

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

ESTUDO DE UM GASOGÊNIO DE FLUXO  
ASCENDENTE PARA SECAGEM DE GRÃOS

EDUARDO JERÔNIMO DE MOURA

Campina Grande, Paraíba

Julho de 1988

EDUARDO JERONIMO DE MOURA

ESTUDO DE UM GASOGÊNIO DE FLUXO  
ASCENDENTE PARA SECAGEM DE GRÃOS

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

PROFESSOR ORIENTADOR: KEPLER BORGES FRANÇA (Ph.D)

CO-ORIENTADORES: MARIO EDUARDO R. M. C. MATA (Ms.C)  
JÚLIO GOLDFARB (Ms.C)

Campina Grande, Paraíba

1988



M929e Moura, Eduardo Jerônimo de.  
Estudo de um gasogênio de fluxo ascendente para secagem de grãos / Eduardo Jerônimo de Moura. - Campina Grande, 1988.  
66 f.

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

1. Gasômetro - Reservatórios - Gases. 2. Gaseificador de Fluxo Ascendente. 3. Produto Mecânico - Projeto. 4. Secagem - Grãos (Agricultura). 5. Engenharia Mecânica - Dissertação. I. França, Kepler Borges. II. Mata, Mario Eduardo R. M. C. III. Goldfarb, Júlio. IV. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). V. Título  
CDU 621.039.542.5(043)


ESTUDO DE UM GASOGÊNIO DE FLUXO ASCENDENTE PARA SECAGEM DE GRÃOS.

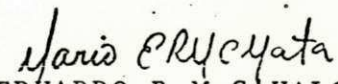
EDUARDO JERÔNIMO DE MOURA

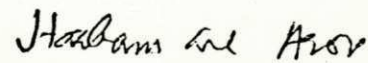
DISSERTAÇÃO APROVADA EM 29/07/88

  
KEPLER BORGES FRANÇA

Orientador

  
JÚLIO GOLDFARB  
Co-Orientador

  
MÁRIO EDUARDO R.M. CAVALCANTI MATA  
Co-Orientador

  
HARBANS LAL ARORA  
Membro

CAMPINA GRANDE

JULHO - 1988



DEDICATÓRIA

A meus pais

A minha esposa Lourdes

A meus filhos Eron e Ellen

Ao Dedico este trabalho

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq

pelo estímulo e apoio financeiro

Ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS

pela oportunidade que me ofereceram para a realização deste trabalho, através dos engenheiros Nelito Gomes de Matos, Engenheiro Chefe de 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 todos aqueles que de uma forma ou de outra tornaram este trabalho uma realidade.

A 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 Junior e José Leopoldo da Silva, pelo apoio e 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 Lopez, pelo trabalho em computação referentes ao soft gráfico e ajuste linear.

por intermédio do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, pelo acesso ao soft de simulação de secagem de grãos de milho.

por intermédio do Departamento de Engenharia Química  
nas pessoas dos professores Kepler Borges França, orientador e  
Júlio Goldfarb, co-orientador.

## RESUMO

A secagem de produtos agrícolas constitui um dos mais sérios problemas da agricultura brasileira. Anualmente mais da metade dos grãos de cereais colhidos perdem-se devido a uma secagem inadequada e péssimas condições de armazenagem. Por outro lado, a secagem de cereais com o uso de combustíveis fósseis oneram demasiadamente seus custos. Como solução deste problema é necessário substituir os combustíveis tradicionais por fontes alternativas de energia, tais como, a biomassa e a energia solar.

O projeto desenvolvido é um gaseificador de fluxo ascendente adaptado para a secagem de cereais. Parte da carga térmica constituída pelo calor sensível dos gases gerados é transferida por meio de um trocador de calor para o ar de secagem através de um ventilador de sucção, que é acionado pelo motor do gasogênio.

Foram obtidos os dados de desempenho dos componentes do gasogênio e rendimento do gaseificador. As falhas foram assinaladas e nas sugestões, indicou-se as modificações que devem ser realizadas no protótipo para um melhor desempenho.

Com os dados obtidos simulou-se a secagem de grãos de milho utilizando-se o programa SASG 1 desenvolvido pelo Núcleo de Tecnologia em Armazenagem da UFPb. Os resultados obtidos permitem concluir pela viabilidade técnica do uso do gasogênio na secagem de grãos. Espera-se que este sistema venha contribuir de forma significativa na diminuição dos custos energéticos na secagem de grãos.

## Abstract

One of the serious problems of the Brazilian agriculture is the drying of agricultural products. Anually more than half of the harvest is spoiled because of inadequate drying and bad storage conditions. on the other hand, the drying of cereals by using petroleum fuels increases the cost highly. It is necessary to substitute the traditional fuels by alternative sources of energy, as biomass and solar energy, to solve this problem.

The developed project is a gasifier of ascendant flow to be adapted to drying cereals. A part of sensible heat obtained from gases is transfered by means of fan which is moved by the gasifier engine.

Performance data of components of the system were obtain. The defects are noted and the modifications are reported in the suggestion section to improve the performance of the prototype.

With the obtained data the drying of grain was simulated by a computer programme SASG1 developed by Nucleous of Tecnology in Storage of the UFPb. These results conclude the technical the use of the gasifier to dry the grains. It is expected that this system will contribute in significant manner to reduce the energy cost of drying the grains.

## LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 2.1 - Parâmetros decorrentes do diâmetro da cetilha.	16
Tabela 4.1 - Temperaturas de entrada e saída dos gases no trocador de calor em função de diferentes rotações do motor.	48
Tabela 4.2 - Temperaturas de entrada e saída dos gases no trocador de calor versus tempo, a uma rotação constante de 1500 rpm.	50
Tabela 4.3 - Resumo da simulação de secagem de grãos de milho com o ar aquecido no trocador de calor com variações de rotação do motor de 1500 a 3000 rpm.	57
Tabela 4.4 - Resumo da simulação de secagem de milho utilizando simultaneamente, os gases de escapamento do motor e o ar aquecido pelo trocador de calor.	57



## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 01 - Gaseificador de fluxo ascendente, de grelha rotativa e camisa de água.	6
Figura 02 - Gaseificador de fluxo ascendente com saída de gás no topo.	13
Figura 03 - Gaseificador de fluxo ascendente com saída de gás entre as zonas de gaseificação e carbonização.	13
Figura 04 - Gaseificadores de fluxo ascendente de grelhas abertas, sem cetilha.	14
Figura 05 - Gaseificador de fluxo descendente para madeira.	15
Figura 06 - Gaseificador de fluxo descendente para carvão ou madeira.	15
Figura 07 - Gaseificador de fluxo transversal sem injeção de vapor.	17
Figura 08 - Gaseificador de fluxo transversal com injeção de vapor.	17



	Página
Figura 09 - Posições das grelhas fixas: 1a horizontal, 2a vertical e 3a inclinada.	19
Figura 10 - Curvas típicas de secagem de grãos.	26
Figura 11 - Representação esquemática de uma camada delgada de grãos.	26
Figura 12A- Diagrama de bloco do sistema.	29
Figura 12B- Vista geral do gasogênio com ventilador de sucção.	30
Figura 13 - Gaseificador.	33
Figura 14 - Unidade de termo-sifão formada pelo reservatório de água, cetilha e tubulações.	34
Figura 15 - Cetilha.	35
Figura 16 - Trocador de calor.	38
Figura 17 - Gasômetro e tubulações anexas.	39
Figura 18 - Filtro.	41
Figura 19 - Ciclone.	43

- Figura 20 - Ventilador de sucção. 44
- Figura 21 - Temperaturas de entrada e saída dos gases no trocador de calor em função da rotação por minuto (RPM) dada ao motor. 49
- Figura 22 - Temperaturas de entrada e saída dos gases do trocador de calor em função do tempo sob 1500 RPM. 52
- Figura 23 - Simulação do tempo de secagem (horas) de grãos de milho em função da rotação do motor (rpm), com e sem os gases de escapamento do motor. 58

## NOTAÇÃO, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES GERAIS

cm = Centímetro

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

H = Entalpia da reação

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

h = Hora

ha = Hectare

$H_g$  = Poder calorífico inferior típico do gás pobre

$H_i$  = 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 temperatura e pressão

no. = Número

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

$T_i$  = Temperatura inicial

$T_f$  = Temperatura final

V = Vazão do gás em Nm<sup>3</sup>/h

w = rpm do motor

NOTAÇÃO NUMÉRICA REFERENTE A EQUAÇÃO (4.7)

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

NOTAÇÃO, NOMECLATURA E ABREVIACÕES  
REFERENTES A SECAGEM DE GRÃOS

A e B = constantes que dependem da temperatura e do produto.

$a_1, a_2, b_1, b_2, a, b, c, d$  = Constantes que dependem do produto agrícola

b.s. = Produto agrícola em base seca

$C_p$  = Calor específico do produto agrícola em kcal/(kg de ar seco.°C)

$\frac{dU}{dt}$  = Taxa de secagem

D = Coeficiente de difusão,  $m.s^{-1}$

h = Coeficiente de transferência de calor por convecção,  $w.m^{-2}.K^{-1}$

$h_m$  = Coeficiente de transferência de massa por convecção,  $m.s^{-1}$

H = Umidade relativa do ar, decimal

$h_{fg}$  = Calor latente de vaporização da água no produto agrícola

$K = D\pi^2/R^2$  = Constante de secagem,  $h^{-1}$

M = Razão de umidade do produto, decimal, adimensional

$m_w$  = Taxa de evaporação

$M_w$  = Peso molecular da água, kg.mol

$P_{vu}$  = Pressão de vapor à temperatura do bulbo úmido,  $N.m^{-2}$

$P_{va}$  = Pressão de vapor à temperatura ambiente,  $N.m^{-2}$

q = Taxa de transferência de calor, w

R = raio equivalente, m

$R_c$  = Razão de conversão de unidades, kg do produto/kg de ar seco

$R_0$  = Constante universal dos gases,  $8314 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-2} \text{ kg.mol.K}^{-1}$

$R_v$  = Constante dos gases para o vapor de água,  $462.69 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

$S$  = Superfície exposta,  $\text{m}^2$

$T$  = Temperatura absoluta, K

$t$  = Tempo, h

$T_\theta$  = Temperatura ambiente, K

$T_{bu}$  = Temperatura de bulbo umido, K

$\theta$  = Temperatura do produto, K

$T_e$  = Temperatura de equilíbrio do ar, °C



## ÍNDICE

	Página
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	
2.1. Gasogênio .....	3
2.1.1. Antecedentes históricos .....	3
2.1.2. Gaseificação .....	4
2.1.3. As zonas do gasogênio .....	5
2.1.3.1. Zona de combustão .....	5
2.1.3.2. Zona de gaseificação .....	5
2.1.3.3. Zona de carbonização .....	8
2.1.3.4. Zona de semi-carbonização ou pré- aquecimento .....	8
2.1.3.5. Zona de desidratação .....	8
2.1.4. Comburentes .....	8
2.1.4.1. Agente gaseificante: Oxigênio ...	9
2.1.4.2. Agente gaseificante: Ar .....	9
2.1.4.3. Agente gaseificante: Vapor d'água	10
2.1.4.4. Agente gaseificante: Ar e Vapor d'água .....	11
2.1.5. Fluxo de gás gerado .....	11
2.1.5.1. Gaseificador de fluxo ascendente (up draft) .....	11
2.1.5.2. Gaseificador de fluxo descendente (down draft) .....	12
2.1.5.3. Gaseificador de fluxo transversal	16

	Página
2.2. Grelhas .....	18
2.3. Segurança .....	18
2.3.1. Toxidez .....	20
2.3.2. Explosividade .....	21
2.4. Secagem de produtos agrícolas .....	21
2.4.1. Teoria da secagem .....	21
2.4.2. Fase inicial: período de secagem a taxa constante .....	21
2.4.3. Segunda fase de secagem: período de seca- gem a taxa decrescente .....	22
2.4.4. Equilíbrio higroscópico dos grãos .....	23
2.4.5. Secagem em camada fina .....	23
2.4.6. Secagem em camada espessa .....	25
3. MATERIAIS E MÉTODO EXPERIMENTAL	
3.1. Descrição das unidades do sistema .....	28
3.1.1. Gaseificador com cetilha e anexos .....	31
3.1.1.1. Gaseificador .....	31
3.1.1.2. Cetilha .....	32
3.2.2. Trocador de calor de tubos retos - gases versus ar .....	36
3.2.3. Gasômetro .....	37
3.2.4. Filtro .....	37
3.2.5. Ciclone .....	40
3.2.6. Motor e ventilador de sucção .....	42
3.2.6.1. Motor .....	42
3.2.6.2. Ventilador de sucção .....	42
3.3. Manutenção do gasogênio .....	42
3.4. Instrumentação .....	45

4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO	
4.1. Variação de temperatura dos gases na entrada e saída a do trocador de calor .....	47
4.1.1. Temperatura de entrada e saída dos gases no trocador de calor em função de diferentes rotações do motor .....	47
4.1.2. Temperaturas de entrada e saída no trocador de calor em função do tempo .....	50
4.2. Rendimento energético do gaseificador com uma estimativa das perdas energéticas principais .....	53
4.2.1. Volume de gás gerado e carvão consumido de 1500 a 3000 rpm .....	53
4.2.2. Rendimento do gasogênio .....	54
4.3. Simulação de secagem de milho com os dados termodinâmicos do ar provenientes do ventilador acionado por um gasogênio contra corrente .....	55
5. CONCLUSÃO .....	59
6. SUGESTÕES .....	61
BIBLIOGRAFIA .....	62

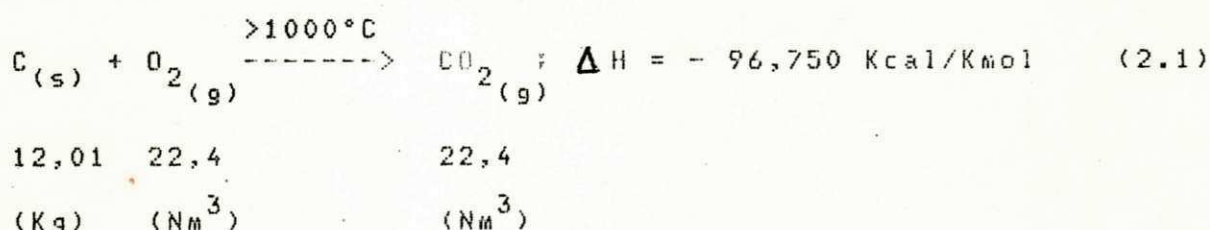
pirolenhosos e desidratação da biomassa. Os gaseificadores são classificados de diferentes formas dependendo basicamente do comburente e do fluxo da massa gasosa gerada (1, 12, 25).

### 2.1.3. As zonas do gasogênio

No interior do gasogênio ocorrem zonas bastantes delimitadas. Estas zonas são as seguintes: combustão, gaseificação, carbonização, semi-carbonização e desidratação. Em cada uma destas zonas ocorrem diferentes fenômenos dependentes da temperatura reinante (25), conforme mostra a Figura 1.

#### 2.1.3.1. Zona de combustão

É a zona onde ocorre a oxidação do carbono, conforme a reação:



Esta zona tem uma espessura de 10 a 15 cm aproximadamente e temperaturas entre 1000 a 1500°C. A liberação de calor desta zona é responsável pelo gradiente térmico do gaseificador.

