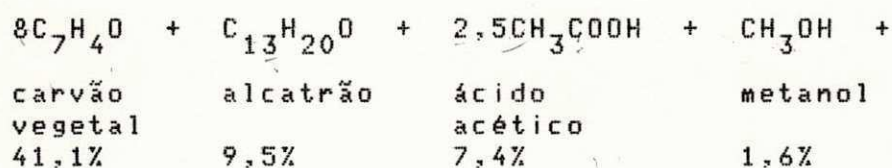
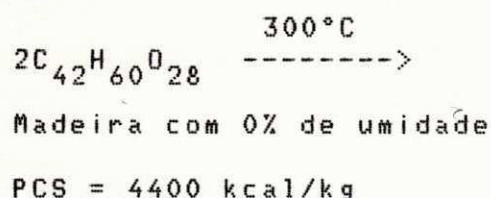
C	49,0	± 1,0%
H ₂	6,10	± 0,1%
O ₂	42,5 a 44,6%	
N ₂	0,1 a 0,3%	
Cinzas	0,2 a 1,0%	

A umidade é fator negativo na obtenção de um combustível gasoso, obtido da madeira. A umidade baixa o poder calorífico do combustível e pode ser obtido conforme a equação (37):

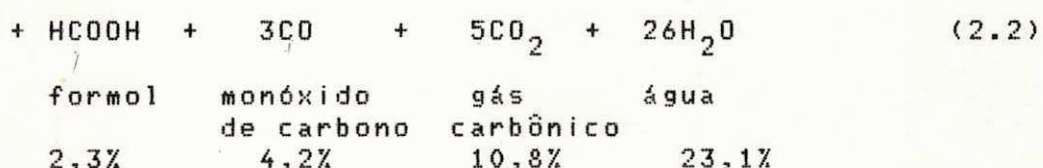
$$H = 4400 - 50 \times H_2O\% \text{ kcal/kg} \quad (2.1)$$

É desejável que o teor de umidade da madeira situe-se entre 5 a 8%, com mais de 30% de umidade, o gasogênio deixa de funcionar. Com o uso da Equação 2.1 obtém-se 4150 kcal/kg para 5% de umidade e um valor de 2900 kcal/kg para 30% de umidade.

A madeira transforma-se em carvão e em outros compostos, conforme a Equação a seguir (41).



PCS = 7500 kcal/kg



O carvão é um dos produtos da reação de carbonização da madeira com um poder calorífico superior de 7500 kcal/kg. Tanto para a madeira como para o carvão a umidade é um fator negativo, e deve ser a menor possível; a umidade deve ser menor que 8%, e em quantidades maiores, o gaseificador funciona mal ou deixa de gerar combustível.

Tanto para a madeira, como para o carvão, a granulometria e a densidade são fatores que influenciam nas regiões do gasogênio. As dimensões da madeira devem ficar entre 2,50 cm e 5,00 cm, e a do carvão entre 1,25 cm e 2,60 cm. Granulometrias não homogêneas podem provocar vazios na zona de redução e por conseguinte não haverá geração satisfatória de combustível (1). A densidade deve ser a maior possível, tanto para a madeira, como para o carvão vegetal. São desejáveis madeiras de grande densidade, tais como, a jurema preta e a catingueira, e os carvões obtidos destas madeiras são também densos.

Está sendo cada vez mais usado o briquete de carvão vegetal, que é um aglomerado de alta densidade, alto poder calorífico e boa resistência mecânica, e por estas razões os briquetes são muito indicados para motores. Na Europa e nos países desenvolvidos foram amplamente industrializados processos de briquetagem, tanto do carvão vegetal, como do mineral. Estes são fabricados em vários padrões e vendidos até em supermercados. A briquetagem traria as seguintes vantagens:

- padronização do combustível a ser gaseificado, favorecendo o funcionamento dos gaseificadores no sentido de obterem-se gases com composição mais uniforme e com produção mais regular;
- aproveitamento dos finos de carvão mineral e vegetal, e dos resíduos de madeira; os quais normalmente, na sua maioria, são desperdiçados;
- maior capacidade dos gaseificadores, abrindo novos campos para a sua utilização, principalmente nos transportes;
- maior desenvolvimento industrial e científico no campo de gaseificação de combustíveis sólidos (4).

2.3. Reações químicas nos gasogênios

As reações químicas que ocorrem durante os processos de gaseificação de combustíveis sólidos são reações de oxirredução, envolvendo fases sólidas e gasosas, ou sejam, sistemas heterogêneos. A gaseificação envolve dois processos: um físico e um químico (2).

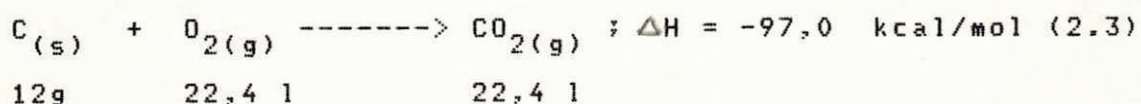
O processo físico consiste no transporte dos reagentes para zonas de reações que é a condição necessária para que as reações químicas ocorram. Nos gaseificadores esta condição é

crítica e, vazios no interior do carvão ou da madeira diminuem drasticamente as reações. As reações que ocorrem na gaseificação envolvem fenômenos de condução, convecção e radiação de calor. As reações são influenciadas pela superfície de contato que dependem da concentração dos reagentes, tamanho e empacotamento das partículas de madeira ou carvão, temperatura e pressão do sistema (1).

No interior do gaseificador existem quatro zonas: zona de combustão, zona de gaseificação, zona de destilação destrutiva e zona de desidratação.

2.3.1. Zona de combustão

Zona de combustão é a região onde ocorre a oxidação do carbono, primeira reação do gaseificador, e a passagem de água contida no ar atmosférico de vapor úmido para vapor superaquecido. Esta reação é exotérmica e responsável pelo gradiente térmico do sistema, as temperaturas nesta zona variam de 1000 a 1500°C e devem situar-se em torno de 1300°C. Segue abaixo a Equação química da combustão do carbono.



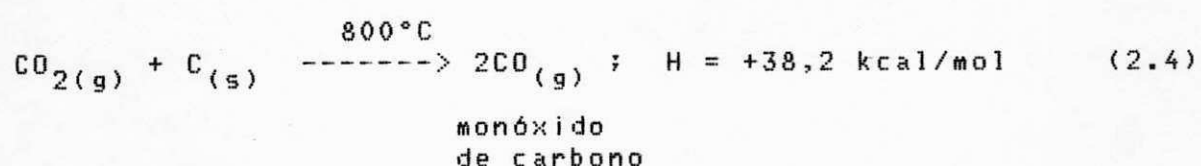
Como o agente oxidante empregado na prática é o ar e não oxigênio puro, o nitrogênio presente em 78,1% do ar atmosférico diluirá os gases produzidos, baixando o poder calorífico da mistura gasosa obtida. Para cada mol de O₂, o N₂ está presente com 3,76 moles, o que significará 3,76 x 22,4 l = 84,224 l; isto significa que na combustão de um mol

de carbono (12g), os 22,4 l de O_2 estão acompanhados de 84,224 l de N_2 que se transforma em uma "bucha" de 51% em volume de gás não combustível. A zona de oxidação tem uma espessura aproximadamente de 10 a 15 cm (36 - 37).

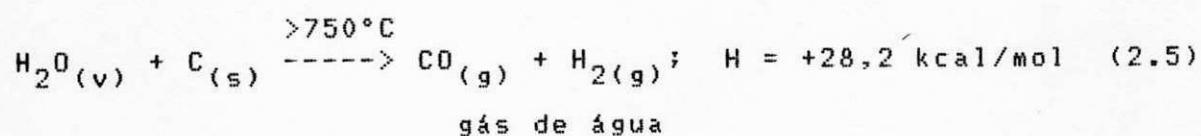
2.3.2. Zona de gaseificação

A zona de gaseificação sucede à zona de oxidação e caracteriza-se pela redução do $H_2O(g)$ e do $CO_2(g)$ pelo carvão ao rubro a uma temperatura acima de $800^\circ C$. Estas reações são endotérmicas, e o calor necessário provém da zona de oxidação. Esta zona tem uma espessura em torno de 20 cm e a temperatura situa-se numa faixa de 700 a $1000^\circ C$. Dá-se também nesta zona a reação do hidrogênio com o carvão ao rubro, formando-se o metano, numa reação de oxidação. As reações fundamentais que ocorrem nesta zona são as seguintes:

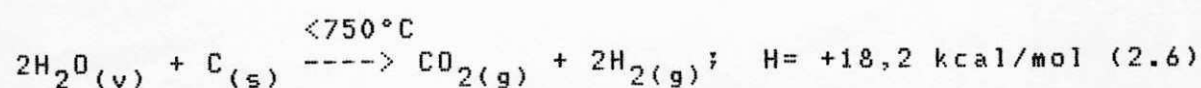
1 . Reação de Boudouard



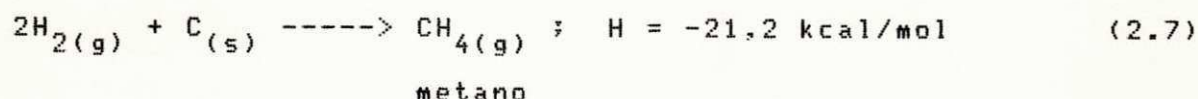
2 . Reação do gás de água



3 .



4 . Reação de formação do Metano



A reação de Boudouard é a mais importante nos gasogênios geradores de gás pobre, tendo em vista que o monóxido de carbono (CO) tem uma participação em volume de 28 a 31%. A reação do gás de água é a segunda mais importante, em razão do hidrogênio ter uma participação volumétrica, em torno de 5 a 10%. O metano participa com apenas 1 a 2%.

A terceira reação em gaseificadores que possuam um isolamento térmico adequado com temperaturas da ordem de 1500°C na zona de combustão e mais de 900°C na zona de gaseificação, é praticamente desprezível; isto é muito importante, pois irá ocasionar uma menor taxa de CO₂ na mistura gasosa resultante.

A reação de "SHIFT" (CO + H₂O --> CO₂ + 2H₂) só ocorre em presença de um catalisador à base de ferro, e este não está geralmente presente nas zonas de reação, contidas no material refratário que reveste o gaseificador (35).

2.3.3. Zona de destilação destrutiva

As temperaturas nesta zona, onde se realiza a destilação do alcatrão e ácidos pirolenhosos está em torno de 550°C. É a região de carvoejamento; os tiços e a madeira perdem o alcatrão e pirolenhosos e o carvão perde o alcatrão residual (26).

Os produtos da pirólise são os seguintes:

- **ácido pirolenhoso:** solução aquosa de coloração marrom, com vários componentes, a saber: ácido acético, metanol, alcatrão solúvel e outros constituintes em menores quantidades.
- **alcatrão insolúvel:** produto de coloração negra, mais denso e viscoso, que se separa do anterior, por gravidade. É um composto de caráter fenólico, contendo ácidos orgânicos, compostos oxigenados e hidrocarbonetos aromáticos de cadeia pesada.

2.3.4. Zona de desidratação

A zona de desidratação é a região do gaseificador com temperatura em torno de 100 a 200°C, onde os materiais carbonáceos perdem toda a água.

Em resumo pode-se apresentar as zonas referidas acima como segue:

CARVÃO/MADEIRA	
ZONA DE DESIDRATAÇÃO	Perda de $H_2O_{(v)}$
= 100 - 200°C	
ZONA DE PIROLISE	Perda de Alcatrão e
= 200 - 400°C	Ácidos Pirolenhosos
ZONA DE GASEIFICAÇÃO	$CO_2 + C \rightarrow 2CO$
= 800 - 1000°C	$H_2O + C \rightarrow CO + H_2$
	$2H_2O + C \rightarrow CO_2 + 2H_2$
	$2H_2 + C \rightarrow CH_4$
O_2	
AR \rightarrow	ZONA DE COMBUSTÃO
	$C + O_2 \rightarrow CO_2$
N_2	= 1300 - 1600°C

2.4. Gaseificadores

Os Gaseificadores são classificados de várias formas a saber:

- Quanto ao Comburente;
- Quanto à fonte de energia para o processo de gaseificação;
- Quanto à pressão de operação do gaseificador;
- Quanto ao movimento relativo, corrente de gases versus corrente do combustível no gaseificador;
- Quanto ao tipo de leito do gaseificador;
- Quanto ao tipo de grelhas.

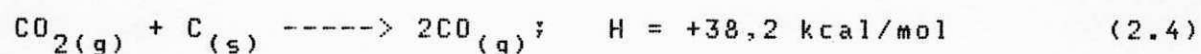
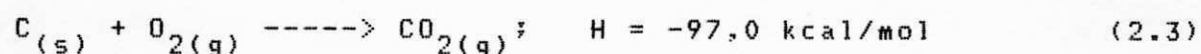
2.4.1. Comburente

O comburente é o agente da gaseificação que pode ser o oxigênio, o ar, o vapor de água, o vapor de água e oxigênio e o vapor de água e o ar. O oxigênio como comburente não será discutido aqui, em virtude do seu alto custo e não ser empregado nos gasogênios mais comuns. O emprego do oxigênio puro implicaria em obter-se quase que exclusivamente o monóxido de carbono com um poder calorífico inferior de 2857 kcal/Nm^3 . O tipo de comburente determina três tipos comuns de gases: gás de ar, gás de água e gás misto.

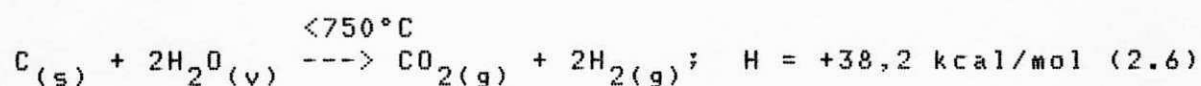
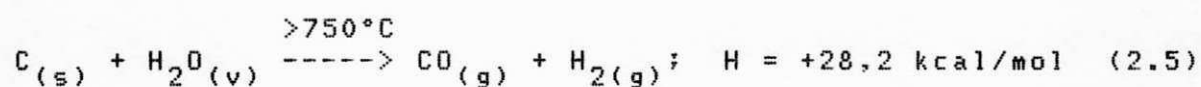
2.4.1.1. Gás de ar

O gás de ar ou de gerador é obtido pela passagem do ar sobre o carvão ao rubro. Forma-se o CO_2 , o qual, ao atravessar

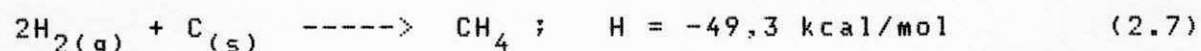
a camada de carvão ao rubro (zona de gaseificação ou redução), transforma-se em CO. As Equações já citadas são as seguintes:



A umidade existente no ar será craqueada na zona de redução, conforme as equações:



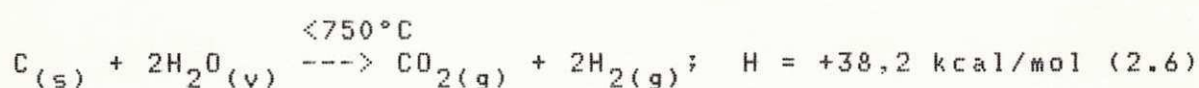
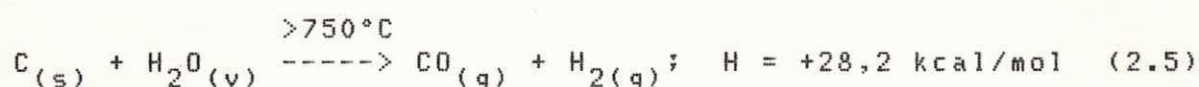
O Hidrogênio obtido encontrando o carvão ao rubro forma o gás metano, conforme a equação:



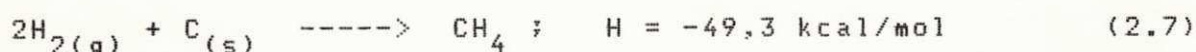
O gás combustível obtido é uma mistura de CO (28 a 30%), H₂ (10 a 15%), CH₄ (1 a 2%) com as substâncias não combustíveis, N₂ (50 a 55%) e CO₂ (4 - 8%). Este gás é pois uma mistura de CO, H₂, CH₄, N₂ e CO₂; é chamado também de gás pobre devido ser o combustível gasoso comercial de menor poder calorífico (1.000 - 1.200 kcal/Nm³). O baixo poder calorífico é devido ao grande volume do gás inerte N₂, que o acompanha, na proporção de 1 volume de CO para 2 de N₂ (39).

2.4.1.2. Gás de água

Obtém-se pela passagem do vapor de água sobre o carvão ao rubro. As reações fundamentais são duas:



Ocorre também em pequenas proporções (1 - 3%) a formação do gás metano, conforme a equação a seguir:



O poder calorífico superior do gás de água é em torno de 2.800 kcal/Nm³.

