TESE
605

Escola
Federal de
Engenharia de
Itajubá

ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DA APLICAÇÃO DE GASEIFICADORES EM MOTORES

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DA APLICAÇÃO DE GASEIFICADORES EM MOTORES

CLASS. 536.422.1:621.43(043.2)
CUTT. F475e
TOMBO 605

EFEI / BIBLIOTECA

ESTE LIVRO DEVE SER DEVOLVIDO NA ÚLTIMA DATA CARIMBADA.

29-5-90	29/11/02	
09/4/01		
17/12/91	06/12/02	
12/07/95	13.12.02	
23.3.98	20.12.2002	
28.3.91	08/01/03	
04/04/98	16.01.03	
17/09/98	20/3/2003	
25/4/98	27/03/2003	
28/01/99		
12/03/99		
27/03/99		
13.4.99		
10.5.99		
19/08/00		
30.5.2001		
13/06/01		
05.11.02		
12/11/02		
21.11.2002		

Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação Estudos Teóricos e Experimentais da Aplicação de Gaseificadores em Motores

Autor: Genebaldo Sampaio Figueiredo Neto

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A+	
2º	A+	
3º	A+	
4º		

Resultado Médio: Conceito A+, ou seja, aprovado com distinção.

Observações:

Itajubá, 12 de dezembro de 1989.

Prof. Emílio Lebre La Rovere
COPPE - UFRJ
1º Examinador

Prof. Afonso Henriques M. Santos
EFEI
2º Examinador

Prof. Luiz Augusto Horta Nogueira
EFEI/Orientador - 3º Examinador

Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 340 de 08/12/89, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: Estudos Teóricos e Experimentais da Aplicação de Gaseificadores em Motores

apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica, na Área de Concentração de Conversão de Energia, satisfeitas as demais exigências regimentais, a Genebaldo Sampaio Figueiredo Neto.

Itajubá, 12 de dezembro de 1989.

Prof. Emílio Lebre La Rovere
COPPE - UFRJ
1º Examinador

Prof. Afonso Henriques M. Santos
EFEI
2º Examinador

Prof. Luiz Augusto Horta Nogueira
EFEI - Orientador
3º Examinador

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

"ESTUDOS TEÓRICOS E EXPERIMENTAIS DA APLICAÇÃO DE GASEIFICADORES EM MOTORES"

Genebaldo Sampaio Figueirêdo Neto

ORIENTADOR : Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira

ITAJUBÁ - MG

1989

À Dina, minha esposa, ao nosso filho, e aos meus pais Genebaldo e Olga,

D E D I C O

AGRADECIMENTOS

Aos orientadores e amigos Luiz Augusto Horta Nogueira e Afonso Henriques Moreira Santos.

Aos profissionais colaboradores: Dinah R. B. Figueirêdo, Genebaldo Figueiredo e José Bernardes.

Ao Grupo de Informações da Secretaria de Minas e Energia do Estado da Bahia, a FAPEMIG e a GENIOGÁZ S.A. pelo apoio prestado.

Aos Engenheiros José Carlos Rodrigues e Ângelo Stano, e os demais funcionários dos Laboratórios Eletro-Mecânico e de Máquinas Térmicas da EFEI.

Aos amigos Vanderley Venturini, Maria Adélia Venturini, Carlos Barreira Martinez e Luiza Bernardes.

Aos demais amigos, funcionários e professores da Escola Federal de Engenharia de Itajubá que, de forma direta ou indireta, contribuiram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta estudos experimentais e técnico-econômicos sobre a utilização de gaseificadores de biomassa associados à motores estacionários de combustão interna, com relevo para as aplicações agrícolas e em especial considerando a gaseificação de carvão vegetal. O suprimento energético no setor agropecuário brasileiro, nos moldes convencionais, tem sido incapaz de atender as urgentes carências existentes e a ampla disponibilidade de biomassa florestal, favorecida pelas oportunas condições climáticas e extensão territorial do Brasil se conjugam para indicar a viabilidade da rota de conversão energética estudada neste trabalho. O propósito fundamental é oferecer uma contribuição efetiva à difusão destes sistemas, em bases tecnicamente racionais e economicamente justificáveis. Após um capítulo inicial, onde se discutem aspectos gerais de gaseificação, são apresentados, em quatro capítulos, estudos experimentais em um gaseificador a carvão vegetal e análise da operação de um sistema moto-bomba associado, visando caracterizar as condições recomendáveis em termos energéticos. Nos capítulos finais desenvolve-se uma avaliação da economicidade de gaseificadores, em um amplo contexto de aplicações, e são apresentadas as conclusões atingidas no trabalho, que inclui ainda apêndices, especialmente em relação à utilização de gaseificadores.

ABSTRACT

This work presents experimental and technical-economical studies about the use of biomass gasification associated to internal combustion stationary motors, regarding agricultural applications and, in particular, considering the gasification of wood coal. The energetic supply directed to brazilian rural activities being unable, in conventional ways, to provide the urgent actual necessities, joins the ample availability of forest biomass, which is favored by Brazil's territorial extension and good climatic conditions, to show the viability of the energetic conversion route studied in this work. The fundamental purpose is to offer an effective contribution to the diffusion of these systems, in a technically reasonable and economically justifiable basis. After an initial chapter, where a general view on gasification is presented, four chapters show experimentel studies in a wood coal gasificator and the analisys of the operation of an associated internal combustion engine powered pump system, both seeking to describe lhe energetically recommendable conditions. In the final chapters, the evaluation of the economic viability of gasificators in a wide applicational context is developed and the conclusions attained in the work are presented. This work includes also appendixes, specially in relation to gasificators.

CONTEÚDO

AGRADECIMENTO i
RESUMO ii
ABSTRACT iii
CONTEÚDO iv
ÍNDICE DE TABELAS vii
ÍNDICE DE FIGURAS ix
SIMBOLOGIA xi

Pág

PARTE I - GENERALIDADES

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO 1

1.1 - Processo de gaseificação 1
1.2 - Tecnologia 5
1.3 - Desenvolvimento histórico 13
1.4 - Aplicações 17

PARTE II - ESTUDOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

CAPÍTULO 2 - SISTEMA MOTOR-GASEIFICADOR GENIOGÁZ 20

2.1 - Apresentação 20
2.2 - Operação do Sistema 27
2.2.1 - Preparo do combustível 27
2.2.2 - Abastecimento e preparo da partida 29
2.2.3 - Aspectos da operação de motor Otto com gás pobre 31
2.2.4 - Procedimento para partida 32
2.2.5 - Dificuldades observadas 34
2.2.6 - Reabastecimento 35
2.2.7 - Eventuais problemas e soluções 36

CAPÍTULO 3 - ABORDAGEM EXPERIMENTAL 39
3.1 - Metodologia (objetivo e métodos) 39
3.2 - Instrumentação 45
3.3 - Comentários 47

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS 48

4.1 - Consumo específico, rendimento e outros parâmetros essenciais 48

4.1.1 - Poder calorífico do carvão vegetal 48
4.1.2 - Densidade aparente 49
4.1.3 - Medidas de consumo de carvão 50
4.1.4 - Potência elétrica gerada 51
4.1.5 - Correção da potência observada 53
4.1.6 - Consumo específico e rendimento 54
4.1.7 - Torque e pressão média indicada 55
4.1.8 - Resultados dos ensaios 56
4.2 - Campo de funcionamento e curvas auxiliares 59
4.2.1 - Análise de regressão 59
4.2.2 - Campo de funcionamento 62
4.3 - Algumas análises comparativas 66
4.3.1 - Comparação entre o consumo experimental e estimativas de consumo teórico 66
4.3.2 - Comparação do rendimento teórico com o rendimento experimental 68
4.3.3 - Comparação da operação do motor com combustível convencional 70
4.4 - Parâmetros de controle 74
4.4.1 - Composição do gás 74
4.4.2 - Temperatura do gás 76
4.4.3 - Temperatura da água de resfriamento da cetilha 82
4.4.4 - Temperatura do gás de escape do motor 84

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA BOMBA-MOTOR-GASEIFICADOR 87

5.1 - Metodologia 87
5.2 - Aplicações 92

PARTE III - ESTUDOS ECONÔMICOS

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DA ECONOMICIDADE DO EMPREGO DE GASEIFICADORES EM MOTORES ESTACIONÁRIOS 101

6.1 - Introdução 101
6.2 - Metodologia 103
6.3 - Cenários considerados e resultados 105
6.4 - Algumas conclusões 114

PARTE IV - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÓES 120

BIBLIOGRAFIA 122

APÊNDICES

1 - Estudos da superfície irrigável em Sistemas utilizando gasogênios 128
2 - Dimensionamento da potência do gaseificador a partir de uma área a ser irrigada 132
3 - Avaliação do parâmetro β e da eficiência de cogeração em gaseificadores 135
4 - Discussão dos índices técnicos da geração de energia elétrica empregando gaseificadores 139
5 - Manutenção do sistema 143
6 - Fotos 145

ÍNDICE DE TABELAS

1 - Poder calorífico inferior de alguns resíduos agrícolas
2 - Quantidade e PCI médio do gás produzido mediante gaseificação de resíduos agrícolas
3 - Composição dos gases obtidos
4 - Exemplos de aplicações possíveis de gaseificadores à biomassa no setor agrícola de países em desenvolvimento.
5 - Exemplos de aplicações possíveis de gaseificadores à biomassa para indústria em países em desenvolvimento
6 - Compras de carvão vegetal para o gasogênio
7 - Características do alternador Bambozzi sem escovas ("brushless")
8 - Parâmetros envolvidos no cálculo do PC do carvão vegetal
9 - Cálculo da densidade aparente média
10 - Resultados dos ensaios à 1600 rpm
11 - Resultados dos ensaios à 1800 rpm
12 - Resultados dos ensaios à 2560 rpm
13 - Valores do coeficiente de determinação, r^2 ou R^2 no ajuste de curvas
14 - Resultado da análise de regressão
15 - Comparação da faixa do consumo teórico e experimental
16 - Rendimentos experimentais
17 - Comparação dos dados básicos do motor GM Brasil, 4,1 ℓ, operando com gasolina e gás pobre
18 - Cruzamento dos dados dos campos de funcionamento do conjunto motor/gaseificador com a bomba Worthington 2 DBE 133 Ø 11,80"
19 - Cruzamento dos dados dos campos de funcionamento do conjunto motor/gaseificador com a bomba Worthington 1 1/2 DBE 133 Ø 12,60"
20 - Fatores de substituição energética
21 - Caso motor ciclo Diesel
22 - Caso motor ciclo Otto
23 - Comparação entre o consumo teórico e experimental
24 - Preços médios de motores ciclo Otto
25 - Cenários com relação aos investimentos
26 - Custo equivalente do óleo Diesel no caso: motor Diesel/gasogênio à madeira (US$/ℓ)

27 - Custo equivalente do óleo Diesel no caso: motor Otto/gasogênio à madeira (US$/ℓ)
28 - Custo equivalente do óleo Diesel no caso: motor Diesel/gasogênio à carvão vegetal (US$/ℓ)
29 - Custo equivalente do óleo Diesel no caso: motor Otto/gasogênio à carvão vegetal (US$/ℓ)
30 - Percentual de economia no caso do uso do motor Diesel/gasogênio à madeira (%)
31 - Percentual de economia no caso do uso do motor Otto/gasogênio à madeira (%)
32 - Percentual de economia no caso do uso do motor Diesel/gasogênio a carvão vegetal (%)
33 - Percentual de economia no caso do uso do motor Otto/gasogênio à carvão vegetal (%)

Apêndice 2
A1 - Custo Anual (A)
A2 - Custo Total Anual (CTA)
A3 - Combinações visando obter a potência requerida

Apêndice 3
A4 - Estimativa de S_1', S_2', β e η_{ng}.

Apêndice 4
A5 - Percentual de propriedades rurais eletrificadas por regiões
A6 - Área a ser plantada para vários rendimentos florestais

ÍNDICE DE FIGURAS

1 - Gaseificador contra-corrente
2 - Gaseificador co-corrente
3 - Gaseificador de tiragem central
4 - Gaseificador transversal
5 - Vista lateral gasogênio E-500
6 - Vista superior gasogênio E-500
7 - Cetilha do gasogênio E-500
8 - Ciclones em série
9 - Dosadores gás/ar adotados
10 - Esquema localizando os termopares no sistema de gaseificação
11 - Variação da corrente de saída, I, em função da excitação, e.
12 - Curva característica do alternador Bambozzi à 1800 rpm
13 - Curva auxiliar Peixo R x m' para 1600 rpm
14 - Curva auxiliar Peixo R x m' para 1800 rpm
15 - Curva auxiliar Peixo R x m' para 2560 rpm
16 - Campo de funcionamento do conjunto motor-gaseificador
17 - Comparação das potências alcançáveis com gasolina e gás pobre
18 - Torque x Rotação: gasolina e gás pobre
19 - Consumo Específico x Rotação: Gasolina e gás pobre
20 - Comparação do gás pobre em função da rotação do motor
21 - Temperatura média do gás na saída do gasogênio à 1600 rpm
22 - Temperatura média do gás na saída do gasogênio à 1800 rpm
23 - Temperatura média do gás na saída do gasogênio à 2560 rpm
24 - Temperatura média do gás depois do trocador à 1600 rpm
25 - Temperatura média do gás depois do trocador à 1800 rpm
26 - Temperatura média do gás depois do trocador à 2560 rpm
27 - Temperatura média do gás antes da admissão do motor à 1600 rpm
28 - Temperatura média do gás antes da admissão do motor à 1800 rpm
29 - Temperatura média do gás antes da admissão do motor à 2560 rpm
30 - Temperatura média da água de resfriamento da cetilha à 1600 rpm
31 - Temperatura média da água de resfriamento da cetilha à 1800 rpm

32 - Temperatura média da água de resfriamento da cetilha à 2560 rpm
33 - Temperatura média do gás de escapamento do motor à 1600 rpm
34 - Temperatura média do gás de escapamento de motor à 1800 rpm
35 - Temperatura média do gás de escapamento do motor à 2560 rpm
36 - Esquema do sistema de irrigação suprido pela gaseificação
37 - Esboço do campo de funcionamento de uma bomba
38 - Esboço de campo de funcionamento do conjunto motor-gaseificador
39 - Esboço das curvas do consumo unitário de combustível com relação a vazão, CQ versus rotação
40 - Campo de funcionamento da bomba Worthington 2 DBE 133, Ø 11,80"
41 - Campo de funcionamento da bomba Worthington 1 1/2 DBE 133, Ø 12,60"
42 - Curvas CQ x N (Consumo unitário de combustível versus rotação) para a bomba Worthington 2 DBE 133, Ø 11,80"
43 - Curvas CQ x N (Consumo unitário de combustível versus rotação) para a bomba Worthington 1 1/2 DBE 133, Ø 12,60"
44 - Custos totais para a irrigação da bata no sul de Minas, considerando diversos acionadores primários
45 - Competitividade gasogênio de madeira x motor Diesel
46 - Competitividade gasogênio de madeira x motor Otto
47 - Competitividade gasogênio à carvão vegetal x motor Diesel
48 - Competitividade gasogênio à carvão vegetal x motor Otto
49 - Efeito da utilização anual do gasogênio
50 - Efeito da taxa de atualização
51 - Efeito da vida útil
52 - Efeito da taxa de substituição
53 - Efeito do custo para a potência de 10 CV

Apêndice 3

A1 - Esquema do sistema de cogeração

SIMBOLOGIA

Caracteres latinos

A - Custo anual
B - Consumo de biomassa em condições da substituição, S, considerada
Bmáx - Consumo de biomassa máximo
C - Custo de gás equivalente a um litro de óleo Diesel
CAC - Custo anual do carvão
CL - Calor latente contido nos sub-produtos
CMO - Custo de manutenção e operação
CQ - Consumo unitário de combustível com relação a vazão
CS - Calor sensível do gás
CTA - Custo total anual
D - Consumo específico quando operado unicamente com óleo Diesel
D' - Demanda de óleo Diesel ou gasolina, a depender do motor considerado
Da - Densidade aparente
E - Eficiência do sistema de irrigação
E' - Energia elétrica/mecânica produzida
EA - Energia anual requerida
ET - Evapotranspiração
F - Estatística F
F' - Consumo de combustível na cogeração
FC - Fator de carga
FRC - Fator de recuperação de capital
H - Altura manométrica de bombeamento
Ha - Pressão de trabalho do aspersor escolhido
Hp - Perda de carga na tubulação
Ht - Desnível médio entre o ponto de captação de água e o de irrigação
I - Corrente de saída do alternador
$\bar{I}$ - Média da corrente de saída do alternador
K - Investimento
L - Utilização anual prevista
L' - Lastro necessário
LB - Lâmina bruta
LF - Lâmina de água a ser aplicada na cultura
M - Massa do carvão

N - Rotação
NP - Nº de partes que deve se dividir a área irrigável
Patm - Pressão atmosférica
P - Preço da biomassa
P' - Potência fornecida pelo conjunto
PC - Poder calorífico do carvão
PC' - Poder calorífico do ácido benzóico
Pcar - Potência relativa ao carvão vegetal
PCg - Poder calorífico do gás
Pe - Potência no eixo
PE - Período de irrigação
Peixo o - Potência mecânica no eixo observado
Peixo R - Potência mecânica no eixo reduzida
Pele - Potência elétrica
Pir - Potência do gaseificador a partir de uma área a ser irrigada
Pm - Pressão média indicada no eixo
PM - Ponto de murcha
PR - Valor presente
Q - Vazão de água
R - Concentração volumétrica do gás na mistura
S - Taxa de substituição do Diesel por gás
S' - Energia térmica produzida
S_1' - Energia térmica recuperável proveniente do gás de escape do motor
S_2' - Energia térmica cedida a água de resfriamento e do trocador
Si - Área a se irrigar
T - Temperatura
TD - Período de irrigação diário
TE - Tempo de ensaio
TOR - Torque
TP - Tempo de aplicação da lâmina bruta
TR - Turno de rega
V - Volume correspondente a uma altura no leito
VA - Valor em água
Vd - Volume deslocado
Vg - Volume do gasogênio
VIB - Velocidade de infiltração básica

c - cilindrada
cc - capacidade de campo
d - densidade do material
e - corrente de excitação do alternador
f - fator cultural
h - altura do leito
hf - altura do final do ensaio
hi - altura do início do ensaio
hr - profundidade efetiva do sistema radicular
i - taxa de atualização
k - fator de substituição energética
m - custo de manutenção e mão-de-obra
$\dot{m}$ - quantidade de combustível consumido
m' - consumo específico
m_1 - massa do ácido benzóico
$\dot{m}g$ - vazão do gás
n - vida útil do gasogênio
n' - número de pontos
n_{ir} - número de vezes que se irrigará durante PE
p - número de coeficientes da equação
r - rendimento volumétrico do motor
r^2 - coeficiente de determinação
t - tempo de funcionamento

OUTROS CARACTERES

η_a - rendimento do alternador
η_B - rendimento da bomba
η_g - rendimento da gaseificação
η_G - rendimento do conjunto gaseificador-motor
η_m - rendimento do motor
η_{tg} - rendimento térmico do gaseificador
η_T - rendimento total
η_{NG} - novo rendimento global
β - parâmetro do sistema de cogeração
$\mathcal{E}_{ir}$ - energia requerida no eixo da bomba para irrigação
α A - fator de redução
ϕ - umidade relativa

Δh - variação da altura do leito durante o ensaio

$\Delta h'$ - variação da altura do leito corrigida

ΔT - variação da temperatura da água durante a queima do carvão

$\Delta T'$ - variação da temperatura da água durante a queima de ácido benzoico.