#### 2.1.3.2. Zona de gaseificação

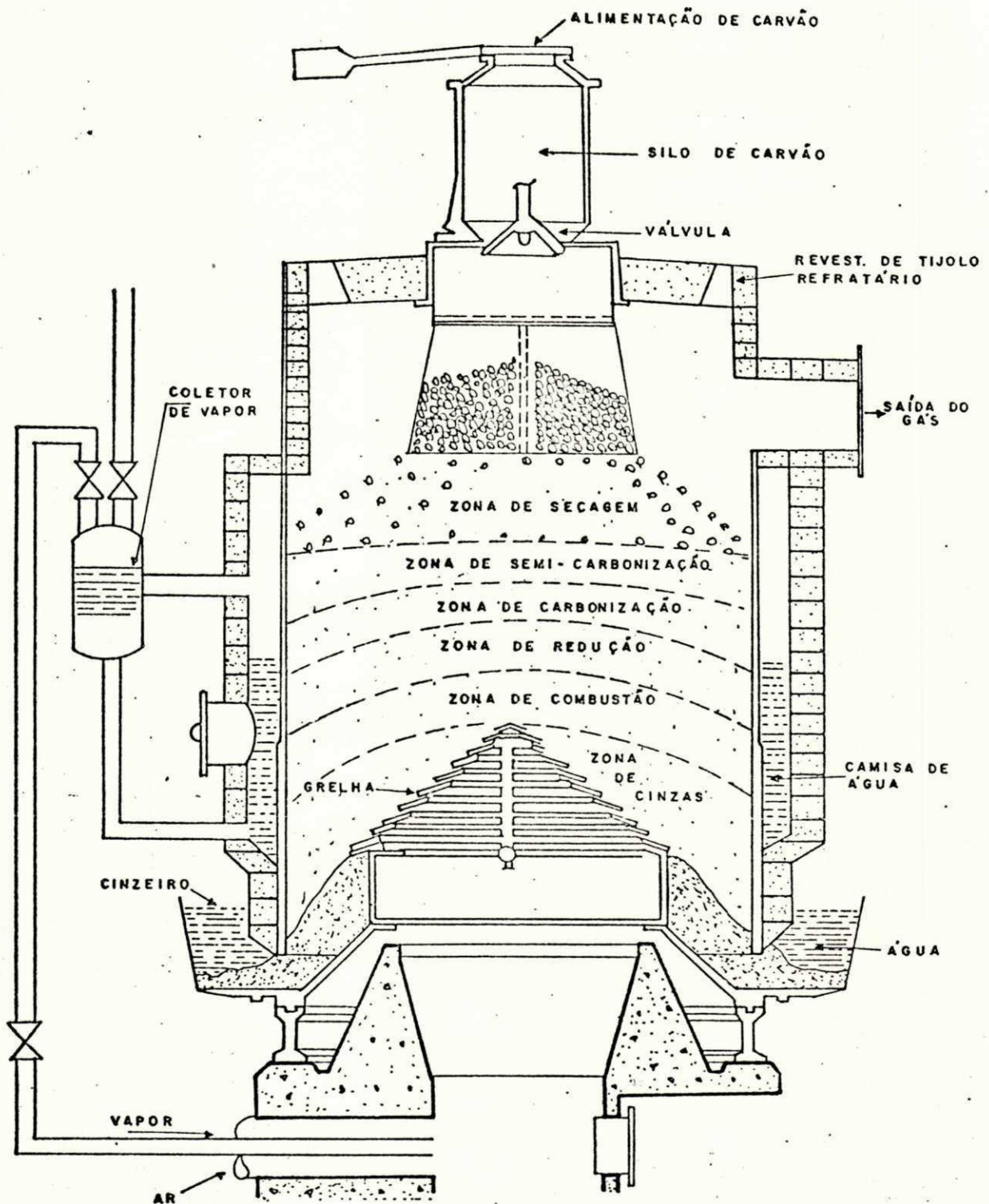


FIGURA I : GASEIFICADOR DE FLUXO ASCENDENTE, DE GRELHA ROTATIVA, COM CAMISA DE ÁGUA.





Esta zona tem uma espessura em torno de 20 cm e temperaturas entre 700 e 1000°C (25).

#### 2.1.3.3. Zona de carbonização

A zona de carbonização também chamada de pirólise, destilação destrutiva ou devolatização é a região onde a madeira perde todo o alcatrão contido, transformando-se em carvão. Operando-se com o carvão vegetal, este perde o alcatrão residual. As temperaturas nesta região situam-se na faixa de 300 a 700°C (25).

#### 2.1.3.4. Zona de semi-carbonização ou pré-aquecimento

É a região onde o material carbonáceo perde parte do alcatrão formando os tiços. Os tiços apresentam uma coloração marron indicando que ainda possuem alcatrão. Esta zona apresenta uma faixa de temperatura entre 120 a 300°C.

#### 2.1.3.5. Zona de desidratação

A zona de desidratação ou secagem é a primeira região do gaseificador onde o carvão ou madeira perde toda a sua umidade. A temperatura desta zona fica entre 50 a 120°C.

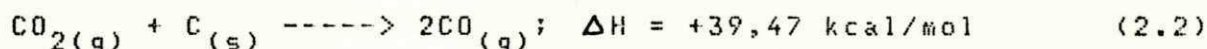
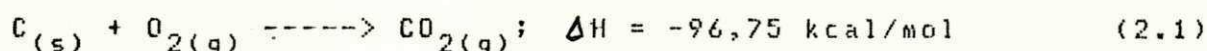
#### 2.1.4. Comburentes

Os comburentes utilizados na gaseificação são os seguintes: oxigênio, ar, vapor de água, e simultaneamente ar e vapor de água.



#### 2.1.4.1. Agente gaseificante: Oxigênio

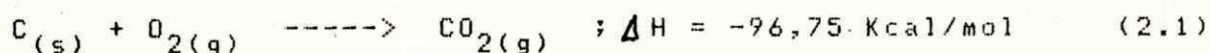
O oxigênio é um comburente de custo elevado e só utilizado quando se quer obter o monóxido de carbono puro. O monóxido de carbono junto com o hidrogênio é empregado na síntese do álcool metílico. Neste caso as reações básicas são as seguintes:

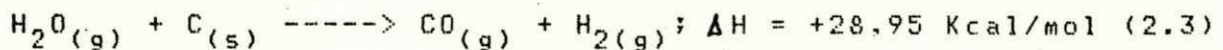
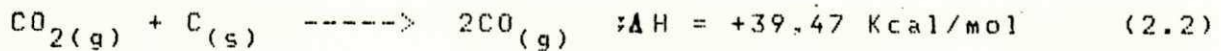


O poder calorífico inferior do monóxido de carbono é de 2.866 kcal/Nm<sup>3</sup> sob uma temperatura de 15,5°C e 1 atm (3).

#### 2.1.4.2. Agente gaseificante: Ar

Quando o ar é o agente gaseificante obtém-se no processo de gaseificação o gás de ar, também denominado gás de gerador ou gás pobre. Como o ar contém aproximadamente 80% de nitrogênio, a presença final deste gás incomburente faz diminuir o poder calorífico final que fica em torno de 1.100 a 1.200 Kcal/Nm<sup>3</sup> (25). É o combustível de menor poder calorífico e também de menor custo e maior facilidade de obtenção. Como o ar contém umidade, esta é craqueada na zona de redução obtendo-se também o gás de água. As principais reações que geram o gás de ar são as seguintes:





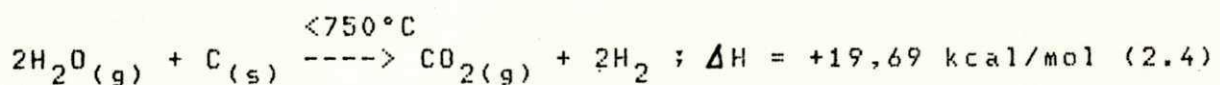
O gaseificador contra-corrente é um gerador de gás de ar. A composição típica do gás de ar é a seguinte (6):

Monóxido de carbono (CO)	- 23 a 28%
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	- 12 a 15%
Metano (CH <sub>4</sub> )	- 1 a 2%
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	- 50 a 55%
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	- 4 a 10%

#### 2.1.4.3. Agente gaseificante: Vapor de água

Quando o agente gaseificante é o vapor de água obtém-se o gás de água, também chamado de gás azul, gás de iluminação ou gás de rua (7).

As reações básicas que conduzem ao gás de água são as seguintes:



O poder calorífico inferior do gás de água é de

aproximadamente  $2470 \text{ Kcal/Nm}^3$  (3).

#### 2.1.4.4. Agente gaseificante: Ar e vapor de água

Quando o agente gaseificante é simultaneamente o ar e vapor de água obtém-se o chamado gás misto. Sua composição é semelhante a do gás de ar com a diferença de um aumento da taxa de hidrogênio. As reações químicas que ocorrem são a do gás de ar e do gás de água.

O vapor de água é obtido a partir de uma camisa de água que envolve as zonas de combustão e gaseificação (Figura 1). O vapor de água é misturado ao ar de entrada na proporção de 250g de vapor por quilograma de carvão consumido (7). O poder calorífico do gás misto se situa entre o poder calorífico do gás de ar e do gás de água.

#### 2.1.5. Fluxo de gás gerado

Os gaseificadores podem ser de três tipos de fluxos: ascendente, descendente e transversal. Cada um destes fluxos determina uma ordem específica nas zonas de reação, como também uma composição diferente nos gases contidos.

##### 2.1.5.1. Gaseificador de fluxo ascendente (up draft)

Caracterizam-se pela ascensão dos gases gerados no sentido da convecção natural, isto é de baixo para cima. Dentro do gaseificador, da parte inferior para a superior apresenta-se a seguinte ordem de zonas: combustão, gaseificação, carbonização, semi-carbonização e desidratação,



conforme mostram as Figuras 2 e 3.

Estes gaseificadores apresentam os seguintes fatores positivos: temperatura adiabática de chama mais elevada do que as dos outros fluxos, aceitam madeira ou carvão com teores de umidade de até 15%, tempo de acendimento mais rápido, manutenção mais simples e menor custo de construção. Os fatores negativos do gaseificador ascendente são os seguintes: maiores quantidades de água e pirolenhosos na mistura gasosa, e menor poder calorífico em relação aos outros gasogênios.

As saídas do gás no reator podem estar situadas na parte superior (Figura 2) ou na parte inferior (Figura 3) entre a zona de carbonização e gaseificação. Na última situação, isto é, com tiragem na parte inferior o alcatrão do gás é craqueado diminuindo os custos de filtragem.

Os gasogênios deste tipo podem operar com grelhas abertas, evitando assim o uso de cetilha (Figura 4).

#### 2.1.5.2. Gaseificador de fluxo descendente (down draft)

São gaseificadores cujo fluxo de gás é de cima para baixo, contrário pois a convecção natural. Também são chamados de concorrentes. Apresentam a vantagem de craquear a água e o alcatrão aumentando desta forma o poder calorífico da mistura gasosa. O sentido da chama na combustão é invertido e por esta razão as zonas de reação apresentam a seguinte ordem de cima para baixo: desidratação, semi-carbonização, carbonização, oxidação e gaseificação (Figuras 5 e 6). Os gaseificadores descendentes são indicados para consumir madeira e desta forma recuperar o calor latente do alcatrão contido na madeira. As desvantagens destes gaseificadores são as seguintes: com mais

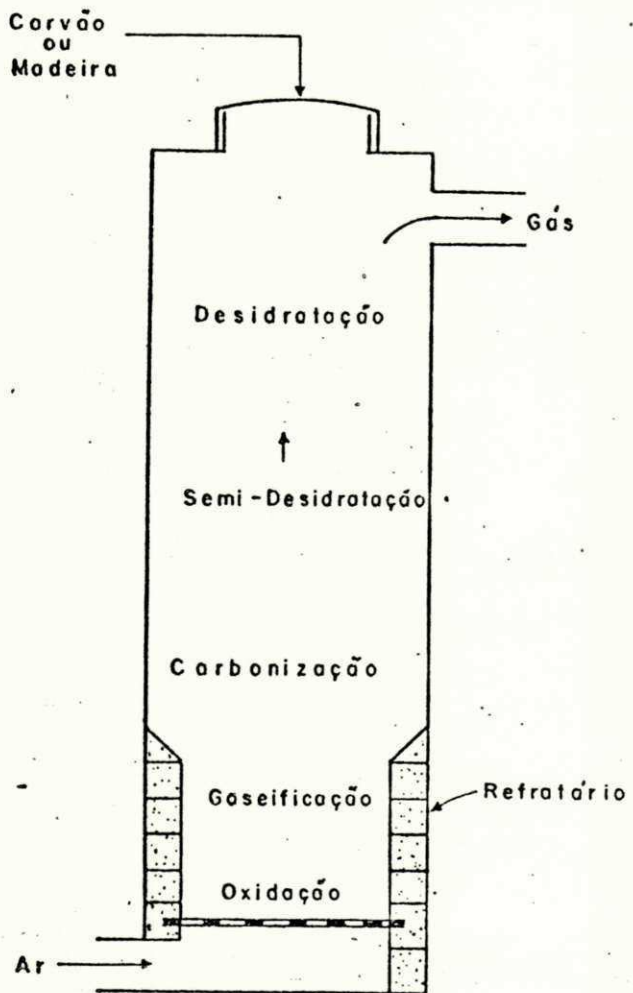


FIGURA 2 : GASEIFICADOR DE FLUXO ASCENDENTE COM SAÍDA DE GÁS NO TOPO.

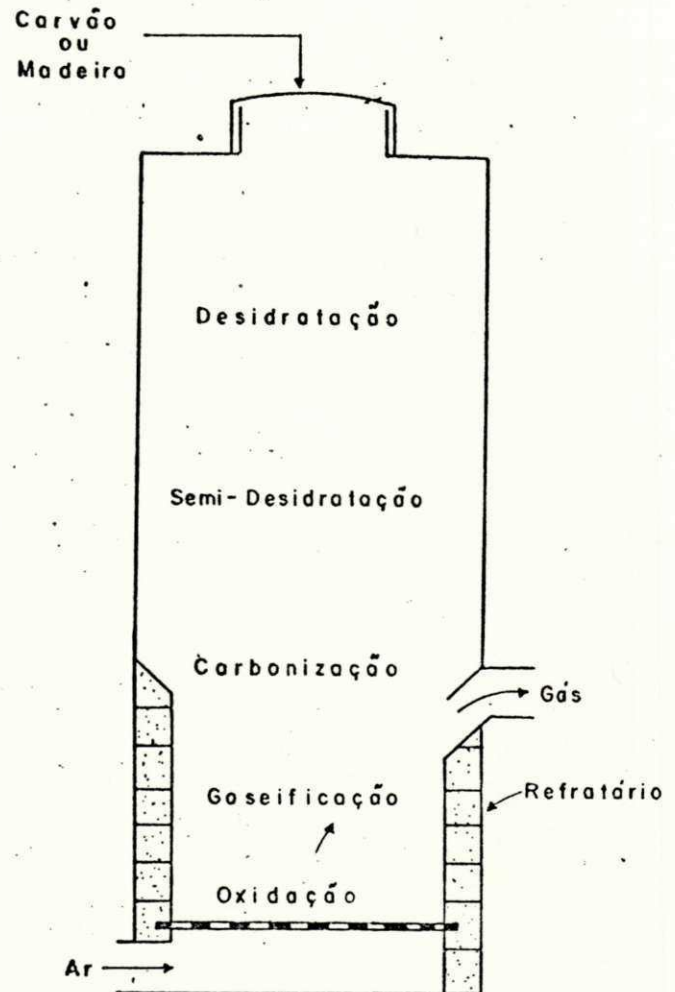


FIGURA 3 : GASEIFICADOR DE FLUXO ASCENDENTE COM SAÍDA DE GÁS ENTRE AS ZONAS DE CARBONIZAÇÃO E GASEIFICAÇÃO.