A composição média do gás de água é a seguinte:

H ₂	-----	51,28%
CO	-----	40,74%
CO ₂	-----	5,32%
CH ₄	-----	1,10%
Outros	-----	1,56%

Os gaseificadores de gás de água sofreram grande aperfeiçoamento nos últimos anos. A Companhia Energética de São Paulo - CESP projetou e construiu um gaseificador eletroquímico na Usina de Corumbataí; em Rio Claro, São Paulo (8, 9

e 28).

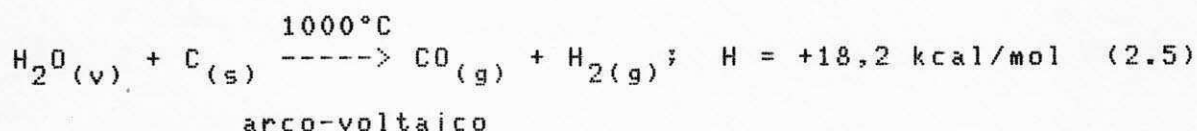
2.4.1.3. Gás misto

Obtém-se pela passagem simultânea do ar e vapor superaquecido sobre o carvão ao rubro. Realizam-se aqui conjuntamente as reações do gás de ar e de água. O poder calorífico do gás misto é em torno de 1500 kcal/Nm³. A experiência mostra que a proporção ideal de água/carvão é de 250g de vapor por quilograma de carvão consumido (6).

2.4.2. Fonte de energia para o processo de gaseificação

A energia para o processo de gaseificação pode ser obtida pela combustão parcial do próprio combustível, ou provir de outra fonte, que não o próprio combustível; no primeiro caso o gaseificador denomina-se autotérmico e no segundo caso alotérmico.

O gaseificador autotérmico é usualmente empregado para gerar o gás pobre, enquanto que o gaseificador alotérmico é empregado para a obtenção quase que exclusiva do gás de água, conforme a reação anteriormente citada:



A Companhia Energética de São Paulo - CESP desenvolveu junto à Usina Hidroelétrica de Corumbataí um gaseificador alotérmico, destinado a obtenção do gás de água que é transformado em álcool metílico (8 - 9).

2.4.3. Pressão de operação do gaseificador

A pressão é um fator favorável às reações de gaseificação, tendo em vista a mesma favorecer o contato íntimo das moléculas.

Os gaseificadores classificam-se quanto a pressão em:

- Gaseificadores de alta pressão. Estes trabalham com pressões acima da atmosférica. O gaseificador alemão Lurgi opera com pressões entre 25 a 30 atm. O gaseificador alemão Winkler opera a 10 atm.
- Gaseificadores de baixa pressão. Operam com pressões próximas da atmosférica, com pressão positiva (um pouco acima da atmosférica) ou negativa (um pouco abaixo da atmosférica). O Gaseificador tipo Davy industrial que funcionou no passado operou com pressão atmosférica (45 - 46).

2.4.4. Movimento relativo corrente de gases versus corrente do combustível no gaseificador

Quanto ao movimento dentro do reator, os gasogênios são dos seguintes tipos: Contracorrente, concorrente e transversal.

2.4.4.1. Gaseificadores de fluxo contracorrente (up draft)

Os gaseificadores de fluxo contracorrente são instalações especiais que consistem de um poço vertical para onde, de cima carrega-se o combustível, e de baixo, insufla-se

o ar, oxigênio, vapor de água ou as misturas destas substâncias, em função da composição dos gases insuflados, obtém-se o gás de ar, o de água, o misto e outros (17) (Figura 1).

Os gaseificadores contracorrentes são os mais antigos e são em geral de fácil manutenção. O processo de gaseificação contracorrente consiste de: o combustível, carvão ou madeira sofre na primeira fase, dita zona de secagem, situada na parte superior do gasificador a desidratação total em temperaturas de 100 a 200°C; em seguida o combustível desidratado desce para a zona inferior, dita de pirólise destrutiva (destilação destrutiva ou desvolatização ou carbonização), em temperaturas de 200 a 400°C, onde a madeira perde o alcatrão e ácidos pirolenhosos, transformando-se em carvão e em se tratando apenas do carvão, este perde o alcatrão residual; em seguida o carvão já seco, desce para à zona de gaseificação, também chamada de redução, onde em temperaturas de 400 a 900°C são gerados os gases combustíveis CO, H₂ e CH₄; Após esta fase, na parte inferior do gasogênio, que é a zona de combustão ou oxidação, dá-se a combustão do carbono em CO₂, em temperaturas de 1000 a 1600°C.

As vantagens do gaseificador contracorrente são:

- Atingir em todas as zonas maiores temperaturas, sendo a transmissão de calor por convecção o fator mais significativo na elevação de temperatura das zonas de pirólise e desidratação.
- O consumo de ar, isto é, o de O₂, nas regiões de gaseificação é menor do que nos sistemas concorrentes. Isto significa um menor consumo de N₂ e como consequência

um maior poder calorífico.

- Como a troca térmica dá-se por contato direto, podem-se utilizar materiais de maior granulometria, de mais fácil e menos onerosa preparação, e ao mesmo tempo permite trabalhar com equipamentos de maior porte e capacidade de produção.
- A umidade não tem tanta influência no funcionamento do gaseificador, uma vez que os gases quentes provenientes das zonas de gaseificação e pirólise promovem a secagem da madeira ou carvão e a água removida não influi nas características dos gases geradores nestas zonas. Podem admitir, carvão ou lenha com um teor de umidade até 20%.
- Os gases saem mais frios do reator, em virtude de trocarem calor nas zonas de pirólise e de desidratação.
- As altas temperaturas na zona de combustão favorecem a redução do vapor de água.
- São de custos mais reduzidos em relação aos outros tipos, de construção mais simples e fácil manutenção.

As desvantagens do gaseificador contracorrente são as seguintes:

- O gás obtido contém altas taxas de água, alcatrão e ácidos pirolenhosos, arraste de cinzas e finos de carvão, implicando num sistema maior de purificação. A taxa de alcatrão no carvão vegetal é muito menor do que na madeira.
- Tem menor poder calorífico (1000 a 1200 kcal/Nm^3) uma vez que o alcatrão não é craqueado, porém, eliminado no sistema de filtragem; mas se o gás não foi filtrado, como

é usado nas cerâmicas, o poder calorífico inferior é superior a 1400 kcal/Nm^3 usando-se madeira.

Os gaseificadores contracorrentes da Siemens e da Lurgi, podem ser considerados como dos mais otimizados no gênero (20, 32 - 38) (Figuras 4 e 5). Foi Siemens quem otimizou o primeiro gaseificador contracorrente em meados do século passado.

O poder calorífico da mistura gasosa, usando carvão, sem injeção de vapor, num sistema contracorrente situa-se entre 1000 a 1200 kcal/Nm^3 e a composição típica é a seguinte (7):

Monóxido de Carbono (CO) - 23 a 28%

Hidrogênio (H_2) - 12 a 15%

Metano (CH_4) - 1 a 2%

Nitrogênio (N_2) - 50 a 55%

Dióxido de Carbono (CO_2) - 4 a 10%

Um quilograma de carvão vegetal produz aproximadamente 4 Nm^3 de gás com o poder calorífico inferior da ordem de 1.200 kcal/Nm^3 , o que significa 4.800 kcal/Nm^3 para cada kg de carvão consumido. O rendimento carvão \Rightarrow gás pode ser determinado como segue:

Combustão de 1kg de carvão vegetal em base seca varia de 6800 a $7200 \text{ kcal/kg} \cong 7000 \text{ kcal}$

1 kg de carvão vegetal \Rightarrow 4 Nm^3 de gás

PCI de 1 Nm³ de gás de carvão vegetal em sistema contracorrente \cong 1200 kcal/Nm³

$$n = (V \times \text{PCI}_{(g)} \times 100) / \text{PCI}_{(c)} \quad (2.8)$$

n = rendimento

v = volume

PCI_(g) = Poder calorífico inferior do gás obtido

PCI_(c) = Poder calorífico inferior do carvão

$$n = (4 \times 1200 \times 100) / 7000 = 68,57\%$$

2.4.4.2. Gaseificação de fluxo concorrente (down draft)

O gaseificador concorrente é mais usado para consumir madeira. Neste tipo de gaseificador, a carga do mesmo modo que no contracorrente é introduzida pelo topo, porém o agente gaseificante é injetado um pouco acima da zona de reação (Figura 2). O gás produzido sai pela parte inferior, sendo comum a existência de um ventilador de sucção da corrente gasosa. O agente gaseificante em se tratando de madeira é geralmente o ar, em lugar da mistura ar + vapor, já que a própria umidade da madeira é suficiente para permitir as reações de gaseificação. Os ácidos pirolenhosos e o alcatrão são craqueados e transformados em gases combustíveis na zona de gaseificação. As vantagens do gaseificador concorrente são as seguintes (5, 11, 13, 18, 25, 27, 29, 45 e 46):

- Maior poder calorífico, em virtude de incorporar os gases craqueados do alcatrão e a umidade da madeira. O

gaseificador concorrente, que opera geralmente com madeira tem um rendimento energético de 80%. 1 kg de madeira com 15% de umidade libera em média $2,4\text{Nm}^3$ de gás com um poder calorífico inferior (PCI) de 1400 kcal/Nm^3 . O PCI da lenha com 15% é igual a 4200 kcal/kg , logo temos:

1 kg de madeira -----> $2,4\text{Nm}^3$ de gás

PCI da madeira = 4200 kcal/kg

PCI de 1Nm^3 de gás de madeira em concorrente = 1400 kcal/Nm^3

. . . $2,4 \times 1400 = 3360\text{ kcal}$ de energia obtida na combustão de 1 kg de madeira

n = rendimento

$\text{PCI}_{(g)}$ = PCI do gás obtido

$\text{PCI}_{(m)}$ = PCI da madeira c/ 20% de umidade

$$n = (\text{PCI}_{(g)} \times 100) / \text{PCI}_{(m)} \quad (2.8)$$

Rendimento: $3360 \times 100 / 4200 = 80\%$

- Em virtude do alcatrão e finos de carvão terem de atravessar a zona de gaseificação, onde também são gaseificados, obtém-se portanto gases de saída mais limpo, o que implica em menores custos no sistema de filtragem.

As desvantagens do gaseificador concorrente são as seguintes (2):

- O gaseificador não admite mais de 15% de umidade. Teores de umidade superiores a 15% determinam um mau funcionamento do gaseificador.
- Pode haver arraste de pirolenhosos com os gases obtidos, principalmente se o gaseificador não tiver uma boa distribuição do ar ao longo do diâmetro da zona de oxidação.
- Maior custo na construção do gasogênio.
- Maior manutenção, em comparação com o contracorrente.

2.4.4.3. Gaseificador de fluxo transversal

O gaseificador de fluxo transversal caracteriza-se por situarem-se na mesma horizontal, a entrada de ar e a saída dos gases; o fluxo é transversal ou cruzado, isto é, o carvão ou madeira segue de cima para baixo, cruzando na parte inferior com o fluxo horizontal - entrada de ar e saída dos gases (Figura 3). Este tipo de tiragem apresenta as seguintes vantagens (12 e 36):

- O alcatrão e a umidade do combustível são craqueados na zona de gaseificação, elevando o poder calorífico do gás obtido. O PCI no caso de empregar-se o carvão, situa-se entre 1200 - 1400 kcal/Nm³.
- Em virtude de o alcatrão ser craqueado, há menores custos no sistema de filtros, pois se obtém em caso de uso de carvão vegetal de boa qualidade um gás praticamente

limpo. Por esta razão este tipo de gaseificador é mais usado em motores de combustão interna, de ciclo Otto ou Diesel.

- Facilidade na manutenção do gasogênio.

As desvantagens deste gasogênio são as seguintes:

- Os teores de umidade da carga não devem ultrapassar de 15%.
- O projeto e construção deste gasogênio é mais complexo do que o contracorrente, sendo muito crítico o projeto da cetilha, em função das zonas de combustão e gaseificação e a retirada das cinzas.

2.4.5. Tipos de leito

Quanto ao leito os gaseificadores podem ser classificados como: fixo, fluidizado e em suspensão.

2.4.5.1. Gaseificador de leito fixo

O gaseificador de leito fixo é todo aquele em que o combustível permanece estacionário nas zonas de combustão e gaseificação. Na realidade nenhum leito é fixo. Nas normas do gasogênio elaboradas pela Secretaria de Tecnologia Industrial é definido: "gaseificador de leito fixo é aquele no qual o combustível sólido é alimentado por uma extremidade e as cinzas são retiradas pela outra" (42).

O rendimento do gaseificador de leito fixo depende da densidade do material carbonáceo introduzido no gaseificador;