PARTE I - GENERALIDADES

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Neste Capítulo se apresentam elementos básicos de processo de gaseificação, o histórico de seu desenvolvimento e as aplicações potenciais e correntes.

1.1. PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

A gaseificação tem como propósito a transformação do combustível sólido em gasoso mediante um processo térmico composto pelas seguintes etapas : secagem, pirólise e reações de oxidação e redução. A vantagem dessa transformação é que um combustível gasoso, resultante de um combustível sólido pode ser aplicado em substituição aos derivados de petróleo. Considerando-se ainda que a madeira e, por consequência, o carvão vegetal são energéticos renováveis, a gaseificação assume boa posição diante das alternativas de suprimento energético vigentes.

Distinguem-se em um reator de gaseificação algumas zonas características. A zona de oxidação é determinada pela posição da entrada do comburente, cujo oxigênio é responsável pela queima de parte da matéria-prima liberando energia térmica. A temperatura da zona de oxidação varia entre 800°C e 1200°C [14] como resultado da reação exotérmica entre o carbono da matéria-prima e o oxigênio do ar. Havendo presença de hidrogênio na fase sólida, ocorre a formação de vapor de água, também com liberação de calor.

Os gases quentes da zona de oxidação passam em seguida à zona de redução, ajacente, acima ou abaixo, dependendo da configuração do gaseificador. Nesta zona, deficiente em oxigênio, ocorre a formação dos componentes combustíveis do gás.

As principais reações que ocorrem no reator são [10,14,15] :

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2 + 97.600 \text{ Kcal/mol} \qquad (1.1.1)$$

$$2C + O_2 \longrightarrow 2CO + 58.800 \text{ Kcal/mol} \qquad (1.1.2)$$

$$CO_2 + C \rightleftharpoons 2CO - 38.800 \text{ Kcal/mol} \quad (1.1.3)$$

$$2CO + O_2 \rightleftharpoons 2CO_2 + 136.400 \text{ Kcal/mol} \quad (1.1.4)$$

$$H_2O + C \rightleftharpoons CO + H_2 - 28.800 \text{ Kcal/mol} \quad (1.1.5)$$

$$2H_2O + C \rightleftharpoons CO_2 + 2H_2 - 18.800 \text{ Kcal/mol} \quad (1.1.6)$$

$$H_2O + CO \rightleftharpoons CO_2 + H_2 + 9.400 \text{ Kcal/mol} \quad (1.1.7)$$

A zona de pirólise fica situada acima das zonas de oxidação e redução, as quais fornecem a energia necessária às reações de pirólise. Estas começam a ocorrer com temperaturas em torno de 200°C [14] quando a estrutura da biomassa começa a se decompor por ação térmica. Consideradas globalmente, as reações de pirólise são exotérmicas formando vapor d'água, metanol, ácido acético e alcatrões. No caso do uso do carvão vegetal, as etapas de pirólise e gaseificação ficam separadas, isto é, deve-se produzir carvão com biomassa e, depois gaseificar o carvão. A gaseificação é bastante facilitada, neste caso, porque os produtos voláteis indesejáveis são em boa parte eliminados na pirólise preliminar.

Estima-se em três décimos de segundo o tempo da passagem do gás através das zonas de reação nos gaseificadores fixos e em três centésimos de segundo para os gaseificadores automotivos [10].

Na zona de secagem, a temperatura é suficientemente baixa (menor que 200°C)[14] para evitar a decomposição da biomassa, porém alta o bastante para eliminar sua umidade sob a forma de vapor.

Como a quantidade de ar introduzida no reator é limitada, os produtos preliminares da oxidação (CO_2 e água) se transformam num gás composto de monóxido de carbono, hidrogênio, hidrocarbonetos leves, alcatrões, dióxido de carbono, nitrogênio e vapor d'água. Os vapores de alcatrão, apesar de serem combustíveis, são produtos indesejáveis pois quando quentes polimerizam-se formando incrustações nas tubulações e quando resfriados condensam-se sob a forma de um líquido escuro e viscoso, de odor característico, que se não removido, também entope tubulações e queimadores.

Podem ser empregados outros comburentes além do ar. A produção de gás de baixo poder colorífico, na forma tradicional de gaseificação é a mais simples, demanda menores investimen

tos e é viável para uso em pequena indústria. Também chamado vulgarmente de "gás pobre", este gás tem poder colorífico de 1.300 a 1.700 Kcal/Nm^3, sendo inviável seu transportes a longas distâncias [15].

A gaseificação usando o oxigênio é mais complexa e exige investimentos maiores, porém a qualidade do gás obtido é muito superior a correspondente na gaseificação com o ar. Este gás é chamado de gás de síntese, contém altos teores de CO e H_2 e quantidades pequenas de outros compostos, o que permite usá-lo para a síntese de amônia, de hidrocarbonetos (via reação de Fischer Trospsch), de metanol, etc. Também é chamado de gás combustível de médio poder calorífico (PCS de 2.500 a 4.000 Kcal/Nm^3).

Existem também a gaseificação com hidrogênio e a gaseificação eletroquímica. A primeira consiste em gaseificar o combustível sólido utilizando-se, como comburente, hidrogênio sob pressão, o que permite aumentar a relação hidrogênio/carbono favorecendo a conversão de gás em combustíveis líquidos. Na segunda, o sistema utiliza a energia elétrica como fonte de calor necessária à reação. A zona de reação é mantida à alta temperatura mediante a passagem de corrente elétrica que aquece o combustível sólido. O agente de gaseificação é o vapor de água, produzindo-se o gás de síntese. A gaseificação com o ar para a produção de gás pobre será tratado aqui com maiores detalhes.

Diversos são os fatores que influenciam nas reações de gaseificação. Dentre os principais estão a temperatura de reação, pressão, umidade relativa do comburente e granulometria [5].

A consequência maior da variação desses parâmetros consiste, basicamente, nas diferentes composições que o gás assume. Por exemplo, o aumento de pressão propicia determinadas reações intermediárias aumentando os teores de CO e CH_4 no gás, e inibe outras, diminuindo o teor de H_2. Se a umidade relativa do carburente for baixa favorece também ao monóxido de carbono inibindo a presença de H_2. A granulometria, além de influenciar na composição do gás, também é um fator que pode afetar a marcha do gaseificador, pois o material de menor tamanho tenderá a queimar mais rapidamente na zona de oxidação e pode ocasionar deslocamentos da mesma para determinados pontos do gaseificador, com formações de regiões quentes e frias e, eventualmente, bolsões de gás que são indesejáveis. Caso a granulometria

do material seja heterogênea a distribuição de tamanhos de cada carga deve ser razoavelmente constante.

1.2. TECNOLOGIA

Segundo Assumpção [5] os equipamentos de gaseificação classificam-se de várias formas, dentre as quais, podem-se destacar :

a. Quanto à fonte de energia para o processo de gaseificação :

- alotérmico : onde a energia provém de outra fonte que não o próprio combustível.
- autotérmico : onde a energia provém da combustão parcial do próprio combustível.

b. Quanto à pressão de operação do gaseificador :

- alta pressão : trabalha com pressões acima da atmosférica.
- baixa pressão : trabalha com pressões próximas à atmosférica. Podem operar com pressão positiva (pouco acima da atmosférica) ou com pressão negativa (pouco abaixo da atmosférica).

c. Quanto ao tipo de leito no gaseificador :

- leito fixo : o termo é usado para designar um leito de combustível suportado por uma grelha. O nível é mantido constante pela alimentação do carvão na sua parte superior e retirada de resíduos na parte inferior, de modo que o leito move-se do topo para o fundo através da zona de gaseificação. Deste modo muitos autores disignam este tipo de equipamento de leito móvel.
- leito fluidizado : os gaseificadores tipo leito fluidizado caracterizam-se por utilizar a madeira ou o carvão em partículas de pequenas dimensões (5 a 7mm), mantidos em suspensão através da injeção do meio gaseificador (ar ou oxigênio) que passa pelo leito a uma velocidade suficiente para fluidizá-lo. O contato sólido-gás é muito bom e a temperatura de saída do gás

é aproximadamente a temperatura do leito.

- leito arrastado : a gaseificação em leito arrastado utiliza partículas de carvão menores ainda que os processos de leito fluidizado, de modo que parte das cinzas é removida juntamente com o gás.

d. Quanto ao movimento relativo corrente de gases x corrente do combustível no gaseificador :

- contra-corrente ou ascendente ("up draft") : quando o combustível e os gases gerados se movimentam em direções contrárias. Inicialmente o ar entra em contato com o combustível em uma zona de temperatura elevada, chamada zona de oxidação, ocorrendo sua combustão com produção de CO_2 e H_2O. Logo estes gases entram em contato com uma zona de excesso de carvão, chamada zona de redução, a uma temperatura mais baixa, onde o CO_2 e H_2O presentes são reduzidos a CO, H_2 e CH_4 conforme já apresentado. Quando os gases sobem para zonas de temperaturas mais baixas, pirolizam a biomassa descendente e com isso alguns voláteis condensáveis como alcatrão e ácidos pirolenhosos são arrastados. Além disso, os gases entram em contato com o combustível úmido, secando-o.

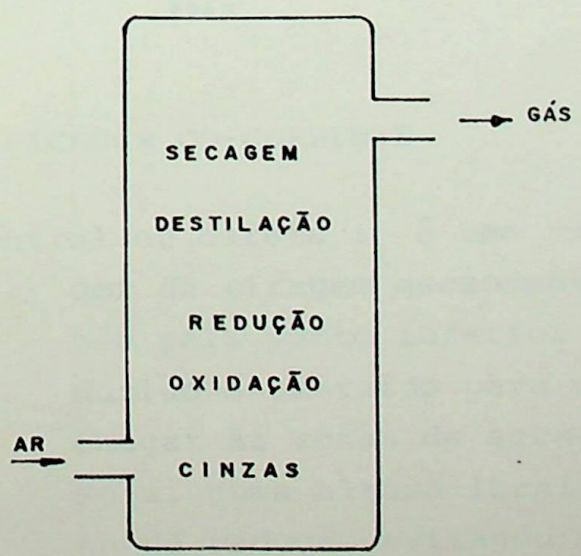


FIGURA 1 - GASEIFICADOR CONTRA-CORRENTE

- co-corrente ou descendente ("down draft") : quando o combustível e os gases gerados se movimentam na mesma direção, tipo chama invertida. Foi projetado com o objetivo de se eliminar do gás os alcatrões e frações pesadas. O ar é introduzido através de um conjunto de bocais e os produtos de combustão são reduzidos a CO e H_2 à medida em que atravessam o leito de carvão. Os alcatrões e os óleos são reduzidos para menos de 10% da quantidade produzida nos gaseificadores contra-correntes, diminuindo a necessidade de purificação do gás. Neste caso a zona de oxidação vem logo após a zona de pirólise e a zona de redução antecede a zona de remoção de cinzas. Dessa forma o gaseificador co-corrente é mais sensível às condições de umidade da matéria-prima.

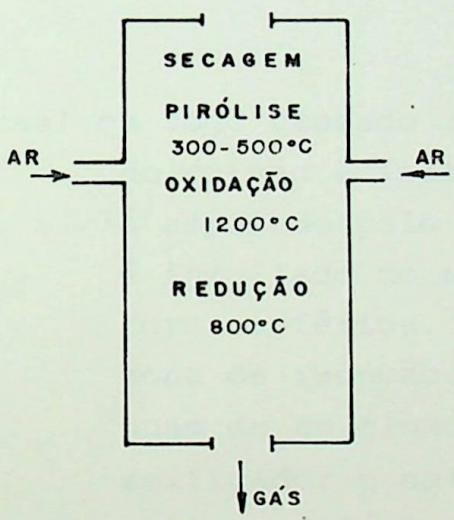


FIGURA 2 - GASEIFICADOR CO-CORRENTE

- tiragem central ou direta : é uma variante do gaseificador de tiragem ascendente pois o ar entra também pela parte inferior da grelha. O gás produzido é extraído para o exterior antes de chegar às zonas de secagem ou destilação, ou seja, numa altura localizada ao redor da zona de redução evitando assim que os gases atravessem a massa de biomassa incorporando

os produtos voláteis. Este tipo é bastante flexível com relação à combustão, facilitando-se, dessa forma variações bruscas na demanda de gás.

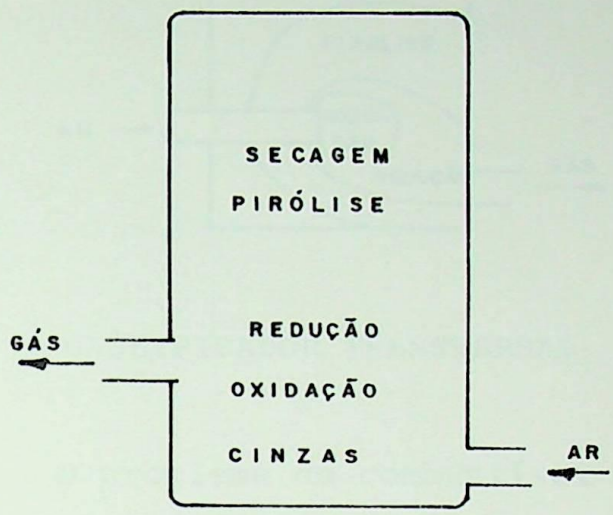


FIGURA 3 - GASEIFICADOR DE TIRAGEM CENTRAL

- transversal ou fogo cruzado : neste caso, a alimentação do carvão é feita pela parte superior. O ar é aspirado pelo lado através de um conduto e é insuflado no meio da zona de oxidação, de forma esférica, a qual se acha rodeada pela zona de redução. Os gases resultantes continuam em um fluxo transversal cruzando o gaseificador e saindo pela grelha que fica disposta verticalmente.

  Apenas a parte inferior do gasogênio é solicitada termicamente, sendo o restante apenas um reservatório de carvão. Pode-se dizer que é o gaseificador mais simples, bastante flexível e fácil de ser colocado em funcionamento.

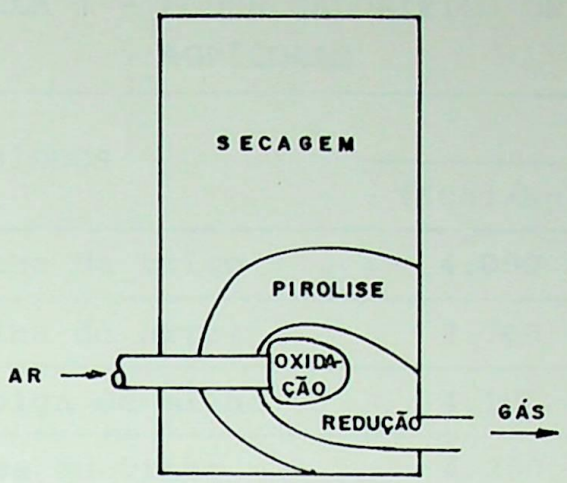


FIGURA 4 - GASEIFICADOR TRANSVERSAL

O problema do combustível a ser utilizado apresenta-se de maneira diferente para os gaseificadores de utilização automotiva e para os gaseificadores de utilização industrial ou fixa. Neste último, a possibilidade de se usar componentes pesados e volumosos simplificam consideravelmente a escolha do combustível, enquanto que nos de utilização veicular o peso e o volume devem ser reduzidos ao mínimo, além do que a gaseificação deve se efetuar mais rapidamente, existindo assim, fatores limitantes na escolha do combustível.

A madeira, carvão vegetal, carvão mineral, turfa, resíduos agrícolas dentre outros formam uma gama de combustíveis aptos para a alimentação de gaseificadores. Entretanto, deve-se ressaltar que, principalmente no caso de resíduos, nem sempre é fácil gaseificá-los, sendo muitas vezes preferível utilizá-los em queima direta.

A seguir pode-se observar o PCI e a quantidade de gás produzido pela gaseificação de vários resíduos agrícolas.

TABELA 1 - PODER CALORÍFICO DE ALGUNS RESÍDUOS AGRÍCOLAS

RESÍDUOS	P C I	
	(Kcal/Kg)	(kWht/Kg)
Palha de trigo	4.000	4,65
Palha de arroz	3.700	4,30
Espiga de milho	4.100	4,76
Rama de vinho	4.200	4,88
Poda de pêssego	4.300	5,00
Poda de oliva	4.000	4,65

Fonte : [28]

TABELA 2 - QUANTIDADE E PCI MÉDIO DO GÁS PRODUZIDO MEDIANTE GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS

RESÍDUOS	GÁS PRODUZIDO (m^3/Kg)	PCI MÉDIO (kWht/m^3)
Palha de trigo	2,7	1,0 - 1,3
Palha de arroz	2,5	1,0 - 1,3
Espiga de milho	2,8	1,0 - 1,3
Rama de vinho	2,9	1,0 - 1,3
Resíduos de podas frutíferas	2,9	1,0 - 1,3

Fonte : [28]

A gaseificação do carvão vegetal, sob o ponto de vista técnico, é bem mais simples que a gaseificação direta da madeira. Praticamente pode-se substituir o carvão mineral, com vantagens, em todos os inúmeros processos existentes de gaseificação, pois tem maior reatividade, baixo teor de cinzas (não superior a 5%), é facilmente fracionado e possui baixo teor de enxofre. O teor de umidade ideal deverá estar localizado em torno de 5%, a densidade na faixa de 170 a 220 Kg/m^3 e o poder calorífico varia de 6.800 a 7.300 Kcal/Kg. O poder calorífico

da mistura ar-gás é de 520 a 570 Kcal/m^3 [6, 10, 15].

O grande problema da gaseificação do carvão vegetal está ligado ao processo de carbonização necessário para obtê-lo. Segundo Brito [10], ao carbonizar 100Kg de madeira produz-se 27Kg de carvão, o que corresponde a uma perda de energia em torno de 50%. Além do carvão, deriva-se do processo a fração de voláteis que se divide entre os gases não condensáveis, a fração orgânica e a fração aquosa. A carbonização da madeira é feita nos fornos de carvoejamento, isto é, fornos apropriados, construídos em alvenaria, no interior dos quais é empilhada a madeira a ser carbonizada. São vários tipos de fornos existentes, sendo os mais comuns os fornos de superfície convencionais e os de superfície com câmara de combustão. No caso dos fornos convencionais o calor necessário à transformação da lenha em carvão é obtido pela queima de parte da lenha colocada no forno, enquanto que nos fornos com câmara o calor é produzido pela queima, na câmara, de lenha ou resíduos florestais [16].

Como o processo é descontínuo, isto é, os fornos são resfriados para que o carvão seja descarregado, a cada carbonização o calor gerado pela queima de parte da carga é utilizado para aquecer o forno, secar a lenha e processar a carbonização propriamente dita.

Dos diversos fornos existentes, o CETEC [16] ressalta quatro deles: rabo quente, encosta, de superfície e de superfície com câmara externa. O forno rabo quente pela sua simplicidade construtiva e baixo custo é dos mais difundidos junto aos pequenos produtores, ao lado do forno de encosta cuja utilização depende das condições topográficas. Já os fornos de superfície são utilizados pelos grandes produtores de carvão vegetal.

Pode-se citar ainda os sistemas com recuperação de voláteis, onde o rendimento térmico é melhor, porém envolve custos e investimentos maiores, particularmente aqueles custos ligados a transporte de madeira pois são instalações centralizadas e fixas.

Em veículos a utilização do carvão vegetal é mais interessante, pois produz menor teor de voláteis. Na tabela seguinte pode-se verificar a composição dos gases formados, a partir de vários combustíveis e métodos de gaseificação.