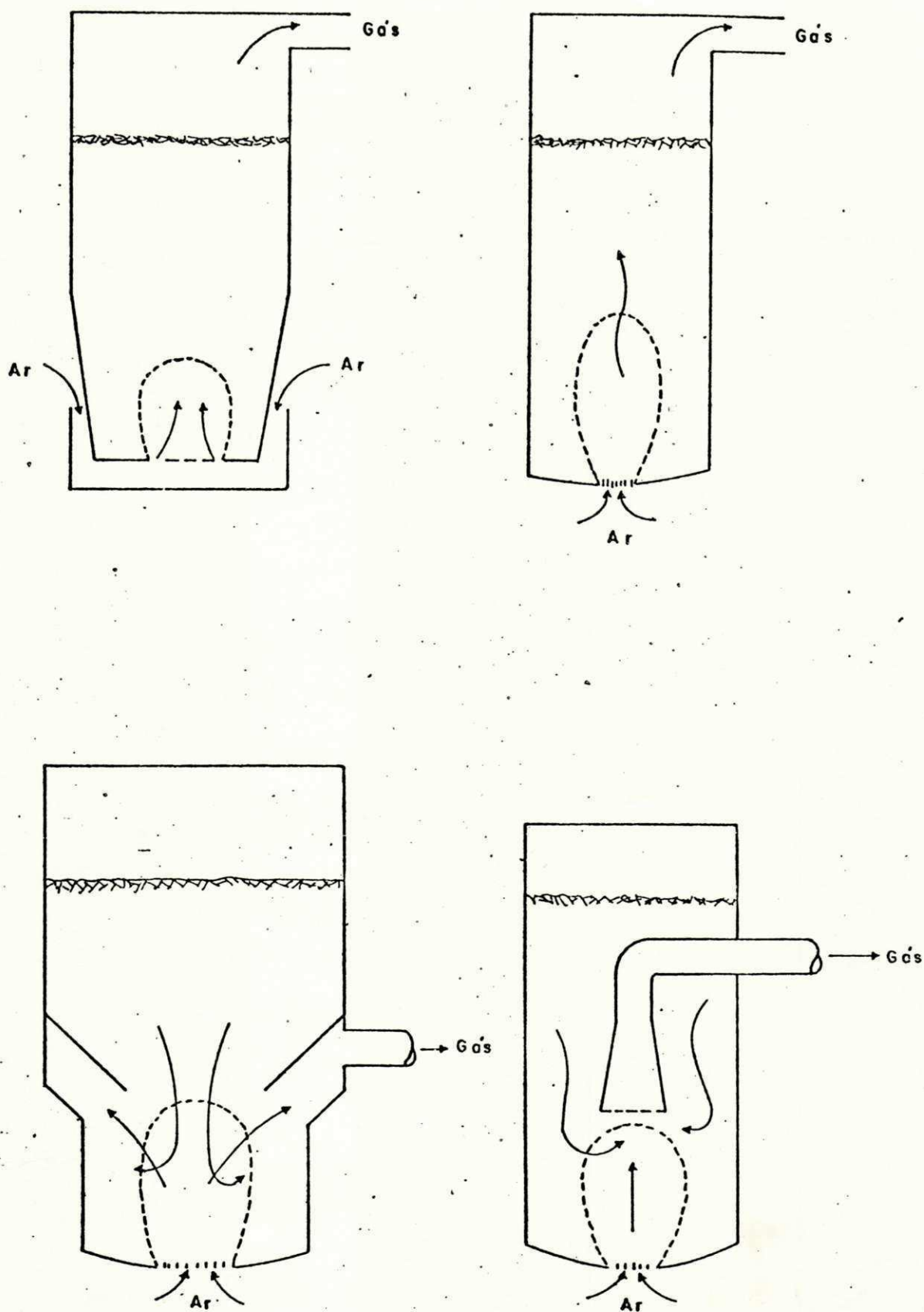


FIGURA 4 : GASEIFICADORES DE FLUXO ASCENDENTE DE GRELHA ABERTA, SEM CETILHA (25).

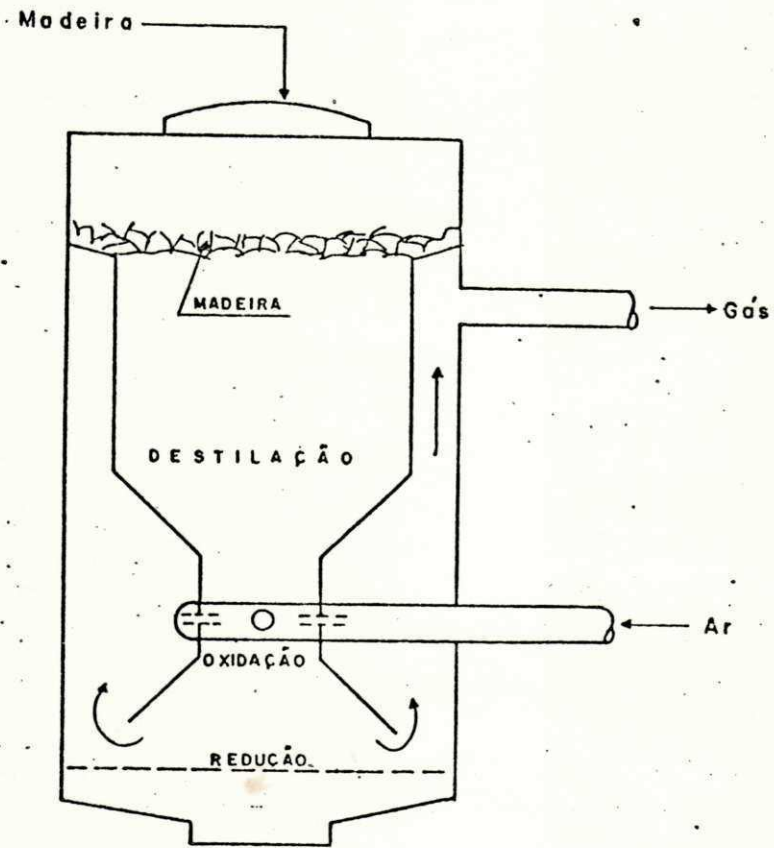


FIGURA 5: GASEIFICADOR DE FLUXO DESCENDENTE PARA MADEIRA

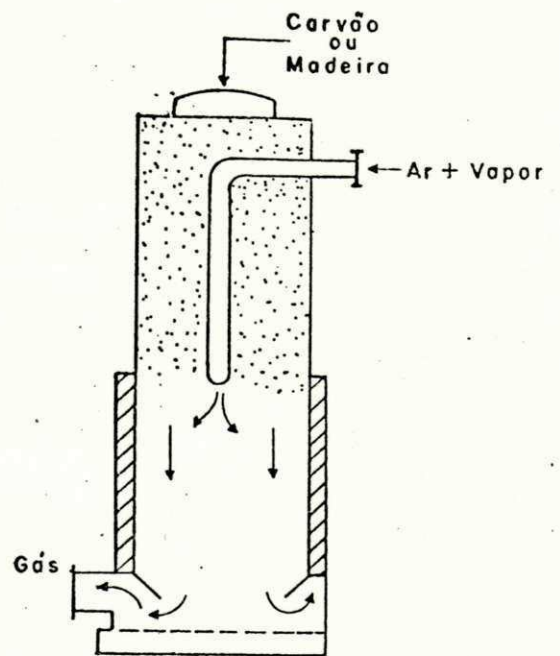


FIGURA 6: GASEIFICADOR DE FLUXO DESCENDENTE PARA CARVÃO OU MADEIRA.



de 15% de umidade deixam de funcionar, de construção mais complexa, e de maior manutenção (2).

### 2.1.5.3. Gaseificador de fluxo transversal

Neste tipo de gaseificador o gás é gerado na parte inferior do reator e desloca-se no sentido horizontal (Figuras 7 e 8). As zonas de oxidação e gaseificação estão na horizontal e dependem da zona de fogo determinada pelo diâmetro interno da cetilha (Tabela 2.1). O gaseificador de fluxo transversal apresenta as mesmas características do fluxo descendente, aqui também a água e pirolenhosos são craqueados.

Tabela 2.1. Parâmetros decorrentes do diâmetro da cetilha (24)

Diâmetros das cecilhas	7,94mm (5/16")	12,7mm (1/2")	19mm (3/4")	25,4mm (1")
Condições				
a) Comprimento mínimo da chama que dá 900°C na grelha (cm)	19	23	28	33
b) Vazão mínima de ar para uma razão $[CO/(CO+CO_2)]=0,9$	0,104	0,168	0,196	0,28
c) Vazão máxima de ar para depressão através do gerador de 300 mm de coluna d'água. (m <sup>3</sup> /min.)	0,196	0,45	0,785	1,06
d) Vazões permissíveis de gás (m <sup>3</sup> /min.)	0,135 a 0,258	0,224 a 0,59	0,226 a 1,02	0,29 a 1,4
e) Limites correspondentes da potência do gás (cv. apr.)	9,5 a 29	25 a 66	27 a 112	29 a 160
f) Potências correspondentes no motor para eficiência térmica de aprox. (25%)	2,4 a 7,2	6,2 a 16,5	6,7 a 28	7,2 a 40

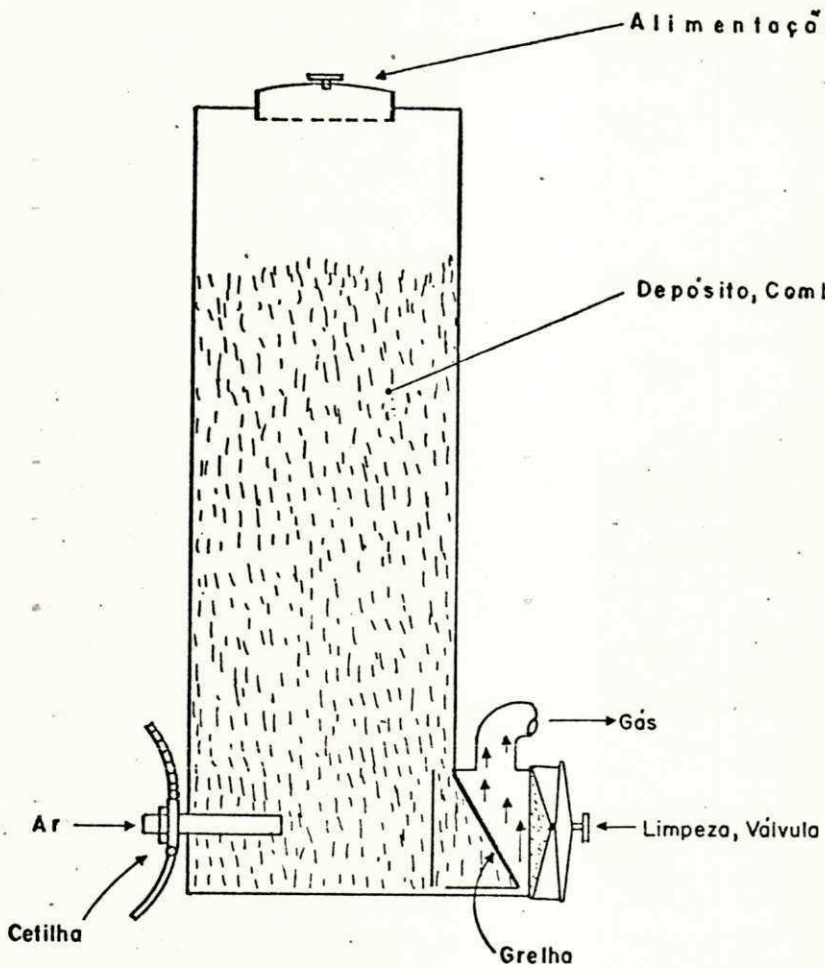


FIGURA 7 : GASEIFICADOR DE FLUXO TRANSVERSAL SEM INJEÇÃO DE VAPOR ( 25 ).

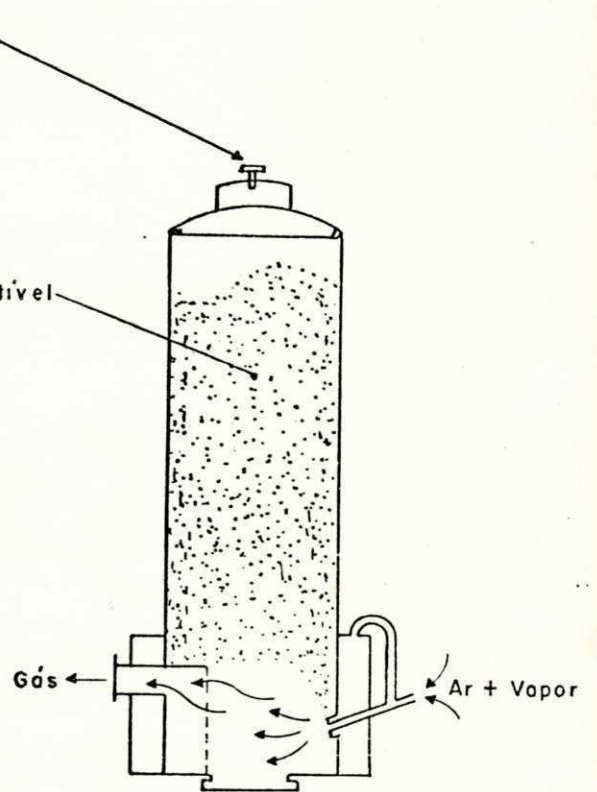


FIGURA 8 : GASEIFICADOR DE FLUXO TRANSVERSAL COM INJEÇÃO DE VAPOR ( 25 ).

As vantagens e desvantagens do gaseificador de fluxo transversal são as mesmas do gaseificador de fluxo ascendente, apresentando uma vantagem adicional de ser de construção compacta e volume reduzido.

## 2.2. Grelhas

As grelhas são peças de ferro fundido ou aço inoxidável destinadas a 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 nas zonas de reação e eliminam as cinzas, que funcionam como isolantes térmicos. As grelhas podem ser fixas ou móveis (12).

As grelhas fixas são em forma de malhas e tem uma relação de área livre para obstruída de 0,5. As grelhas fixas tem três posições principais: horizontal, vertical e inclinada (Figura 9). As grelhas móveis são constituídas de discos superpostos de ferro fundido ou aço podendo ser excêntricas ou não.

Nos gaseificadores de carvão vegetal as cinzas não ultrapassam 1% da massa total e por esta razão as grelhas podem ser dispensadas.

## 2.3. Segurança

Os gases gerados no gaseificador apresentam problemas de toxidez e explosividade (10, 19, 28 e 32).

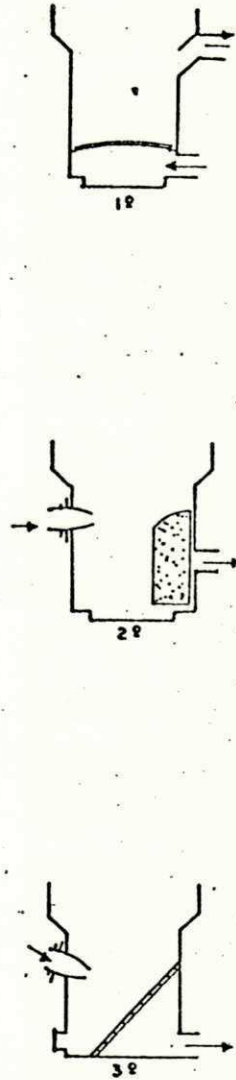


FIGURA 9 : TRÊS PRINCIPAIS POSIÇÕES DAS GRELHAS: 1º HORIZONTAL;  
2º VERTICAL E 3º INCLINADA (25).



### 2.3.1. Toxidez

O monóxido de carbono é um gás altamente tóxico por inalação. Reage com a hemoglobina do sangue gerando o composto cristalizado denominado carbohemoglobina, que é incapaz de transportar o oxigênio, e por esta razão causa anemia, asfixia e morte (19 e 28).