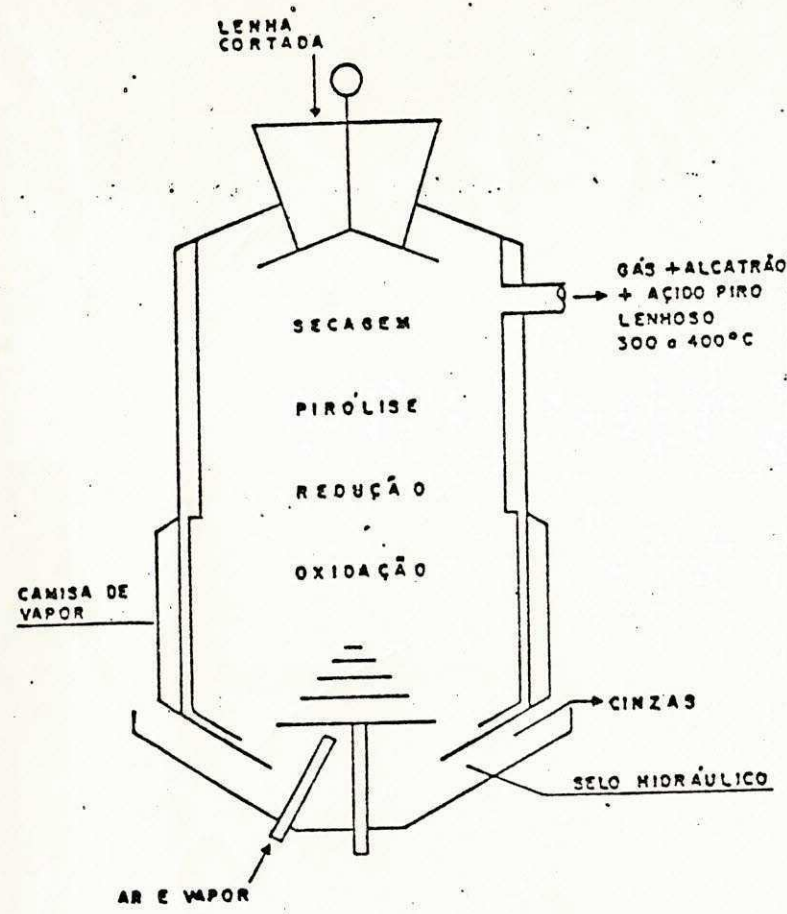


FIGURA 1 : GASEIFICADOR CONTRA-CORRENTE

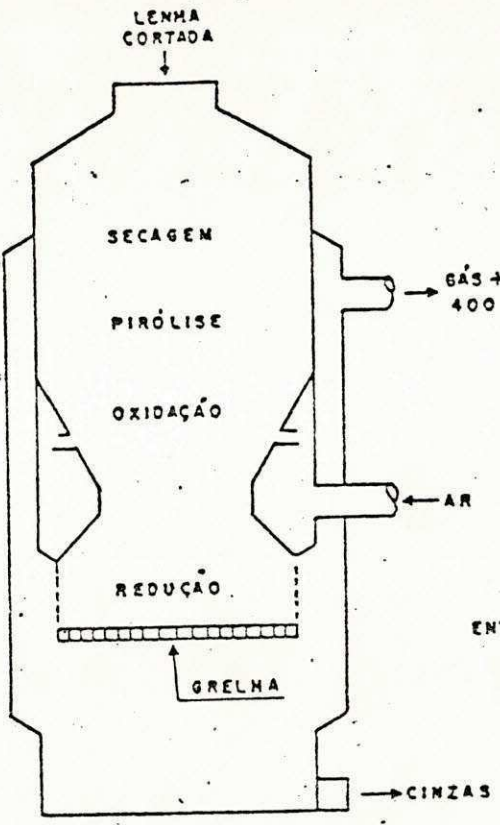


FIGURA 2 : GASEIFICADOR CO-CORRENTE

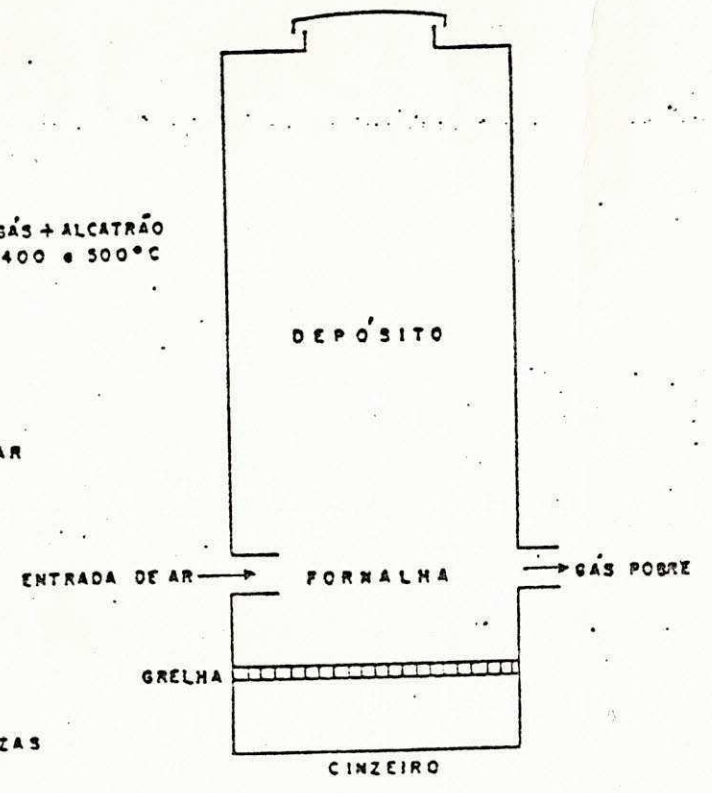


FIGURA 3 : GASEIFICADOR TRANSVERSAL

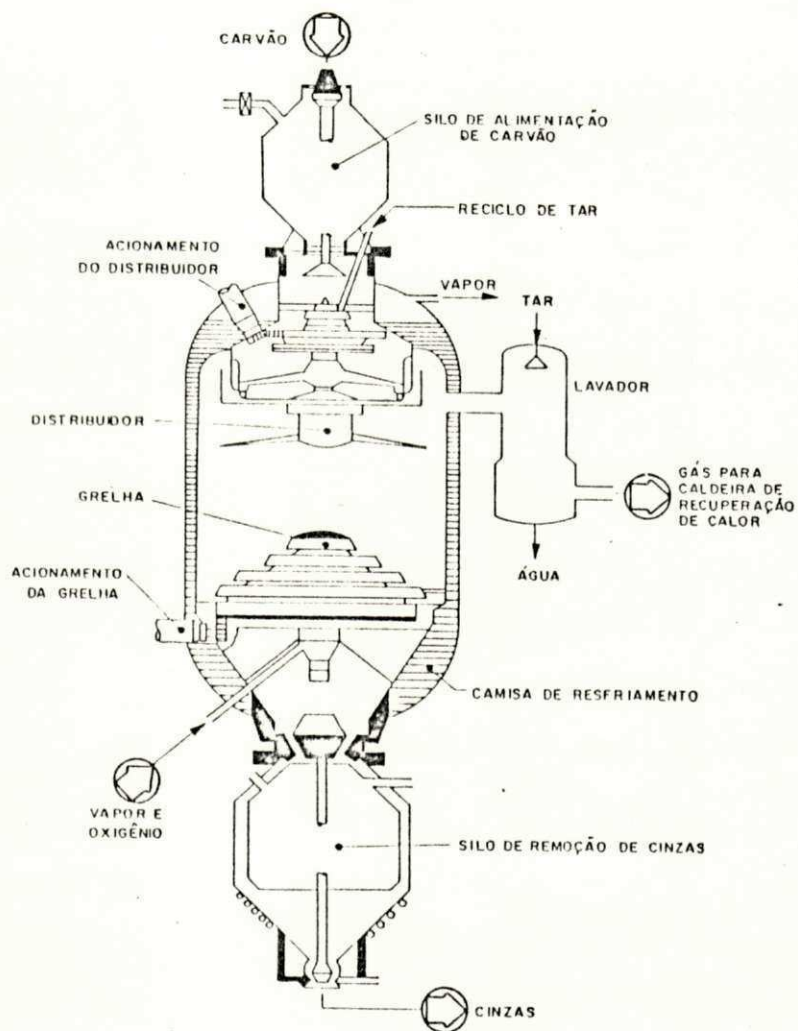


FIGURA 4 : GASEIFICADOR PRESSURIZADO LURGI (LEITO FIXO)

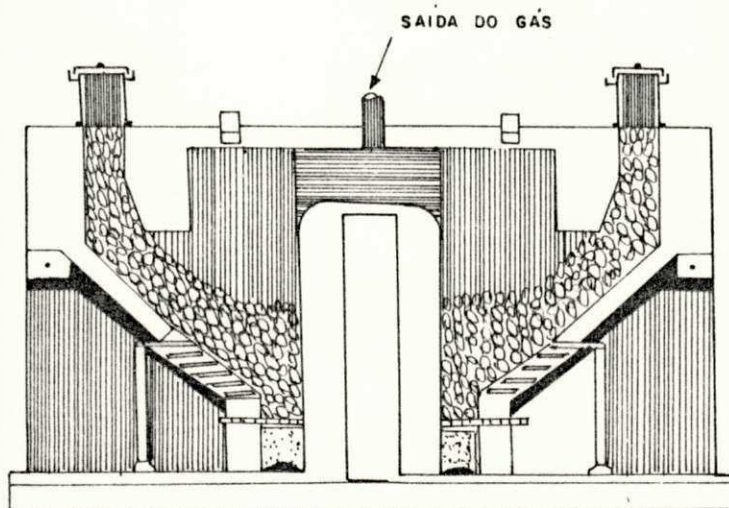


FIGURA 5 : GASOGÊNIO SIEMENS

quanto mais denso maior o rendimento, isto significa que carvões e madeiras pesadas dão mais rendimentos do que os carvões e madeiras leves. O carvão briquetado dá maior rendimento do que o carvão ao natural. Materiais carbonáceos de pequena granulometria, tais como, serragens, bagaço de cana pulverizado, etc., não são operados em gaseificadores de leito fixo, porém sim, em leito fluidizado ou suspensão (35).

2.4.5.2. Gaseificador de leito fluidizado

O gaseificador de leito fluidizado é caracterizado por utilizar um material inerte, em geral areia, misturada à biomassa pulverizada ou de pequena granulometria (carvão pulverizado, lenha ultra picada, pó de serra, palha de arroz, sabugo de milho pulverizado, bagaço de cana pulverizado, etc), em um leito fluidizado e turbulento com o auxílio da injeção de ar (33). A biomassa deve apresentar dimensões bem reduzidas, para permitir uma boa fluidização. A passagem do ar através de um leito em tais condições determina um estado de turbulência elevado e imprime extraordinária velocidade de transferência de calor, favorecendo à reação química de combustão. O leito fluidizado tem a capacidade de fluir, como se fosse um líquido, o que torna o processo contínuo (34-36) (Figura 6).

O gaseificador de leito fluidizado é bastante sofisticado para ser usado em condições rurais, por outro lado é importante assinalar que os resíduos vegetais, tais como, sabugo e palha de milho, palha de arroz e outros resíduos vegetais, são mais importantes como alimentação para os animais.

2.4.5.3. Leito em suspensão

No leito em suspensão, também chamado de leito em corrente fluida, as partículas do combustível de pequena granulometria são misturadas com o agente de gaseificação, e em seguida a mistura é injetada no gaseificador, a matéria vegetal é dosada através do alimentador que se encontra na parte superior do gaseificador e circula dentro do aparelho, para processarem-se a pirólise e a gaseificação (33) (Figura 7). No leito em suspensão há a vantagem de provocar uma íntima mistura entre a matéria vegetal e o ar de gaseificação. Como foi dito para o leito fluidizado, os resíduos vegetais são mais econômicos, se empregados para ração animal, e não como combustíveis.

2.4.6. Grelhas

Grelha é o equipamento que tem como finalidades suportar o leito de combustível, permitir uma boa distribuição da mistura combustível-ar e proporcionar a descarga das cinzas. As grelhas permitem um contato íntimo dos reagentes, evitam a formação de vazios na zona de reação e eliminam as cinzas, que são isolantes térmicos. O carvão mineral tem de 30 a 50% de cinzas; nestes casos o projeto da grelha é essencial. Já a madeira só tem de 1 a 2% de cinzas, não sendo crítico neste caso o projeto das grelhas. Nos gasogênios de pequeno porte, para uso rural, podem-se dispensar a utilização de grelhas.

As grelhas podem ser fixas ou móveis (8). Existem vários modelos de grelhas, podendo ser excêntricas ou não. A

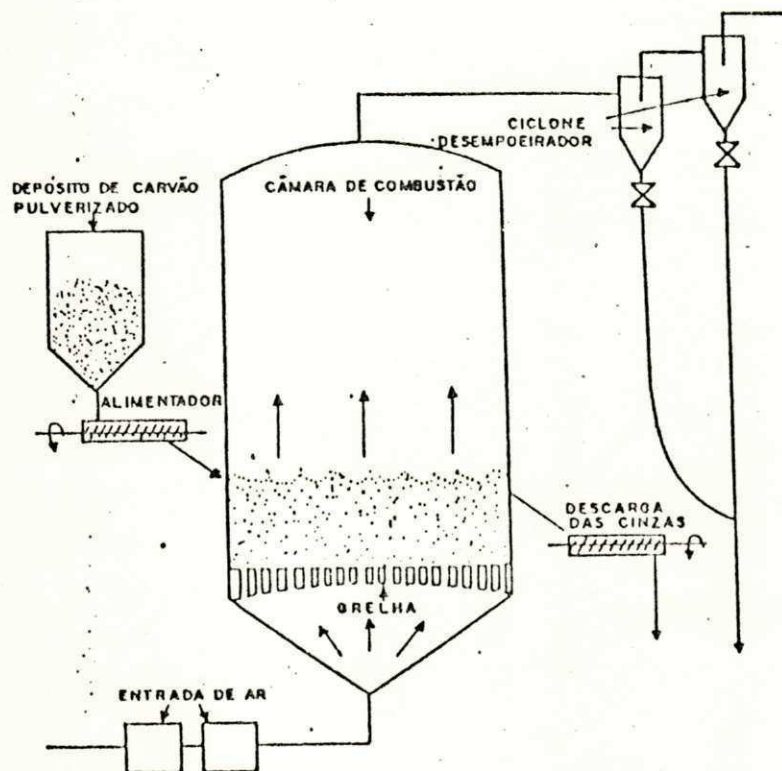


FIGURA 6 : GASEIFICADOR DE LEITO FLUIDIZADO

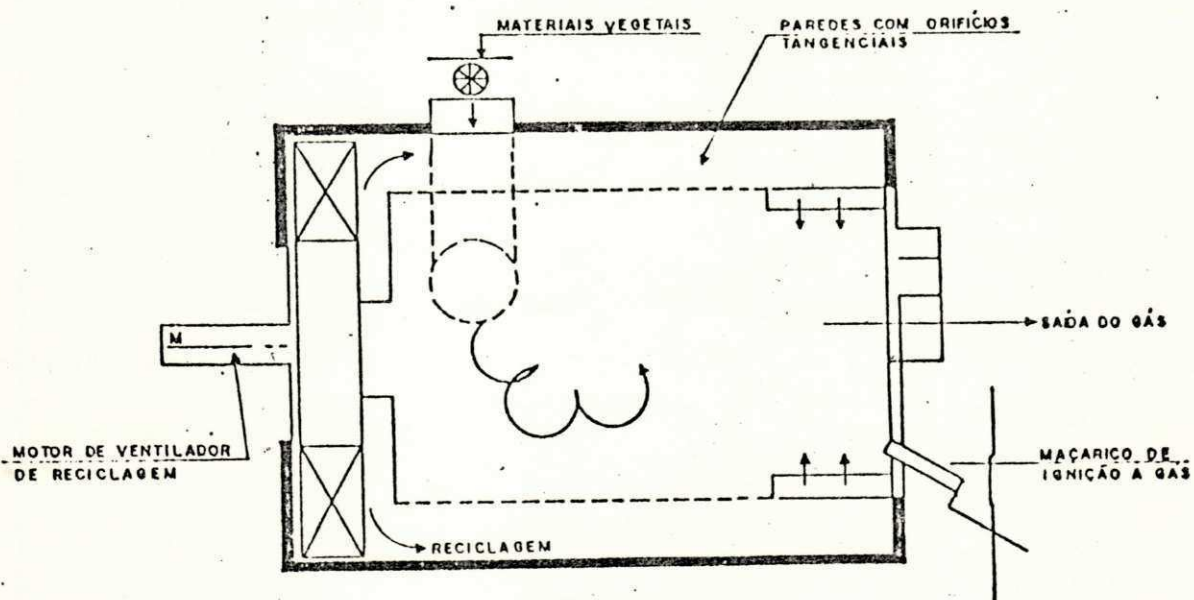


FIGURA 7 : GASEIFICADOR DE LEITO EM SUSPENSÃO

grelha do gaseificador Wellman-Galusha é do tipo móvel e excêntrica, e funciona da seguinte maneira: ao girar lentamente, o espaço entre a parede do gaseificador e as placas da grelha varia continuamente; desta maneira, quando o espaço aumenta, ele se enche de cinzas e quando este espaço diminui, as cinzas são forçadas entre as placas da grelha, caindo no cinzeiro do gaseificador. Eventuais pedaços maiores de cinzas aglomeradas são quebrados pela grelha contra a parede do gaseificador, na área de maior excentricidade e menor espaço (38).

2.5. Segurança

A mistura gasosa gerada no gaseificador apresenta problemas de toxidez e explosividade.

2.5.1. Toxidez

O monóxido de carbono é altamente venenoso, por que reage com a hemoglobina do sangue formando o composto cristalizado, denominado carbohemoglobina, tornando o sangue incapaz de transportar o oxigênio, e por este motivo causa intoxicação, asfixia e morte. A intoxicação dá-se com 0,03% em volume misturado ao ar, com 0,3% em volume causa dores de cabeça e toxidez e com 1% em volume ao ar é mortal. A permanência prolongada numa atmosfera contendo mesmo fracas quantidades de monóxido de carbono, determina anemia (39-41).

Para minimizar os problemas de toxidez são necessários:

- O gasogênio deve estar situado em um galpão aberto e bastante ventilado;
- A chaminé de partida deve estar acima do telhado;
- Controlar os vazamentos, tornando o sistema estanque;
- Quando possível manter um equipamento de detecção de monóxido de carbono.

2.5.2. Explosividade

Dada a mistura no gás pobre do CO_2 e N_2 com o CO e H_2 , o problema de explosão torna-se menor, embora haja possibilidade de explosão no gaseificador e gasômetro. Este problema é minimizado com a utilização de uma válvula de segurança.

2.6. Gasogênio desenvolvido

O presente projeto consta de um gaseificador contracorrente, destinado à irrigação rural para as condições do Nordeste brasileiro. Suas características são as seguintes:

- Gasogênio de pequeno porte, tendo como agente gaseificante o ar e combustível o carvão vegetal, produto barato e encontrado em todas as propriedades rurais;
- Sistema rústico, que pode ser construído com materiais da região;
- Fácil manutenção.

3. SISTEMA E METODO EXPERIMENTAL

3.1. Descrição do sistema

O sistema é descrito como mostram as Figuras 8 e 9.

O gasogênio do projeto compreende as seguintes partes:

1. Gaseificador com cetilha e anexos (Figuras 10, 11 e 12).
2. Trocador de calor de tubos retos - gases versus água e anexos (Figura 13).
3. Gosômetro (Figura 14).
4. Filtro (Figura 15).
5. Ciclone (Figura 16).
6. Motor, bomba de água e anexos (Figura 9).