TABELA 3 - COMPOSIÇÃO DOS GASES OBTIDOS

COMBUSTÍVEIS	MÉTODO	FRAÇÃO VOLUMÉTRICA				
		CO	H_2	CH_4	CO_2	N_2
Madeira com 12-20% umidade	co-corrente	17-22	16-20	2-3	10-15	45-50
Carvão vegetal	co-corrente	28-31	2-10	1-2	1-2	55-60
Antracita	contra-corrente	27,0	12,7	0,7	3,9	55,7
Turfa	co-corrente	19,0	11,2	1,0	14,0	54,8
Carvão vegetal	contra-corrente	30,4	19,7	0,3	3,6	46,0

Fontes : [5] e [10]

1.3. DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO

Segundo Queiroz [63], o engenheiro francês Felippe Lebon foi o primeiro que, em 1785, propôs a utilização dos produtos gasosos resultantes da destilação da madeira para iluminação pública. Logo surgiram inúmeras propostas para se melhorar o sistema, tornando-se o mesmo aproveitado nas formas das residências particulares, casas comerciais e indústrias.

Já a primeira referência encontrada sobre aparelho de gasogênio em automóveis data de 1836 numa patente requerida na Inglaterra por Samuel Brown. A importância do desenvolvimento posterior do gasogênio aumentou paralelamente com a necessidade de substituir os combustíveis líquidos de importação.

Atualmente, principalmente em países do terceiro mundo, a gaseificação é utilizada e proposta em diversas aplicações.

No Brasil, parece que o primeiro gasogênio foi fabricado em Itabirito (MG), alguns anos antes da 2a. Guerra, por um engenheiro da Escola de Minas de Ouro Preto [39].

A partir de 1938 o Ministério da Agricultura do Brasil incentivou, principalmente aos possuidores de automóveis, para iniciarem o emprego de gasogênio nos seus veículos pois isso viria a atenuar o problema de abastecimento de combustível importado. Com a criação da Comissão Nacional do Gasogênio (CNG) em 1940, esta alternativa tomou grande impulso para o uso veicular. Basta citar os vários fabricantes, segundo Queiroz [63]: Ferta, Brasil, Guarany, Piratininga, Oeste, Santana, Irineu Corrêa, Mozzato, JJI, Mechanica, Loz e Nascimento Junior, dentre outros. Entretanto, passada esta fase, os derivados de petróleo se tornaram facilmente disponíveis e baratos e os gasogênios foram gradativamente desativados em sua totalidade. Com a recente conjuntura energética, em meados de 1980, começaram a surgir novos fabricantes, principalmente para uso estacionário; contudo houve precipitação de alguns deles ao lançarem equipamentos que precisavam de um melhor aperfeiçoamento. Isso provavelmente, foi o motivo para a não afirmação dos gaseificadores no mercado. Segundo Furtado Filho [33], o atual estágio do uso de gaseificação no Brasil é

o seguinte :

a. Fabricantes de gaseificadores para geração de potência em motores de combustão interna :

a.1. Siquieroli (MG)

Iniciou produção em 1979 até 1986 vendendo cerca de 1000 unidades. O gaseificador é do tipo fogo cruzado, com uma ventoneira refrigerada a água e grelha vertical junto à saída do gás, localizada no lado oposto à entrada do ar de gaseificação. Praticamente todas as unidades vendidas operam com motores ciclo Otto destinando-se a operação de veículos, sistemas de bombeamento de água e geração de energia elétrica.

a.2. Geniogáz (SP)

Produz gasogênio para carvão vegetal do tipo fogo cruzado. No ano de 1987, foram vendidas 5 unidades, todas destinadas à geração de energia elétrica para serrarias, instaladas em propriedades rurais, e para acionamento de motores de secadores de grãos e periféricos (alimentadores, transportadores, etc.). Um equipamento deste fabricante foi objeto de estudo nesta dissertação.

a.3. Sheffer (RS)

O gasogênio é do tipo co-corrente com grelha plana e sem região de estrangulamento. Desde o início da produção deste modelo já foram vendidas cerca de 300 unidades. Em 1987, foram vendidas 45 unidades e 8 em 1988. Todas as unidades são para uso em ciclo dual c/diesel. O destino das unidades são geralmente para geração de energia elétrica e irrigação.

a.4. Avimec - Gaspel (RS)

Fabricou e vendeu cerca de 200 unidades até o ano de 1986. O gaseificador que foi comercializado é de um modelo contra-corrente para lenha ou carvão, operando com sistema de lavagem constituído de duas colunas preenchidas com cavaco de madeira. Praticamente todas as unidades vendidas destinaram-se à geração de gás para sistema de irrigação. Recentemente a Gaspel adquiriu os direitos de produção do equipamento e montou um protótipo para realização de melhorias.

b. Fabricantes para uso térmico direto em fornos e caldeiras :

b.1. Termoquip (SP)

Produz gaseificadores desde 1980, tendo já vendido cerca de 120 unidades. Inicialmente as unidades comercializadas eram de 250 a 500 Mcal/h. Atualmente todas as unidades vendidas são de 1,5 a 2,5 Gcal/h. A Termoquip sempre trabalhou com um modelo co-corrente, construido em aço carbono, com estrangulamento interno.

b.2. Riedhammer (SP)

Iniciou sua produção em 1980. Vendeu 20 unidades até 1986. Seu modelo é um gaseificador contra-corrente seguido de um complexo sistema de limpeza de gás. Todas as unidades vendidas foram para geração de gás para queima em fornos cerâmicos. A potência nominal da maior parte das unidades é de 5 Gcal/h.

b.3. Conventos (SC)

Produz um gaseificador contra-corrente, potência de 5 Gcal/h, com grelha rotativa e sistema de lavagem de gás. Vendeu cerca de 40 unidades. Em 1987 vendeu 4, com o objetivo de gerar gás de carvão vegetal para substituição de GLP em fornos de produção de cerâmica branca.

b.4. CIFALI (RS)

Seus gaseificadores são de um modelo contra-corrente, com potência da ordem de 7 Gcal/h, alimentados a lenha picada e destinados exclusivamente ao aquecimento de asfalto em fornalhas rotativas, através da queima direta do gás sujo e quente. Em cinco anos foram vendidas 80 unidades.

b.5. Technor (BA)

É um fabricante de gaseificadores do tipo co-corrente, para lenha taqueada, refrigerado por camisa de água, não possuindo portanto revestimento interno de refratários. Este modelo trabalha sobre pressão positiva, e é oferecido em potências de até 6 Gcal/h. Nos últimos anos foram vendidas 15 unidades, todas para aquecimento de fornalhas de fábrica de asfalto.

b.6. GTI (MG)

É um fabricante de fornos industriais para produção de cal usando gaseificadores de lenha (fornos verticais) e de carvão vegetal (fornos rotativos). A GTI produz instalações completas para fabricação de cal. A técnica é a da gaseificação

contra-corrente e combustão do gás quente com todos os voláteis, o que torna o rendimento elevado. Os fornos verticais, desenvolvidos para operar com esta técnica têm capacidade de 50 a 100t de cal/dia, e utilizam gaseificadores de potência nominal de 4 a 7 Gcal/h, respectivamente. Já produziu cerca de 40 unidades equipadas com gaseificadores e todos encontram-se em operação.

Com relação às pesquisas sobre gaseificação, Furtado Filho [33] destaca os seguintes programas :

Petrobrás : - gaseificação de carvão vegetal, em leito fixo contra-corrente para combustão em caldeira
- gaseificação de casca de côco de babaçu, em leito fixo co-corrente
- gaseificação de cavacos de madeira em leito fluidizado.

Eletrobrás : - Sistema de gaseificação para funcionamento de unidades de geração de energia elétrica com motores diesel nas regiões norte e centro-oeste.

Cientec : - gaseificação em leito fluidizado.

IPT : - desenvolvimento tecnológico de gaseificadores leito fixo e fluidizado.

CESP : - gaseificação eletrotérmica de madeira para geração de gás de síntese visando a produção de metanol.

CETEC : - gaseificador de pequenas potências (5 a 15 HP no eixo do motor), a carvão vegetal, baseado em conceitos de gaseificadores para motores em desenvolvimento na Suécia, Holanda e Tailândia.

1.4. APLICAÇÕES

Segundo Kjellstrom [42], a utilização do gás proveniente da gaseificação de biomassa nos países em desenvolvimento deve ser examinada já que, nestes países, os motores de combustão interna queimando derivados de petróleo não são apenas usados para veículos, mas também para geração de energia elétrica, operação com bombas e outras aplicações estacionárias.

Nas tabelas a seguir tem-se as aplicações no setor agrícola e no setor industrial do uso de gaseificadores de biomassa e suas respectivas faixas de potência.

TABELA 4 - EXEMPLOS DE APLICAÇÕES POSSÍVEIS DE GASEIFICADORES À BIOMASSA NO SETOR AGRÍCOLA DE PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO

A P L I C A Ç Õ E S	ENERGIA (kW) : TÉRMICA (t) MECÂNICA (m) ELÉTRICA (e)
Gás para combustão - secador de grãos	200 - 500 kW (t)
Gás como combustível para motores de combustão interna	
- bombeamento de água (irrigação e uso doméstico).	5 - 150 kW (m)
- Processamento da colheita (moinho, etc)	5 - 100 kW (m)
- Geração de potência elétrica (iluminação, energia para bombas, etc.)	10 - 500 kW (e)
- Tratores agrícolas	30 - 60 kW (m)
- Transporte de produtos e suprimento (caminhões e barcos)	30 - 100 kW (m)

Fonte : [42]

TABELA 5 - EXEMPLOS DE APLICAÇÕES POSSÍVEIS DE GASEIFICADORES À BIOMASSA PARA INDÚSTRIA EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO

APLICAÇÕES	ENERGIA (kW) : TÉRMICA (t) MECÂNICA (m) ELÉTRICA (e)
Gás para combustão	
- Fornalhas	50 - 500 kW (t)
- Fornos de cerâmica e cal	500 - 10000 kW (t)
- Caldeiras	500 - 10000 kW (t)
Gás como combustível para motores de bustão interna	
- Serrarias	30 - 100 kW (m)
- Geração de potência mecânica	30 - 100 kW (m)
- Geração de potência elétrica	10 - 500 kW (e)
- Transportes de produtos e suprimentos (caminhões e barcos)	30 - 100 kW (m)

Fonte : [42]

Como se verifica boa parte das aplicações consiste na utilização de gás pobre em motores ciclo Otto e Diesel. Os aspectos relativos aos motores Otto serão discutidos no próximo capítulo. No Apêndice 3 - AVALIAÇÃO DO PARÂMETRO β E DA EFICIÊNCIA DE COGERAÇÃO EM GASEIFICADORES, se desenvolvem considerações sobre a cogeração de potência mecânica e calor útil em gasogênios, evidenciando os ganhos de eficiência.

Historicamente, sobre a adaptação de motores ciclo Diesel com gasogênios, muito pouco se tem notícia, mesmo porque na época em que foram utilizados os gaseificadores, os motores diesel eram menos difundidos.

O funcionamento de um motor ciclo Diesel com o gasogênio não exige modificações significativas no seu projeto original. Dessa forma temos que [15]:

- o acionamento do motor é feito normalmente com o óleo diesel permanecendo em uma rotação pré-estabelecida (marcha lenta);
- o acendimento do gaseificador é feito através da sucção do próprio motor, não necessitando de ventoinha acionada eletricamente;
- como o gás pobre tem características anti-detonantes pode-se trabalhar com o motor diesel original com taxas de compressão altas (17:1 a 21:1), sem modificações, injetando-se uma percentagem de óleo diesel e evitando-se altos teores de hidrogênio no gás pela não utilização de vapor d'água no gaseificador.

O princípio de funcionamento então, fica resumido na seguinte sequência :

1. produção de gás pelo gaseificador, succionado pelo motor;
2. purificação do gás através de sistemas mecânicos de filtragem;
3. mistura do gás com o ar de combustão;
4. admissão da mistura combustível ao motor através do coletor de admissão;
5. injeção de uma percentagem de óleo diesel (10 - 20%) através da bomba injetora, devidamente modificada;
6. mistura dos combustíveis líquido e gasoso na câmara de combustão;
7. compressão da mistura combustível;
8. ignição da mistura no cilindro;
9. expansão e escape dos gases de queima.

O uso do turbo compressor em ciclos Otto e Diesel aumentando a pressão de alimentação dos cilindros, é uma das medidas possíveis para a diminuição da perda de potência, apesar de, evidentemente, encarecer o conjunto.

PARTE II - ESTUDOS EXPERIMENTAIS E TEÓRICOS

Capítulo 2 - SISTEMA MOTOR-GASEIFICADOR GENIOGAZ

Capítulo 3 - ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Capítulo 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Capítulo 5 - ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA BOMBA-MOTOR-GASEIFICADOR

CAPÍTULO 2 - SISTEMA MOTOR-GASEIFICADOR GENIOGAZ

Este capítulo apresenta o sistema empregado nos estudos experimentais, detalhando a forma de operação.

Estes aspectos essenciais, em sua maior parte foram obtidos durante os estudos experimentais, já que a literatura aplicada é muito reduzida neste tema.

2.1. APRESENTAÇÃO

As figuras a seguir apresentam vistas do gasogênio E500, produzido pela Geniogaz - São Paulo empregado para gaseificação de carvão vegetal e produção de gás para o acionamento do motor General Motors associado, com as seguintes características :

Cilindrada : 4,1ℓ
Nº de cilindros : 6
Diâmetro do cilindro : 98,4mm
Curso do cilindro : 89,6mm
Taxa de compressão : 8,0 : 1
Desempenho líquido : Potência 117HP/4000rpm;
Torque 28 Kgfm/2000rpm
Ordem de explosão : 1 . 5 . 3 . 6 . 2 . 4

Inicialmente, procurou-se obter um conhecimento minuncioso de cada componente do gasogênio, possível através de uma desmontagem total. Detalham-se a seguir os componentes mais importantes, com algumas considerações do projeto.

Com a retirada dos ciclones, caixas de pó, a abertura da tampa superior do reator e do cinzeiro pode-se observar que o reator se resume a um cilindro de aço 1010 com 2mm de espessura, desprovido de grelha, e que a responsável pelo reduzido arraste de partículas é a própria geometria existente entre o reator e os ciclones. Este gaseificador pode ser considerado do tipo transversal, com modificações.

1- GASOGÊNIO
2- TANQUE RESFRIAMENTO DA CETILHA
3- CICLONES
4- CAIXA DE PÓ
5- INTERCAMBIADOR DE CALOR P/RESFRIAMENTO DO GÁS
6- LAVADOR
7- MOTOR

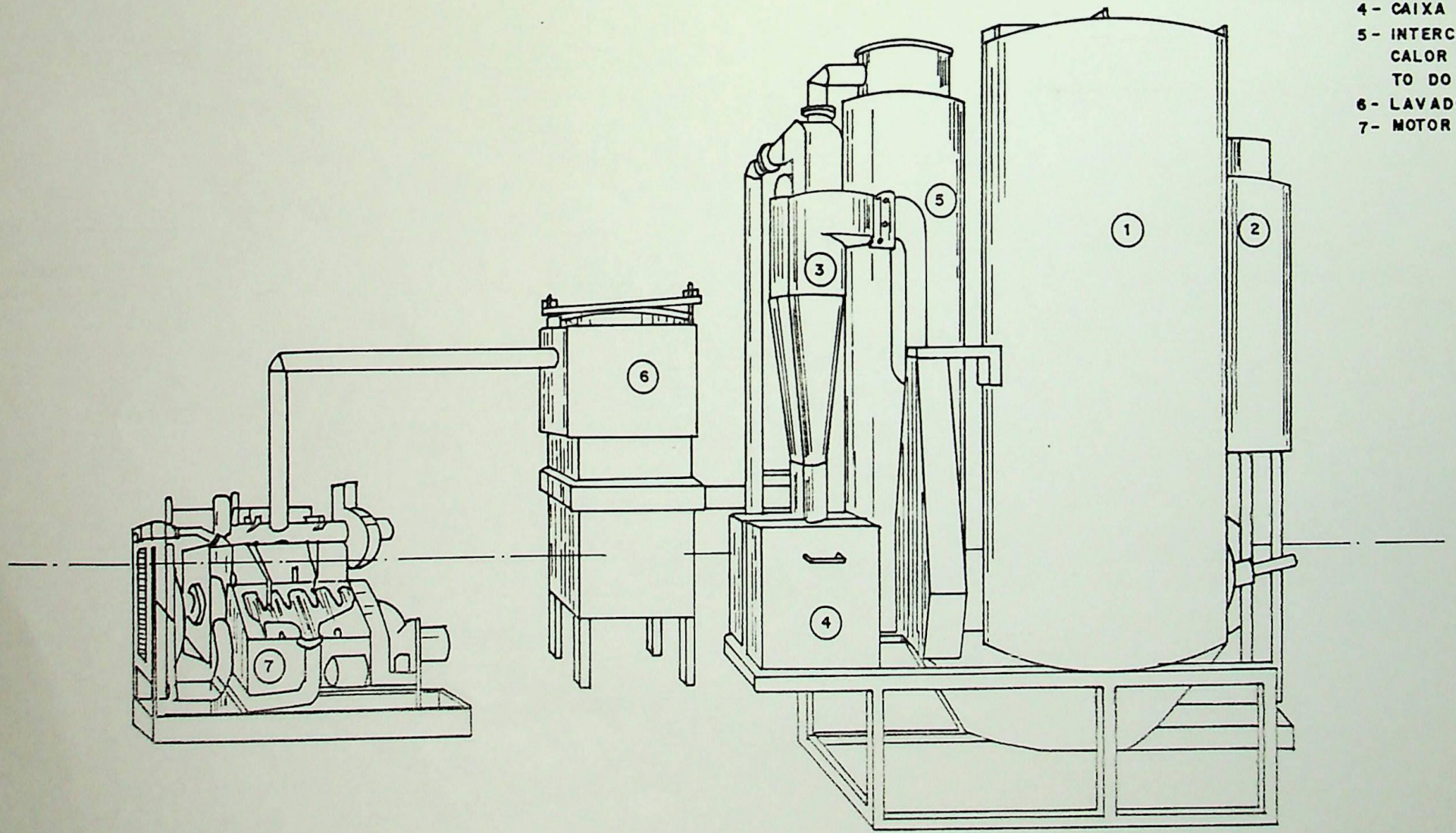
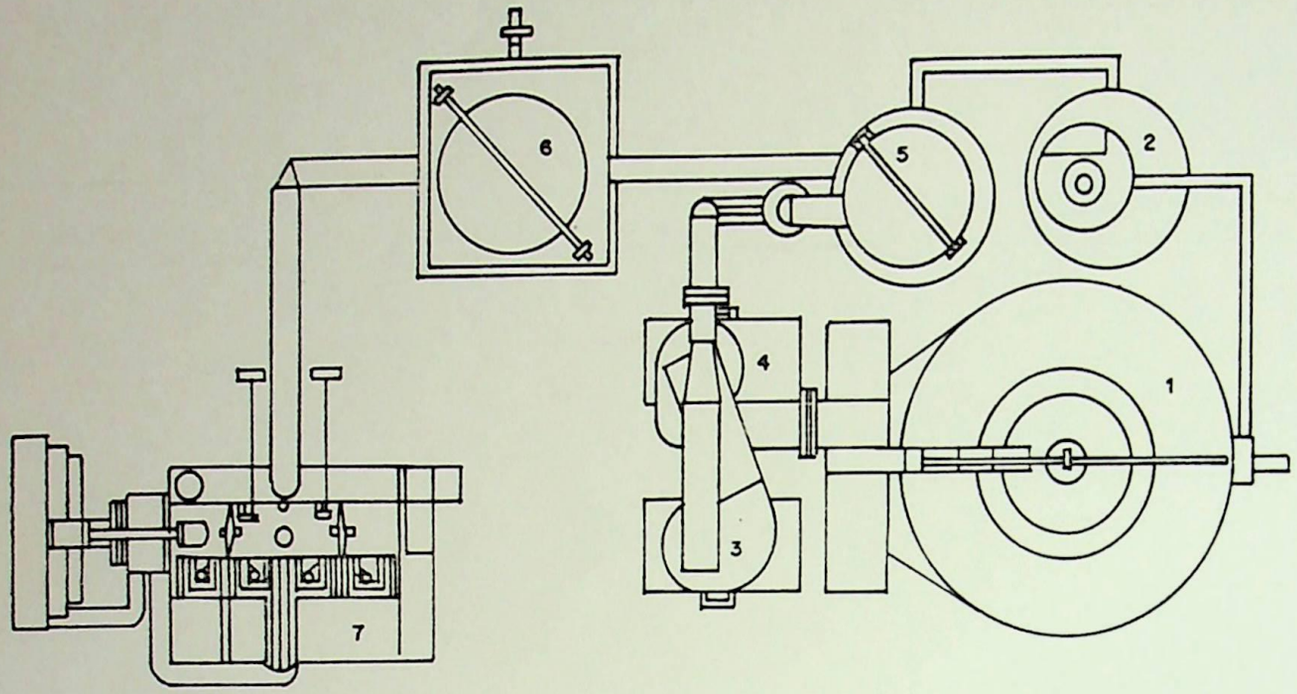


FIGURA 5 - VISTA LATERAL GASOGÊNIO E500/1500

ESC.~1:20



1 - GASOGÊNIO
2 - TANQUE RESFRIAMENTO DA CETILHA
3 - CICLONES
4 - CAIXA DE PÓ
5 - INTERCAMBIADOR DE CALOR P/RESFRIAMENTO DO GÁS
6 - LAVADOR
7 - MOTOR

FIGURA 6 - VISTA SUPERIOR GASOGÊNIO E500/1500

ESC.1:20

O reator deve ser calculado em função da potência do motor, seus períodos e regime de trabalho, peso da instalação e ser fisicamente suportável pela estrutura suporte. Para uma gaseificação eficiente é necessária uma determinada camada de combustível para contato com o ar e para proteger as paredes do gasogênio na zona de oxidação. Isso obriga o gasogênio a ter sempre um lastro de combustível, correspondendo, de 20 a 25% do seu volume.