O monóxido de carbono misturado ao ar com 0,03% em volume em períodos prolongados provoca anemia, ocasionada pela destruição dos glóbulos vermelhos. Observou-se que os operadores de gasogênio localizados em ambientes sem ventilação adequada apresentam uma palidez acentuada identificando a anemia (28).

Misturado ao ar com 0,3% em volume em menos de uma hora, causa dores de cabeça, sonolência, náuseas e vertigens. Com 1% em volume ao ar pode produzir resultados fatais em dez minutos (19).

Os problemas de toxidez são evitados da seguinte forma:

- O gasogênio deve estar situado em um galpão aberto e bastante ventilado.
- A chaminé de partida deve ser projetada pelo menos a dois metros acima do telhado.
- Deve-se eliminar totalmente os vazamentos tornando o sistema estanque.
- Quando possível manter um equipamento de detecção de monóxido de carbono.

### 2.3.2. Explosividade

Em virtude do monóxido de carbono e hidrogênio estarem misturados ao gás carbônico e nitrogênio o problema da explosividade não é tão crítica como no estado de pureza. Não obstante o uso inadequado do gasogênio tem provocado explosões no gasômetro e gaseificador em virtude do recuo de chama (flash back). O problema de explosão é evitado com a utilização de uma válvula de segurança.

## 2.4. - Secagem de produtos agrícolas

### 2.4.1. Teoria da secagem

A secagem é um fenômeno de transferência simultânea de calor e massa. Os produtos agrícolas tais como o milho, quando desidratados em camadas finas apresentam uma perda de umidade a uma taxa constante durante a fase inicial de secagem, em seguida a taxa de desidratação é decrescente. No entanto os grãos destinados a secagem já passaram pela primeira fase e se encontram no período de desidratação a taxa decrescente (5).

### 2.4.2. Fase inicial: período de secagem a taxa constante

Na fase inicial os grãos destinados a secagem apresentam de 70 a 75% de umidade. Nesta etapa a secagem depende de três parâmetros fundamentais: velocidade do ar, temperatura do ar e umidade relativa do ar. Se estes parâmetros se mantiverem constante a taxa de desidratação também será constante (18). Neste caso a taxa de evaporação é

semelhante a de um termometro de bulbo úmido e será dada por:

$$m_w = \frac{h_m S M_w}{R_o T} (P_{vu} - P_{v\theta}) \quad (2.6)$$

A quantidade de calor do ar transferida para o bulbo úmido é:

$$q = h S (T_\theta - T_{bu}) \quad (2.7)$$

Sabendo-se que a taxa de transferência de calor, é dada por:

$$q = m_w h_{fg} = \frac{h_{fg} h_m S M_w}{R_o T} (P_{vu} - P_{v\theta}) \quad (2.8)$$

Associando as equações (2.7) e (2.8), obtém-se:

$$\frac{dU}{dt} = \frac{h_m S}{R_v T} (P_{vu} - P_{v\theta}) = \frac{h S}{h_{fg}} (T_\theta - T_{bu}) \quad (2.9)$$

#### 2.4.3. Segunda fase de secagem: período de secagem a taxa decrescente

Os grãos destinados a secagem já ultrapassaram o primeiro período e por esta razão não se encontram cobertos por uma camada fina de água, apresentando uma maior resistência a transferência de água que será decrescente com o tempo. As curvas típicas de secagem de grãos são mostradas na Figura 10.

A taxa de secagem de um produto biológico durante o



período de secagem à taxa decrescente é mais complexa do que no período à taxa constante. Nesta situação devem ser considerados tanto a transferência de calor e massa externa, de grão a grão, como também os fenômenos de difusão de calor e massa interna ao grão.

#### 2.4.4. Equilíbrio higroscópico dos grãos

Os grãos e cereais são higroscópicos e mantêm uma pressão de vapor a uma dada temperatura e umidade. Esta pressão de vapor determina um equilíbrio higroscópico entre o grão e o ar circundante em condições isotérmicas.

Existem dois métodos para se determinar o teor de umidade no equilíbrio higroscópico (5):

1 - Método Estático - É o processo em que a atmosfera circunda o produto e tende a equilibrar-se com ele sem que haja agitação mecânica do ar.

2 - Método Dinâmico - É o processo em que a atmosfera que circunda o produto é movida mecanicamente ou vice-versa.

#### 2.4.5. Secagem em camada fina

Embora várias teorias tenham sido propostas como a teoria da difusão líquida, teoria capilar, de vaporização - condensação; teoria de LUIKOV, de PHILIP & DE VRIES, de BERGER & PEI e de FORTES & OKOS, para predizer o comportamento de

secagem de grãos durante o período de secagem à taxa decrescente, somente as relações semi-empíricas e empíricas tem-se mostrado como melhores opções para predizer o processo de secagem (13).

Uma das equações semi-empíricas usadas para descrever a secagem de grãos é apresentada por BROOKER (5), onde simplifica-se a equação de difusão em coordenadas esféricas. Ao invés de um número infinito de termos, somente o primeiro termo é empregado. Desta maneira tem-se:

$$M = \frac{6}{\pi^2} \exp(-kt) \quad (2.10)$$

onde:

$$k = D \pi^2 / R^2 = \text{constante de secagem, } h^{-1}$$

$$t = \text{tempo, h}$$

Uma equação muito semelhante a acima descrita é empregada na secagem de grãos e é análoga a lei de resfriamento de NEWTON. A equação é:

$$\frac{dU}{dt} = k(u - u_2) \quad (2.11)$$

THOMPSON (26-27) em 1968 desenvolveu uma fórmula puramente empírica, sendo hoje bastante aceita para predizer a secagem de grão. Sua forma é:

$$t = A \ln(M) + B (\ln M)^2 \quad (2.12)$$

#### 2.4.6. Secagem em camada espessa

Em um silo a camada de secagem nunca é delgada, mas sim espessa. Nessas condições o ar que passa por uma camada se modifica, diminuindo sua temperatura ao ceder calor sensível para os grãos e aumenta sua umidade ao receber a água evaporada do produto, conseqüentemente sua capacidade de secagem diminui.

##### - Modelo de THOMPSON

THOMPSON em 1967 desenvolveu um modelo matemático para a previsão da influência das condições do ar de secagem, dos fluxos de ar e de grãos, da espessura da camada e do teor de umidade inicial do produto. O autor fundamenta sua secagem em camada espessa dividindo em vários pequenos processos que atuam como camada delgada. A Figura 11 é uma representação esquemática dos processos que ocorrem na secagem em camada delgada. Neste modelo THOMPSON (26) admite as seguintes hipóteses:

- 1) A secagem de uma camada delgada é representada pela equação:

$$t = A \ln(M) + B [\ln(M)]^2 \quad (2.13)$$

- 2) A temperatura do grão é suposta igual a temperatura do ar que o envolve;

- 3) O teor de umidade de equilíbrio do produto, para

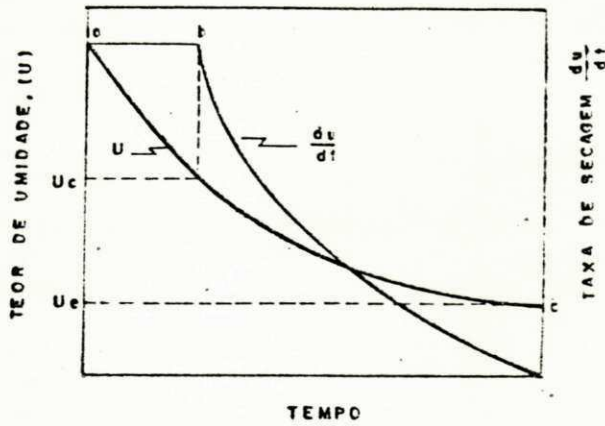


FIGURA 10: COMPORTAMENTO DA SECAGEM DE UM PRODUTO BIOLÓGICO (ab = PERÍODO DE SECAGEM À TAXA CONSTANTE; bc = PERÍODO DE SECAGEM À TAXA DECRESCENTE)

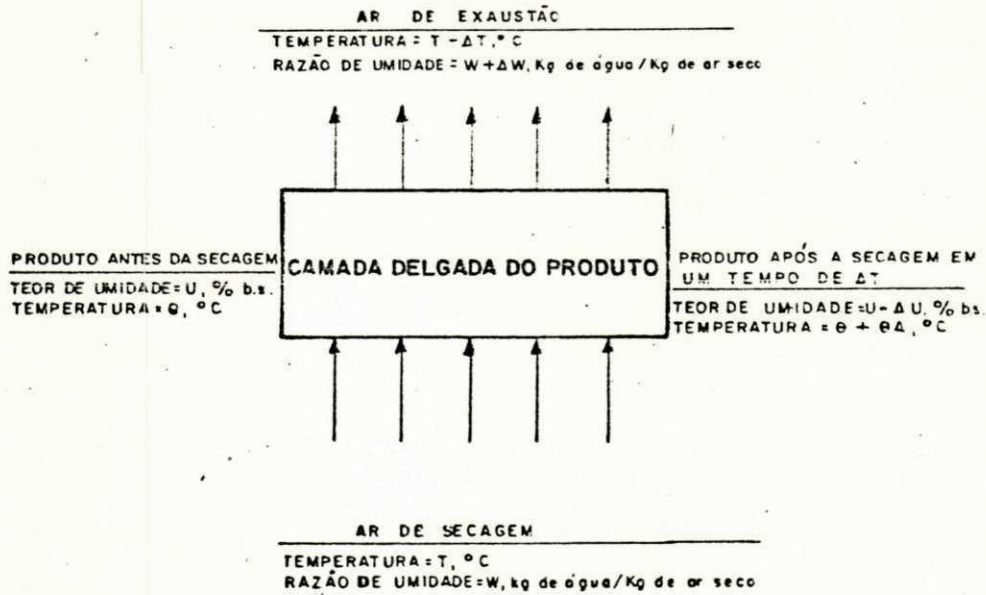


FIGURA 11: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA CAMADA DELGADA (18).

determinada condição do ar da secagem, é representado por:

$$U_e = a \left[ 1 - \frac{\ln(1-H)_1 b}{T_e + 45,6} \right] \quad (2.14)$$

4) O calor latente de vaporização da água é dado por:

$$h_{fg} = (a_1 - b_1 T) [1 + a_2 \exp(b_2 U)] \text{ kcal/kg.K} \quad (2.15)$$

5) O calor específico do produto convertido em kcal/kg de ar seco é dado por:

$$c_p = \left[ c + d \left( \frac{U}{100+U} \right) \right] R_c \quad (2.16)$$

onde os coeficientes para o milho são:

$$A = 2,01794 + 0,008780$$

$$B = 148,6086 \exp(-0,054180)$$

$$a = 120,6$$

$$b = 0,5$$

$$a_1 = 606$$

$$b_1 = 0,57$$

$$a_2 = 4,35$$

$$b_2 = -0,2825$$

$$c = 0,35$$

$$d = 0,00851$$

### 3. MATERIAIS E MÉTODO EXPERIMENTAL

O presente trabalho foi desenvolvido nas dependências do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS com apoio dos Departamentos de Engenharia Mecânica, Engenharia Química, Núcleo de Energia e Núcleo de Tecnologia em Armazenagem da Universidade Federal da Paraíba em Campina Grande - PB.

#### 3.1. Descrição das unidades do sistema

O gasogênio projetado é composto das seguintes unidades (Figura 12A e 12B):

1. Gaseificador com cetilha e anexos (Figuras 13, 14 e 15).
2. Trocador de calor de tubos retos - gases versus ar e anexos (Figura 16).
3. Gasômetro (Figura 17).
4. Filtro (Figura 18).
5. Ciclone (Figura 19).
6. Motor e ventilador de sucção (Figura 20).

##### 3.1.1. Gaseificador com cetilha e anexos

###### 3.1.1.1. Gaseificador

O gaseificador de fluxo ascendente é alimentado com carvão vegetal pelo topo e ar na parte inferior por meio de