3.1.1. Gaseificador com cetilha e anexos

3.1.1.1. Gaseificador

O gaseificador de tipo contracorrente é alimentado com carvão vegetal pelo topo e ar na parte inferior por meio de uma cetilha. O gaseificador tem uma capacidade volumétrica de $0,55 \text{ m}^3$, comportando aproximadamente 81 kg de carvão vegetal (3 sacos de aproximadamente 27 kg). A retirada das cinzas é efetuada através de uma abertura existentes em posição oposta á cetilha. O gaseificador apresenta externamente um formato cilíndrico, com 2 m de altura e 1m de diâmetro. Internamente tem um formato oval, apresentando na base um estreitamento de 25cm de diâmetro com 50cm de altura e no topo outro

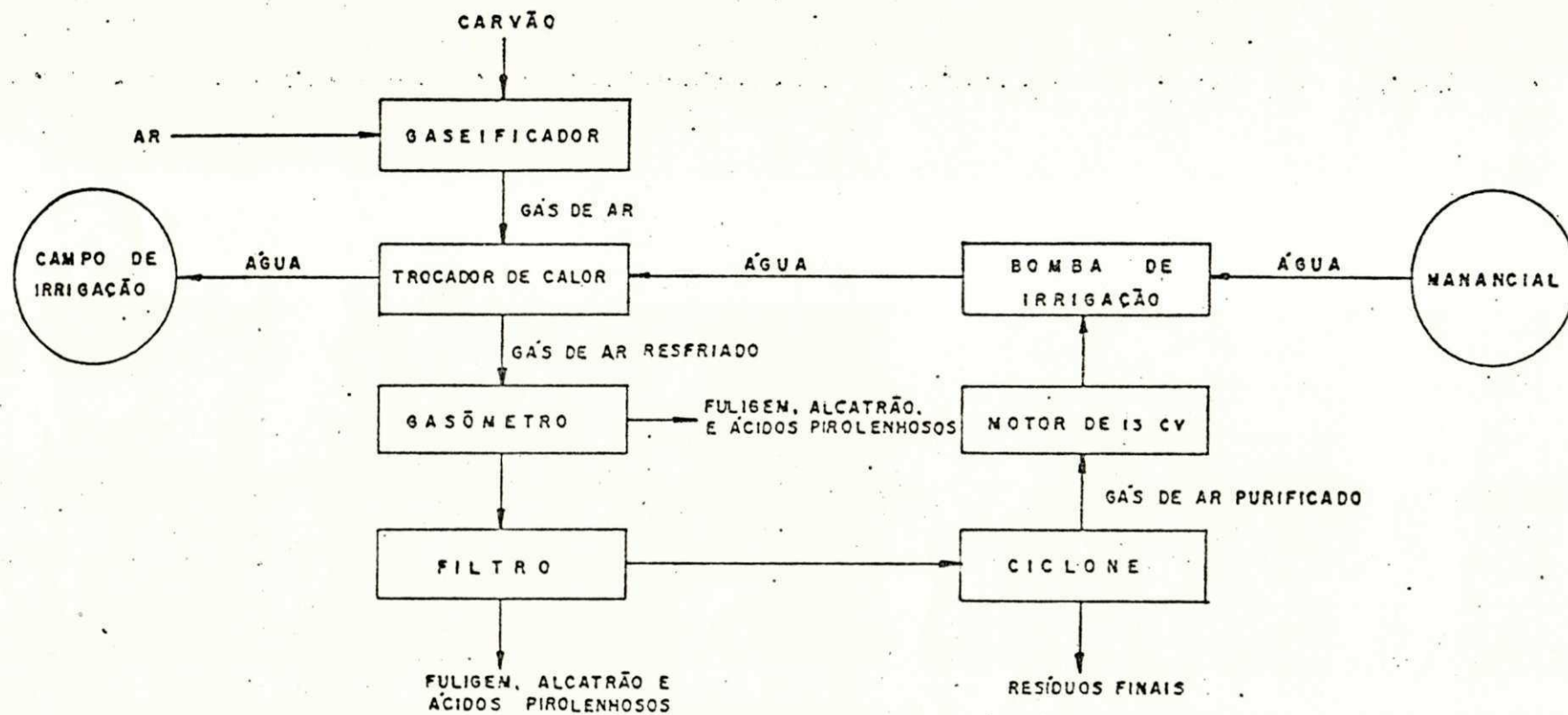


FIGURA 8 : DIAGRAMA DE BLOCO DO SISTEMA

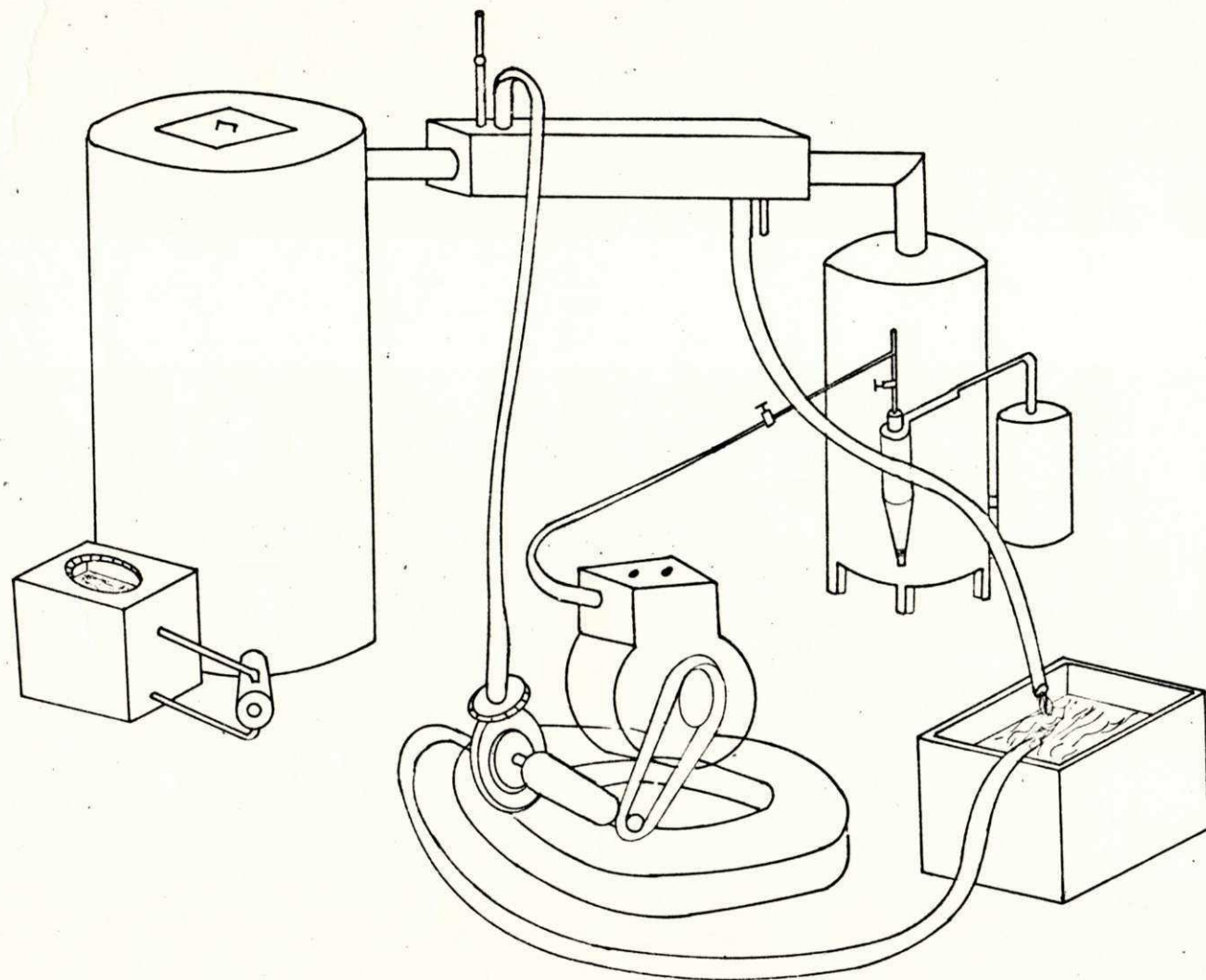


FIGURA 9 : VISTA GERAL DO GASEIFICADOR COM A BOMBA D'AGUA

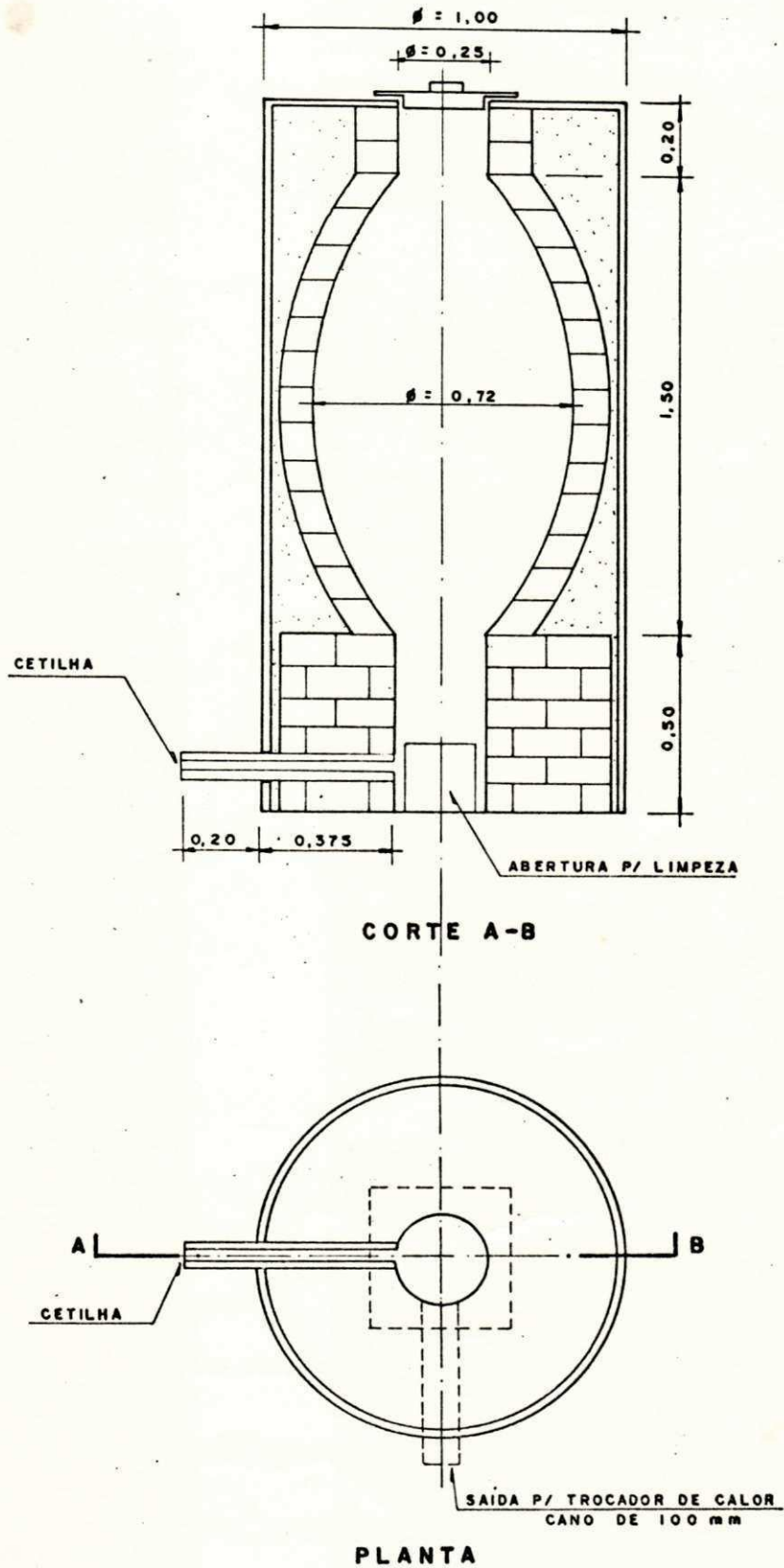


FIGURA 10 : GASEIFICADOR

estreitamento, também de 25cm de diâmetro, com 20cm de altura. O cilindro externo é dividido em dois cilindros de 1m de altura ligados por duas flanges com 24 parafusos de 25,4mm x 6,35mm e distantes um do outro de 16cm. A tampa de abertura de alimentação é quadrada (30cm x 30cm) e fixada por meio de 8 parafusos de 25,4mm x 19,05mm, estando assentado sobre uma junta de borracha de neopreno de 4mm de espessura.

A estrutura interna do gaseificador foi construída com tijolos e argila refratários, constituídos basicamente de carbonato de magnésio ($MgCO_3$), obtidos de uma jazida, no município de Campina Grande. O gaseificador foi revestido com chapas de aço 1020 de 3 mm de espessura. Na construção do gaseificador foram empregados 3 chapas de aço de 2m x 1m, 450 tijolos refratários e 42 galões de argila refratária.

A limpeza é realizada através de uma abertura de 20cm x 20cm; protegida por uma tampa de aço de 4mm de espessura. A abertura superior, com 20cm de diâmetro é bem protegida por uma tampa de aço de 4mm de espessura. Na extremidade superior um tubo de 100mm de diâmetro, de comprimento 0,30m, com inclinação de 7% liga o gaseificador ao trocador de calor. Esta inclinação facilita a purga da água e ácidos pirolenhosos, evitando a corrosão no tubo e seu retorno ao gaseificador.

3.1.1.2. Cetilha

A cetilha é um duto através do qual o oxidante - o ar, atinge a zona de combustão: Constitui um trocador de calor que funciona por convecção natural mediante um termosifão (Figuras

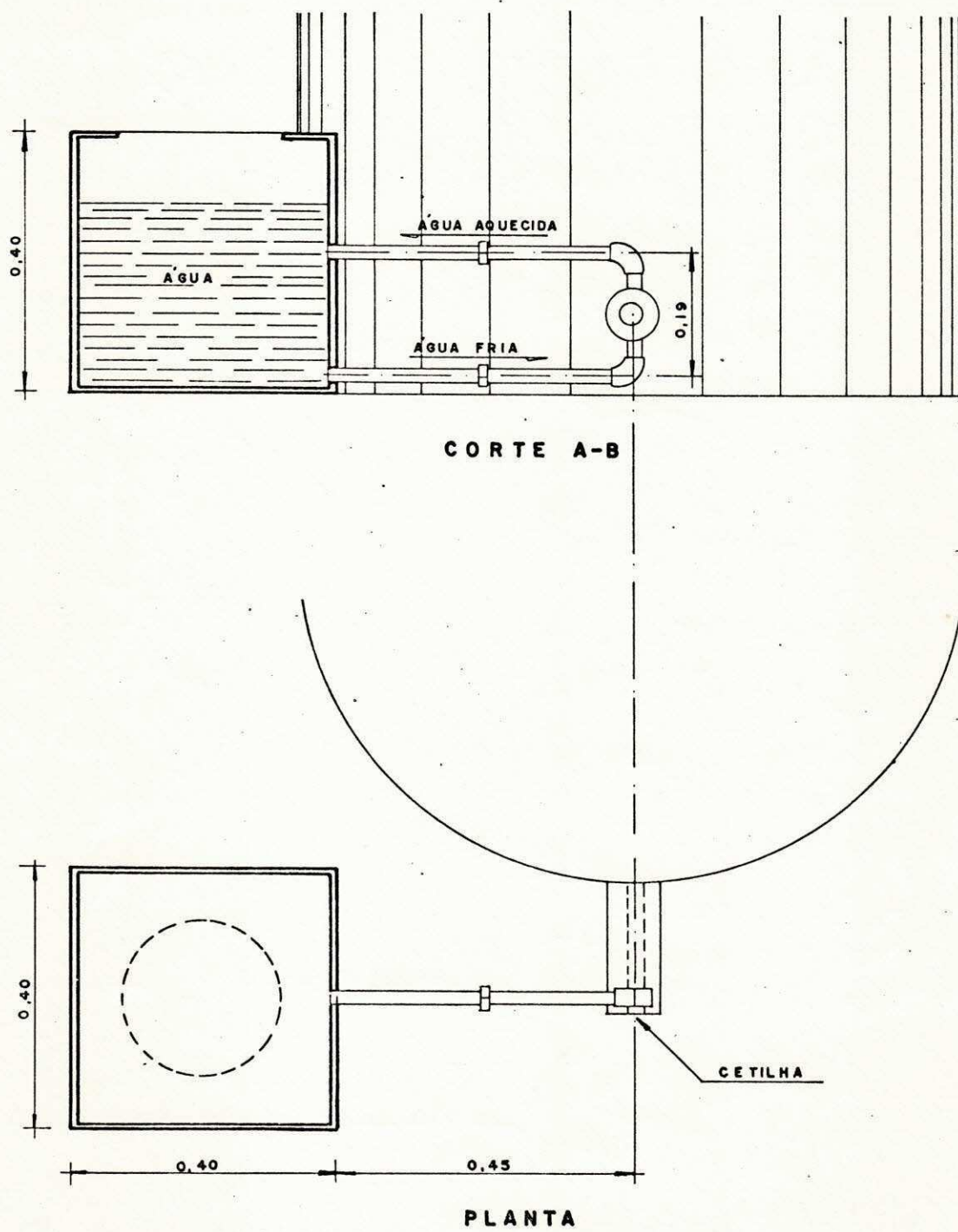


FIGURA II: UNIDADE DE TERMO-SIFÃO FORMADA PELO RESERVATÓRIO DE ÁGUA, CETILHA E TUBULAÇÕES.