O volume do gasogênio, para conter $\dot{m}$ Kg de carvão, funcionando por t horas, é calculado por [14]:

$$Vg = \frac{\dot{m} \cdot t + L' \cdot \dot{m} \cdot t}{d} \qquad (2.1.1)$$

Vg - volume do gasogênio [m^3]
$\dot{m}$ - quantidade do combustível consumido [Kg/h]
t - tempo de funcionamento sem recarga [h]
d - densidade do material [Kg/m^3]
L' - lastro necessário [%]

No reator pode-se observar também a cetilha onde entra o ar para a combustão parcial do carvão vegetal, que é o combustível adequado para este gasogênio. Esta entrada de ar é provida de uma válvula pendente que se abre quando existe a sucção pelo ventilador ou pelo motor em funcionamento. A cetilha, cumprindo seu papel de promover o contato do ar com o combustível na zona de oxidação, gera altas temperaturas, grande produção de calor e induz ao processo de gaseificação. Devem ser projetadas segundo a potência do motor e processo de gaseificação. Devido ao grande aquecimento, a cetilha deve ser arrefecida por circulação de água como mostra a figura abaixo.

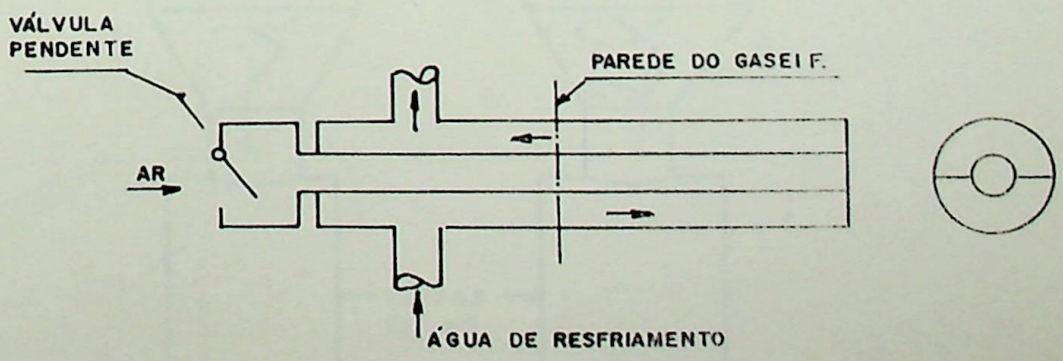


FIGURA 7 - CETILHA DO GASOGÊNIO E-500

Para completar o sistema de arrefecimento da cetilha é necessário um tanque de resfriamento, em anexo, que funciona através de sistema de circulação por termossifão e gera vapor à pressão atmosférica durante o funcionamento do sistema térmico.

Alguns gaseificadores possuem um tubo de escapamento de vapor que tem como objetivo introduzir este fluido na zona de combustão, para que uma quantidade maior de hidrogênio e oxigênio sobre o carbono venha a formar uma maior quantidade de óxido de carbono e induza também a formação de hidrocarbonetos leves.

Após o reator, cetilha, tanque de resfriamento, ainda,suportados pela mesma estrutura metálica tem-se um conjunto de dois ciclones em série responsáveis pela coleta de pó arrastado com o gás. Esta operação deve ser feita antes do resfriamento pois as impurezas contidas no gás provocariam incrustações nas paredes internas dos tubos do trocador de calor, que vem a seguir, diminuindo sua eficiência.

No ciclone o gás tem o movimento em espiral com dois vórtices: um externo descendente servindo para depositar as partículas, e outro interno ascendente com o gás já mais livre de impurezas, como pó de carvão incombusto. Usando-se uma bateria de ciclones pode-se separar partículas de até 5μ, além de proporcionar uma redução na temperatura do gás [14].

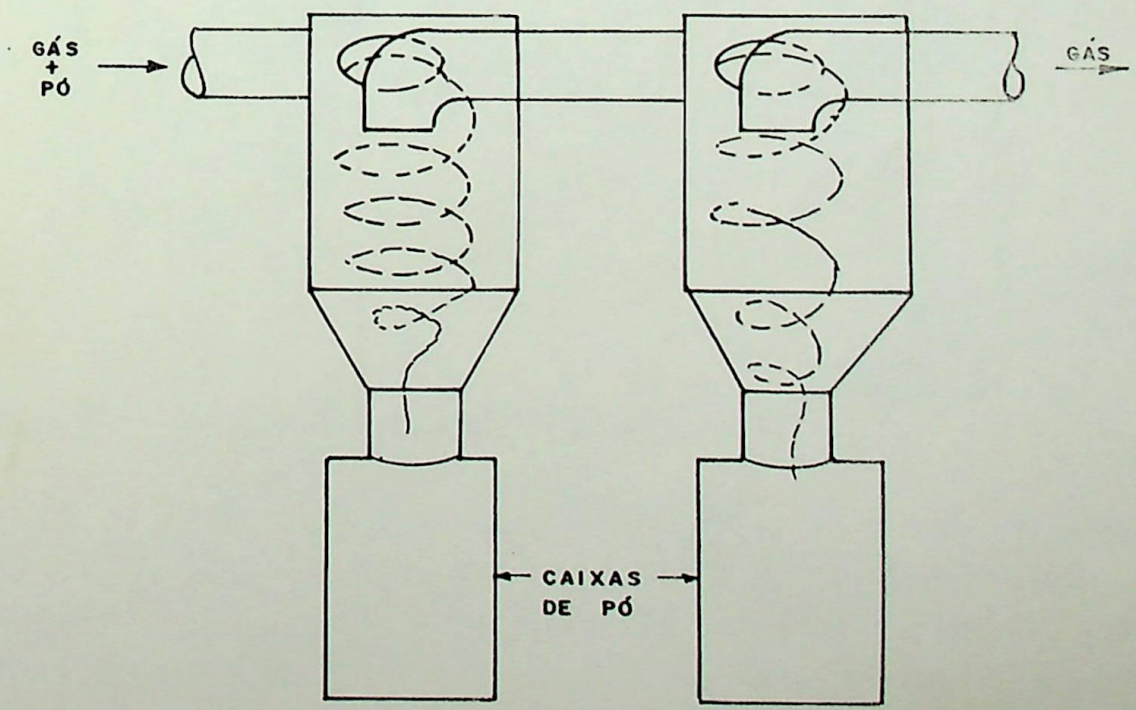


FIGURA 8 - CICLONES EM SÉRIE

Saindo dos ciclones o gás segue por uma tubulação até o trocador de calor tipo casco-tubo. Neste equipamento, em sua parte inferior do lado do gás, existe um dreno que deve estar aberto no funcionamento, para a retirada de condensados. O trocador de calor é projetado em função da temperatura e vazão do gás. No caso da Geniogaz usou-se um trocador tipo casco e tubos, onde o gás passa pelos tubos, trocando calor c/a água na parte externa dos tubos. Após o trocador, o gás de dirige a um lavador de gás via úmida.

Este lavador é um tanque onde o gás é insuflado sobre uma superfície de água, cedendo alcatrão e outros condensáveis. Após este contato, passa por uma tela sintética e por uma espuma visando reter a umidade em excesso e as eventuais partículas que tenham sido ainda arrastadas pelo gás.

Do lavador, o gás é conduzido até o filtro de papel, neste caso o mesmo filtro de ar utilizado em caminhões SCANIA. Em seguida atinge-se finalmente a admissão do motor.

Os dosadores ou misturadores gás-ar são construídos com tubos de diâmetros iguais para o gás e para o ar e obedecem ao esquema da figura abaixo.

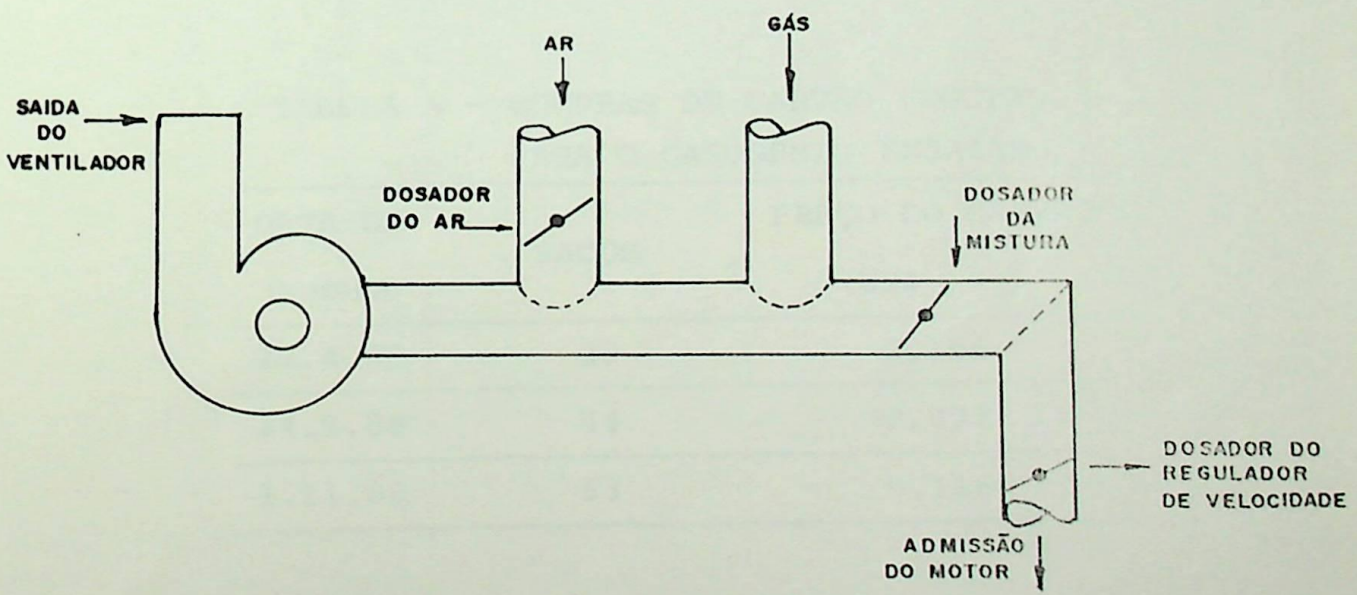


FIGURA 9 - DOSADORES DE GÁS/AR ADOTADOS

Como mostra esta figura, deve ser citado ainda o desvio ("by pass") existente na admissão que proporciona o funcionamento do ventilador para partida. Fazem parte ainda do conjunto fornecido pelo fabricante uma haste para o assentamen-

to do leito de carvão e uma pá para a limpeza do cinzeiro. Este conjunto associado ao motor já apresentado, foi instalado no Laboratório de Máquinas Térmicas do Instituto de Mecânica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá.

Após a instalação e reconhecimento de todos os componentes do conjunto gasogênio-motor e suas funções, o próximo passo foi naturalmente a obtenção do carvão vegetal para o início dos estudos de funcionamento do conjunto.

O carvão vegetal utilizado em todo o processo experimental com o referido gasogênio foi comprado na Serraria Fazenda Alegria, município de Delfim Moreira (MG), à 30 Km de Itajubá. O carvão é produzido em fornos de encosta e origina-se das sobras de pinus das seguintes variedades : elliotti, taedra e pátula.

Durante a fase de capacitação na operação e ensaios foram consumidos 130 sacos de carvão, com, em média, 15Kg cada um, totalizando aproximadamente 1950Kg de carvão.

Na tabela abaixo pode-se observar os preços de aquisição do carvão que, como será mostrado no capítulo 6, são superiores aos preços médios praticados em Minas Gerais.

TABELA 6 - COMPRAS DE CARVÃO VEGETAL PARA O GASOGÊNIO ENSAIADO

DATA DE COMPRA	SACOS	PREÇO DO CARVÃO (US$ / Kg)
20.4.88	23	0,106
24.9.88	44	0,097
1.11.88	63	0,116

Cabe salientar aqui a dificuldade de se comprar carvão nesta região devido à não emissão da guia de transporte nem pela Serraria, nem pelo Instituto Estadual de Florestas (I E F). Nestas condições os fabricantes receiam vender por falta de suporte legal.

2.2. OPERAÇÃO DO SISTEMA

2.2.1. PREPARO DO COMBUSTÍVEL

O primeiro item a ser observado para um bom funcionamento do gasogênio Geniogaz não é diferente com relação a outros gasogênios e consiste no preparo do combustível. Para isto, o carvão deve ser de boa qualidade e seco. Por carvão seco entende-se de 3 a 5% de umidade. O carvão utilizado neste caso acusou 6,3% de umidade, em várias amostras secadas numa estufa a 150°C durante 3 horas, logo bem próximo aos valores aceitáveis. Como se sabe, o carvão tem a propriedade de absorver grande parte da umidade do ar atmosférico e vem daí a necessidade de se escolher um ambiente propício ao armazenamento do mesmo. Por princípio, não é aconselhável colocá-lo diretamente em contato com o solo e/ou próximo a uma porta ou janela acessível ao ambiente externo. No caso deste estudo o carvão foi armazenado em uma área próxima do conjunto, coberta e seca.

Carvão de boa qualidade é aquele que ao se quebrar um pedaço a fratura apresenta superfície preta, lisa e brilhante. Se o carvão apresentar coloração meio opaca ou "russa", não deve ser usado, segundo o fornecedor [49], devido aos resíduos de alcatrão que sujarão mais facilmente todo o sistema, prejudicando o funcionamento do gasogênio. Para se testar no campo a umidade do carvão, pode ser usado o mesmo pedaço que foi quebrado, colocando-se saliva na parte lisa. Se o carvão não absorver nada da saliva, este não está seco, portanto não é próprio para o uso, porém se parte da saliva for absorvida o mesmo está bom. Este procedimento prático é adotado por carvoeiros.

O bom carvão não tem cheiro. Caso notar-se odor pode ser a presença de alcatrão e logo não se deve utilizar este combustível, pois a utilização contínua de carvão com alcatrão implica no emperramento das borboletas e nas constantes trocas ou lavagens do filtro de gás.

O reator Geniogáz foi projetado para usar carvão das mais variadas dimensões, porém o carvão com muito pó exige limpezas mais frequentes dos depósitos, ciclones e filtros. Por

outro lado, usando-se pedaços de carvão muito grandes a formação inicial do gás é mais demorada. A granulometria média ideal é a correspondente de 1 a 6cm para as dimensões mínimas e máximas, respectivamente.

Para se chegar a tais condições granulométricas, o carvão antes de ser utilizado no gasogênio foi quebrado de forma mais uniforme possível através de um processo manual. Utilizou-se como instrumento de corte um facão. Após a quebra, o carvão foi peneirado numa tela de malha 1x1cm para se separar os finos e a seguir o mesmo era ensacado para posterior utilização. Nesta operação cada saco que originariamente pesava cerca de 15Kg passava a pesar cerca de 12,5Kg, havendo portanto uma perda em torno de 15%.

2.2.2. ABASTECIMENTO E PREPARO DA PARTIDA

Com o combustível assim preparado abastecia-se o reator pela tampa superior que emprega como junta borracha de silicone para suportar temperaturas acima de 200°C. Depois do carvão estar alojado no reator é preciso um assentamento do leito com a haste apropriada, de forma que sejam eliminados os espaços vazios e que a zona de reação fique adequada para a partida. Uma observação importante é que esta operação deve ser feita de forma suave, evitando-se assim a formação de finos os quais, como se sabe, sujam o sistema.

No caso de partida com a presença de carvão no reator, restante de uma operação anterior, deve-se mexer a zona de reação com a haste pela cetilha de modo que se desfaça a camada de cinzas que fica sobre os pedaços de carvão que, por falta de oxigênio, foram apagadas.

Neste caso o cinzeiro deve ser limpo, através de pá apropriada, antes de se iniciar a operação. O processo de limpeza é simples : deve-se ir retirando o carvão misturado com cinzas e escória, do fundo do reator e parar quando começar a sair carvão limpo. O carvão com cinzas e escória deve ser peneirado, reaproveitando-se os pedaços bons.

O reator em questão tem um volume de $0,764m^3$ com a altura de 1,5m e um diâmetro de 0,805m, estimado pela circunferência de 2,53m e desprezando-se o fundo cônico. Desta forma caberá no reator cerca de 130 a 160Kg de carvão, a depender de sua densidade aparente. Para a operação o tanque de resfriamento da cetilha deve estar cheio, bem como o trocador de calor. Suas capacidades são de 100 e 200ℓ de água, respectivamente.

Durante a operação a água do tanque de resfriamento da cetilha vai se evaporando e através de um sistema de bóia a água do trocador vai completando seu volume, sendo que uma outra bóia aciona uma chave elétrica acendendo uma lâmpada de alerta, quando o nível de água do trocador chega no seu limite mínimo. O consumo de água é bastante variado dependendo da rotação e carga do motor, evidentemente.

Para a partida são necessários também que as caixas de pó, a tela e espuma do lavador e os filtros de papel do gás

e do ar estejam limpas. O lavador deve ter seu nível d'água correto, conforme um indicador externo. Existe um pequeno consumo de água também no lavador, e para se completar o nível, durante a operação, pode-se colocar uma tubulação ligando a entrada de água a um reservatório e à medida que o nível vai abaixando, a água do mesmo é aspirada, devido ao efeito da depressão interna.

A perfeita fixação das borrachas de vedação das tampas do lavador e filtros devem ser examinadas para evitar-se a entrada de ar falso no sistema. Para se constatar vazamento ou entrada de ar falso convém usar uma tocha fumegante passando-se sobre as juntas ou flanges, se a fumaça for aspirada estará constatado o problema.