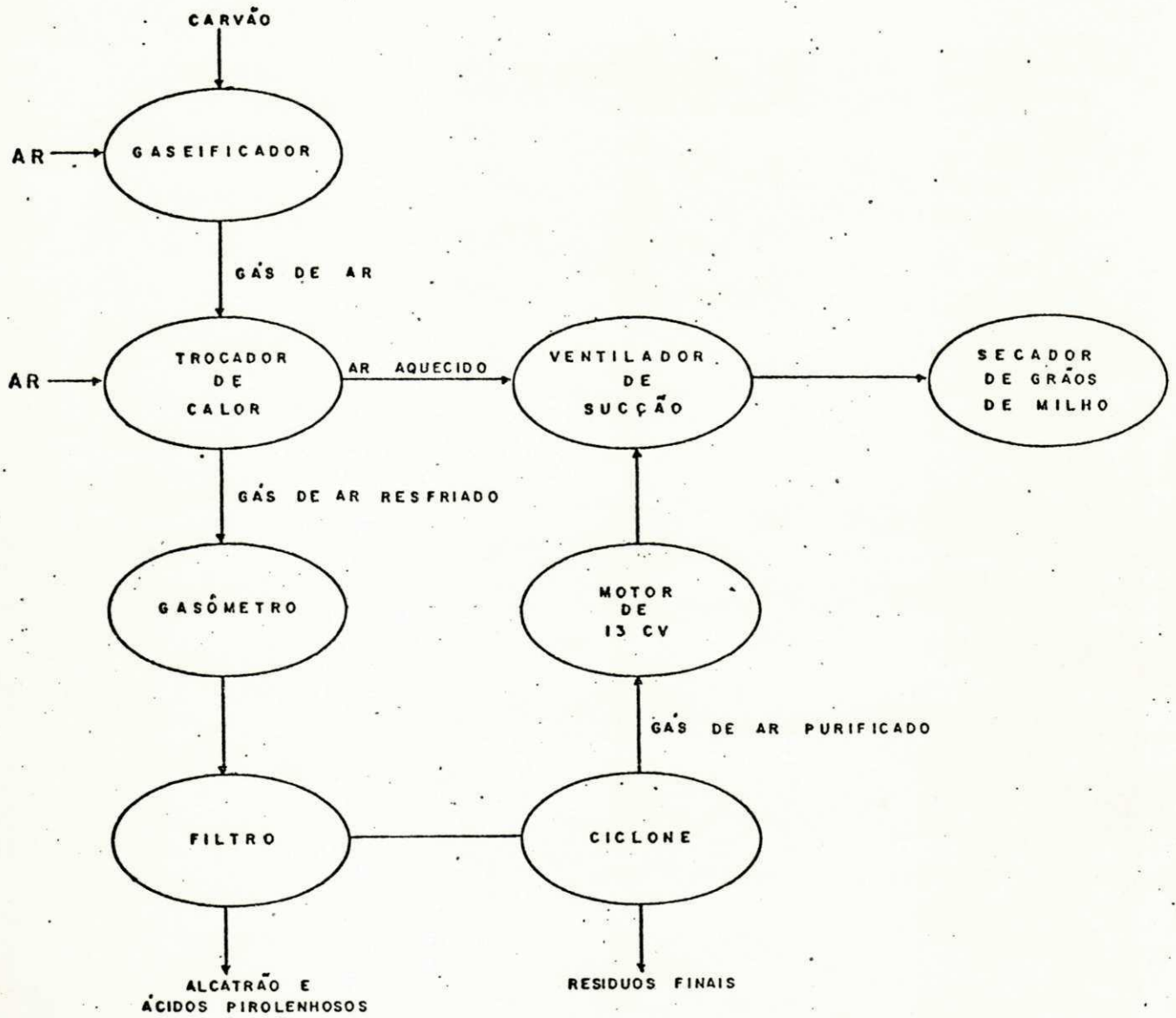


FIGURA 12 A: DIAGRAMA DE BLOCO DO SISTEMA



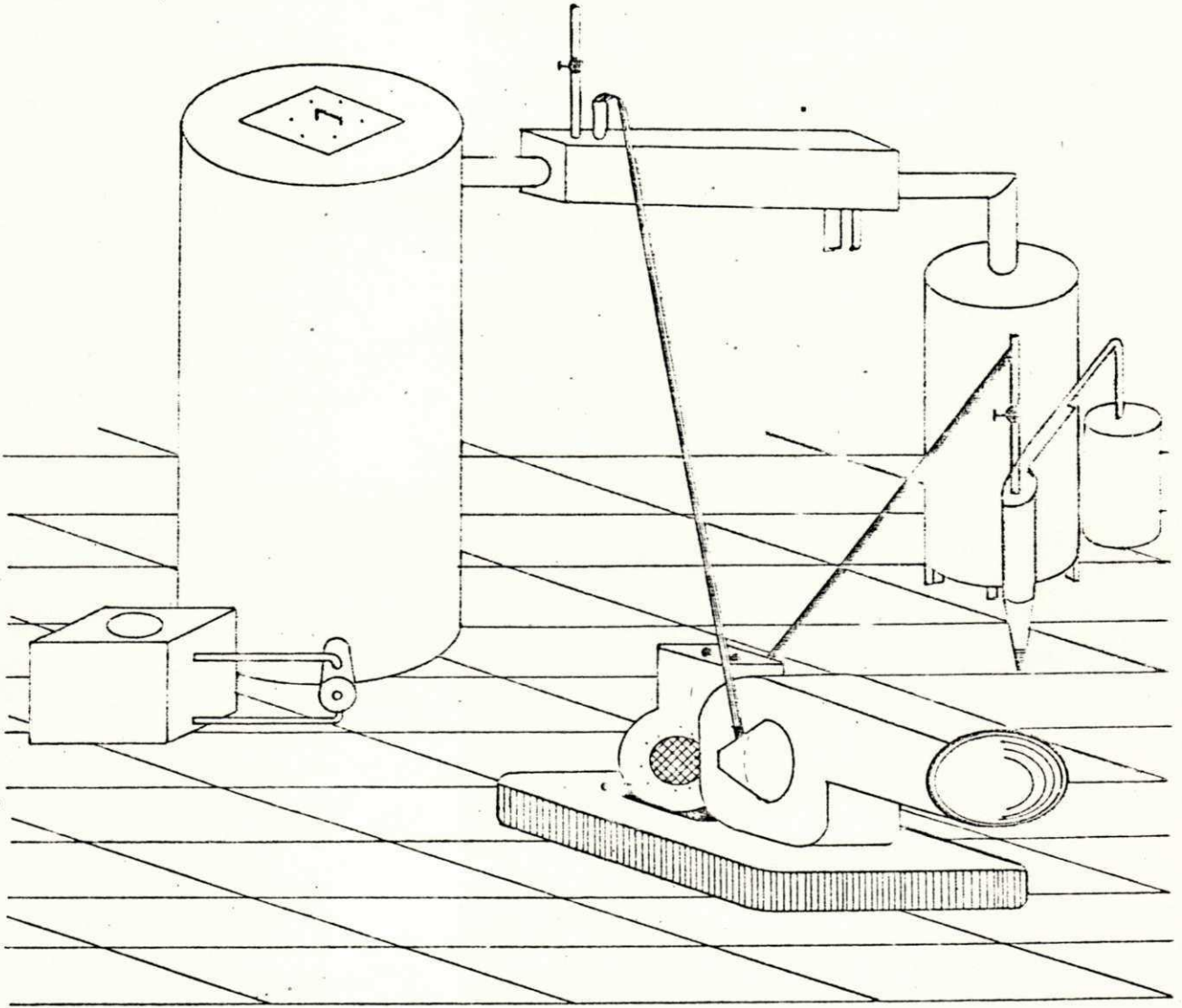


FIGURA 12 B : VISTA GERAL DO GASOGÊNIO COM VENTILADOR DE SUÇÃO

uma cecilha. 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 existente em posição oposta à cecilha. 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 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 6,35mm, 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 ( $\text{MgCO}_3$ ), 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 2% 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 e constitui um trocador de calor que funciona por convecção natural mediante um termosifão (20) (Figuras 14 e 15).

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 termosifão.

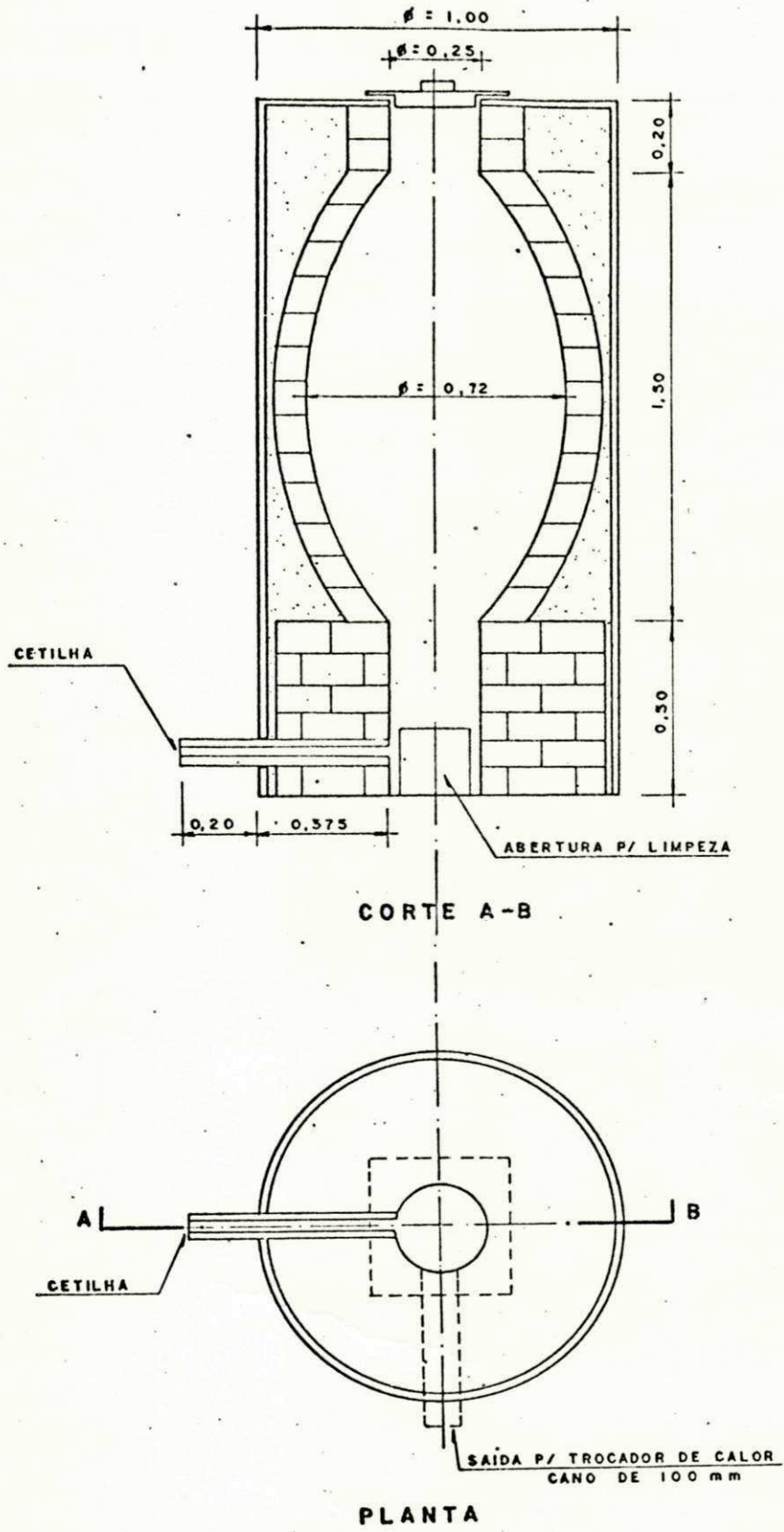


FIGURA 13 : GASEIFICADOR

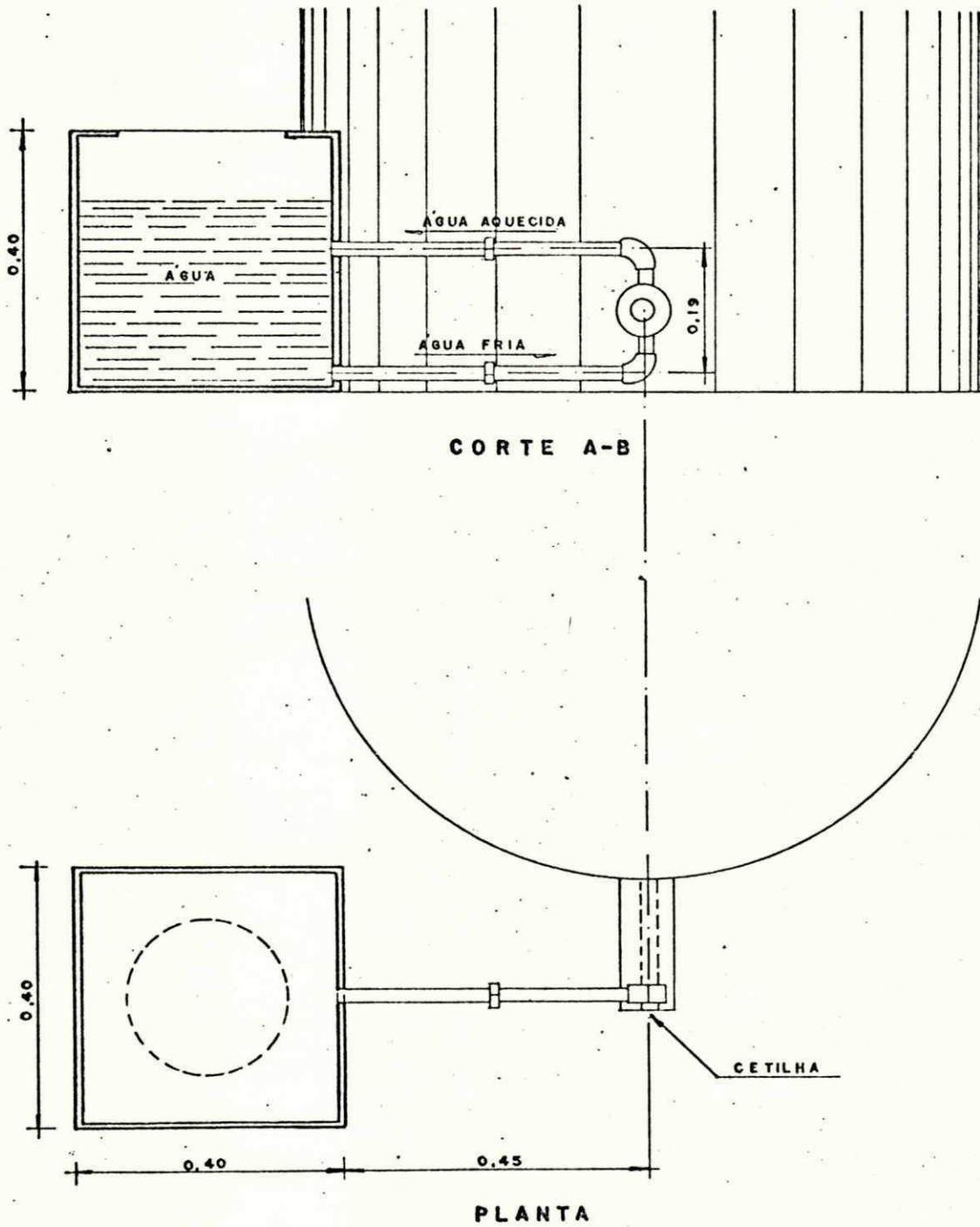


FIGURA 14 : UNIDADE DE TERMO-SIFÃO FORMADA PELO RESERVATÓRIO DE ÁGUA, CETILHA E TUBULAÇÕES.

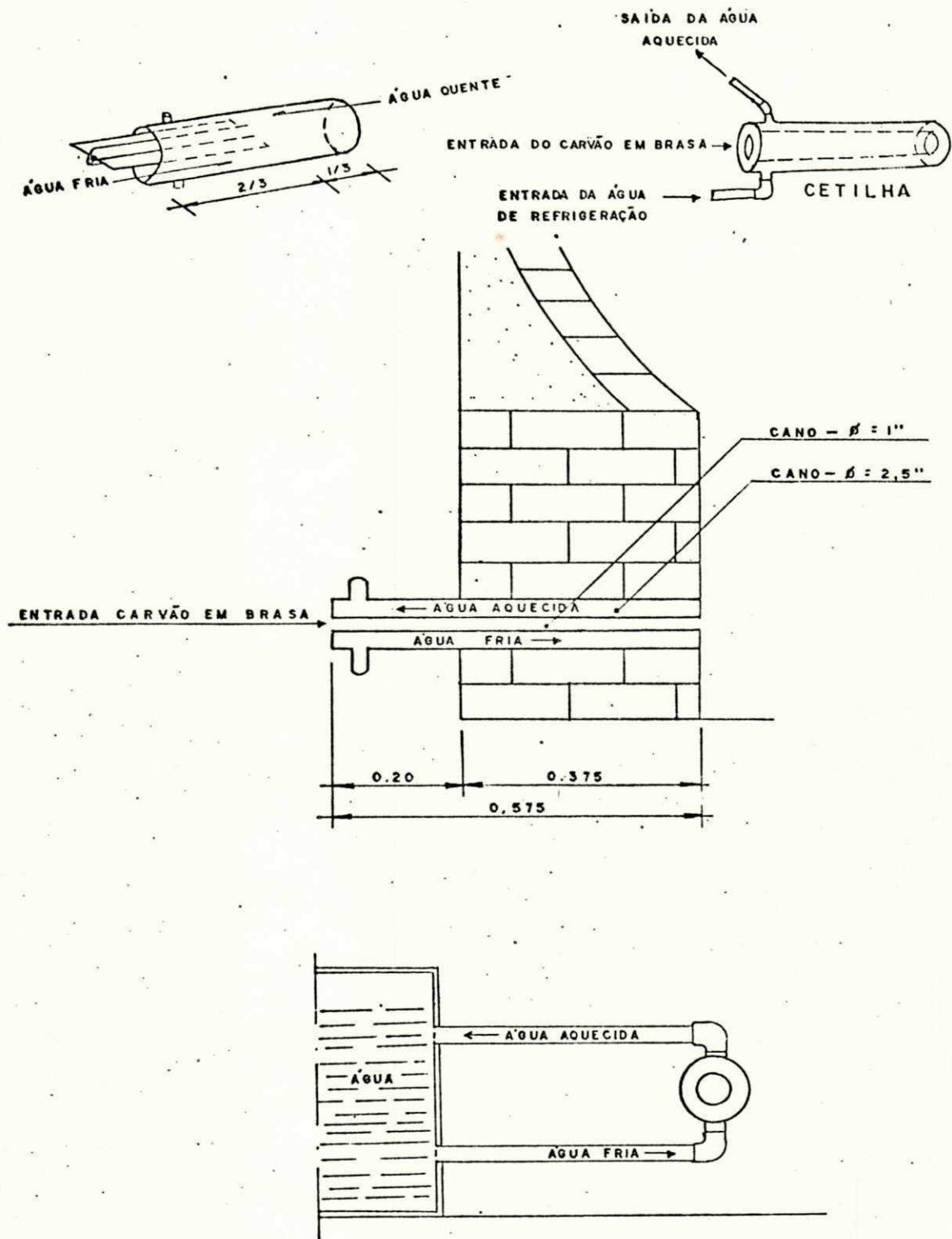


FIGURA 15 : CETILHA



### 3.2.2. Trocador de calor de tubos retos - gases versus ar

O trocador de calor é do tipo tubular, os gases escoam por dentro dos tubos e o refrigerante - ar - escoam por fora dos mesmos. As finalidades do trocador de calor são: (a) aquecer o ar usado na secagem de grãos, (b) baixar a temperatura dos gases para aumentar sua densidade e em consequência elevar o rendimento da combustão do motor, (c) propiciar a condensação da água e pirolenhosos, que serão retidas 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 19mm com 1m de comprimento; no interior dos quais escoam os gases e exteriormente o ar (Figura 16).