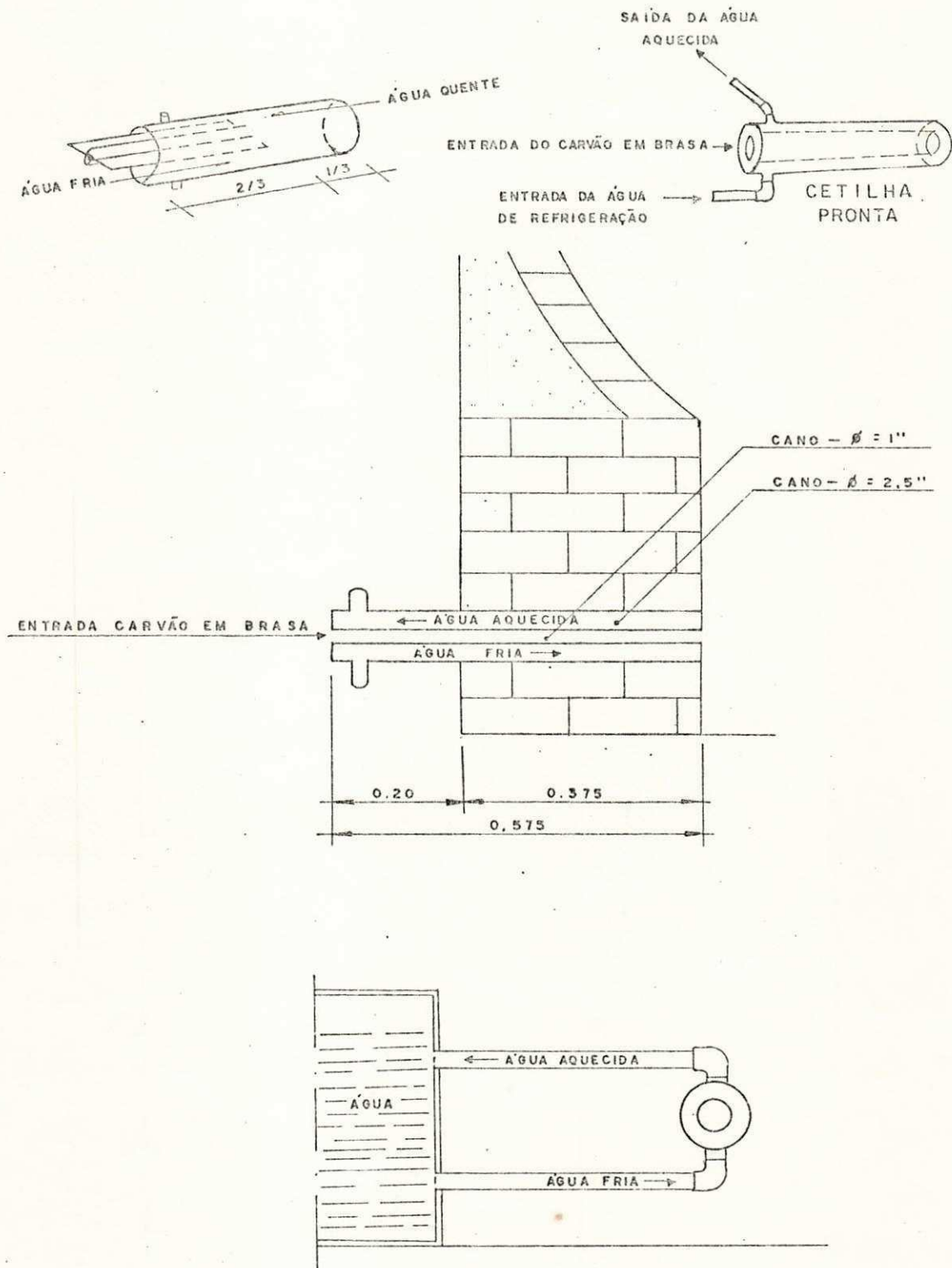


FIGURA 12 : CETILHA

11 e 12).

A cetilha é constituída de dois tubos concêntricos de ferro galvanizado com 0,575m de comprimento. O externo com diâmetro de 63,5mm e o interno de 25,4mm. O tubo interno é soldado ao externo por meio de duas aletas situadas em lados opostos. As aletas têm 38,3cm de comprimento, correspondendo a 2/3 do tubo a partir da extremidade externa. As extremidades do espaço entre os tubos são tapadas e soldadas por meio de arruelas. No tubo externo e alcançando o espaço entre dois tubos são feitas duas aberturas de 25,4mm a superior para a saída da água e a inferior para a entrada da água. A cetilha está 0,375m dentro do gaseificador e 0,20m fora. Um pequeno tanque com chapas de aço 1020 de 3mm de espessura com 0,40m x 0,40m x 0,40m, ligado à cetilha por duas linhas de tubos de 25,4mm possibilita a refrigeração da cetilha por termo-sifão.

3.1.2. Trocador de calor de tubos retos - gases versus água

O trocador de calor é do tipo tubular, os gases escoam por dentro dos tubos e o refrigerante - água escoam por fora dos mesmos. As finalidades do trocador de calor são: (a) baixar a temperatura dos gases para aumentar sua densidade e em consequência elevar o rendimento da combustão do motor e (b) propiciar a condensação da água e pirolenhosos, que serão separados uma parte no próprio trocador e outra parte nas unidades posteriores, constituídas pelo gasômetro, filtro e ciclone. Acoplados ao trocador de calor encontram-se dois termopares, sendo um na entrada e outro na saída, medindo as

temperaturas de entrada e saída dos gases efluentes. A medição das temperaturas é realizada por meio de um termômetro digital de marca World Tron, fabricado pela World Tron Comércio de Instrumentação Ltda, São Paulo, SP, modelo TP 100 conectados aos termopares. Os gases entram no trocador de calor a uma temperatura da ordem de 35°C no início da operação, em virtude da altura da camada de desidratação.

O trocador de calor tem um formato externo retangular, com dimensões de 1,20m de comprimento, 0,15m de largura e 0,20m de altura. Internamente existem 12 tubos retos de diâmetro de 12,7mm com 1m de comprimento; no interior dos quais escoam os gases e exteriormente, a água de refrigeração (figura 13).

O trocador de calor tem duas tubulações anexas, sendo uma para a chaminé de partida e outra para purga.

A tubulação da chaminé de partida tem duas finalidades: controle dos fumos provenientes do gaseificador e a segurança. Quando os fumos tornam-se transparentes é sinal da presença do CO e H_2 . A altura da chaminé de partida permite que a fumaça que contém o gás tóxico CO seja arrastado para fora das instalações, não pondo em risco a vida dos operadores. Esta tubulação tem 2,54 mm de diâmetro e 0,20m de altura.

A tubulação de purga encontra-se na parte final e inferior do trocador de calor e tem por finalidade a eliminação da água e pirolenhosos que ai se acumulam. Esta tubulação tem 25,4mm de diâmetro e 0,20mm de comprimento.

O trocador de calor está ligado ao gasômetro por uma tubulação em forma de L de 100mm diâmetro com o comprimento total de 0,75m (0,40m na horizontal e 0,35m na vertical).

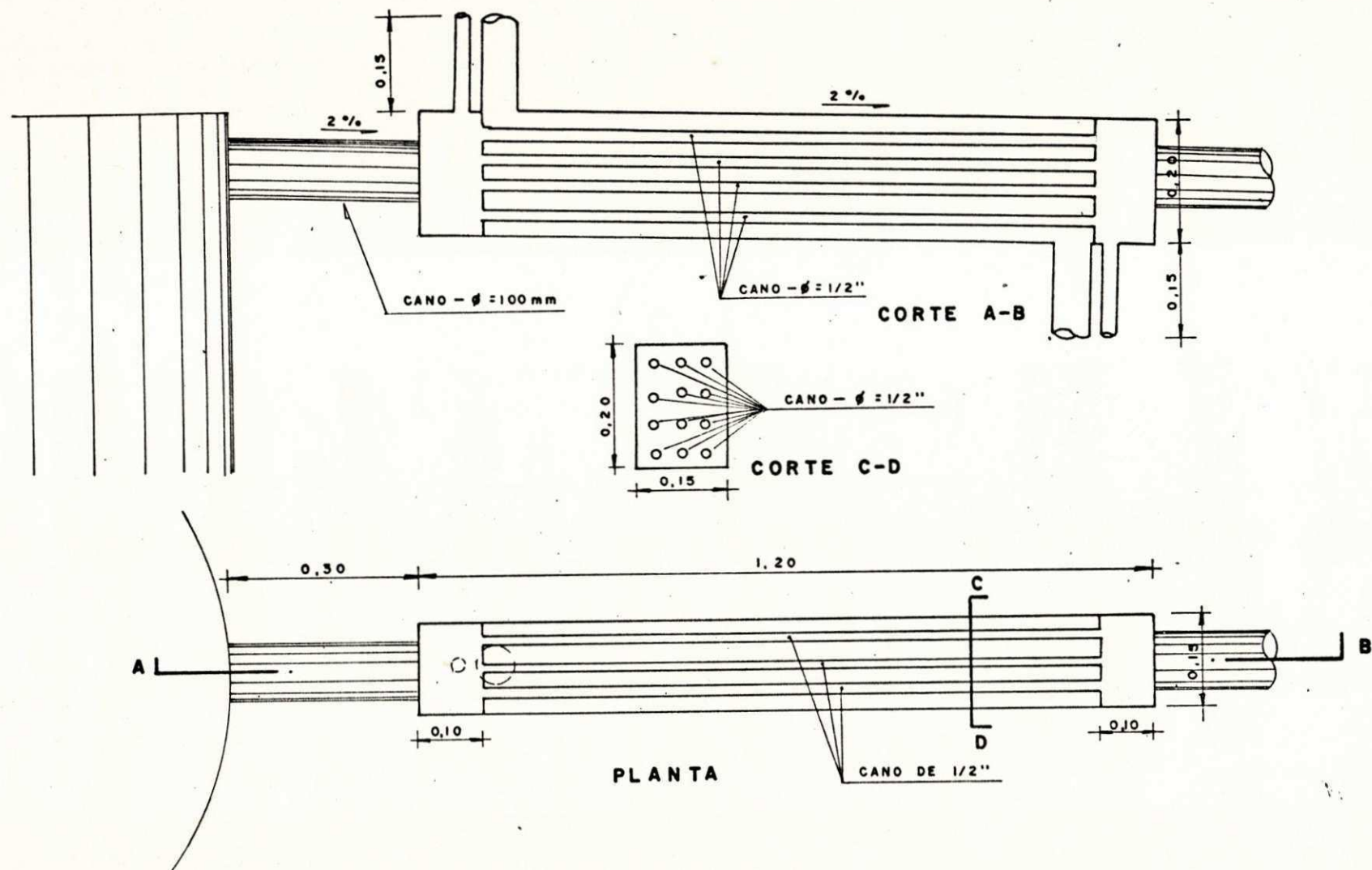


FIGURA 13: TROCADOR DE CALOR

3.1.3. Gasômetro

O gasômetro é um reservatório de aço de forma cilíndrica tendo por finalidade estocar os gases e condensar a maior parte (70%) da água e pirolenhosos, que são purgados pela parte inferior através de um bujão de 100mm de diâmetro. A espessura da chapa é de 5mm, seu volume é de $0,29m^3$, com altura total de 1,298m e diâmetro de 0,566m (Figura 14). O gasômetro está ligado ao filtro por um tubo galvanizado de 25,4mm de diâmetro e comprimento 0,12m. (Figura 14)

3.1.4. Filtro

O filtro tem por finalidade reter partículas sólidas, água e alcatrão, que não foram retidos pelo gasômetro. Externamente é um cilindro de aço de 3 mm de espessura, com diâmetro externo de 200mm e altura de 0,37m. Possui internamente uma tela perfurada com 160mm de diâmetro e 0,35m da altura, revestida por um saco de tecido de algodão, que possui um elástico na boca. Foram confeccionados 3 sacos para permitir uma substituição em cada 24 horas de funcionamento do gaseificador. O filtro está ligado ao ciclone por uma tubulação em forma de L com diâmetro de 25,4mm, tendo na parte vertical 0,13m e na horizontal 0,47m. (Figura 15)

3.1.5. Ciclone (Figura 16)

O ciclone é o último elemento do sistema de filtragem do gasogênio. Ele retém as impurezas, em tonro de 1 a 2%, que não foram retidas pelo filtro, possibilitando a obtenção dos