É prudente verificar também o óleo e a água do radiador do motor.

Dessa forma, cumprindo-se todas estas etapas, tem-se o conjunto gasogênio-motor em condições de operação.

2.2.3. ASPECTOS DA OPERAÇÃO DE MOTOR OTTO COM GÁS POBRE

Um motor convencional ciclo Otto alimentado por um gaseificador a carvão vegetal produz apenas 50 - 60% de sua potência original. Vários fatores contribuem para a perda de potência, sendo o principal o baixo poder calorífico do gás.

De acordo com um estudo da CEMIG [14], a mistura gás-ar tem poder calorífico cerca de 35% inferior ao da mistura gasolina-ar, resultando em perda de potência equivalente no motor. Com o aumento da taxa de compressão do motor esta perda poderá ficar reduzida à metade, razão pela qual é melhor utilizar gás pobre em motor à álcool do que à gasolina. O aumento da taxa de compressão num motor só é possível com o rebaixamento do cabeçote do motor ou aumento das cabeças dos pistões.

Além de taxas de compressão elevadas, outras modificações melhoram o rendimento :

- velas e bobinas capazes de produzir melhor centelha, permitindo maior velocidade de queima do gás no interior do cilindro;
- curva de avanço adequada no distribuidor, assegurando torque em toda a gama de rotações.
- sistemas de sobre alimentação, capazes de aumentar a eficiência volumétrica.

Existem duas maneiras de se iniciar o processo de geração de gás em um gaseificador, as quais são :

a. através de ventiladores, succionadores ou qualquer equipamento capaz de fazer circular ar no leito onde se processa a geração de gás. Isto permite que o motor opere desde a sua partida sem o auxílio de outro combustível. Este é o caso do gasogênio Geniogáz;

b. fazendo o uso de outro combustível auxiliar de maneira que a própria sucção do motor realize a circulação de ar no leito necessária à geração de gás. O combustível auxiliar é utilizado até que se consiga uma geração de gas capaz de suprir a demanda do motor.

O tempo gasto neste processo pode variar de acordo com o tipo de gaseificador.

2.2.4. PROCEDIMENTO PARA PARTIDA

O procedimento para a partida, adotado para o gasogênio Geniogáz em estudos, foi o seguinte :

- verificar se todas as tampas (do reator e filtros) estão bem fechadas;
- abrir a tampa do ventilador e acioná-lo;
- colocar uma mecha acesa na entrada de ar do reator para que a chama seja succionada e inicie a combustão do carvão. O tempo de formação do gás com composição adequada pode variar de 5 a 25 minutos, se o sistema estiver em boas condições. Para se verificar o momento de dar a partida deve-se acender um fósforo na saída do ventilador: se o gás estiver pronto para utilização aparecerá uma chama azulada, garantindo a presença de CO. Caso contrário deve-se aguardar alguns minutos para uma melhor formação;
- com o gás formado, pode-se desligar o ventilador, fechar a sua saída e dar partida no motor.

A respeito da partida do motor algumas observações devem ser feitas. No sistema Geniogáz, como foi abordado, tem-se uma borboleta para a mistura gás-ar e outra para o ar. Na partida deve-se abrir pouco a borboleta da mistura e ainda menos a borboleta do ar, procurando-se cuidadosamente, através de variações sutis no manejo das borboletas, o ponto de ar correto para a combustão durante o acionamento do motor de arranque. Inicialmente o motor começa a funcionar em baixa rotação, cerca de 500 rpm, fazendo o papel do ventilador, porém de forma muito mais eficiente. Aos poucos a qualidade do gás aumenta e consequentemente também a rotação do motor e cabe ao operador a habilidade em sincronizar as borboletas de misturas. Paralelamente a isso o regulador de velocidade, tipo centrífugo, acoplado ao motor, começa a atuar procurando eliminar variações na demanda do gás provenientes do processo.

De acordo com a regulagem na alavanca da borboleta acionada pelo regulador pode-se estabelecer a rotação desejada cuja regulagem é efetuada manualmente no painel. Este sistema permite o carregamento do motor quando em operação interligada. Após o funcionamento normal as válvulas de drenagem do condensa

do nas linhas devem ser abertas.

A partir daí o conjunto funciona com estabilidade, sem trepidações ou falhas, já que a carburação do gás é mais fácil que a dos combustíveis líquidos, que necessitam de uma etapa de vaporização que ocorre no carburador e se completa no coletor de admissão e no interior dos cilindros aquecidos. A geração de gás é função da demanda do motor, sendo ela tanto maior quanto maior a solicitação do mesmo. A resposta do gaseificador é quase que instantânea nos aumentos de demanda.

A partida com o gasogênio quente e recém-desligado pode ser feito diretamente, sem o uso do ventilador, exatamente devido a presença de gás no sistema.

Para o desligamento do conjunto basta fechar a borboleta do ar e desligar a ignição do motor.

2.2.5. DIFICULDADES OBSERVADAS

No início das atividades experimentais, ocorridas no Laboratório de Máquinas Térmicas da EFEI, dar a partida no motor constituia-se em grande dificuldade. Havia a formação do gás, porém não em quantidade suficiente para o início da operação. Pela falta de experiência na época não se chegou de imediato a esta conclusão, tanto que se fez necessário acionar o motor com gasolina para se ter certeza que o problema estaria na gaseificação.

Posteriormente, sob a orientação de um técnico da Geniogáz, descobriu-se que estava faltando um melhor assentamento do leito, efetuado através de haste apropriada, para a formação adequada do gás. Contudo durante a permanência deste problema, a bateria foi bastante solicitada, inclusive impondo sua substituição após sucessivas recargas.

Outras dificuldades de operação ocorreram devido ao não conhecimento prévio das necessidades de manutenção do equipamento, o que foi sanado posteriormente. Este é o caso da limpeza periódica dos filtros e caixas de pó dos ciclones.

Algumas informações complementares podem ser citadas para orientar a correta operação do gasogênio :

- pode ocorrer excessivo aquecimento do gasogênio quando for operado com carga muito pequena de carvão no reator, recomendando-se o seu reabastecimento antes da operação regular;
- a granulometria, conforme já comentado, é um parâmetro essencial e ajuda a definir a estabilidade da operação, já que o leito deve, a medida que é consumido, ir baixando regularmente;
- nunca deve-se esquecer de observar o nível d'água nos tanques, pois se a cetilha não for bem refrigerada fatalmente se fundirá.
- não se deve respirar gás pobre, já que o monóxido de carbono é altamente nocivo à saúde, sendo mortífero mesmo sob baixas concentrações.

2.2.6. REABASTECIMENTO

Para o reabastecimento do gasogênio deve-se seguir o seguinte procedimento, conforme orientações do fabricante [49]:

- recomenda-se que o aparelho esteja desligado;
- deve-se observar se não há materiais combustíveis nas proximidades;
- abrir a tampa do reator, mantendo o rosto distante da abertura do aparelho;
- jogar um fósforo aceso dentro do reator, em caso de dúvida se entrou aceso ou não, jogar outro;
- pode haver ou não ligeiro barulho seguido de chama, resultado da queima de gás que sobrou dentro do aparelho;
- assim que a chama abaixar (quando houver), deve-se iniciar o abastecimento;
- não se deve encostar sacos plásticos na borda do aparelho, pois estes materiais derretem despejando o carvão no chão;
- ajeitar suavemente o carvão enfiando a haste profundamente no leito;
- deve-se cuidar para não socar o carvão, pois além dele se esfarelar provoca ainda engaiolamento;
- colocar a tampa tomando cuidado para que ela fique apoiada na junta de borracha;
- limpar o carvão que sobrar sobre o aparelho e em volta dele.

Ainda que tais observações pareçam óbvias, são cabíveis sua apresentação neste contexto, seja para complementar os aspectos operacionais, seja porque efetivamente ocorreram nos estudos experimentais, situações de risco, devido à sua inobservância na fase inicial de contato com o equipamento. A concepção do sistema de abertura da tampa do reator conduz a sua incorreta operação, recomenda-se ao fabricante a colocação de um dispositivo ou puxador em posição mais favorável.

2.2.7. EVENTUAIS PROBLEMAS E SOLUÇÕES

A seguir apresenta-se uma síntese dos problemas que podem ocorrer no uso dos gaseificadores e suas respectivas soluções, conforme observações dos estudos experimentais e da literatura [49,50].

a. Motor não funciona, o carvão não acendeu. Verificar pela entrada de ar se está aceso ou não.
   Causas possíveis : a.1. Mecha pequena ou apagada
   a.2. Baixa rotação do ventilador
   a.3. Má regularem dos controles (borboletas)
   a.4. Filtro de gás obstruído
   a.5. Entrada de ar, por falta de vedação nas tampas do reator e/ou filtros.
   Soluções : a.1. Reacender a mecha ou aumentá-la
   a.2. Rotação do ventilador deve ser aumentada
   a.3. Regular controles ar-gás
   a.4. Limpar filtro de gás
   a.5. Ajustar tampas e vedação.

b. Carvão está aceso, mas motor não funciona.
   Causas possíveis : b.1. Carvão aceso e reator esquenta devido ao nível de carvão abaixo do mínimo
   b.2. Má formação do gás.
   Soluções : b.1. Completar o nível de carvão
   b.2. Mexer na zona de reação com a haste pela entrada de ar.

c. Motor começa a funcionar com gás e para.
   Causas possíveis : c.1. Falta de gás no sistema (insuficiente)
   c.2. Falta de carvão na zona de queima (engaiolamento do carvão).
   Soluções : c.1. Aguardar a formação de gás por mais tempo
   c.2. Manter o ventilador funcionando, abrir a tampa de abastecimento e com uma haste ajeitar o carvão.

d. Após algum tempo de funcionamento normal, o motor perde a potência e não recupera.
   Causas possíveis : d.1. Mistura ar-combustível alterada

d.2. Filtro parcialmente obstruído (ver indicador de obstrução)

d.3. Problemas de ignição

d.4. Falta de carvão na zona de queima, por engaiolamento, ou acabando

d.5. Carvão de má qualidade na zona de queima

d.6. Acúmulo de escória e cinzas na zona de queima.

Soluções : d.1. Tentar novo ponto de mistura

d.2. Examinar e limpar filtro

d.3. Verificar sistema de ignição

d.4. Abrir a tampa de abastecimento e com a haste ajeitar o carvão, mantendo o ventilador funcionando

d.5. Esgotar o reator e abastecer com carvão bom

d.6. Abrir a tampa do cinzeiro e com a pá adequada retirar o carvão e escórias do fundo, até começar a aparecer carvão limpo, trocar a junta e fechar a tampa.

e. Demora para iniciar a operação com gás, mas depois do início o desempenho é normal

Causas possíveis : e.1. Entrada de fogo pela cetilha insuficiente

e.2. Pedaços de carvão muito grandes na zona de queima

e.3. Carvão muito úmido retardando a produção de gás

e.4. Arrumação inadequada do carvão na zona de queima.

Soluções : e.1. Aumentar a mecha

e.2. No próximo abastecimento observar a granulometria indicada.

e.3. Se possível, usar carvão mais seco

e.4. Arrumar melhor o carvão no próximo abastecimento.

f. Se após o funcionamento o desempenho não é normal.

Causas possíveis : f.1. Filtro parcialmente obstruído

f.2. Queda do carvão, para a zona de queima, irregular por engaiolamento ou

por aderência nas paredes do reator

f.3. Carvão muito úmido

f.4. Qualidade do carvão inadequada

f.5. Entrada de ar falso ou obstrução do sistema: por tampas e/ou juntas mal colocadas ou danificadas.

Soluções : f.1. Examinar e limpar filtros de gás

f.2. Sendo possível, continuar e aguardar próximo abastecimento. Não sendo possível, abrir a tampa de abastecimento e com uma haste ajeitar o carvão no centro e nas laterais do reator

f.3. Se possível continuar e aguardar o próximo abastecimento. Não sendo, abrir a tampa do reator deixando que o próprio calor elimine toda a umidade até parar de sair vapor e fechar a tampa

f.4. Utilizar carvão de melhor qualidade

f.5. Examinar tampas e juntas e corrigir.

g. O desempenho não é normal, mesmo após examinar e corrigir todos os itens anteriores. Há indicação de restrição elevada ou total.

Causa possível : g.1. Tubulação bloqueada por uso continuado de carvão com alcatrão, que se solidifica nas curvas e partes baixas.

Solução : g.1. Dissolver o alcatrão com solvente ou com calor, mantendo o tubo inclinado para o escoamento de resíduos.

O apêndice 5. Manutenção do sistema, apresenta diversas informações sobre a manutenção do gasogênio, conforme observações durante os ensaios e da literatura, recomendando-se sua observância para a correta operação.

CAPÍTULO 3. ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve a metodologia e instrumentação empregadas, e se comenta os ensaios efetuados para o estudo experimental do conjunto motor-gaseificador.

3.1. METODOLOGIA (objetivo e métodos)

Com relação a parte experimental, o objetivo básico consiste no esboço do campo de funcionamento do conjunto motor-gaseificador. Isso deverá ser obtido encontrando o rendimento global do conjunto ou o consumo específico para várias cargas e em várias faixas de rotação.

As medidas de consumo de carvão vegetal em um determinado espaço de tempo, avaliadas pela variação da altura do leito no reator, da rotação e da potência no eixo do motor, avaliada através do alternador, são medidas chamadas essenciais. No próximo capítulo se detalha o equacionamento adotado para o obtenção destes parâmetros a partir das leituras efetuadas. Por outro lado as medidas de temperatura em alguns pontos do sistema e análise de gases são as medidas denominadas de complementares ou de controle, já que não afetam o campo de funcionamento, servindo como parâmetros auxiliares de diagnóstico.

Visando cobrir o campo de operação do motor, definiu-se que eram necessárias três faixas de rotação, com pelo menos quatro cargas diferentes, totalizando doze pontos.

Para realizar a medida de potência do eixo foi acoplado ao câmbio do motor um alternador trifásico Bambozzi, com as seguintes características:

TABELA 7 - CARACTERÍSTICAS DO ALTERNADOR BAMBOZZI SEM ESCOVAS ("brushless")

MODELO 13229				
30 KVA		FP 0,8		1800 rpm
3 fases		ISOL B (130ºC)		60 Hz
VOLT (V)	220	380	440	EXCITAÇÃO 42,7 V
AMP (A)	78,9	45,5	39,5	1,9 A

O alternador trifásico é uma máquina girante síncrona, destinada a converter energia mecânica em elétrica, fornecendo corrente alternada sob tensão e frequências fixas. Para isto deve ser acionado através de uma potência mecânica aplicada ao eixo do seu rotor.

O acoplamento deve absorver os esforços transitórios de partida e parada do motor, além do seu torque máximo, sem acarretar esforços axiais nos eixos do motor ou do alternador.

O fato do alternador disponível para os ensaios ter que trabalhar a 1800rpm foi um fator que limitou as possibilidades de variação da rotação do motor em função das relações de transmissão da caixa de redução associada ao motor. Dessa forma definiu-se dois tipos de ensaios. O primeiro tipo a energia gerada seria colocada em paralelo com a rede, e com o câmbio na 4a. e 5a. marcha, seriam obtidas 2560 e 1800rpm no motor, já que a frequência da rede estabiliza o gerador funcionando a 1800rpm.

O segundo tipo de ensaio a ser feito, a energia gerada deveria ser dissipada em bancos de resistência, mantendo-se o gerador e o motor a 1600rpm através da 5a. marcha conseguindo-se então os pontos de uma terceira faixa de rotação. Este é o ensaio de maior dificuldade.

O procedimento para os ensaios em paralelo com a rede foi o seguinte :

a. completar a carga de carvão evitando-se encher totalmente para facilitar a medida do leito;

b. leitura da pressão atmosférica, temperatura ambiente e umidade do ar, parâmetros que serão utilizados para o cálculo da potência efetiva reduzida;

c. medida da altura inicial do leito;

d. ligar o potenciômetro que recebe os termopares localizados no sistema de gaseificação, conforme a figura a seguir;

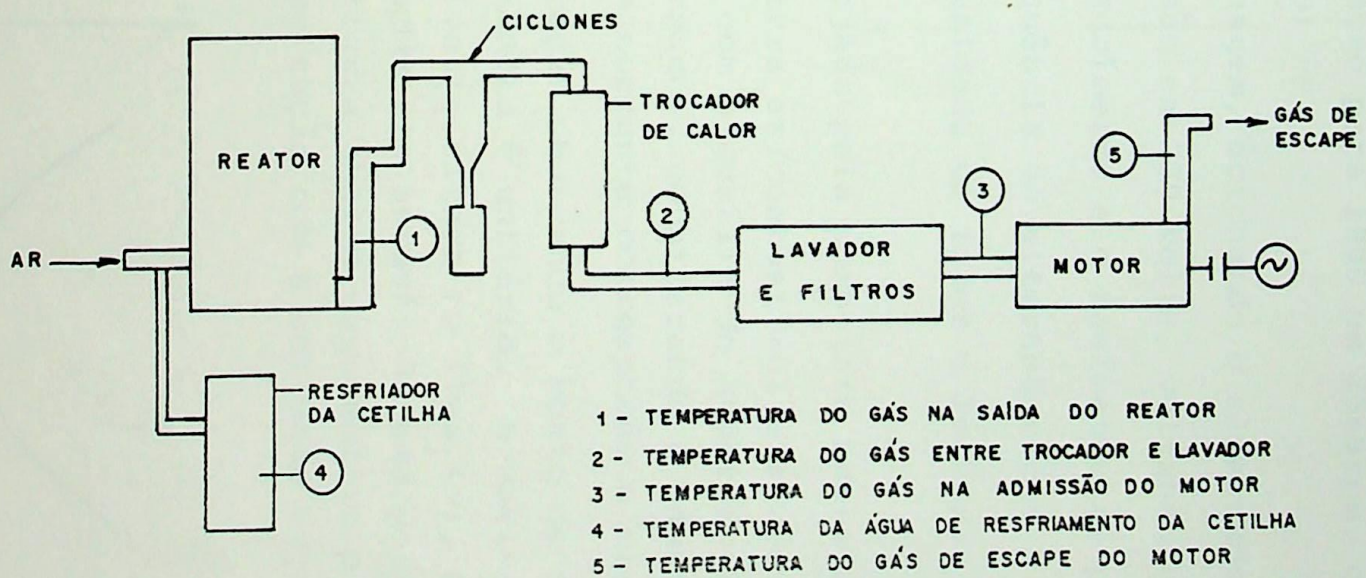


FIGURA 10 - ESQUEMA LOCALIZANDO OS TERMOPARES NO SISTEMA DE GASEIFICAÇÃO

e. ligar o varivolt trifásico de regulagem da excitação;

f. acionar o ventilador e acender a mecha na entrada do ar do gasogênio;

g. esperar a formação do gás;

h. assegurada a formação do gás, partir o motor;

i. ajustar a rotação para 1800 ou 2560rpm, conforme a relação de transmissão;

j. soltar a embreagem, acionando o alternador;

k. regular a tensão em 220 volts, voltando a ajustar a rotação;

l. ligar o frequencímetro e o fasímetro no painel;

m. ajustar a frequência do alternador com a rede;

n. observar a igualdade de fases e fechar o disjuntor do paralelismo;

o. dar carga desejada pela borboleta manual;

p. regular a mistura ar/combustível através da variação da borboleta do ar, com o auxílio do amperímetro ligado em uma das fases do alternador, considerando a máxima eficiência, portanto a máxima corrente corresponde a mistura recomendável;

q. variar a excitação, buscando o ponto de corrente mínima onde o fator de potência é unitário. A variação é conseguida através do varivolt, citado no ítem (e), que está conectado ao campo da excitatriz através de uma ponte retificadora de corrente. A figura abaixo esquematiza o comportamento da corrente de excitação com a corrente de saída do alternador.