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<sub>2</sub>. 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 25,4 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 0,20m 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).

### 3.2.3. Gasômetro

O gasômetro é um reservatório de aço de forma cilíndrica tendo por finalidade estocar os gases e condensar a maior parte da água e pirolenhosos, que são purgados pela parte inferior através de um bujão de 100mm de diâmetro (20). A espessura da chapa é de 5mm, seu volume é de 0,29m<sup>3</sup>, com altura total de 1,298m e diâmetro de 0,566m (Figura 17). O gasômetro está ligado ao filtro por um tubo galvanizado de 25,4mm de diâmetro e comprimento 0,12m.

### 3.2.4. 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

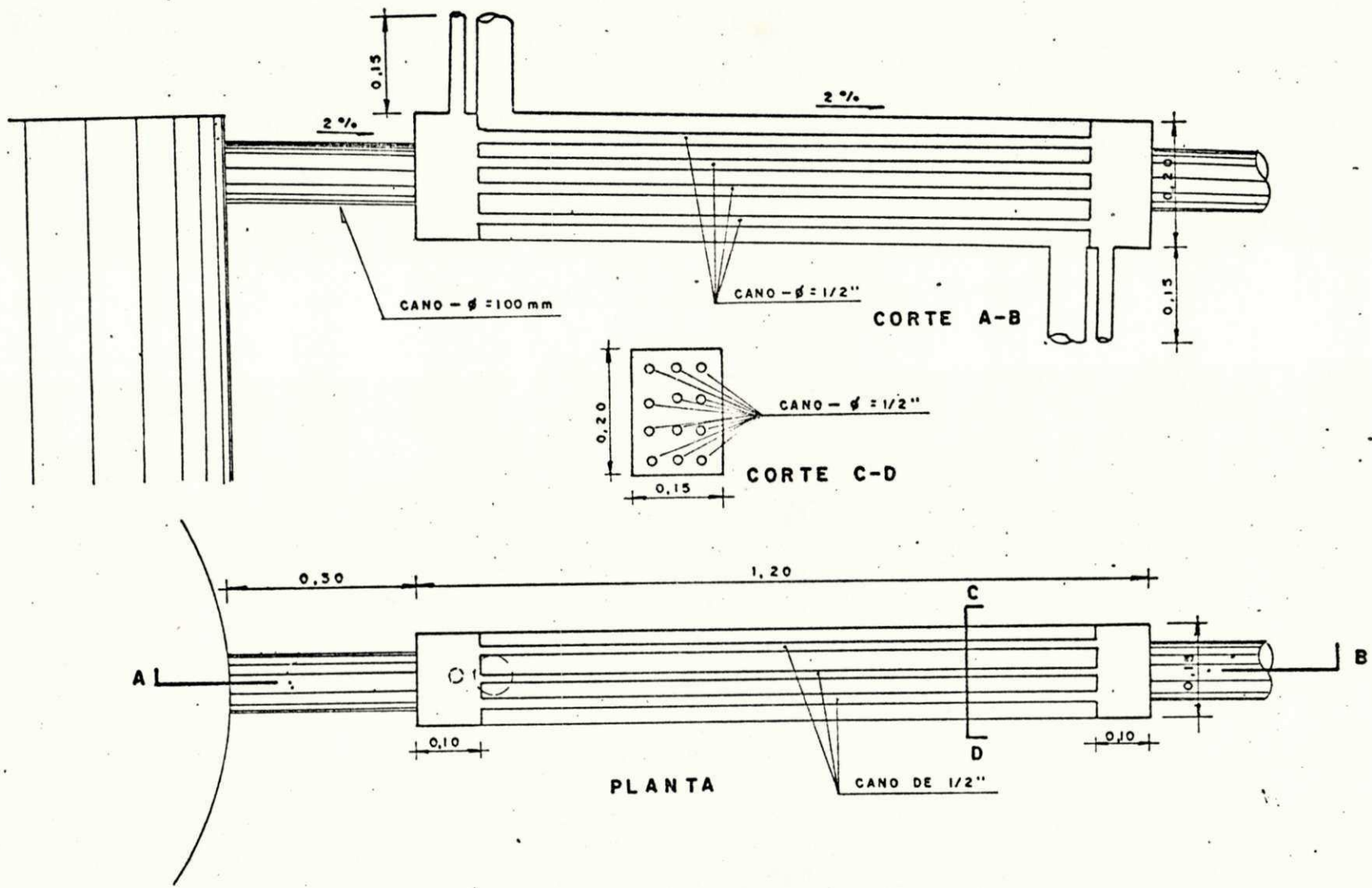


FIGURA 16 : TROCADOR DE CALOR

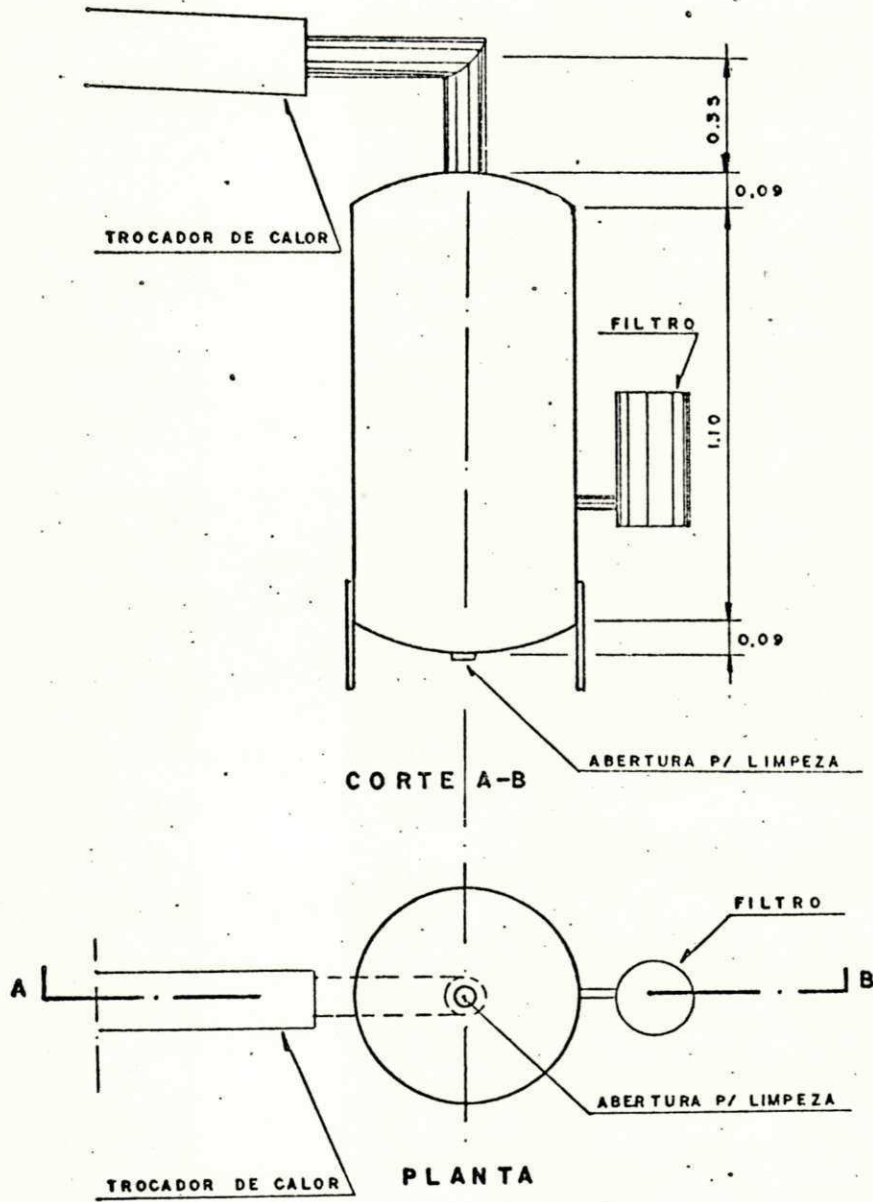


FIGURA 17 : GASÔMETRO E TUBULAÇÕES ANEXAS

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 18).

### 3.2.5. Ciclone (Figura 19)

O ciclone é o último elemento do sistema de filtragem do gasogênio (20). Ele retém as impurezas, em torno de 1 a 2%, que não foram retidas pelo filtro, possibilitando a obtenção dos gases praticamente puros, que são aspirados pelo motor. O ciclone é formado por dois tubos concêntricos, um interno com 50,8mm e um diâmetro 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

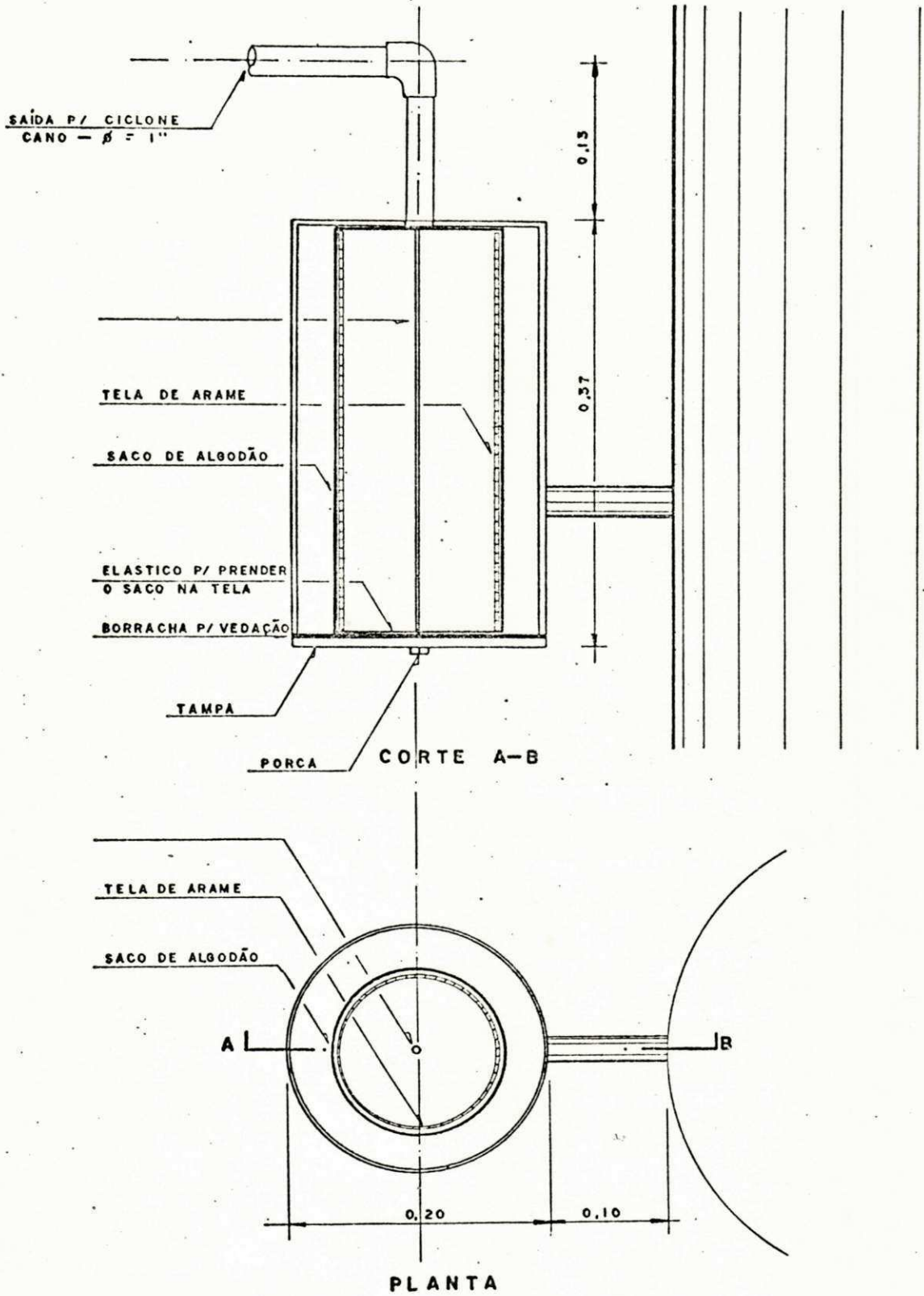


FIGURA 18 : F Í L T R O



comprimento conectada com o motor.

### 3.2.6. Motor e ventilador de sucção

#### 3.2.6.1. 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.

#### 3.2.6.2. Ventilador de sucção (Figura 20)

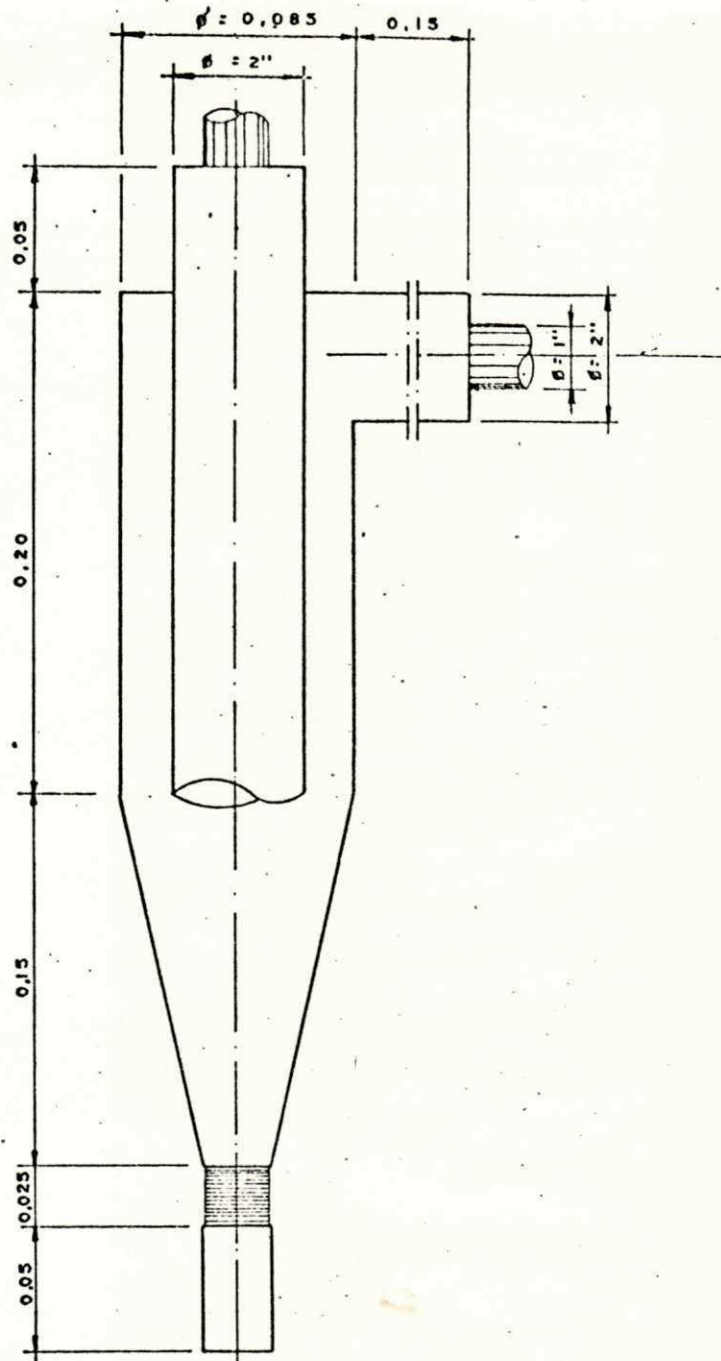
O ventilador de sucção foi construído pela EQUIFIBER, Campina Grande, Pb. O ventilador tem 30 cm de diâmetro. As entradas estão conectadas ao trocador de calor por meio de 4 m de mangueiras de borracha. O ventilador (Figura 20) está ligado ao motor por meio de polias e correia. Em sua saída encontra-se um tubo de zinco 0,50 m de comprimento e 0,30 m de diâmetro por onde escoar o ar aquecido, que será utilizado para secagem de grãos de milho armazenados em um silo.