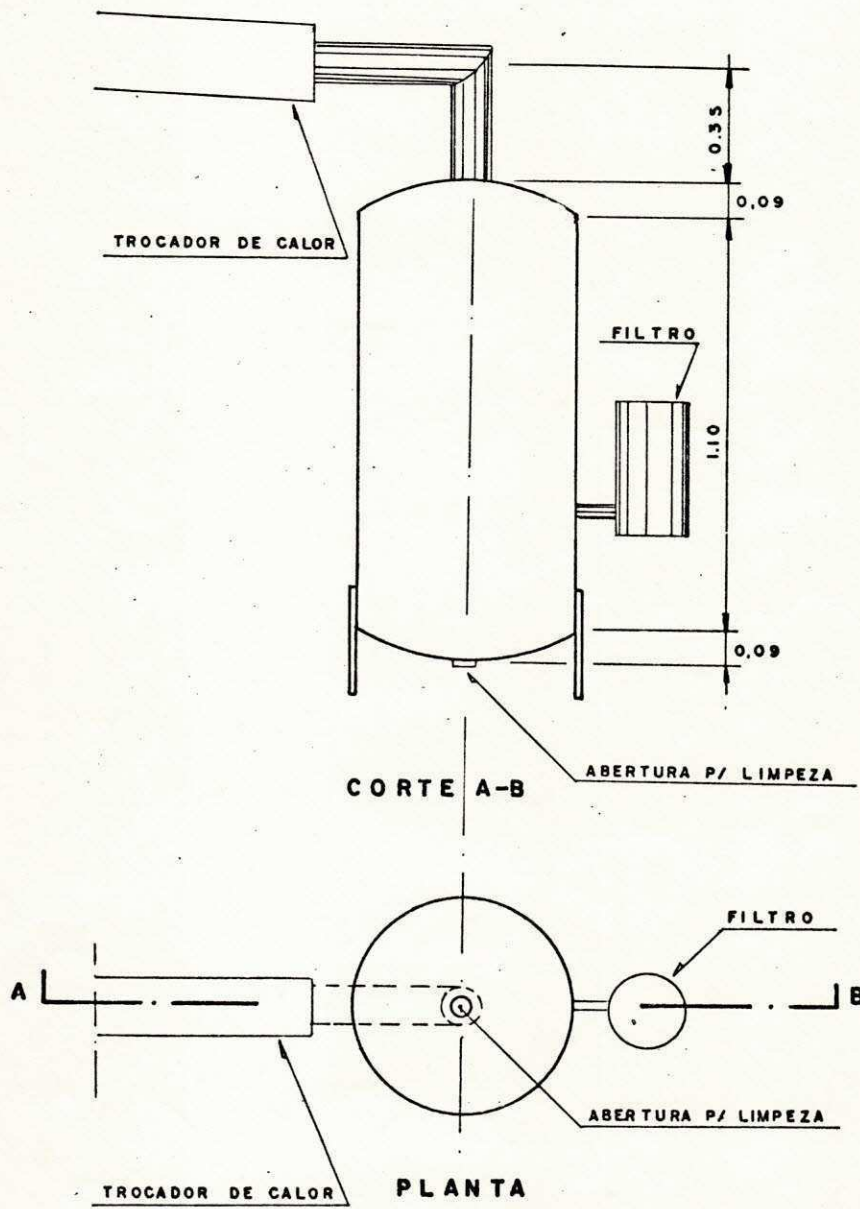


FIGURA 14: GASÔMETRO E TUBULAÇÕES ANEXAS

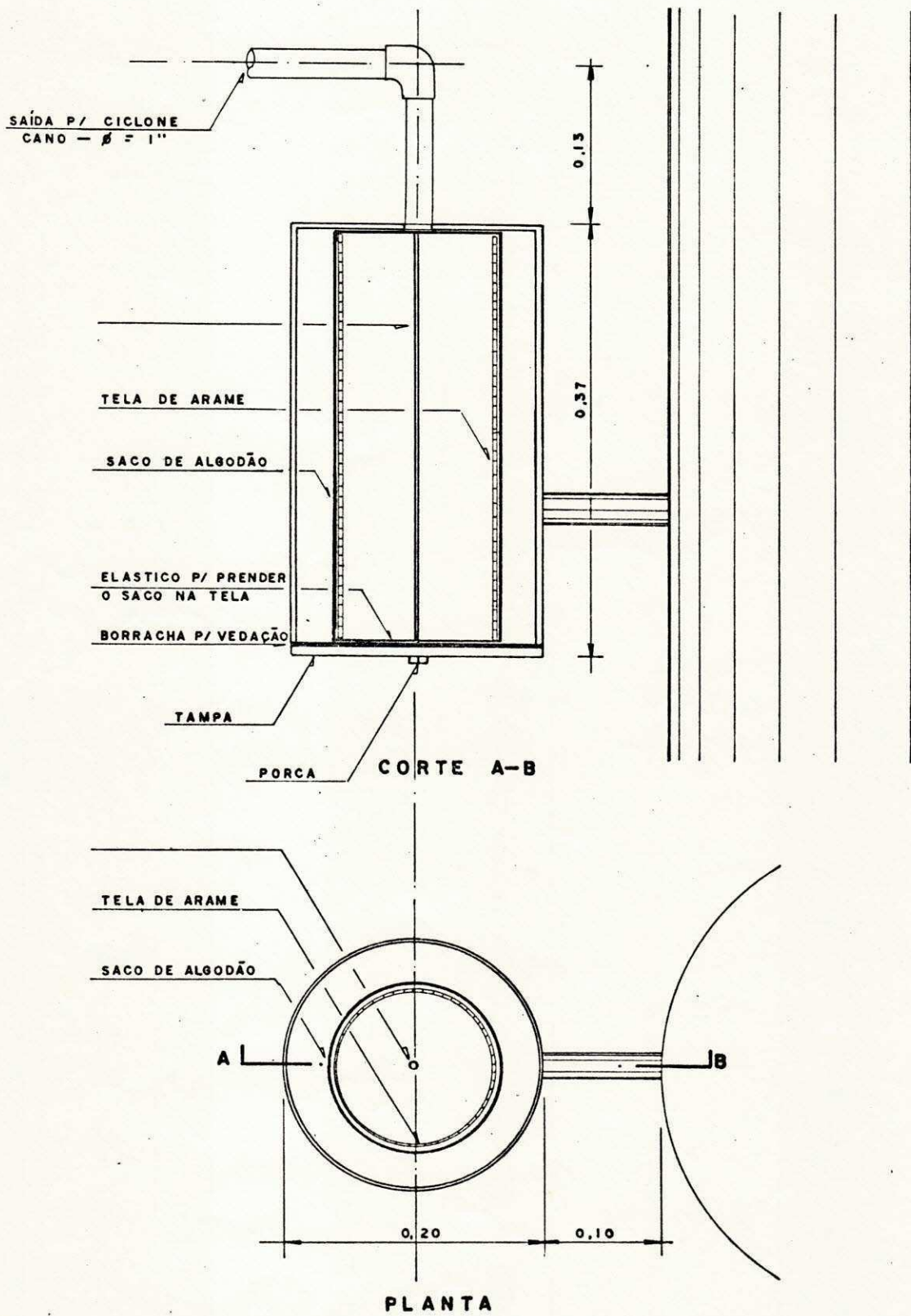


FIGURA 15: FILTRO

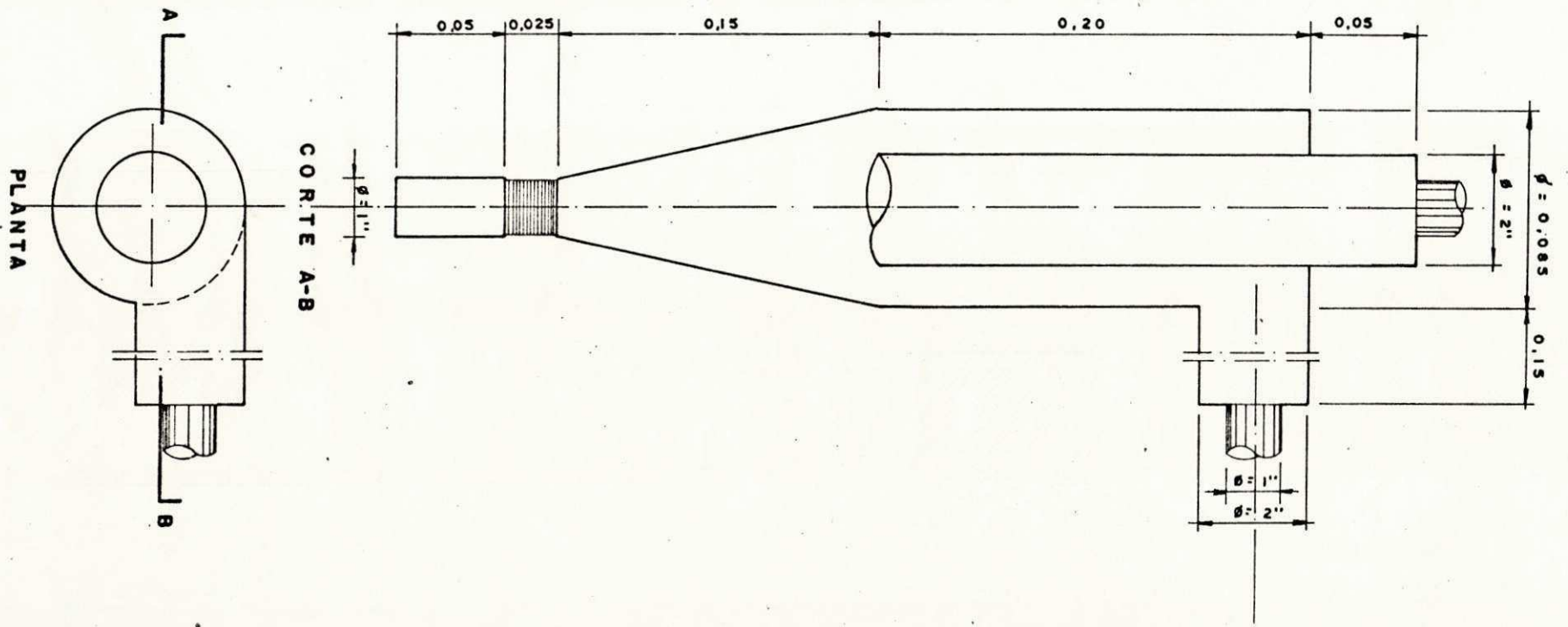


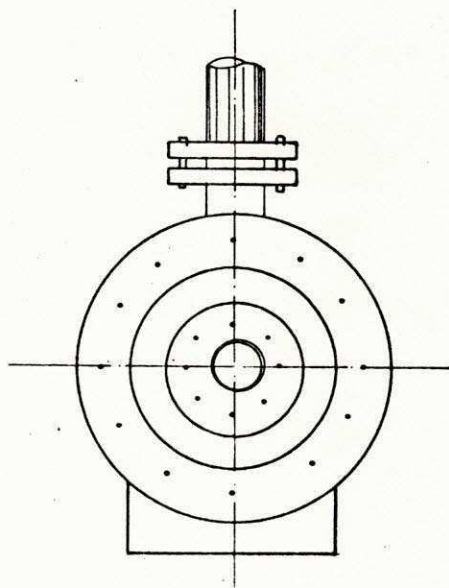
FIGURA 16: CICLONE

gases praticamente puros, que são aspirados pelo motor. O ciclone é formado por dois tubos concêntricos, um interno com 50,8mm e um externo com 100mm. Possui uma entrada com seção quadrática de $0,0025m^2$ e duas saídas, sendo uma para os gases com 50,8mm de diâmetro e outra para a retirada de impurezas, com 25,4mm de diâmetro e ligada a um pequeno reservatório também de 25,4mm de diâmetro e 0,05m de altura, onde ficam retidas as impurezas restantes. O ciclone está ligado ao motor por meio de uma tubulação em forma de Tê de 25,4mm de diâmetro, a parte vertical tem 0,63m e a horizontal 0,80m. Na parte vertical e acima da horizontal existe um registro de gaveta, com a finalidade de verificar-se o teor da chama do gás, e na parte horizontal e a 0,50m do Tê existe outro registro também de gaveta, com a finalidade de controlar o fluxo do gás que aciona o motor. Após esta tubulação horizontal de 0,80m existe uma tubulação em mangote de borracha de 25,4mm de diâmetro e 1,5m de comprimento conectada com o motor.

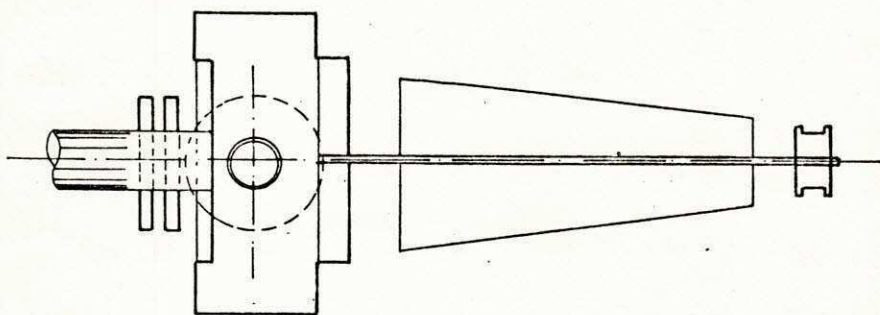
3.1.6. Motor, bomba de água (Figuras 9 e 17)

3.1.6.1. Motor

O motor é de marca Montgomery, fabricado por Motores Montgomery S.A. Indústria e Comércio, São Paulo, SP, com as seguintes características: modelo a álcool de 4 tempos, 477 c.c, potência máxima 13,0 CV para 3600 rpm e refrigeração a ar. Foi executada uma mudança no ponto de ignição, avançando-se o distribuidor para que a centelha seja lançada de 21° , antes do ponto morto superior.



VISTA FRONTAL



PLANTA

FIGURA 17: BOMBA D'AGUA

A partida do motor é realizada por um motor de arranque, de modelo 63, 0,25 CV, 1720 rpm, 60 Hz, 1,3 - 0,75 A; fabricado pela Weg, São Paulo, SP.

A bomba de água está ligada ao trocador de calor por meio de um mangote de 50,8mm de diâmetro e 2,5m de comprimento.

3.1.6.2. Anexos

Ligada a bomba de água e ao trocador de calor encontra-se uma caixa de água de capacidade para 250 l. Esta ligação é realizada mediante 3 mangotes de borracha de 25,4mm de diâmetro, sendo um dos mangotes de sucção, ligando a caixa de água à bomba de água com 1m de comprimento, outro de recalque com 2,5m de comprimento ligando a bomba de água ao trocador de calor e finalmente um de retorno de 3,15m de comprimento ligando o trocador de calor à caixa de água. O trocador encontra-se a uma altura manométrica de 1,85m.

3.2. Método experimental

3.2.1. Operações do gasogênio

A colocação do gasogênio em operação segue diversas etapas. Primeiramente se abre a válvula da chaminé de partida, destampa-se a cetilha e completa-se o nível do seu reservatório. Em seguida retiram-se parcialmente as cinzas acumuladas na zona de reação, introduzindo-se um tubo plástico de 19,05mm de diâmetro com 1m de comprimento no interior da cetilha, de quatro a seis vezes sucessivamente. As cinzas

penetram no interior do tubo e são facilmente removíveis do mesmo. Em seguida, introduzem-se de três a cinco carvões ao rubro no interior da cetilha, tendo-se o cuidado de levá-los até o leito de carvão da zona de combustão, por meio de uma vareta. Imediatamente se acopla à cetilha uma ventoinha acionada por um motor trifásico de 1/4 de HP e 1720 rpm, fabricado pela Weg, São Paulo, SP.

Após, mais ou menos 15 minutos observam-se as fumaças que se escoam pela chaminé de partida, que se devem tornar transparentes. Isto acontecendo, que é o normal, fecha-se a válvula da chaminé de partida e abre-se a válvula da chaminé de controle de chama, na qual está fixada uma lamparina. Havendo chama abundantemente do gás do gasogênio, o que significa que o gaseificador está gerando CO e H₂ em quantidades satisfatórias, fecha-se esta válvula e abre-se a válvula que dá o acesso dos gases ao motor. Dá-se então a partida do motor por meio do motor de arranque. Tendo-se dada a partida do motor, desliga-se a ventoinha e o motor de arranque e retira-se a correia que liga o motor de arranque ao motor.

Obtém-se a aceleração desejada, mediante manobras na válvula que dá acesso dos gases ao motor e no carburador que regula a entrada de ar.

Afim de evitar o recuo de chama, realiza-se a parada do motor da seguinte forma: fecha-se inicialmente a válvula que alimenta o motor e em seguida fecha-se a entrada da cetilha. Procedendo-se esta operação de maneira inversa, isto é, fechando-se primeiramente a cetilha e depois a válvula de acesso ao motor, poderá haver explosão dentro do gasômetro ou dentro do gaseificador, por recuo de chama.

3.2.2. Manutenção do gasogênio

A manutenção do gasogênio é imprescindível. Diariamente antes do início do funcionamento do gaseificador, fazem-se as purgas da água e pirolenhosos acumulados no trocador de calor, gasômetro e ciclone. Diariamente também se deve substituir o saco de algodão do filtro.

A cada 6 horas de trabalho diário, faz-se a limpeza do cinzeiro abrindo-se sua porta e retirando-se as cinzas soltas e fundidas, desobstruindo-se portanto o canal da cetilha e o espaço da zona de combustão.

3.2.3. Instrumentação

Foram levantados os seguintes dados experimentais: temperaturas da interface entre a zona de combustão e a do cinzeiro, temperatura de entrada e saída dos gases no trocador de calor, temperatura do ar ambiente, temperaturas iniciais e finais da água de circulação no trocador de calor, vazão dos gases combustíveis, vazão de circulação da água, rotações do motor e determinação qualitativa e quantitativa das substâncias constituintes da mistura gasosa efluente do gaseificador.

As temperaturas da interface entre a zona de combustão e o cinzeiro foram medidas por meio de um termopar com isolamento mineral, para altas temperaturas (máxima 1200°C) acoplado a um termômetro digital portátil, modelo TP 1000 da World Tron Comércio de Instrumentação Ltda. São Paulo, SP.

As temperaturas de entrada e saída dos gases no trocador de calor foram medidas por um termopar com isolamento

mineral, para temperaturas máximas de até 900°C, ligado ao termômetro digital anteriormente citado.

As temperaturas do ar ambiente e as temperaturas iniciais e finais da água de circulação foram determinadas por um termopar cromel alumel, protegido por aço inox 304 (temperatura máxima 750°C) acoplado ao termômetro digital já citado.

A vazão dos gases combustíveis aspirados pelo motor foi determinada por um rotâmetro com passagem horizontal da News Pumps - Indústria e Comércio de Bombas Ltda, São Paulo, SP.

A vazão de circulação da água recalçada pela bomba de água foi determinada por um hidrômetro de marca Tecnobrás, São Paulo, SP, com uma capacidade de medição de até 20m³/h.

As rotações do motor foram determinadas por um tacômetro digital de marca Microtest L-20 quartzo 20 da Importécnica S.A, São Paulo, com as seguintes especificações: capacidade 1 a 20000 rpm, mostrador 4 dígitos e precisão ± 1 dígito de 1 a 20000 rpm.

As substâncias constituintes da mistura gasosa efluente do gaseificador foram determinadas pelo aparelho de Orsat, fabricado pela Puimis, São Paulo, SP.

mineral, para temperaturas máximas de até 900°C, ligado ao termômetro digital anteriormente citado.

As temperaturas do ar ambiente e as temperaturas iniciais e finais da água de circulação foram determinadas por um termopar cromel alumel, protegido por aço inox 304 (temperatura máxima 750°C) acoplado ao termômetro digital já citado.

A vazão dos gases combustíveis aspirados pelo motor foi determinada por um rotâmetro com passagem horizontal da News Pumps - Indústria e Comércio de Bombas Ltda, São Paulo, SP.

A vazão de circulação da água recalçada pela bomba de água foi determinada por um hidrômetro de marca Tecnobrás, São Paulo, SP, com uma capacidade de medição de até 20m³/h.

As rotações do motor foram determinadas por um tacômetro digital de marca Microtest L-20 quartzo 20 da Importécnica S.A, São Paulo, com as seguintes especificações: capacidade 1 a 20000 rpm, mostrador 4 dígitos e precisão ± 1 dígito de 1 a 20000 rpm.

As substâncias constituintes da mistura gasosa efluente do gaseificador foram determinadas pelo aparelho de Orsat, fabricado pela Puimis, São Paulo, SP.

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em função dos dados experimentais obtidos foram estudados os seguintes parâmetros do gasogênio, que são fundamentais para avaliar o seu desempenho e formular novas soluções: (1) Determinação dos gases gerados, (2) Relação entre as variações de temperatura ($T = T_f - T_i$) de entrada e saída no trocador de calor, (3) Eficiência do sistema e (4) Custos do gasogênio.

4.1. Determinação dos gases gerados

A análise dos gases gerados foi realizada mediante um aparelho de Orsat. Obtiveram-se os seguintes índices:

Monóxido de carbono (CO) : 27 - 28%

Hidrogênio (H_2) : 12 - 14%

Dióxido de carbono CO_2 : 6 - 11%

Estes dados são semelhantes aos valores típicos de composição de gás em gaseificadores de carvão, de fluxo contra-corrente sem camisa de água para geração de vapor. Quando se injeta vapor d'água com ar de entrada sobe o teor de hidrogênio. Observou-se que em dias chuvosos aumentava o teor de hidrogênio na mistura.

O gás metano e o nitrogênio não foram determinados diretamente pelo aparelho de Orsat, porém sim, indiretamente através do balanço de massa. As quantidades de metano e nitrogênio encontradas foram respectivamente 1 - 2% e 50 - 55%.

A determinação do poder calorífico inferior da massa gasosa (H) foi realizada pela Equação $H = \sum V_g H_g$ (4.1), que é a média ponderada da soma da porcentagem de cada gás combustível, multiplicado pelo seu poder calorífico inferior e dividido pela porcentagem total. Tomou-se por base os índices intermediários para CO e H₂ e o valor de 1% para o CH₄, tomando-se pois os valores: CO = 27,5%, H₂ = 13% e CH₄ = 1%. Seguem abaixo os cálculos para o H:

$$H = (\%CO \times PCI_{CO} + \%H_2 \times PCI_{H_2} + \%CH_4 \times PCI_{CH_4}) / 100$$

Tomando-se os dados obtidos acima, tem-se que:

$$H = (27,5 \times 2981 + 13 \times 2537 + 1 \times 8440) / 100$$

$$H = 1233 \text{ kcal/Nm}^3$$

Em comparação com os valores típicos do gás pobre para o gadogênio contra-corrente que é de 1100 - 1200 kcal/Nm³, foi tomado por base o valor de 1200 kcal/Nm³ para os cálculos efetuados neste trabalho.