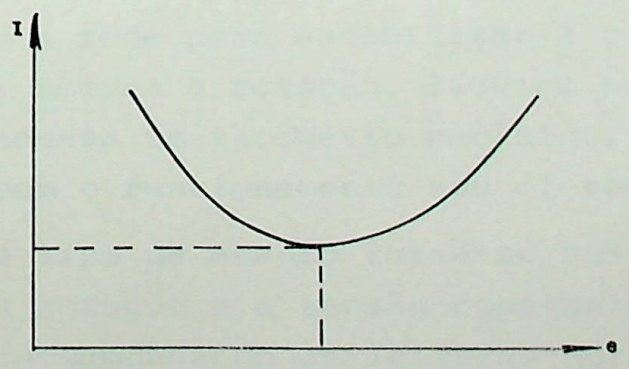


FIGURA 11. VARIAÇÃO DA CORRENTE DE SAÍDA, I, EM FUNÇÃO DA EXCITAÇÃO, e.

A vantagem de se trabalhar com o fator de potência unitário está na facilidade em se monitorar a carga no ensaio, bem como no fato de se eliminar a potência reativa.

A corrente deve ser monitorada continuamente, observando-se a regulagem de ar e se o fator de potência permanece unitário, pois possíveis alterações na demanda poderão alterar um pouco a situação inicial.

r. manter a carga constante durante o ensaio, tendo sido adotado um período de 1,5hs para cada ensaio, visto ser um tempo suficiente para eliminar eventuais erros de partida e atribuição de carga, e não exigir um volume excessivo de combustível para a realização dos ensaios;

s. tomar leituras dos termopares de 10 em 10 minutos para a avaliação do comportamento das temperaturas ao longo do processo;

t. após o término, reduzir a carga, desacoplar a embreagem, desligar o motor e o disjuntor do paralelismo;

u. checar a entrada de ar do gasogênio e verificar a estanqueidade no sistema garantindo o apagamento do carvão;

v. após o resfriamento do reator, cerca de 5 horas depois da parada do motor, medir a altura final do leito.

Este tempo é necessário para que esta operação não se torne perigosa em virtude do gás ainda presente no reator.

Dessa forma foi possível obter os pontos referentes a duas faixas de rotações 1800 e 2560rpm.

O procedimento para carga isolada, onde a potência é dissipada em resistências, difere um pouco do anterior. Neste caso, não se tem a rede para estabilizar a rotação, sendo necessário se ajustar sempre a rotação, 1600rpm neste caso, e tensão. Para isso utilizou-se um tacômetro mecânico, pois o tacômetro do motor vibra com o funcionamento não oferecendo boa precisão.

Este tipo de ensaio torna-se bastante complexo, pois para se manter a rotação e a tensão constante é preciso estar permanentemente acompanhando as leituras do voltímetro do painel, do tacômetro e da regulagem de ar, exigindo evidentemente mais de uma pessoa. Através deste ensaio pode-se visualizar com bastante facilidade a queda de rotação do motor a cada aumento

de potência. Fez-se necessário o uso de ventiladores visando refrigerar os módulos de resistências usados.

A leitura no amperímetro só se faz necessário uma vez, já que a carga é fixada e o fator de potência neste caso também é unitário, ou seja, a potência ativa é igual a aparente. A rotação, porém, deve ser lida várias vezes obtendo-se uma média.

O equipamento ensaiado incluia um regulador de velocidade, conforme já citado. No entanto, propositalmente foi deixado inoperante, para maior liberdade de estabelecer a carga correta e evitar efeitos secundários indesejáveis e fora de monitoração, sobretudo no ensaio em carga isolada, realizado nos limites do curso do regulador.

Não obstante, para operação normal, sem interesse em medidas e tomada de dados, o regulador se revelou bastante eficaz.

3.2. INSTRUMENTAÇÃO

Visando obter-se as condições ambientes no momento do ensaio, utilizou-se de um barômetro e termo-higrômetro do Laboratório de Máquinas Térmicas/EFEI.

Para a medida da altura do leito do carvão foi necessário se montar uma haste numa base retangular de 20 x 20cm, ambas de madeira, sendo a haste dotada de uma escala em centímetros. Dessa forma, após o cuidadoso assentamento do leito, a altura poderia ser medida. Este instrumento também foi utilizado para a estimativa da densidade aparente do carvão vegetal, descritos no próximo capítulo.

Para as medidas de temperatura usou-se termopares, tipo J (ferro - constantan), devido a sua versatilidade e resposta rápida. Os termopares foram conectados num potenciômetro digital, marca "IOPE".

Com relação à medida de potência elétrica utilizou-se um transformador de corrente em uma das fases e ligado a ele um amperímetro de corrente alternada (0 - 12A). Para o monitoramento do campo de excitação do alternador utilizou-se um varivolt, uma fonte retificadora de corrente e um amperímetro de corrente contínua (0 - 5A). Os demais instrumentos de controle como voltímetro, fasímetro e frequencímetro situam-se num painel elétrico do laboratório, e foram acionados quando necessário.

O poder calorífico do carvão foi avaliado experimentalmente com o auxílio de uma bomba calorimétrica e da norma P-MB-454, da ABNT. O procedimento para o ensaio consta da colocação de uma massa conhecida de combustível num cadinho apropriado, dentro da bomba calorimétrica, com um filamento de ignição. A bomba é carregada com oxigênio à pressão de 20atm, para assegurar uma combustão completa, colocada em banho de água em um reservatório adiabático, e efetuada a ignição do combustível. A liberação de energia química causa uma pequena elevação na temperatura da bomba e da água. Com esta variação e de posse da massa do combustível e do equivalente em água da bomba calorimétrica determina-se o poder calorífico.

A análise dos gases foi feita, utilizando o aparelho

de Orsat, coletando-se o gás pobre pelo dreno existente na tubulação, antes do trocador de calor, em várias faixas de rotação do motor, o que corresponde a variar a vazão mássica de gás. O Orsat determina a composição volumétrica em base seca de CO_2, O_2 e CO dos gases, através da absorção química desses produtos. Os principais componentes do aparelho são: uma bureta medidora, um frasco nivelador e três buretas de absorção, que se interligam através de válvulas. O processo de funcionamento consiste em absorver seletivamente CO_2, O_2 e CO nas buretas, através de reativos previamente colocados em cada frasco. O teor de cada componente se obtém pela leitura direta na bureta medidora após sua absorção.

3.3. COMENTÁRIOS

Sem dúvida, a maior dificuldade encontrada nos experimentos foi referente ao tratamento do carvão para o abastecimento. Obter a granulometria adequada, após quebrar, peneirar e re-ensacar é uma tarefa demorada e extenuante, que pode em alguns casos desestimular a maior difusão dos gaseificadores de carvão vegetal.

Um aspecto importante a remarcar foi a necessidade de se monitorar a corrente do campo de excitação do alternador, já que, a busca do ponto de fator de potência unitário tem que ser feita com cuidado, evitando-se que esta corrente ultrapasse o seu limite de placa (1,9A). Em mais de uma ocasião houve a perda de diodos do alternador devido a sobrecorrente.

As partidas do motor foram obtidas sem maiores dificuldades, pois ao se iniciarem os ensaios, já se havia realizado um período de aprendizagem e conhecido suficientemente o sistema. Ainda assim, dos 48 ensaios efetuados, foram considerados 27 ensaios de 1,5hs cada. Os resultados de 21 ensaios não serão apresentados por terem sido considerados defeituosos devido, principalmente, ao consumo de mistura rica. Deve-se ressaltar entretanto, que os parâmetros destes ensaios foram interessantes, na medida que indicaram a faixa das medidas corretas e consolidaram a experiência operacional com o sistema.

Entre a fase de aprendizado e os ensaios foram consumidos, desprezando as perdas, cerca de 1650Kg de carvão vegetal. Os resultados dos ensaios serão apresentados no próximo capítulo.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este Capítulo complementa o anterior, apresentando e discutindo os valores obtidos no equipamento ensaiado, incluindo a análise de regressão dos resultados observados e sua comparação com avaliações teóricas.

4.1. CONSUMO ESPECÍFICO, RENDIMENTO E OUTROS PARÂMETROS ESSENCIAIS.

4.1.1. PODER CALORÍFICO DO CARVÃO VEGETAL

O poder calorífico do carvão, dado essencial no cálculo do rendimento, avaliado em bomba calorimétrica, foi bastante aproximado ao valor apresentado no Balanço Energético Nacional [6].

As equações utilizadas para se chegar a este valor foram:

$$VA = \frac{Pc' \cdot m_1}{\Delta T'} \qquad (4.1.1.1)$$

$$PC = \frac{VA \cdot \Delta T}{M} \qquad (4.1.1.2)$$

TABELA 8 - PARÂMETROS ENVOLVIDOS NO CÁLCULO DO PC DO CARVÃO VEGETAL

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	VALOR	OBS
Pc'	Poder calorífico do ácido benzoico	6318 Kcal/Kg	dado
m_1	Massa do ácido benzoico	1,05 g	medido
$\Delta T'$	Variação da temperatura durante a queima do ácido benzoico	3,1°C	medido
VA	Valor em água	2,14Kcal/°C	calculado
M	Massa do carvão	0,535g	medido
ΔT	Variação da temperatura durante a queima do carvão	1,7°C	medido
Pc	Poder calorífico do carvão	6799,8Kcal/Kg	calculado

4.1.2. DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente, que permite estimar a massa consumida a partir da variação de volume no reator, foi estimada pesando-se várias cargas de carvão e fazendo a medida do aumento do leito para cada carga. O volume, em m^3, correspondente a uma altura do leito, h, em metros é dada por :

$$V = 0,5093 \cdot h \qquad (4.1.2.1)$$

Dividindo-se este valor pelo peso da carga tem-se a densidade aparente, Da. O valor médio obtido para a densidade aparente foi de, aproximadamente, 170kg/m^3, conforme mostra a tabela a seguir.

TABELA 9 - CÁLCULO DA DENSIDADE APARENTE MÉDIA

AMOSTRAS	PESO (Kg)	VOLUME CORRESPONDENTE (m^3)	DENSIDADE APARENTE (Kg/m^3)	Δ %
1	12,6	0,0713	176,68	3,5
2	12,9	0,0764	168,83	-1,1
3	12,9	0,0774	166,61	-2,4
4	13,1	0,0764	171,45	0,4
5	13,0	0,0764	170,14	-0,3
6	12,4	0,0713	173,88	1,9
7	13,2	0,0789	167,21	-2,0
MÉDIA	12,9	0,0754	170,68	1,6

4.1.3. MEDIDAS DE CONSUMO DE CARVÃO

Para se chegar ao consumo de carvão, $\dot{m}$, em kg/h, baseia-se na variação da altura do leito durante o ensaio, Δh, que é dada por :

$$\Delta h = hf - hi \qquad (4.1.3.1)$$

onde : hf - altura no final do ensaio, [m]
hi - altura no início do ensaio, [m]

Entretanto, cada vez que se inicia a operação do gaseificador, tem-se um consumo relativo à formação do gás. Ao final do processo, também, existe um consumo até a combustão se cessar totalmente. O consumo inicial mais o final foi estimado iniciando-se e logo em seguida, terminando-se a operação. Neste caso, o leito cedeu 5cm. Dessa forma deve-se abater este valor de Δh já que, numa operação normal, mais prolongada, este consumo fica distribuído ao longo de várias horas, e não deveria ser considerado.

Assim, a variação corrigida, $\Delta h'$, fica :

$$\Delta h' = \Delta h - 0,05 \qquad (4.1.3.2)$$

Pode-se então definir $\dot{m}$, como :

$$\dot{m} = 170 \cdot V \qquad (4.1.3.3)$$

Onde o volume correspondente a uma variação corrigida, em 1,5hs de ensaio, é expresso por :

$$V = 0,3395 \cdot \Delta h' \qquad (4.1.3.4)$$

Portanto, das três últimas expressões, tem-se :

$$\dot{m} = 57,728\Delta h - 2,886 \qquad (4.1.3.5)$$

onde : $\dot{m}$ - consumo de carvão, [kg/h]
Δh - Variação do leito em 1,5hs, [m]

4.1.4. POTÊNCIA ELÉTRICA GERADA

A potência elétrica gerada, no alternador trifási é dada por:

$$Pele = \frac{\sqrt{3} \cdot 220}{1000} \cdot \bar{I} \qquad (4.1.4.1)$$

Onde: Pele - potência elétrica gerada [kW]

$\bar{I}$ - média da corrente de saída [A]

A potência observada no eixo do motor é obtida a através do rendimento do alternador, ηa, logo:

$$Peixo = \frac{Pele}{\eta a} \qquad (4.1.4.2)$$

Nos ensaios onde o motor trabalhou com 1800 e 2560 rpm, o alternador operou a 1800rpm devido ao uso da caixa de transmissão, e o rendimento do alternador pôde ser obtido a partir da curva característica à 1800 rpm com fator de potência unitário, como mostra a figura, resultante de ensaios neste equipamento no Laboratório Eletro-Mecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas, da EFEI.

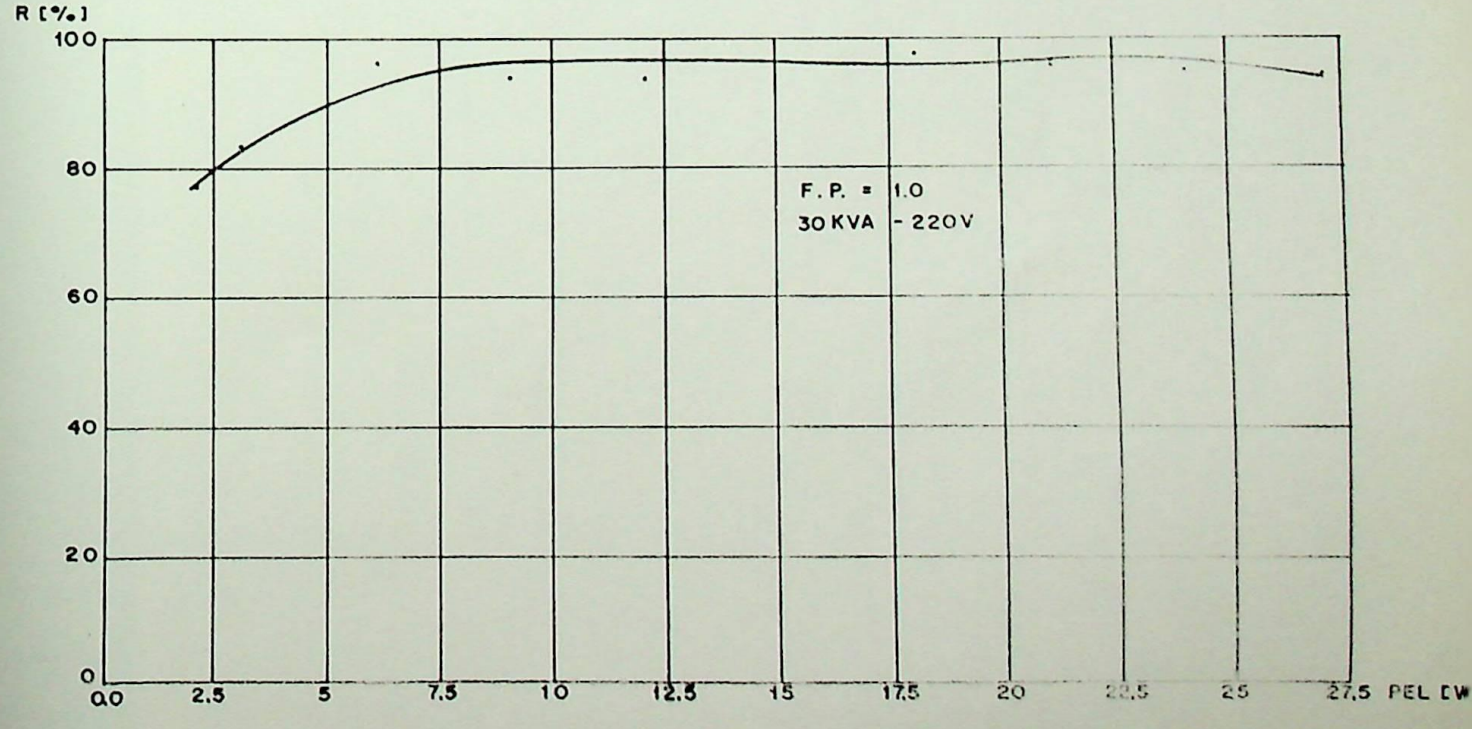


FIGURA 12 - CURVA CARACTERÍSTICA DO ALTERNADOR BAMBOZZI À 1800 rpm

Nos ensaios de carga isolada, no entanto, o alternador trabalhou em torno de 1600 rpm. Para conhecer seu rendimento, em função da potência nesta rotação, seria necessário um ensaio adicional. Porém, consultas efetuadas com a equipe técnica do, já citado Laboratório Eletro-Mecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas/EFEI, levaram a concluir que a curva característica a 1600 não difere à 1800 rpm em mais de 5%, e dessa forma, optou-se em adotar a mesma curva de rendimento.

4.1.5. CORREÇÃO DA POTÊNCIA OBSERVADA

A potência no eixo observada é a potência produzida pelo motor sob as condições atmosféricas do ensaio. Para a coerência do cálculo de rendimento global do conjunto motor-gaseificador (η_G) deve-se calcular a potência reduzida, ou seja, a potência observada, corrigida para as condições atmosféricas padrão. O termo "reduzida" refere-se aos resultados reais de desempenho, obtidos em ensaios por observação, e calculados para as condições atmosféricas definidas em norma.

As condições atmosféricas padrão são, segundo a norma P MB 749, da ABNT :

- pressão atmosférica : Bp = 736mm Hg = 981,3mbar
- temperatura do ar : tp = 20°C = 293K
- umidade relativa : Øp = 60%
- pressão parcial de vapor d'água no ar :
  hp = 0,60 . 17,54 = 10,5mm Hg

Dessa forma a potência no eixo reduzida é determinada por :

$$\text{Peixo R} = \frac{\text{Peixo o}}{\alpha_A} \qquad (4.1.5.1)$$

onde : Peixo R - potência no eixo reduzida, [kW]
Peixo o - potência no eixo observada, [kW]
α_A - fator de redução, normalizado.

Os fatores de redução α_A são tabelados na norma ABNT - P MB 749 [57], para pressões barométricas de P = 760 a 600mm Hg, a intervalos de 5mm Hg e temperaturas de 10 a 50°C, a intervalos de 2°C e umidade relativa de 30 a 100%, a intervalos de 10%.

Estes coeficientes consideram um valor de rendimento mecânico de 0,85, o que é razoável. Logo, α_A é uma função do rendimento mecânico, que traduz a razão entre a potência efetiva e a potência indicada. Potência efetiva é a potência mecânica ou elétrica disponível na tomada de força, para a produção de trabalho útil e a potência indicada é a potência desenvolvida dentro dos cilíndros.

4.1.6. CONSUMO ESPECÍFICO E RENDIMENTO

O consumo específico m', em Kg/Kwh, é definido como :

$$m' = \frac{\dot{m}}{Peixo\ R} \qquad (4.1.6.1)$$

onde : $\dot{m}$ - consumo de carvão, [Kg/h]

Peixo R - potência no eixo reduzida, [kW].