### 3.3. Manutenção do Gasogênio

A manutenção do gasogênio é absolutamente necessária. Caso não seja realizada o gaseificador deixa de funcionar, os filtros ficam entupidos e o motor funciona com falhas ou deixa



43



$\phi = 1''$   
CORTE A-B

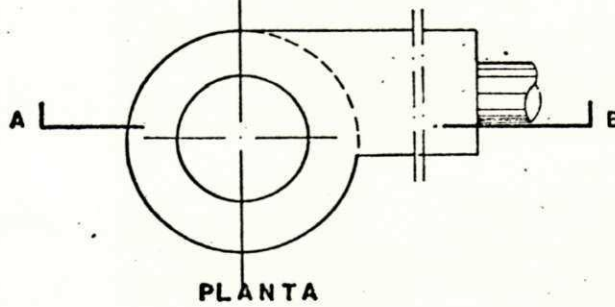
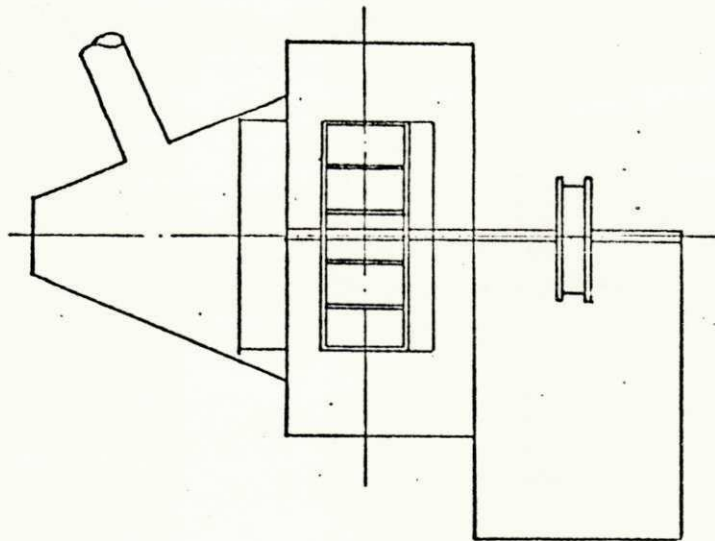
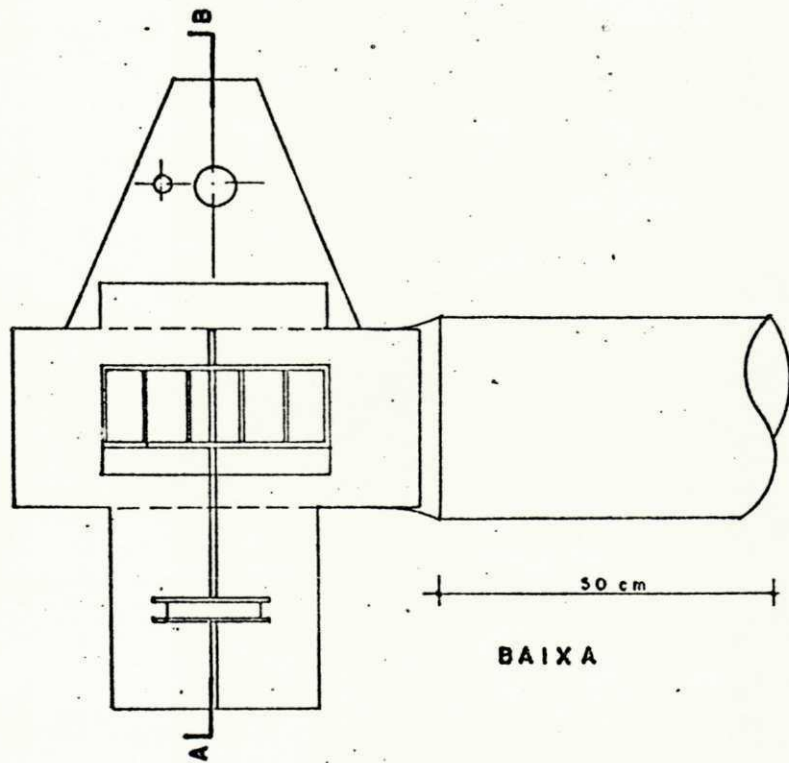


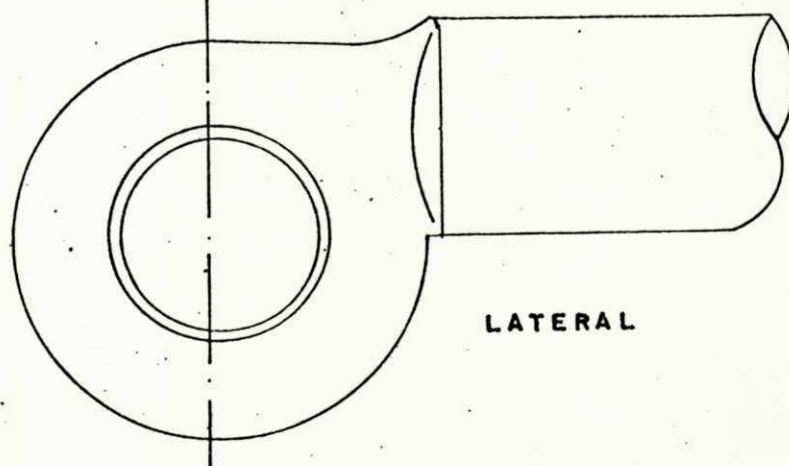
FIGURA 19 : C I C L O N E



CORTE AB



BAIXA



LATERAL

FIGURA 20 : VENTILADOR DE SUCÇÃO

de funcionar. A manutenção deve ser realizada no gaseificador, no trocador de calor, no gasômetro, filtro e ciclone.

Diariamente, antes do início dos trabalhos, retira-se por meio de um tubo metálico introduzido na cetilha, as cinzas acumuladas nesta região. Trabalhando-se cerca de 6 horas por dia, após 3 a 4 dias, quando a carga de carvão for consumida em mais de 70%, abre-se a porta do cinzeiro e retira-se o resto de carvão misturado as cinzas. Diariamente retira-se pela válvula de purga os pirolenhosos acumulados no trocador de calor. Quinzenalmente é feita a purga do gasômetro retirando-se o bujão de sua parte inferior onde se encontram localizados uma mistura de água e pirolenhosos. Recomenda-se substituir diariamente o saco de algodão do filtro que contém basicamente alcatrão por um outro limpo. Periodicamente, de 3 em 3 dias, recomenda-se retirar o bujão da parte inferior do ciclone e limpar o resto de alcatrão contido.

#### 3.4. Instrumentação

Os instrumentos usados foram os seguintes: termopares, termômetros digital, velômetro, tacômetro e medidor de umidade.

Os fluxos de ar foram levantados por meio de um velômetro de marca Alnor, fabricado pela indústria Alnor Instrument Company, Niles, Illinois, USA.

As temperaturas da zona de combustão foram obtidas através de um termopar com isolamento mineral para altas temperaturas (máxima 1200°C) acoplado a um termômetro digital portátil, modelo TP 1000 da World Iron Comércio de Instrumentação Ltda. São Paulo, SP. As temperaturas de entrada

e saída no trocador foram obtidas por meio de um termopar com isolamento mineral, para temperaturas máximas de até 900°C ligado ao termometro já citado.

A umidade relativa do ar ambiente e a da saída do ventilador de sucção foram medidas por meio de um termohigrômetro marca Pacer, modelo DH 300, medindo a umidade relativa de 10 a 95% e temperatura de 0°C a 80°C, fabricado pela Pacer Industries Inc, Chippewa Falls, Wisconsin, USA.

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 de 1 a 20.000 rpm, mostrador com 4 dígitos e precisão + 1 dígito de 1 a 20.000 rpm.



#### 4. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com os dados experimentais obtidos foram pesquisados os seguintes parâmetros: 1) Relação entre as variações de temperatura de entrada e saída do trocador de calor ( $T = T_i - T_f$ ); 2) rendimento energético do gaseificador com uma estimativa das perdas energéticas principais e 3) simulação matemática de secagem de grãos de milho.

##### 4.1. Variações de temperatura dos gases na entrada e saída do trocador de calor

Conforme descrito no item 3.1.2, o ar é refrigerado num sistema contra-corrente ar-gás. O ar uma vez aquecido é succionado pelo ventilador. O presente item estuda as modificações térmicas do gás no trocador de calor e suas consequências para o motor.

##### 4.1.1. Temperaturas de entrada e saída dos gases no trocador de calor em função de diferentes rotações do motor

O motor funcionou sucessivamente de 1500 a 3000 rpm com acréscimos sucessivos de 250 rpm. Obteve-se deste modo, os seguintes dados conforme mostra a Tabela 4.1.

Pela regressão linear de Gauss dos mínimos quadrados obteve-se uma reta (Figura 21),  $t_i = f(w)$  dada pela equação:

$$t_i = 1,342 \times 10^{-2} \times w + 27,128 \quad (4.1)$$

A reta que representa a equação (4.1) revela que a

Tabela 4.1. Temperaturas de entrada e saída dos gases no trocador de calor em função de diferentes rotações do motor.

rpm	$t_i$ (°C)	$t_f$ (°C)
1500	47,9	31,0
1750	50,5	32,7
2000	53,5	33,4
2250	57,3	33,9
2500	60,2	34,6
2750	64,0	35,0
3000	68,0	35,8

temperatura inicial cresce sensivelmente com o aumento das rotações do motor. O índice de ajustagem, também chamado de coeficiente de determinação foi de  $R^2 = 0,996$  e obtido através de um computador IBM 5.100 utilizando a Linguagem Basic.

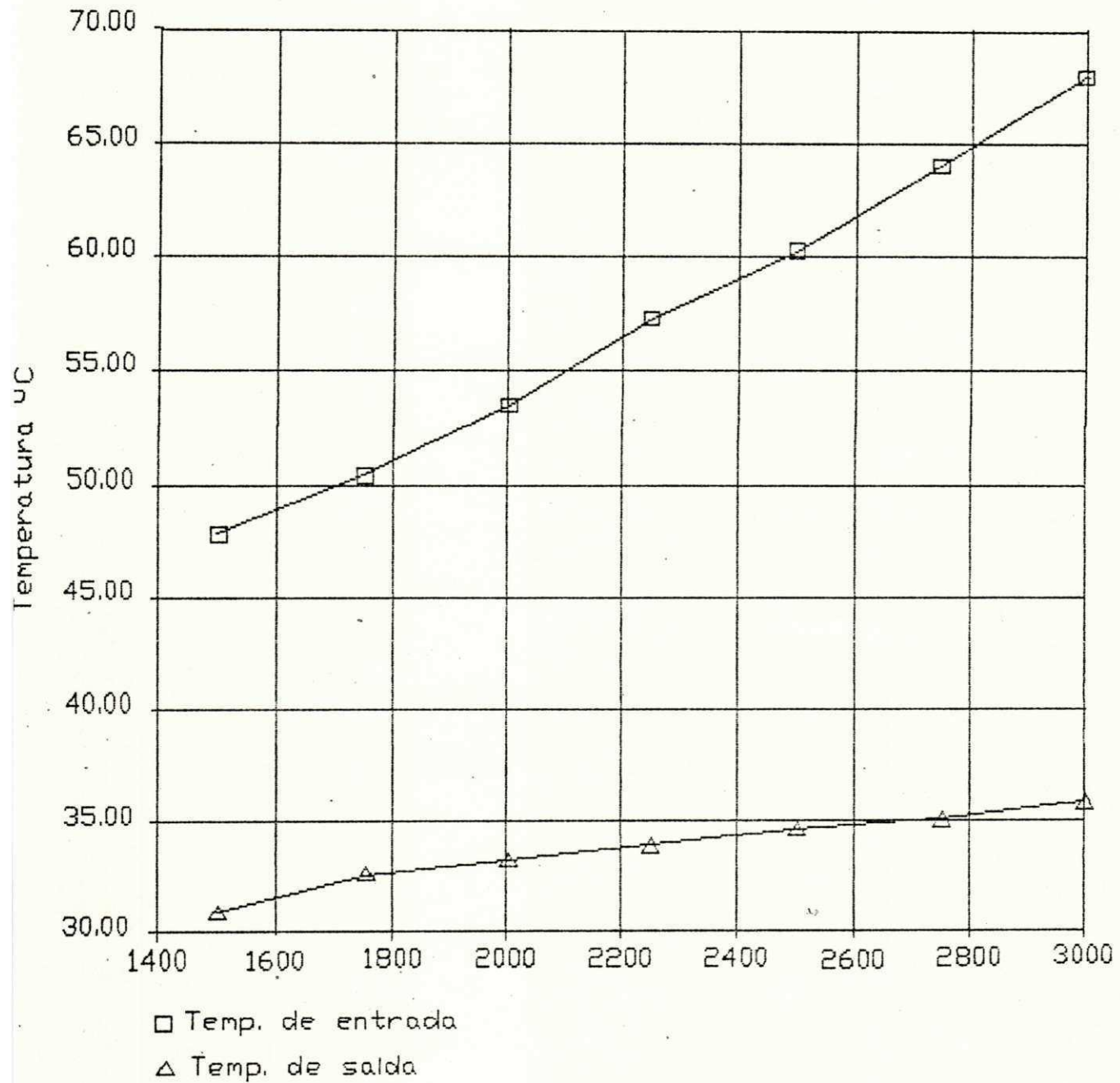
Pelo mesmo sistema de linguagem Basic, relacionando-se a temperatura final com as rotações do motor ( $t_f = f(w)$ ), obteve-se uma equação linear, com um índice de ajustagem  $R^2 = 0,953$ , abaixo assinalada:

$$t_f = 2,88 \times 10^{-3} \times w + 27,278 \quad (4.2)$$

Na Figura 21 observa-se a reta que representa esta equação. Como podemos notar a variação entre a temperatura inicial e final ( $T_i - T_f$ ) aumenta proporcionalmente com as rotações do motor, o que significa que o ar ganha maior



Figura 21 - Temperatura dos gases na entrada e saída do trocador de calor em função da rotação por minuto (RPM) dada ao motor.



energia térmica com a elevação das rotações do motor.