4.2. Relação entre a variação de temperatura dos gases na entrada e saída do trocador de calor com o tempo

As temperaturas de entrada e saída do gás no trocador de calor foram obtidas pelos instrumentos já mencionados no Capítulo 3, item 3 e estão na Tabela 4.1.

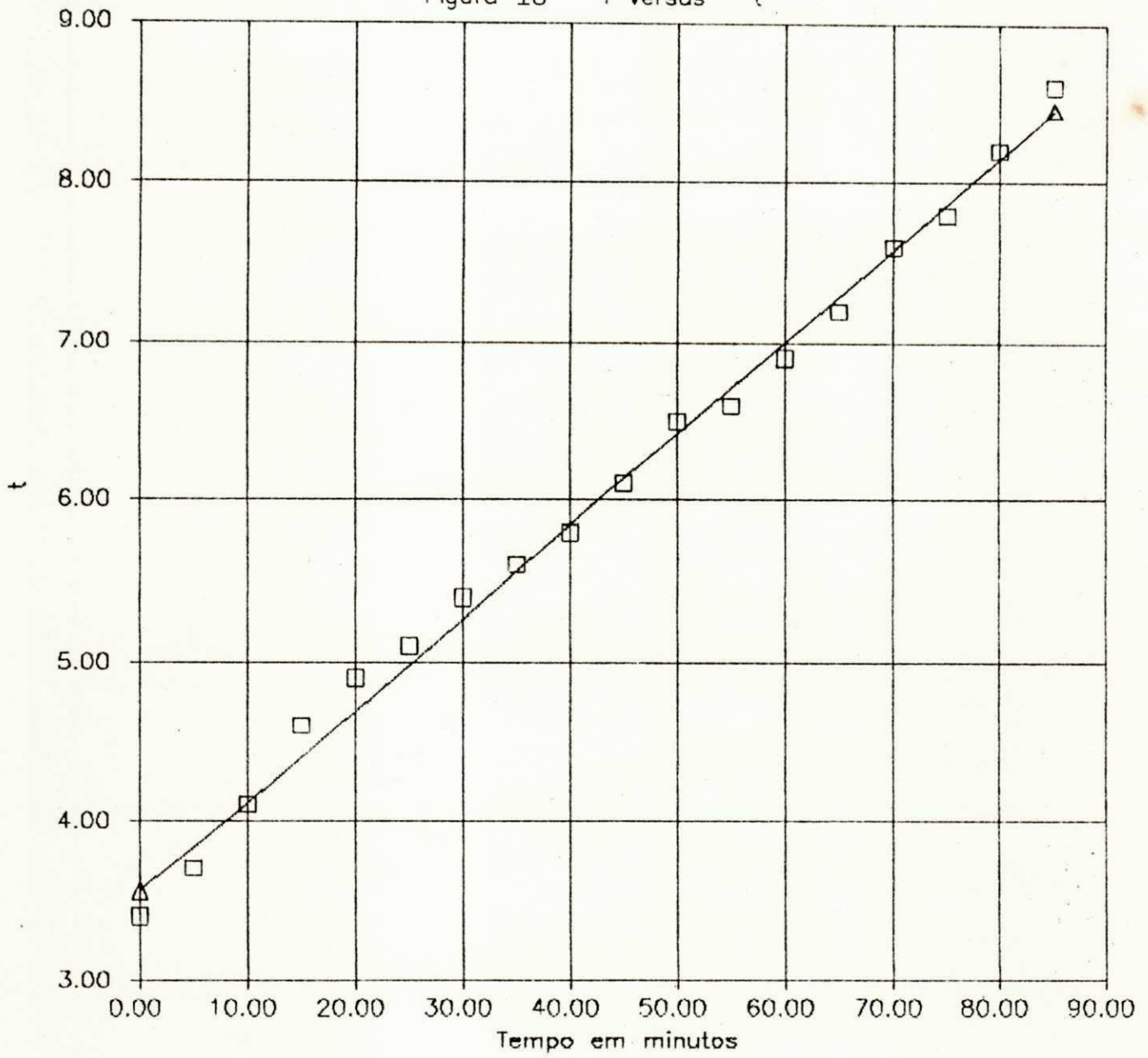
As variações na rotação do motor mantiveram relativamente constantes os dados da Tabela 4.1. Na

Tabela 4.1 : Temperatura de entrada e saída dos gases no trocador de calor ($^{\circ}\text{C}$) em função do tempo (min) a 1420 rpm e $T_a = 25^{\circ}\text{C}$.

t (min)	T_i ($^{\circ}\text{C}$)	T_f ($^{\circ}\text{C}$)	$T = T_i - T_f$
0	28,8	25,4	3,4
5	29,3	25,6	3,7
10	29,8	25,7	4,1
15	30,5	25,9	4,6
20	30,9	26,0	4,9
25	31,3	26,2	5,1
30	31,7	26,3	5,4
35	32,1	26,5	5,6
40	32,5	26,7	5,8
45	32,9	26,8	6,1
50	33,5	27,0	6,5
55	33,7	27,1	6,6
60	34,3	27,4	6,9
65	34,9	27,7	7,2
70	35,4	27,8	7,6
75	35,9	28,1	7,8
80	36,5	28,3	8,2
85	37,2	28,6	8,6

Figura 18. temos a relação de variação entre o T , diferença entre a temperatura de entrada e saída dos gases e a variação do tempo de 5 em 5 minutos durante 85 minutos. Obteve-se pela regressão linear de Gauss dos mínimos quadrados, uma reta

Figura 18 T versus t



$T = f(t)$, dada pela equação:

$$t = 5,764 \times 10^{-2} \times t + 3,55 \quad (4.2)$$

A reta que representa a Equação 4.1 revela que o T cresce com o tempo, aumentando a diferença entre a temperatura inicial e a temperatura final.

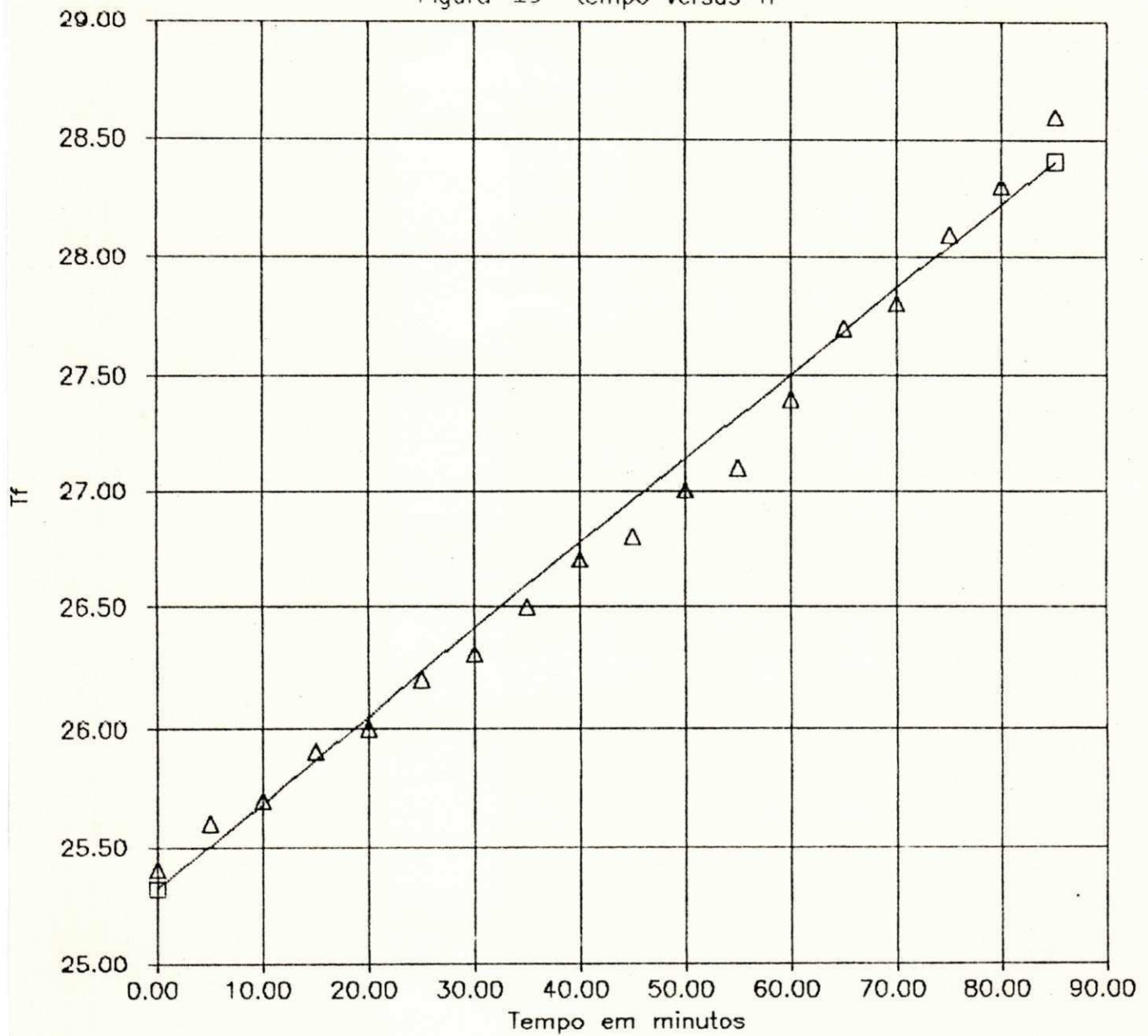
Relacionando-se a temperatura de saída do trocador de calor (T_f) com o tempo (t) obtemos a equação abaixo:

$$T_f = f(t)$$

$$T_f = 25.323 \times e^{1.352 \times 10^{-3} \times t} \quad (4.3)$$

A Equação (4.3) é uma função potencial com um índice de ajustagem (coeficiente de determinação) $R^2 = 0.992$ e foi obtida em um computador IBM 5.100, Linguagem Basic. Tomando-se $T_i = 50^\circ\text{C}$ verificamos, aplicando-se a Equação (4.2) que o tempo (t) será de 8 horas e 30 minutos. Como nas condições de uso do gasogênio para irrigação rural, o período de trabalho, em geral não ultrapassa 8 horas, então a temperatura de saída do trocador de calor não será superior a 50°C . Supondo que a variação da temperatura final com o tempo obedece a equação (4.3). Na realidade deve-se ressaltar que as outras unidades do sistema também absorvem calor da massa gasosa, o que não foi ainda calculado. Portanto, há necessidade de estudos mais profundos neste aspecto.

Figura 19 tempo versus Tf



4.3. Eficiência de sistema

O rendimento dos gaseificadores vem sendo estudado por diversos pesquisadores, através da seguinte equação (7,15,21-23,37):

$$R = \{V(H_g + Q) + S\}/MH_i \quad (4.4)$$

A equação 4.4 consiste basicamente da relação entre a energia recuperada do gás gerado em PCI e a energia do combustível consumido (carvão mineral, madeira ou carvão vegetal) também em PCI.

Para o tipo de gaseificador exposto, o gás alimenta o motor como combustível de forma fria e limpa; o calor sensível (Q) do gás é transferido do trocador de calor para a água.

Logo o gás chegará ao motor sob uma temperatura inferior àquela que entra no trocador de calor, conforme já mencionado no item 4.2. Com isto a densidade do gás aumentará e conseqüentemente o rendimento do motor. Neste gasogênio, tipo contra-corrente para uso em motores, os pirolenhosos são eliminados no trocador de calor, gasogômetro, ciclone e filtro, então o calor latente (S) destes subprodutos lenhosos não são aproveitados. Pode-se, então com base nos argumentos citados acima, escrever a equação 4.5 como segue:

$$R = VH_g/MH_i \quad (4.5)$$

O rendimento do sistema encontra-se determinado em função do volume de gás gerado e a massa de carvão no item 4.4.3.

4.3.1. Determinação dos volumes de gás gerado correspondentes a diversos rpms do motor

A determinação do volume de gás gerado é a sua vazão (V) é calculada pela Equação abaixo, que foi estudada por ARORA e SIQUEIRA (7,37):

$$V = (\text{rpm} \times 60 \times C_v \times 0,75 \times 0,4) / (2 \times 1000) \quad (4.6)$$

A capacidade volumétrica do motor é de 0,477 l, conforme mostra o catálogo. Aplicaram-se rotações máximas e mínimas, bem como rotações intermediárias ao motor, ao qual foi conectada uma bomba de água para realizar um trabalho de bombeamento. Utilizando-se a Equação (4.6) para o valor de C_v , dado acima, obtêm-se os seguintes resultados para vazão de água e volume de gás, conforme mostra a Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Rotações do motor por minuto em função da vazão da água V_a em m^3/h e vazão do gás V em Nm^3/h .

rpm	V_a	V
723	7,06	3,10
774	7,17	3,32
857	8,06	3,68
1154	10,85	4,95
1333	12,30	5,72
1500	14,52	6,44

4.3.2. Determinação da massa (M) de carvão consumido para diferentes vazões de gás

Os dados experimentais demonstram que 1kg de carvão vegetal produz de 3,5 a 4,5 Nm³ de gás, correspondendo aproximadamente a 4,0 Nm³. Em função dessa proporcionalidade, ou seja, partindo de 1kg de carvão e 4,0 Nm³ de gás obtido, pode-se determinar a massa de carvão consumida, durante a operação do volume de gás gerado, segundo mostra a Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Vazão de gás combustível versus massa de carvão

V (Nm ³)	M (kg/h)
3,10	0,775
3,32	0,830
3,68	0,920
4,95	1,237
5,72	1,430
6,44	1,610

4.3.3. Determinação do rendimento do gasogênio

Segundo a Equação 4.4, o rendimento do gasogênio será o quociente entre a energia liberada pelo gás gerado e a energia liberada pelo carvão consumido correspondente. O PCI do carvão vegetal foi estimado em 7100 kcal/kg e o PCI do gás pobre gerado em 1200 kcal/Nm³, conforme item 4.1. Com base nestes índices o rendimento foi de 0,679.

Observa-se que o rendimento ou eficiência térmica do sistema para carvão-gás foi da ordem de 0,68. Verifica-se que o rendimento permanece constante para qualquer vazão de gás tomada e massa consumida. O rendimento poderia ser melhorado em função da desidratação do carvão e/ou aquecimento do ar de entrada no gaseificador. As perdas de energia térmica do combustível são da ordem de 32%, que podem ser atribuídas às perdas de calor sensível (Q) e latente (S) e outras.

A umidade do carvão pode ser a principal fonte responsável pela diminuição do rendimento do sistema. Os estudos realizados por SCHLAEPFER e TOBLER demonstram que a umidade em quaisquer materiais carbonáceos (carvão ou madeira) determina uma diminuição do rendimento. A umidade do combustível conduz a:

- O aumento do CO_2 e como consequência a diminuição do rendimento.
- A diminuição brusca do CO e como consequência também a perda de rendimento.
- O H_2 tem um comportamento diferente para o gaseificador concorrente e contra-corrente. No gaseificador concorrente a quantidade de hidrogênio aumenta até 15% de umidade e em seguida começa a diminuir. No gaseificador contracorrente o H_2 diminui com o aumento da umidade.

Uma solução para um aumento de rendimento foi proposta por HILST, CARVALHO, et Alii. (7,21), consistindo no preaquecimento da madeira ou carvão em uma estufa alimentada pelos gases da combustão do motor.

Além da umidade do combustível um outro fator que faz baixar o rendimento é a temperatura do ar. Aquecendo-se previamente o ar com os gases de escapamento do motor, aumenta-se o rendimento em até 0,4% (23).

4.4. Custo do gasogênio

Foram calculados todos os custos em função da OTN de março de 1988. O apêndice mostra em detalhe os preços de cada componente. Todavia foi avaliado o custo do sistema no valor de Cz\$ 71.000,00.

4.4.1. Custos comparativos entre o consumo de óleo diesel e carvão

Entre os combustíveis líquidos, o óleo diesel é o único de uso generalizado na agricultura. Para efeito de cálculo foram feitas duas suposições: a) um motor diesel com a mesma potência e características do motor a gás de gasogênio e b) uma irrigação de 4ha por inundação. Foram tomados os dados da Tabela 4.2 referentes ao motor com 1500 rpm, vazão da água bombeada para irrigação $14,52 \text{ m}^3/\text{h}$ e a vazão do gás gerado $6,44 \text{ Nm}^3/\text{h}$. O quadro comparativo a seguir mostra o consumo entre o óleo diesel e o carvão.