A potência térmica consumida, com relação ao carvão, Pcar, em Kw, é dada por :

$$Pcar = \frac{\dot{m}\ PC}{860} \qquad (4.1.6.2)$$

onde : $\dot{m}$ - consumo de carvão, [Kg/h]

PC - poder calorífico do carvão, [Kcal/Kg]

Com isso, o rendimento global do conjunto motor-gaseificador fica sendo :

$$\eta_G = \frac{Peixo\ R}{Pcar} \cdot 100 \qquad (4.1.6.3)$$

ou

$$\eta_G = \frac{860}{68\ .\ m'} \qquad (4.1.6.4)$$

4.1.7. TORQUE E PRESSÃO MÉDIA INDICADA

Adicionalmente pode ser determinado o torque e a pressão média indicada, usando as expressões usuais da Engenharia térmica [57].

O torque pode ser calculado por :

$$TOR = \frac{955 \cdot Peixo\ R}{N} \qquad (4.1.7.1)$$

onde : TOR - torque, [Kgf . m]

Peixo R - potência no eixo reduzida, [Kw]

N - rotação, [rpm].

E ainda poderia-se obter a pressão média indicada no eixo, pelas relações abaixo :

$$Pm = \frac{Peixo\ R}{Vd} \cdot 10,2 \qquad (4.1.7.2)$$

$$Vd = \frac{c \cdot N}{i \cdot 60} \qquad (4.1.7.3)$$

onde : Pm - pressão média indicada no eixo, [Kgf/cm^2]

Peixo R - potência no eixo reduzida, [W]

Vd - volume deslocado, [cm^3/s]

c - cilindrada, [m^3]

N - rotação, [rpm]

i - motor 2 tempos = 1
motor 4 tempos = 2

4.1.8 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Os resultados referentes aos ensaios podem ser observados nas tabelas a seguir. Cabe aqui ressaltar que a 1600 e 1800rpm chegou-se a potência máxima do motor, o mesmo não aconteceu a 2560rpm, pois neste caso o alternador foi um fator limitante.

TABELA 10 - RESULTADOS DOS ENSAIOS À 1600rpm

	ENSAIOS / PARÂMETROS		UNID	20º 30/11	21º 8/12	22º 1/12	23º 6/12	24º 2/12	25º 5/12	26º 3/12	27º 4/12
VALORES	MEDIDOS	Patm	mmHg	697,5	695,0	697,5	695,0	695,0	695,0	695,0	695,0
		T	^{o}C	21,5	26,5	19,0	26,0	20,0	25,0	20,5	23,5
		ø	%	67,0	44,0	91,0	53,0	77,0	50,0	60,5	49,0
		$\bar{N}$	rpm	1606	1610	1606	1613	1613	1616	1616	1622
		hi	m	0,18	0,08	0,14	0,19	0,12	0,09	0,13	0,16
		hf	m	0,38	0,27	0,32	0,39	0,38	0,35	0,41	0,43
		I	A	15,0	15,0	20,5	20,5	31,0	31,0	38,0	38,0
	INTERMEDIÁRIOS	Δh	m	0,20	0,19	0,18	0,20	0,26	0,26	0,28	0,27
		$\Delta h'$	m	0,15	0,14	0,13	0,15	0,21	0,21	0,23	0,22
		$\dot{m}$	kg/h	8,66	8,08	7,50	8,66	12,12	12,12	13,28	12,70
		Pelc	kw	5,71	5,71	7,81	7,81	11,81	11,81	14,48	14,48
		ηa	%	0,920	0,920	0,960	0,960	0,965	0,965	0,965	0,965
		Peixo o	kw	6,21	6,21	8,14	8,14	12,24	12,24	15,00	15,00
		α_A	-	0,930	0,920	0,940	0,920	0,930	0,920	0,940	0,925
		Pcar	kw	68,47	63,89	59,30	68,47	95,83	95,83	105,00	100,42
	FINAIS	Peixo r	kw	6,68	6,75	8,66	8,85	13,16	13,30	15,96	16,22
		m'	Kg/kwh	1,296	1,197	0,866	0,978	0,921	0,911	0,832	0,783
		ηG	%	9,76	10,56	14,60	12,92	13,73	13,88	15,20	16,15
		TOR	Kgf m	3,99	4,03	5,17	5,28	7,85	7,94	9,53	9,68
		Pm	Kgf/cm^2	1,246	1,259	1,616	1,651	2,455	2,481	2,978	3,026

TABELA 11 - RESULTADOS DOS ENSAIOS À 1800 rpm

VALORES		PARÂMETROS \ ENSAIOS	UNID	1º 18/11	2º 7/11	3º 10/11	4º 19/11	5º 11/11	6º 11/11	7º 19/11	8º 9/12	9º 20/11	10º 23/11
	MEDIDOS	Patm	mmHg	697,5	695,8	697,5	697,5	697,5	697,5	697,5	695,0	697,5	697,5
		T	°C	22,0	25,0	30,5	28,0	23,0	30,0	22,0	31,0	24,5	22,0
		ø	%	67,0	57,0	42,0	47,0	67,0	49,0	69,0	47,0	67,0	67,5
		N	rpm	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800	1800
		hi	m	0,09	0,17	0,07	0,12	0,11	0,12	0,09	0,14	0,10	0,10
		hf	m	0,34	0,40	0,30	0,36	0,35	0,35	0,39	0,45	0,41	0,43
		$\bar{I}$	A	21,14	21,38	21,60	32,76	32,62	33,03	44,80	42,97	51,97	52,47
	INTERMEDIÁRIOS	Δh	m	0,25	0,23	0,23	0,24	0,24	0,23	0,30	0,31	0,31	0,33
		$\Delta h'$	m	0,20	0,18	0,18	0,19	0,19	0,18	0,25	0,26	0,26	0,28
		$\dot{m}$	kg/h	11,55	10,39	10,39	10,97	10,97	10,39	14,43	15,01	15,01	16,16
		Pele	kw	8,05	8,14	8,23	12,48	12,43	12,58	17,07	16,37	19,80	19,99
		ηa	%	0,960	0,960	0,960	0,965	0,965	0,965	0,960	0,960	0,960	0,960
		Peixo c	kw	8,39	8,48	8,57	12,93	12,88	13,04	17,78	17,06	20,63	20,83
		αA	-	0,930	0,915	0,910	0,915	0,930	0,905	0,930	0,900	0,925	0,930
		Pcar	Kw	91,32	82,15	82,15	86,74	86,74	82,15	114,10	118,68	118,68	127,7
	FINAIS	Peixo r	Kw	9,02	9,27	9,42	14,13	13,85	14,41	19,11	18,95	22,30	22,7
		m'	kg/kwh	1,280	1,121	1,103	0,776	0,792	0,721	0,755	0,792	0,673	0,72
		ηG	%	9,88	11,28	11,47	16,29	15,97	17,54	16,75	15,97	18,79	17,5
		TOR	kgf m	4,78	4,92	5,00	7,50	7,35	7,64	10,14	10,05	11,83	11,7
		Pm	kgf/cm²	1,496	1,537	1,562	2,343	2,297	2,389	3,169	3,143	3,698	3,71

TABELA 12 - RESULTADOS DOS ENSAIOS À 2560 rpm

VALORES		PARÂMETROS	UNID	11º 20/11	12º 9/12	13º 21/11	14º 10/12	15º 21/11	16º 30/10	17º 23/11	18º 11/12	19º 24/11
	MEDIDOS	Patm	mmHg	697,5	695,0	697,5	695,0	697,5	693,0	697,5	695,0	697,6
		T	^{o}C	21,0	24,0	25,5	26,5	20,0	20,0	29,0	30,5	20,0
		ø	%	85,5	61,0	61,0	59,0	85,5	89,0	53,0	47,0	64,0
		N	rpm	2560	2560	2560	2560	2560	2560	2560	2560	2560
		hi	m	0,08	0,12	0,17	0,12	0,10	0,03	0,10	0,15	0,09
		hf	m	0,39	0,44	0,49	0,45	0,46	0,41	0,53	0,55	0,54
		$\bar{I}$	A	20,75	21,19	31,31	31,95	42,02	42,70	53,11	52,92	60,13
	INTERMEDIÁRIOS	Δh	m	0,31	0,32	0,32	0,33	0,36	0,38	0,43	0,40	0,45
		$\Delta h'$	m	0,26	0,27	0,27	0,28	0,31	0,33	0,38	0,35	0,40
		$\dot{m}$	kg/h	15,01	15,59	15,59	16,16	17,90	19,05	21,94	20,20	23,09
		Pele	Kw	7,91	8,07	11,93	12,17	16,01	16,27	20,24	20,16	22,91
		ηa	%	0,950	0,960	0,965	0,965	0,960	0,960	0,960	0,960	0,965
		Peixo c	Kw	8,32	8,41	12,36	12,61	16,68	16,95	21,08	21,00	23,74
		α_{Λ}	-	0,930	0,920	0,915	0,910	0,935	0,925	0,910	0,900	0,940
		Pcar	Kw	118,68	123,27	123,27	127,78	141,53	150,63	173,48	159,72	182,57
	FINAIS	Peixo r	Kw	8,95	9,14	13,51	13,86	17,84	18,32	23,13	23,33	25,26
		m'	Kg/kwh	1,677	1,706	1,154	1,166	1,003	1,040	0,948	0,866	0,914
		ηG	%	7,54	7,41	10,96	10,85	12,61	12,16	13,33	14,61	13,83
		TOR	Kgf m	3,34	3,41	5,04	5,17	6,66	6,83	8,64	8,70	9,42
		Pm	Kgf/cm^2	1,043	1,066	1,575	1,616	2,080	2,136	2,700	2,721	2,944

4.2. CAMPO DE FUNCIONAMENTO E CURVAS AUXILIARES

4.2.1 ANÁLISE DE REGRESSÃO

Para a obtenção do campo de funcionamento, que sintetiza o comportamento energético do sistema motor-gaseificador, sob diversas condições de carga e rotação, foi necessário a construção de curvas auxiliares de consumo específico em função da potência reduzida. Visando o melhor ajuste das curvas auxiliares, traçou-se o diagrama de dispersão a fim de selecionar algumas curvas que pudessem representar o conjunto de dados e calcularam-se, utilizando-se a calculadora Texas TI-58C com módulo de estatística, os coeficientes de determinação correspondentes, os quais são dados a seguir:

TABELA 13 - VALORES DO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO, r^2 OU R^2, NO AJUSTE DE CURVAS Peixo R x m'.

ROTAÇÃO (RPM) / TIPO DE CURVA	1600	1800	2560
Exponencial $y=ab^x \Leftrightarrow \log y = \log a + x \log b$	0,6886	0,7275	0,8710
Potência $y=ax^b \Leftrightarrow \ln y = \ln a + b \ln x$	0,7386	0,8144	0,9448
Logarítmica $y = a + b \ln x$	0,7226	0,7934	0,9129
Recíproca (1) $\frac{1}{y} = a + bx$	0,7086	0,7489	0,9106
Recíproca (2) $y = a + b\frac{1}{x}$	0,7790	0,8670	0,9701
Parábola $y = a + bx + cx^2$	0,7546	0,9012	0,9739

Tendo em vista o indicador de qualidade do ajustamento das curvas (r^2 ou R^2) e razões teóricas, ou seja, que o comportamento do fenômeno deve apresentar um mínimo, escolheu-se a parábola, cujas equações ajustadas pelo método dos mínimos quadrados são apresentados na Tabela 14.

Para poder concluir pela representatividade das equações de regressão, testou-se a estatística "F".

$$F = \frac{(n'-p)\ R^2}{(p-1)\ (1-R^2)}\ , \qquad (4.2.1.1)$$

onde,

n' - número de pontos
p - número de coeficientes da equação
R^2 - coeficiente de determinação

cuja distribuição de probabilidade é "F" com (p-1) e (n-p) graus de liberdade.

Os resultados obtidos na análise, entre eles o nível mínimo de significância (n.m.s.), isto é, o risco que se tem em admitir a existência de regressão quando isso não é verdade, estão na tabela abaixo.

O n.m.s. foi obtido através do módulo estatístico da calculadora Texas TI-58C, e para se calculá-lo considera-se o valor da estatística F e a distribuição de probabilidade F com (p-1) e (n-p) graus de liberdade.

TABELA 14 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE REGRESSÃO

RPM	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO	ESTATÍSTICA		n.m.s.
		R^2	F	
1600	m' = 2,0856 - 0,1734 (Peixo R) + 0,0059 (Peixo R)²	0,7546	7,68	0,02989
1800	m' = 2,4458 - 0,1840 (Peixo R) + 0,0048 (Peixo R)²	0,9012	31,93	0,00030
2560	m' = 3,0925 - 0,1976 (Peixo R) + 0,0044 (Peixo R)²	0,9739	112,0	0,00002

Observando estes resultados verifica-se que o melhor ajustamento foi no caso de 2560 rpm e que o caso de 1600 rpm foi o que apresentou menor variação explicada pela equação ajustada. Com relação a existência de regressão, pode-se concluir, ao nível de significância de 3%, que há regressão nos três casos, cujas equações correspondentes constam da tabela anterior.

4.2.2. CAMPO DE FUNCIONAMENTO

De posse das curvas auxiliares ajustadas, apresentadas nas figuras 13, 14 e 15, pode-se então traçar o campo de funcionamento do conjunto motor-gaseificador, conforme a figura 16.

Observe-se que os dados experimentais tiveram que ser complementados, nesta figura, para a obtenção de um diagrama tipo "colina". Tais estimativas estão tracejadas.