#### 4.1.2. Temperaturas de entrada e saída no trocador calor em função do tempo

foram realizadas experiências com duração de 60 minutos com 10 repetições em intervalos de 5 em 5 minutos das temperaturas de entrada e saída do trocador de calor, a uma rotação constante do motor de 1500 rpm. Este dados estão mostrados através da Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Temperaturas de entrada e saída dos gases no trocador de calor versus tempo, a uma rotação constante de 1500 rpm.

t(min.)	$T_i$ (°C)	$T_f$ (°C)
0	30,5	29,4
5	32,0	30,3
10	33,9	31,0
15	35,3	31,0
20	37,1	32,4
25	38,6	33,1
30	40,3	33,9
35	41,7	34,5
40	43,6	35,7
45	45,1	35,8
50	46,7	36,7
55	48,6	37,0
60	50,2	37,8

Utilizando-se a regressão linear de Gauss dos mínimos quadrados em linguagem Basic no computador anteriormente mencionado, obteve-se as seguintes equações:

$$T_i = 0,339 t + 29,742 \quad (4.3)$$

Com índice de ajustagem de  $R^2 = 0,960$

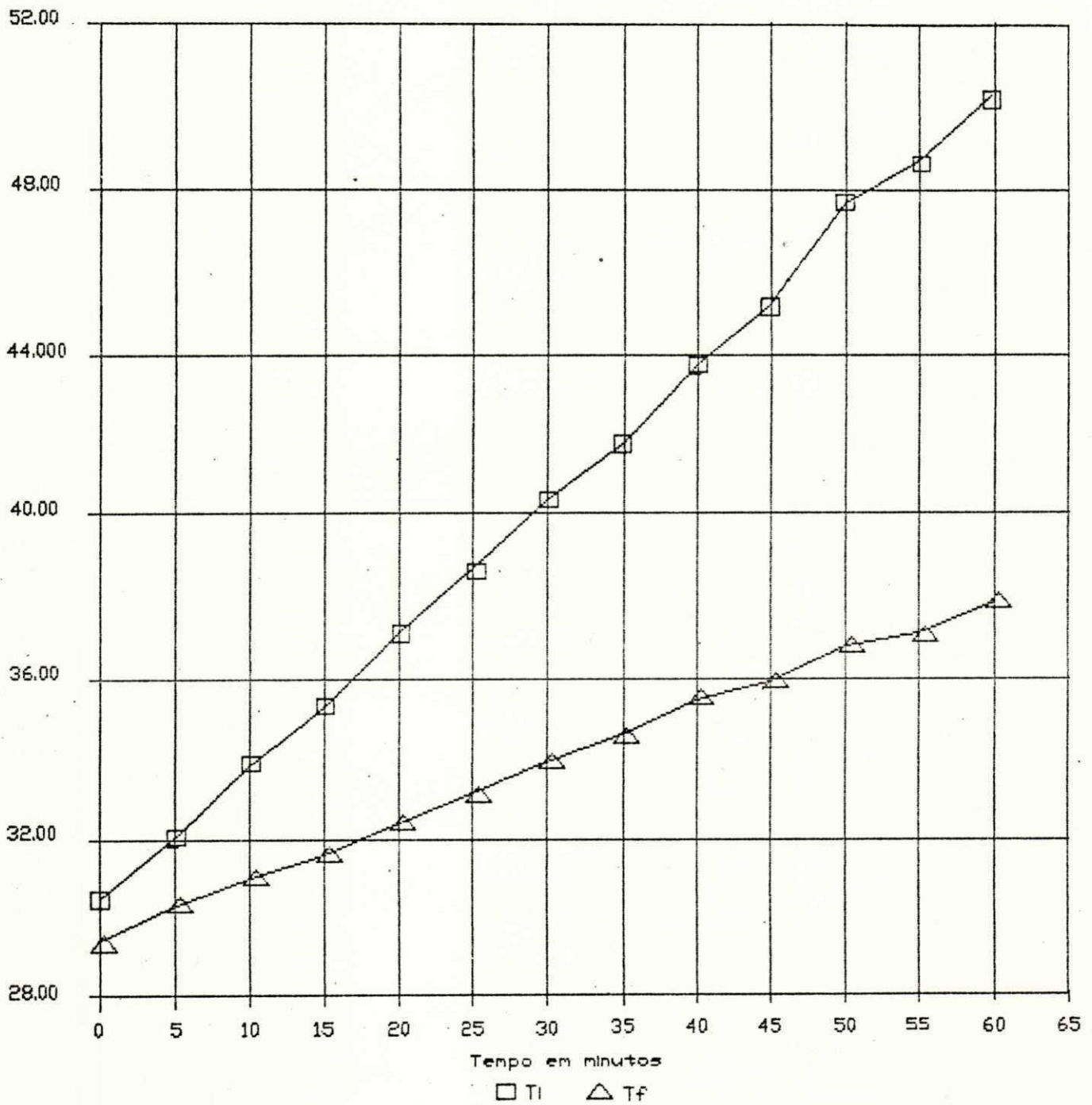
$$T_f = 0,142 t + 29,482 \quad (4.4)$$

Com índice de ajustagem de  $R^2 = 0,991$

Na Figura 22 temos o gráfico com as retas representando os crescimentos das temperaturas inicial e final dos gases em função do tempo. As diferenças ( $T_i - T_f$ ) constituem o gradiente térmico que é transferido para o ar atmosférico que entra no trocador de calor em fluxo contracorrente. Tomando-se a equação (4.4), para uma temperatura de  $50^\circ\text{C}$ , obtêm-se um tempo de duas horas e vinte e quatro minutos. Isto significa que após duas horas e vinte quatro minutos de funcionamento a temperatura de saída dos gases do trocador de calor é de  $50^\circ\text{C}$ . Nesta temperatura o motor deixaria de funcionar (11).

Porém, como o gasômetro, o filtro e o ciclone também funcionam como trocadores de calor, verificou-se experimentalmente que o motor tem funcionado normalmente trabalhando em média de 4 a 5 horas diariamente, sem que a temperatura de  $50^\circ\text{C}$  seja atingida pelos gases na entrada do motor.

Figura 22 - Temperatura dos gases de entrada e saída do trocador de calor em função do tempo sob 1500 RPM.



#### 4.2. Rendimento energético do gaseificador com uma estimativa das perdas energéticas principais

O rendimento energético de um sistema é a relação entre a energia consumida de um combustível e a quantidade desta energia recuperada. No caso dos gasogênios a carvão vegetal o rendimento é a relação entre a energia liberada pela queima de uma certa quantidade de carvão e a energia recuperada na queima dos combustíveis gerados por essa massa de carvão. O rendimento foi estudado por diversos pesquisadores no Brasil e no exterior (4, 8, 15, 16 e 25). É dado pela seguinte equação:

$$R = [V(H_g + Q) + S] / MH_i \quad (4.5)$$

Como o motor exige um combustível de forma fria e limpa, o calor sensível e latente não são recuperados. O calor sensível (Q) é transferido para o trocador de calor, filtro e ciclone, e o alcatrão também é eliminado perdendo-se o calor latente (5). Sendo Q e S iguais a zero, a equação (4.5) pode ser escrita da seguinte forma:

$$R = VH_g / MH_i \quad (4.6)$$

##### 4.2.1 Volume de gás gerado e carvão consumido de 1500 a 3000 rpm

A equação que determina o volume de gás gerado em um gaseificador é a seguinte (8, 25):



$$V = (\text{rpm} \times 60 \times C_v \times 0,75 \times 0,4) / (2 \times 1000) \quad (4.7)$$

Substituindo na equação (4.7) o valor das rotações e  $C_v$  por 0,477 obtém-se os valores correspondentes.

Tendo em vista que 1 kg de carvão produz 4 Nm<sup>3</sup> de gás de baixo poder calorífico (25) pode-se determinar a quantidade de carvão pela seguinte Equação:

$$M = \frac{m_1 V}{V_1} \quad (4.8)$$

Os dados de volume de gás gerado e carvão consumido em função das rpm do motor estão na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Volume de gás gerado e quantidade de carvão consumida em função das rpm do motor.

rpm	Volume de gás em Nm <sup>3</sup> /h	Carvão consumido em kg/h
1500	6,87	1,72
1750	7,51	1,88
2000	8,59	2,15
2250	9,66	2,42
2500	10,73	2,68
2750	11,81	2,95
3000	12,88	3,22



#### 4.2.2. Rendimento do gasogênio

O rendimento do gasogênio pela equação (4.6), é o quociente entre a quantidade de energia liberada pelo gás gerado e a energia contida na massa de carvão consumida. O PCI do carvão vegetal, pode ser estimado em torno de 7.100 kcal/Nm<sup>3</sup> (8, 25). Logo o rendimento do gaseificador será dado por:

$$R = \frac{VH_g}{MH_i} \quad (4.6)$$

$$R = (6,87 \times 1200) / (1,72 \times 7100)$$

$$R = 0,675$$

#### 4.3. Simulação de secagem de milho com os dados termodinâmicos do ar provenientes do ventilador acionado por um gasogênio de fluxo ascendente.

Aplicando-se ao motor rotações sucessivas de 1500 a 3000 rpm, com variações de 250 rpm, o ventilador de sucção acoplado a este motor e injetando o ar aquecido no trocador de calor em um silo de 0,50m<sup>3</sup> (seção circular de 1m<sup>2</sup> e altura de 0,50m) obteve-se por simulação a Tabela 4.3. Como pode-se observar a 3000 rpm, o volume de 0,50m<sup>3</sup> de milho, de aproximadamente 400kg, leva 17 horas para reduzir o teor de umidade do milho de 20% em base seca para 15% em base seca.

Se o ventilador succionar além do ar aquecido no trocador de calor os gases de escapamento do motor, então os dados se modificam conforme Tabela 4.4. Como pode-se constatar

agora a 3000 rpm o tempo de secagem para as mesmas condições anteriores é reduzido para 8 horas.

A Figura 23 ilustra as duas curvas, uma representando a secagem da camada de milho já com o ar aquecido pelo trocador de calor e a outra acrescida de 5°C de temperatura de escapamento do motor.

Analisando-se conjuntamente as Tabelas 4.2 e 4.4, verifica-se que para as condições obtidas do ar de secagem a 1500 rpm, após 5 minutos do motor entrar em operação, a secagem equivalente a 400 kg será realizada em 100 horas, no entanto, quando observamos os dados provenientes da Tabela 4.2 constatamos que após 1 hora as condições do ar de secagem seriam superiores as de 3000 rpm após 35 minutos de funcionamento do motor, desta forma podemos dizer que o tempo de secagem para uma rotação do motor de 1500 rpm será efetivamente inferior a 17 horas o que torna o sistema aproveitável.

MANTOVANI et alii (18) para 0,56 m de altura a temperatura de 30°C e 45% UR obteve um tempo experimental de 12 horas para reduzir o teor de umidade do milho de 20% b.s para 15% b.s e para 0,65 m de altura a 35°C e 43% UR este tempo de secagem foi de 11 horas, está bastante coerente com os dados simulados onde para 38,6°C e 43% de UR a 0,50 m de altura de camada de secagem obteve-se 11 horas como mostra a tabela 4.5.

- A elevação da rotação do motor aumenta a temperatura interna do gaseificador, e transfere maiores gradientes térmicos ao ar de secagem, diminuindo desta forma o tempo de secagem dos grãos.
  
- Para uma rotação constante do motor a temperatura dos gases gerados cresce com o tempo, favorecendo ao aumento de temperatura do ar de secagem.
  
- Misturando-se os gases oriundos do escapamento do motor com o ar de secagem, o tempo de secagem dos grãos será reduzido.

## 6. SUGESTÕES

O rendimento geral do sistema pode ser sensivelmente elevado e a performance do gasogênio melhorada fazendo-se as seguintes alterações:

- Colocar a saída dos gases logo acima da zona de redução. Consequentemente teria-se uma maior taxa de transferência térmica gás-ar no trocador de calor.
- Canalizar os gases de escapamento do motor para serem misturados com o ar no ventilador de sucção e em seguida injetados no silo de secagem de grãos.
- Reprojetar o gaseificador elevando de aproximadamente 20cm acima do piso a cetilha, de modo a permitir a colocação de uma grelha abaixo da mesma. Isto possibilitará a eliminação das cinzas da zona de oxidação e como consequência um maior gradiente térmico.
- Substituir parcialmente o motor de ciclo Otto pelo de ciclo Diesel. O motor Diesel faria a sucção do ar e o acendimento dos carvões eliminado assim do sistema a bateria, o motor de arranque e a ventoinha para o acendimento dos carvões. Isto tornaria mais prático e eficiente o sistema pela simplificação das operações de acendimento.

## 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. ARDITTI, G. Technologie Chimique Industrielle. Paris, France, Editions Eyrolles, 1972, p.20.
4. BIZZO, D. O gaseificador pirolítico no planejamento energético. São Paulo, SP, 1982, Revista de Energia vol. IV, no. 19, p. 49-55.
5. BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W. & HALL, C. W. Drying cereal grains. Westport, Connecticut, AVI Publishing Co., 1974, 265 p.
6. 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.
7. CARRE, P. Précis de chimie industrielle. Paris, France, 1921, Librairie J. - B. Ballière et Fils, p. 40-42.



8. CARVALHO, A. de S., ARORA, H. L., CARIUCA, J. D. B. C., GONDIN, B. C. & SILVA, N. A. da. Gasogênio de alvenaria. Brasília, DF, 1987, Embrater, Ministério da Agricultura, 43 p.
9. DIAS, G. P. & MEWES, B. O. Gasogênio. Viçosa, MG, 05.05.1981. Universidade Federal de Viçosa, Informe Técnico no. 12, 11 p.
10. ENGEL, R. Traité élémentaire de chimie. Paris, France, 1894, Librairie J. - B. Baillièrre et Fils, p. 317-318.
11. FARIA, J. B. de. Projeto de uma bancada de teste de gasogênio para motores de combustão interna. Tese de Mestrado, 21/12/84, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 136 p.
12. 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.
13. FORTES, M. A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillaryporous media with special reference to drying of grains and foods. Purdue University, Tese de Doutorado, 1978, 226 p.
14. 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 World Energy Scene. The Institution of Electrical Engineers (IEE) University of Reading, 2p.
15. 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.
16. KJELLSTROM, B. **Local electricity generation from wood and agricultural residues.** Stockholm, Sweden, 1980, The International Institute for Energy and Human Ecology, 10 p.
17. MANTOVANI, B. H. M.; HARA, T.; OLIVEIRA, L. H & GIUDICE, P.M. **Análise e simulação de secagem de grãos de milho em camadas espessas.** Experimentiae 23 (6): 95-119, 1977.
18. MATA, M. E. R. M. C. & MARTINS, J. H. **Introdução à teoria e simulação matemática de secagem de grãos.** Nota Técnica, Universidade Federal da Paraíba, Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, Campina Grande, Pb, 1984, 104 p.
19. METCALFE, H. C., WILLIAMS, J. E., CASTKA J. F. e MELLO L. J.S. **Química Moderna - Curso Programado.** Rio de Janeiro, RJ, Editora Rennes, 2a. Edição, 2o. Volume, p. 278-279.
20. QUIRINO, J. de S. **Gaseificador para uso em irrigação rural.** Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 29/04/88, 73 p.

21. 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.
22. SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL (STI), DO MINISTERIO DE INDUSTRIA E COMERCIO (MIC), Normas do gasogênio. Brasília, DF, 1982, no. 1, item 3.19.
23. 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.
24. SICILIANO, L. de B. Gasogênio para automóveis e outros fins. Instituto de Engenharia de São Paulo, SP, 1945, 117 p.
25. SIQUEIRA, A. B. Gasogênio para motores. Seminário: Gaseificação de biomassas, Belo Horizonte, MG, 1981, CETEC, p. 103-112.
26. THOMPSON, T. L. Predicted performance and optimal designs of convection grain dryer. Purdue University, 1967, Tese de Doutorado, 134 p.
27. THOMPSON, T. L., PEART, R. M. & FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying - A new model. Transactions of the ASAE, 11 (4), 1968, p. 582-586.

28. TIAN, A. & ROCHE, J. Précis de Chimie. Paris, France, 1950, Ed. Masson, p. 340-341.
29. ULLMANN, F. Enciclopédia de química industrial. Barcelona, Espanha, 1932, Editora Gustavo Gili, vol. IX, p. 620.
30. 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.
31. VERGANHANINI FILHO, R. Preços do petróleo inibem novos projetos. São Paulo, SP, fevereiro de 1987, Revista Energia & Produção, no. 4, p. 38-44.
32. WEYNE, G. R. de S. Produtos químicos agressivos. São Paulo, SP, 1982, Editora Nobel, p. 62.