4.4.2. Amortização do capital investido

O retorno do capital investido (T_R) é dado pela relação da soma de todos os gastos envolvidos dividida pela economia realizada (E_c) (21). Os gastos envolvidos são os

seguintes: custo do investimento (C_i), custo de depreciação do equipamento (C_d) e custo de manutenção do gasogênio (C_m). Em função destes parâmetros pode-se escrever a seguinte expressão:

$$T_R = (C_i + C_d + C_m) / E_c \quad (4.7)$$

Sendo,

$$C_i = \text{Cz\$ } 71.000,00$$

$$C_d = \text{Cz\$ } 14.200,00 \text{ (20\% do investimento)}$$

$$C_m = \text{Cz\$ } 7.100,00 \text{ (10\% do investimento)}$$

$$E_c = \text{Cz\$ } 494,00 - \text{Cz\$ } 305,70 = \text{Cz\$ } 188,30$$

Temos:

$$T_R = (71.000,00 + 14.200,00 + 7.100,00) / 188,30$$

$$T_R = 92.300,00 / 188,30 = 490 \text{ dias} \Rightarrow 1 \text{ ano e } 4 \text{ meses e cinco dias.}$$

Isto mostra que este tempo de retorno é bastante favorável ao gasogênio. Levando-se em consideração que os preços dos derivados de petróleo sobem sempre bem mais do que os preços da madeira e do carvão, pode-se afirmar que o retorno do capital investido dar-se-á em tempo menor do que o calculado.

- Quadro Comparativo:

Motor com óleo diesel	Motor com gás de gasogênio
Rotação: 1500 rpm	Rotação: 1500 rpm
Irrigação: 4ha	Irrigação: 4ha
Sistema: inundação	Sistema: inundação
Consumo: 1,25 l/h	Consumo: 1,61 kg/h de carvão 0,31 l/h de óleo diesel
Consumo diário (8h): 10 l	Consumo diário (8h): 12,88 kg de carvão 2,5 l de óleo diesel
Custo do óleo diesel: Cz\$ 29,40/l	Custo do carvão no local: Cz\$ 2,50/kg
Custo diesel/dia: Cz\$ 294,00	Custo carvão + óleo diesel/dia: Cz\$ 105,7
Mão de obra/dia : Cz\$ 200,00	Mão de obra/dia: Cz\$ 200,00/dia
Custo total dia: Cz\$ 494,00	Custo total dia: Cz\$ 305,70

5. CONCLUSÃO

O gasogênio deste projeto entrou em operação há 6 meses, em outubro de 1987, e está funcionando regularmente. Podemos afirmar que este sistema pode ser repassado para o meio rural, devido ao bom desempenho que vem demonstrando. Contudo, com referência à sua performance geral podemos assinalar alguns aspectos negativos:

- Entrada em operação. Leva de 15 a 40 minutos.
- Cinzas. As cinzas resultantes das operações anteriores não são facilmente removidas do cinzeiro, em virtude de estarem misturadas com carvão.
- Cetilha. Existe uma certa dificuldade para a introdução dos carvões ao rubro no interior da cetilha, no início da operação, devido ao seu diâmetro ser insuficiente. Existe ainda uma outra dificuldade para acoplar a ventoinha à cetilha, em virtude do tubo interno da mesma não avançar de aproximadamente 4cm para fora do tubo externo, afim de que a tubulação da ventoinha possa acoplar ao mesmo.
- Tubulação. Teoricamente é recomendável que toda a tubulação do gasogênio seja de 100mm, porem em nosso caso existem tubulações de 25,4 e 31,75mm que foram conservadas em virtude do gasômetro, filtro e ciclone já terem estes diâmetros originalmente. Entre o trocador de calor e o gasômetro existe uma tubulação em forma de "L", que provoca mais perda de carga do que uma curva suave.

Com referência aos aspectos positivos podemos assinalar:

- Após a entrada em funcionamento não há perda de força do motor e este funciona ininterruptamente até o final dos trabalhos.
- O sistema é totalmente estanque, o que favorece tanto a segurança em relação à toxidez do gás como evita a queda de potência do motor.
- A refrigeração da cetilha funciona satisfatoriamente devido ao bom desempenho do termo-sifão.
- O trocador de calor, o gasômetro, o filtro e o ciclone têm um desempenho satisfatório, não oferecendo qualquer problema de manutenção.

6. SUGESTÕES

Propomos para melhorar o gasogênio as seguintes medidas:

- Construção de uma grelha rústica semelhante à dos alemães, usada na Segunda Guerra mundial. As cinzas cairiam abaixo da grelha, sendo facilmente removidos. Eliminando as cinzas, o tempo de entrada em operação do gasômetro seguramente não ultrapassaria os 15 minutos.
- Reprojetar a cetilha, tomando o tubo interno com diâmetro de 38mm e projetá-lo para fora do tubo externo de aproximadamente 4cm.
- Instalar toda a tubulação do sistema com diâmetro de aproximadamente 100mm e substituir a tubulação em "L", entre o trocador e o gasômetro, por uma curva suave do mesmo diâmetro. Desta forma, serão reduzidas as perdas de carga do sistema.
- Para elevar o rendimento do sistema, recomenda-se secar previamente o carvão em uma estufa, por meio dos gases provenientes do escapamento do motor (7). Outra solução seria aquecer o ar de alimentação do gaseificador em um trocador de calor por meio também, dos gases de escapamento do motor.

BIBLIOGRAFIA

1. ASSUMPCÃO, R. M. V. **Gaseificação de madeira e carvão vegetal.** São Paulo, SP, 1981, Revista de Energia, vol. 3, no. 16 p. 23-42.
2. ASSUMPCÃO, R. M. V. **Gaseificação de madeira e carvão vegetal.** Seminário: Encontro Técnico de Sistemas de Gasogênio, Confederação Nacional da Indústria - CNI, Goiania, GO, 21.09.1981, p. 103-110.
3. BIZZO, D. **O gaseificador pirolítico no planejamento energético.** São Paulo; SP, 1982, Revista de Energia vol. IV, no. 19, p. 49-55.
4. BUSSYGUIN, G. **Gaseificação de combustíveis sólidos.** Seminário: Encontro Técnico de Sistemas de Gasogênio, Confederação Nacional da Indústria - CNI, Curitiba, PR, 20.08.1981, p. 11-14.
5. CARIOCA, J. O. B. & ARORA, H. L. **Biomassa - Fundamentos e Aplicações Tecnológicas.** Fortaleza, CE, novembro de 1984, Banco do Nordeste do Brasil/Univesidade Federal do Ceará, p. 443.
6. CARRE, P. **Précis de chimie industrielle.** Paris, France, 1921, Librairie J. - B. Ballière et Fils, p. 40-42.
7. CARVALHO, A. de S., ARORA, H. L., CARIOCA, J. O. B. C., GONDIN, B. C. & SILVA, N. A. da. **Gasogênio de alvenaria.** Brasília, DF, 1987, Embrater, Ministério da Agricultura, 43 p.

8. COMPANHIA ENERGETICA DE SÃO PAULO - CESP, **Projeto metanol.** São Paulo, SP, 1984, Núcleo Experimental de Corumbataí, 16 p.
9. COMPANHIA ENERGETICA DE SÃO PAULO - CESP, **O programa de metanol da CESP.** São Paulo, SP, 1980, Núcleo Experimental de Corumbataí, 42 p.
10. CHRISTIENSEN, J. G. **Manual de Fundição.** São Paulo, SP, 1978, Editora Egéria S/A, p. 153-162.
11. D'AVILA, S. G. & MAKRAY, Z. T. **Gaseificadores de madeira - Aspectos técnicos e econômicos.** Seminário: Gaseificação de biomassa, CETEC, Belo Horizonte, MG, 1981, p. 75-80.
12. DIAS, G. P. & MEWES, B. O. **Gasogênio.** Viçosa, MG, 05.05.1981, Universidade Federal de Viçosa, Informe Técnico no. 12, 11 p.
13. DUARTE, M. M. L., MAKRAY, Z. T., & PEREIRA, J. A. F. R. **Gaseificação da madeira em gaseificador concorrente - taxa de gaseificação e composição dos gases.** Primeiro Simpósio Internacional de Energia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1983, p. 19-28.
14. ENGEL, R. **Traité élémentaire de chimie.** Paris, France, 1894, Librairie J. - B. Baillièrre et Fils, p. 317-318.
15. FONTES, C. A. de M. **Produção de gás combustível de baixo poder calorífico.** Seminário: Encontro Técnico de Sistemas de Gasogênio, Confederação Nacional da Indústria - CNI, Curitiba, PR, 21.10.1981, p. 17-51.

16. FRANÇA, K. B., GOLDFARB, J., VILAR, E. de O. & Quirino, J. S. **Gasification of carbonuous products to rural irrigation.** Reading, UK, 7-9 april 1987, Fifth International Conference on Energy Options the Role of Alternative in the Worlf Energy Scene, The Institution of Electrical Engineers (IEE) Univesity of Reading, 2p.
17. GLINKA, M. L. **Química Geral.** Moscou, URSS, 1984, Editora Mir, Vol. 2, p. 122-124.
18. GRAHAM, R. G. & HUFFMAN, D. R. **Gaseification of wood in a comercial scale dowdroft gasifier.** Ottawa, Ontário, Canada, 1980, Forintek Canada Corporation, 18 p.
19. GRECO, C. **Combustão e gaseificação em leito fluidizado.** Seminário: Gaseificação de Biomassa, belo Horizonte, MG, 1981, CETEC, p. 115-130.
20. HAMMOND, A. L., METZ, W. D. & MAUGH T. H. **O futuro energético do mundo.** Rio de Janeiro, RJ, 1975, Zahar Editores, p. 30-37.
21. HILST, A. G. P. & KOSIN, F. **Gaseificadores para pequenos e médios consumidores.** São Paulo, SP, 1981, Revista de Energia, vol. III, no. 14, p. 19-27.
22. KALLSCHEUER, H. A. & DUARTE, L. A. M. de S. **Gaseificação industrial.** Seminário: Gaseificação de biomassa, Belo Horizonte, MG, 1981, CETEC, p. 254-260.
23. KJELLSTROM, B. **Local electricity generation from wood and agricultural residues.** Stockholm, Sweden, 1980, The International Institute for Energy and Human Ecology, 10 p.

16. FRANÇA, K. B., GOLDFARB, J., VILAR, E. de O. & Quirino, J. S. **Gasification of carbonuous products to rural irrigation.** Reading, UK, 7-9 april 1987, Fifth International Conference on Energy Options the Role of Alternative in the Worlf Energy Scene, The Institution of Electrical Engineers (IEE) Univesity of Reading, 2p.
17. GLINKA, M. L. **Química Geral.** Moscou, URSS, 1984, Editora Mir, Vol. 2, p. 122-124.
18. GRAHAM, R. G. & HUFFMAN, D. R. **Gaseification of wood in a comercial scale dowdroft gasifier.** Ottawa, Ontário, Canada, 1980, Forintek Canada Corporation, 18 p.
19. GRECO, C. **Combustão e gasefificação em leito fluidizado.** Seminário: Gaseificação de Biomassa, belo Horizonte, MG, 1981, CETEC, p. 115-130.
20. HAMMOND, A. L., METZ, W. D. & MAUGH T. H. **O futuro energético do mundo.** Rio de Janeiro, RJ, 1975, Zahar Editores, p. 30-37.
21. HILST, A. G. P. & KOSIN, F. **Gaseificadores para pequenos e médios consumidores.** São Paulo, SP, 1981, Revista de Energia, vol. III, no. 14, p. 19-27.
22. KALLSCHEUER, H. A. & DUARTE, L. A. M. de S. **Gaseificação industrial.** Seminário: Gaseificação de biomassa, Belo Horizonte, MG, 1981, CETEC, p. 254-260.
23. KJELLSTROM, B. **Local electricity generation from wood and agricultural residues.** Stockholm, Sweden, 1980, The

24. LAGUERIE, C. **Production de gaz de synthese par gaseification du bois.** Primeiro Simpósio Internacional de Energia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1983, p. 1-19.
25. MAKRAY, Z. T. **Gaseificação da madeira e seus aspectos práticos.** Campinas, SP, 1981, Companhia de Desenvolvimento Tecnológico - CODETEC, UNICAMP, Nota Técnica, 18p.
26. MATOS, M. de, ALMEIDA, M. R. de & OLIVEIRA, L. T. de **Características dos produtos da carbonização da madeira.** Seminário: Gaseificação de biomassas, Belo Horizonte, MG, 1981, CETEC, p. 37-43.
27. MOURA, J. C. **Gaseificação de madeira.** Campinas, SP, 1980, Companhia de Desenvolvimento Tecnológico - CODETEC, UNICAMP, Nota Técnica, 8p.
28. OLIVEIRA, E. S. de **A produção de metanol por gaseificador eletroquímico.** São Paulo, SP, 1979, Revista de Energia, vol. I, p. 44-48.
29. PAULA, C. P. de **Desenvolvimento tecnológico da gaseificação da madeira.** São Paulo, SP, 1984, Revista de Engenharia Química, p. 23-27.
30. PUIG, I. **Curso Geral de Química.** Porto Alegre, RS, 1945, Editora Globo, p. 266-267.
31. REIS, O. G. **Gasogênio rústico construído em alvenaria - energia alternativa na propriedade rural.** Brasília, 1984, Empresa Brasileira de Assistência Técnica e Extensão Rural - EMBRATER, Série informações técnicas,

no. 5, 20 p.

32. RINGWALD, G. **Gazeification du charbon: Quels choix?** Paris, France, octobre 1980, Informations Chimie, no. 206, p. 147-161.
33. SAFFER, M., OCAMPO, A. & LAGUERIE, C. **Gaseificação de carvão em leito fluidizado: Resultados e modelagens.** Primeiro Encontro sobre meios porosos, São Carlos, SP, 1984, 13 p.
34. SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL (STI), DO MINISTERIO DE INDUSTRIA E COMERCIO (MIC), **Normas do gasogênio.** Brasília, DF, 1982, no. 1, item 3.19.
35. SHREVE, R. N. & BRINK, JR, J. A. **Indústria de processos químicos.** Rio de Janeiro, RJ, 1980, Editora Guanabara Dois, 4a. Edição, p. 60, 70-71 e 80-82.
36. SICILIANO, L. de B. **Gasogênio para automóveis e outros fins.** Instituto de Engenharia de São Paulo, SP, 1945, 117 p.
37. SIQUEIRA, A. B. **Gasogênio para motores.** Seminário: Gaseificação de biomassas, Belo Horizonte, MG, 1981, CETEC, p. 103-112.
38. TEGEDER, F. & MAYER, L. **Métodos de la indústria química.** Barcelona, Espanha, 1975, Editorial Reverté S.A., p. 70.
39. TEIXEIRA, R. **Gasogênios - Matérias primas disponíveis.** Encontro técnico de gasogênio, Goiania, GO, 1981, Confederação Nacional da Indústria - CNI, p. 71-100.

40. TIAN, A. & ROCHE, J. **Précis de Chimie**. Paris, France, 1950, Ed. Masson, p. 340-341.
41. ULLMANN, F. Enciclopédia de química industrial. Barcelona, Espanha, 1932, Editora Gustavo Gili, vol. IX, p. 620.
42. VELLOSO, W. de O. **Informações sumárias sobre a gaseificação de lenha**. Encontro técnico de sistemas de gasogênio, Goiania, GO, 21.09.1981, Confederação Nacional da Indústria - CNI, p. 53-70.
43. VERGNHANINI FILHO, R. **Preços do petróleo inibem novos projetos**. São Paulo, SP, fevereiro de 1987, Revista Energia & Produção, no. 4, p. 38-44.
44. WEYNE, G. R. de S. **Produtos químicos agressivos**. São Paulo, SP, 1982, Editora Nobel, p. 62.
45. ZAGATTO, A. J. A. G. **Metanol: uma alternativa para a substituição de combustíveis líquidos derivados do petróleo**. São Paulo, SP, setembro/outubro de 1979, Revista de Energia vol. 1, p. 38-48.
46. ZAGATTO, A. J. A. G. **Gaseificadores de médio e grande porte**. São Paulo, SP, 1981, Revista de Energia vol. III, no. 16, p. 44-53.

APÊNDICE

Materiais, equipamentos e mão de obra empregados na construção do gasogênio.

450	tijolos refratários, unitário 10,00	4.500,00
50	galões de argila refratária, unitário 10,00 ..	500,00
3	chapas de aço 1020, de 1mx2m, de espessura 3mm unitário 2.000,00	6.000,00
1	chapa de aço 1020 de 1mx2m, de espessura 2mm, unitário 1.500,00	1.500,00
6	m de cano galvanizado de 25,4mm de diâmetro ..	4.000,00
3	m de cano galvanizado de 2,7mm de diâmetro ...	1.000,00
1	m de cano galvanizado de 100mm de diâmetro ...	1.000,00
30	parafusos com porcas de 25,4mmx4,76mm	400,00
1	galão de tinta para conversão do gasogênio	3.000,00
2	solventes, unitário 400,00	800,00
8	m de mangote de borracha de 25,4mm de diâmetro, unitário 1.000,00	8.000,00
1	bomba de água de marca Refaga de 41mm de diâme- tro de entrada	25.000,00
1	motor de arranque de 3/4 HP	4.000,00
1	ventoinha com carcassa de alumínio, de 25,4mm de diâmetro	1.300,00
	Mão de obra	10.000,00
	Total	71.000,00