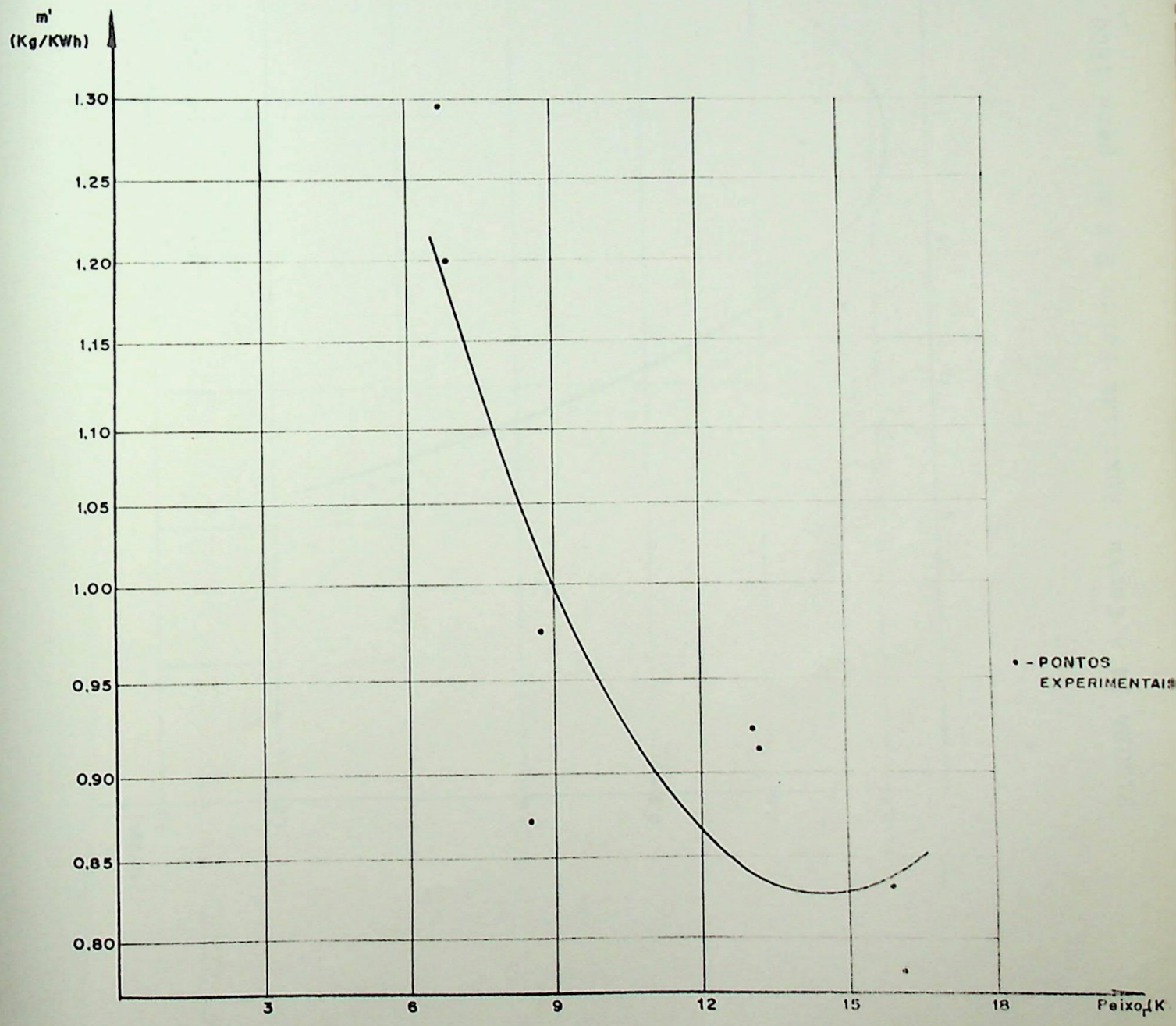


FIGURA 13 - Curva Auxiliar Peixo R x m' para 1600 rpm

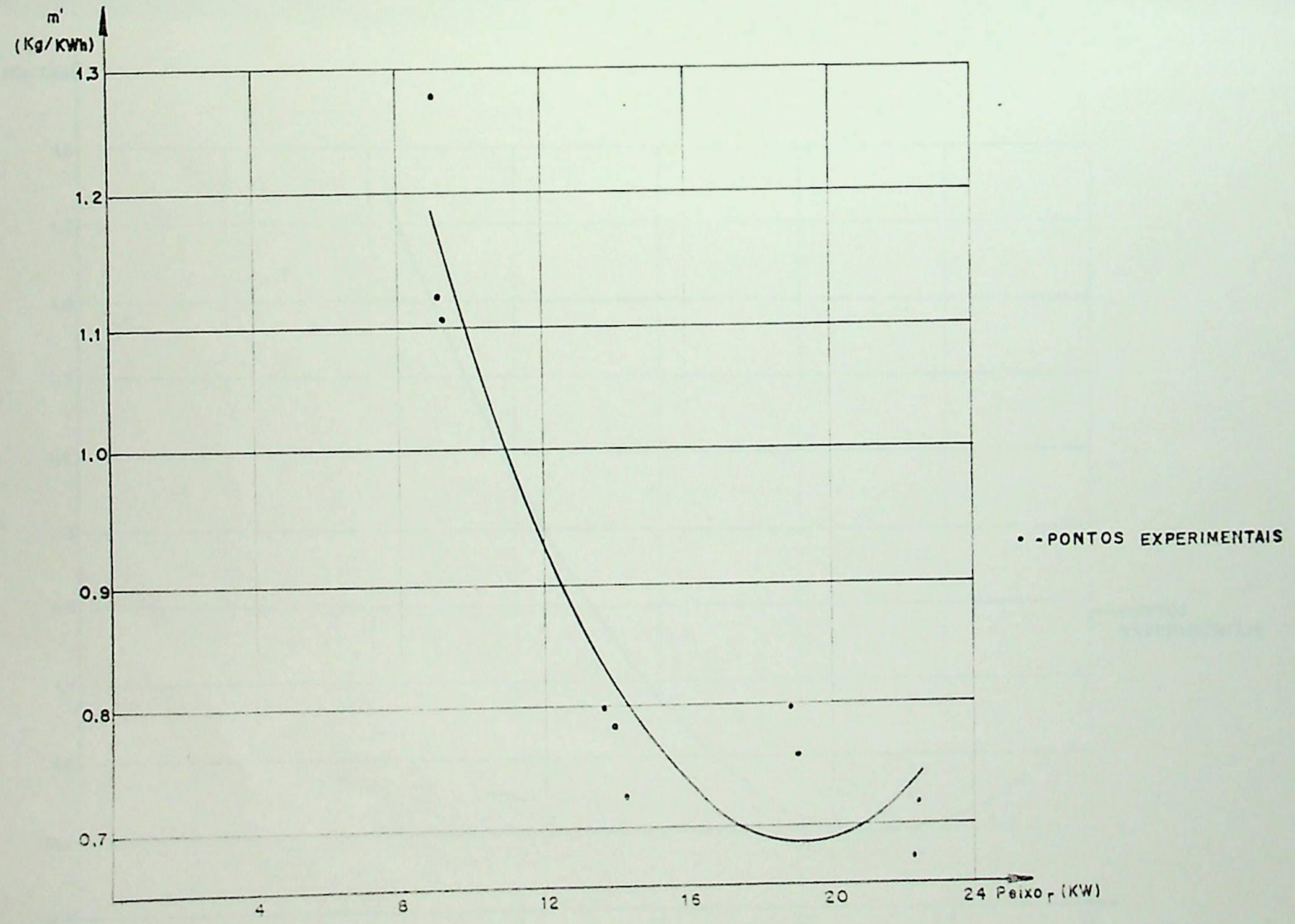


FIGURA 14 - Curva Auxiliar Peixo R x m' para 1800 rpm

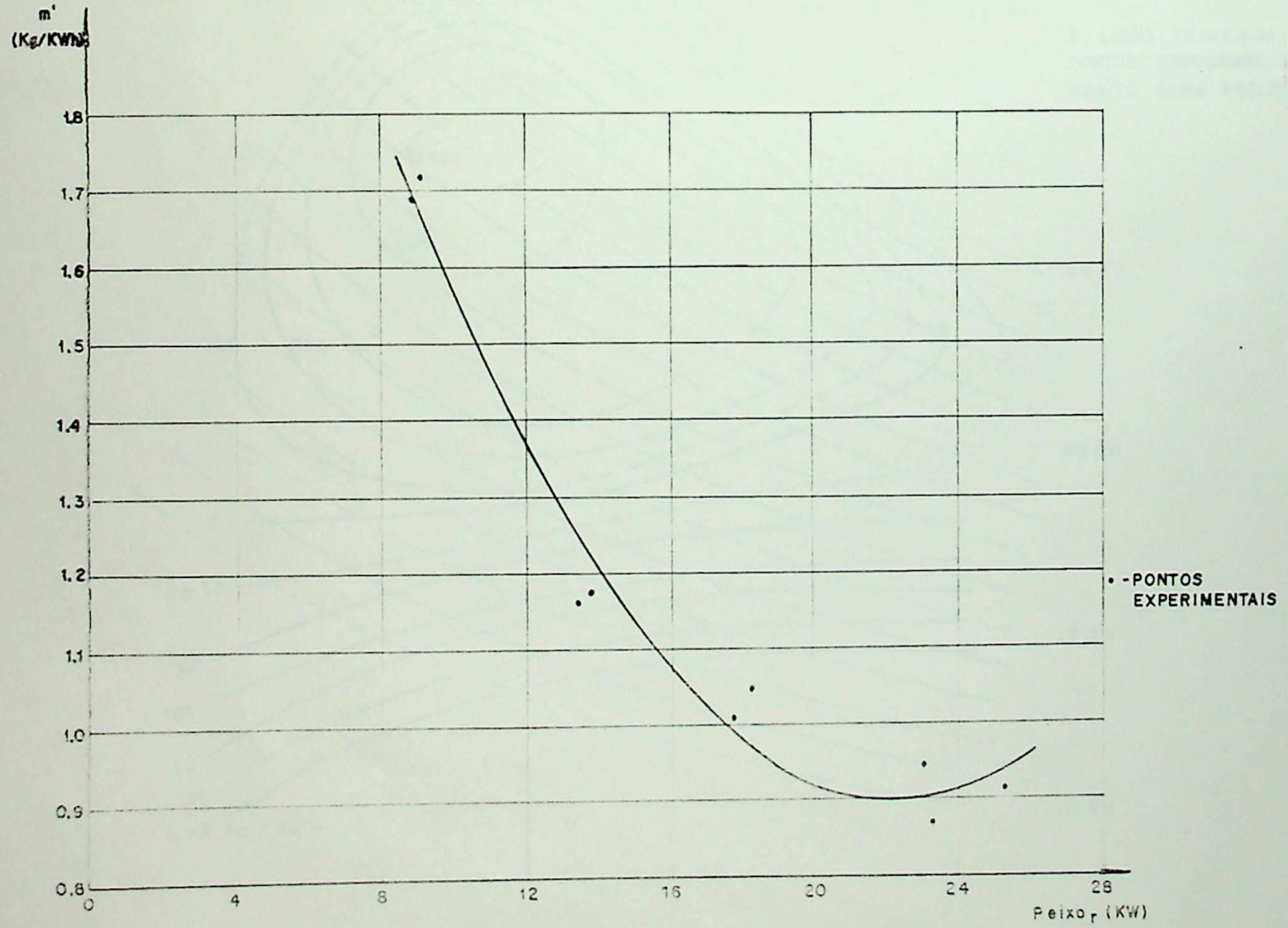
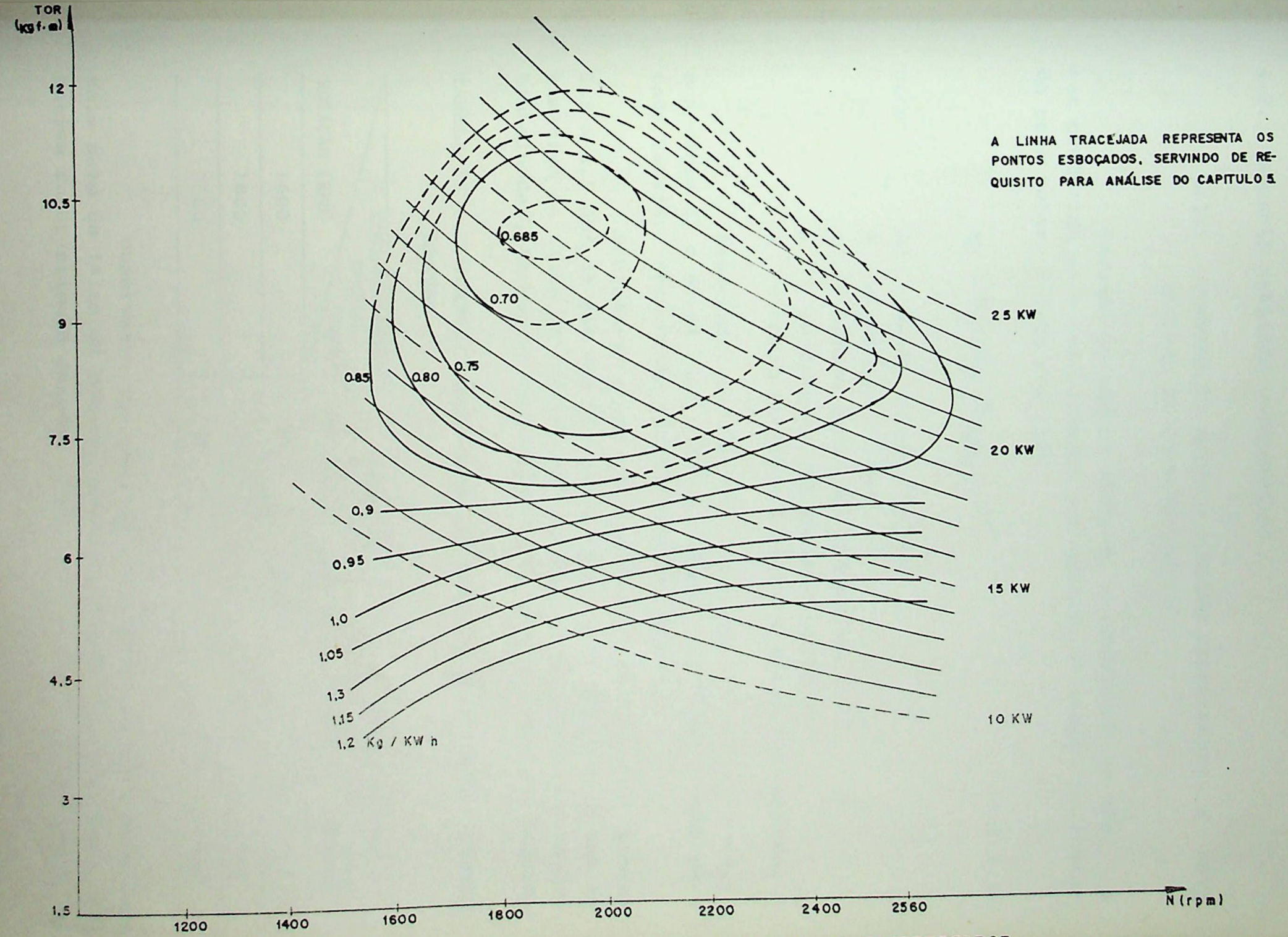


FIGURA 15 - Curva Auxiliar Peixo R x m' para 2560 rpm



FUNCIONAMENTO DO CONJUNTO MOTOR-GASEIFICADOR

4.3. ALGUMAS ANÁLISES COMPARATIVAS

4.3.1 COMPARAÇÃO ENTRE O CONSUMO EXPERIMENTAL E ESTIMATIVAS DE CONSUMO TEÓRICO

Segundo um modelo teórico, a quantidade de gás a ser produzida pelo gaseificador por unidade de tempo, solicitado pelo motor, é dado por [14]:

$$\dot{m}g = \frac{N \cdot c \cdot R \cdot r \cdot 60}{2 \cdot 1000} \qquad (4.3.1.1)$$

onde:
- $\dot{m}g$ - vazão de gás, [m³/h]
- N - rotação, [rpm]
- c - volume total dos cilindros, [ℓ]
- r - rendimento volumétrico do motor
- R - concentração volumétrica do gás na mistura.

Assumindo, para o caso estudado, c = 4,1 ℓ, r = 0,75 e R entre 37 e 47,6% [14] pode-se estimar o consumo de gás para cada rotação, sem considerar diferentes cargas.

Sabendo-se ainda que 1 Kg de carvão vegetal produz 3,5 a 4,5 Nm³ de gás com PCI = 1200 Kcal/Nm³, chega-se a uma estimativa da faixa de consumo de carvão. Logo, para as rotações trabalhadas, tem-se os respectivos consumos na tabela a seguir.

TABELA 15 - COMPARAÇÃO DAS FAIXAS DE CONSUMO TEÓRICO E ESPERIMENTAL

CONSUMO CARVÃO VEGETAL (Kg/h) / ROTAÇÃO (RPM)	TEÓRICO		EXPERIMENTAL	
	MÁXIMO	MÍNIMO	MÁXIMO	MÍNIMO
1600	20,1	12,1	13,3	8,1
1800	22,5	13,6	16,2	10,4
2560	32,1	19,4	23,1	15,0

Observa-se que para cargas baixas os dados experimentais saem da faixa de consumo teórico, notando-se que esta estimativa superestima o consumo observado. Para cargas médias e al

tas os dados se localizam dentro da faixa estimada. Evidentemente, os desvios mostrados na tabela devem-se tanto a imprecisões experimentais como a aproximação do modelo teórico.

Um outro método de estimativa teórica do consumo de combustíveis é apresentado no Capítulo 6, bem como sua comparação com dados experimentais.

Quanto ao dado de consumo apresentado pelo fabricante, Geniogás,0,700 Kg/kWh, com o mesmo motor e sob condições semelhantes de carga e rotação, verificou-se que o consumo avaliado por esta empresa foi cerca de 20% menor que os presentes resultados. Isto se deve, provavelmente, à melhor qualidade do carvão usado pela Geniogáz, proveniente da Acesita, de eucalipto, peneirado e quebrado com granulometria homogênea.

4.3.2. COMPARAÇÃO DO RENDIMENTO TEÓRICO COM O RENDIMENTO EXPERIMENTAL

A eficiência térmica de um gaseificador, em termos de gás quente, não purificado, pode ser calculada pela seguinte expressão [14]:

$$\eta_{tg} = \frac{\dot{m}g\ (Pcg + CS) + CL}{PC\ \dot{m}} \qquad (4.3.2.1)$$

onde : η_{tg} - eficiência térmica de um gaseificador

$\dot{m}g$ - volume de gás produzido, [Nm^3/h]

Pcg - poder calorífico do gás, [$Kcal/Nm^3$]

CS - calor sensível do gás na temperatura de utilização, [$Kcal/Nm^3$]

CL - calor latente contido nos sub-produtos aproveitados, [Kcal/h]

$\dot{m}$ - quantidade de carvão, [Kg/h]

PC - poder calorífico do carvão, [Kcal/kg]

Em termos de gás frio e limpo, a eficiência é dada por :

$$\eta_g = \frac{\dot{m}g\ .\ PCg}{\dot{m}\ PC} \qquad (4.3.2.2)$$

Eficiências típicas de um gaseificador, em termos de gás frio, encontrados na literatura, variam entre 60 e 80% e, em termos de gás quente, entre 70 e 90%, em função do combustível e do tipo de gaseificador.

A eficiência térmica de um motor de combustão interna depende do tipo de motor. A adaptação de motores diesel, gasolina ou álcool para funcionamento a gás, como se sabe, não reduz significativamente a eficiência: apenas a potência gerada é menor. Assim, a eficiência de um motor a gás pobre situa-se entre 20 e 25%.

Dessa forma, pode-se dizer que a faixa teórica de rendimento do conjunto gaseificador-motor Otto varia de 12 a 20%, visto que os rendimentos mais baixos do gaseificador e motor seriam, respectivamente, 60 e 20% e os mais altos, 80 e 25%.

A tabela seguinte mostra as faixas de rendimento do conjunto para cada rotação ensaiada, onde percebe-se que para cargas baixas o rendimento foi inferior ao limite teórico de 12%, ou seja, um rendimento inferior ao mínimo esperado. Entre

tanto, deve-se lembrar que este equipamento não foi projetado para trabalhar com cargos pequenos, razão maior para a queda de eficiência.

TABELA 16 - RENDIMENTOS EXPERIMENTAIS

ROTAÇÃO (RPM)	RENDIMENTO EXPERIMENTAL	
	MÍNIMO	MÁXIMO
1600	9,76	16,15
1800	9,88	18,79
2560	7,41	14,61

4.3.3. COMPARAÇÃO DA OPERAÇÃO DO MOTOR COM COMBUSTÍVEL CONVENCIONAL

Nas figuras seguintes apresentam-se as curvas de potência, torque e consumo específico em função da rotação do motor com combustível original [13] e à gás pobre.

Das curvas de potência visualiza-se bem a já esperada perda quando operando com gás pobre, no caso, em torno de 50%. Das curvas de torque e consumo específico observa-se a desejável coincidência dos pontos de menor consumo e maior torque. A tabela abaixo sintetiza os principais resultados desta comparação.

TABELA 17 - COMPARAÇÃO DOS DADOS BÁSICOS DO MOTOR GM BRASIL, 4,1 ℓ operando com gasolina e gás pobre.

ÍNDICE	COMBUSTÍVEL	
	GASOLINA	GÁS POBRE
Potência Máxima	92,4 kW / 4000 rpm	30 kW / 2560 rpm (inferido)
Torque Máximo	28,0 Kgf.m/2500 rpm	11,8Kgfm/1800 rpm
Consumo Mínimo	366g/kWh/2500 rpm	685g/kWh/1800 rpm

É importante observar estas curvas, sobretudo na faixa de maior potência, foram inferidos a partir dos dados experimentais, já que, conforme citado, foi impossível o carregamento máximo do motor sob altas rotações.

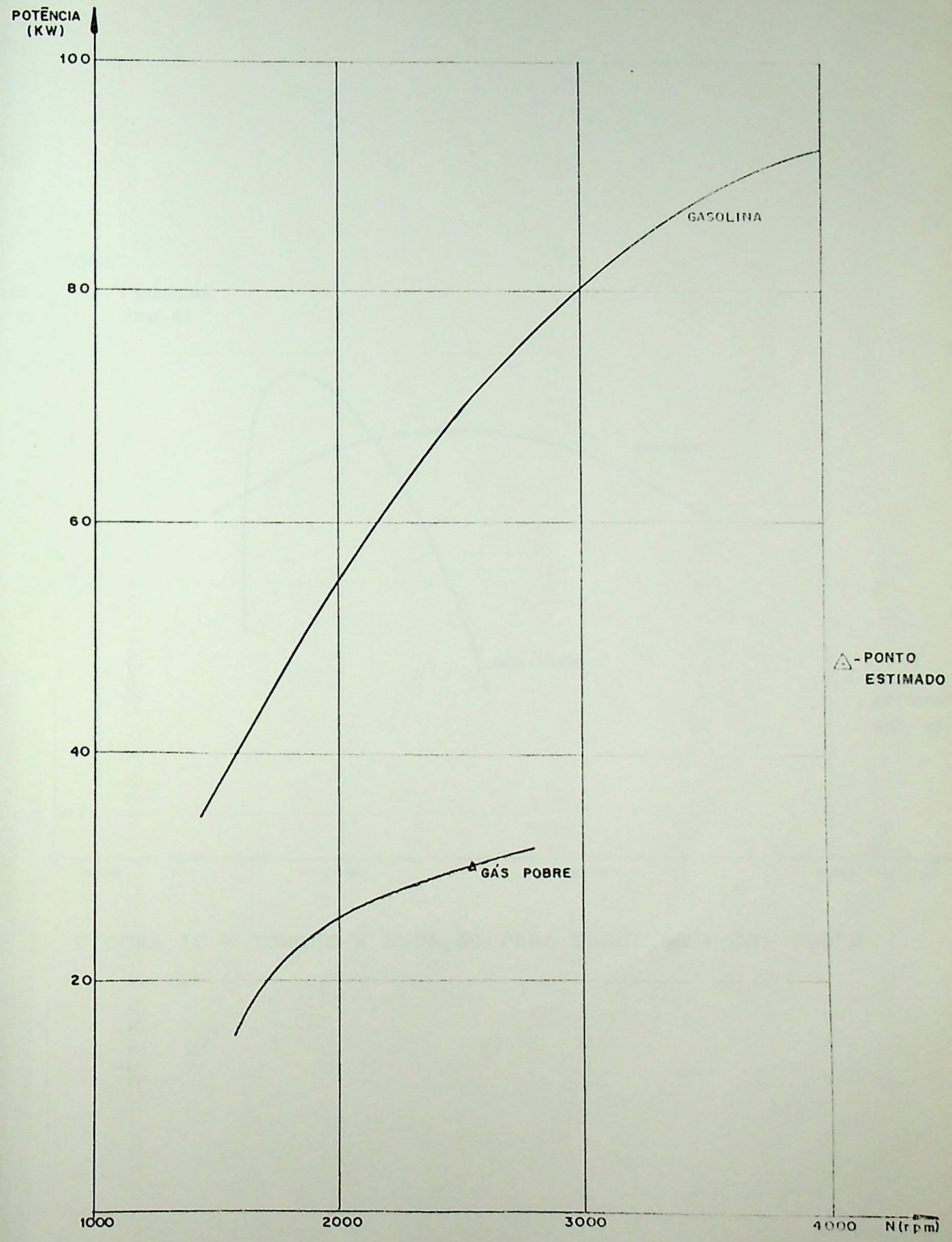


FIGURA 17 - COMPARAÇÃO DAS POTÊNCIAS ALCANÇÁVEIS COM GASOLINA E GÁS POBRE

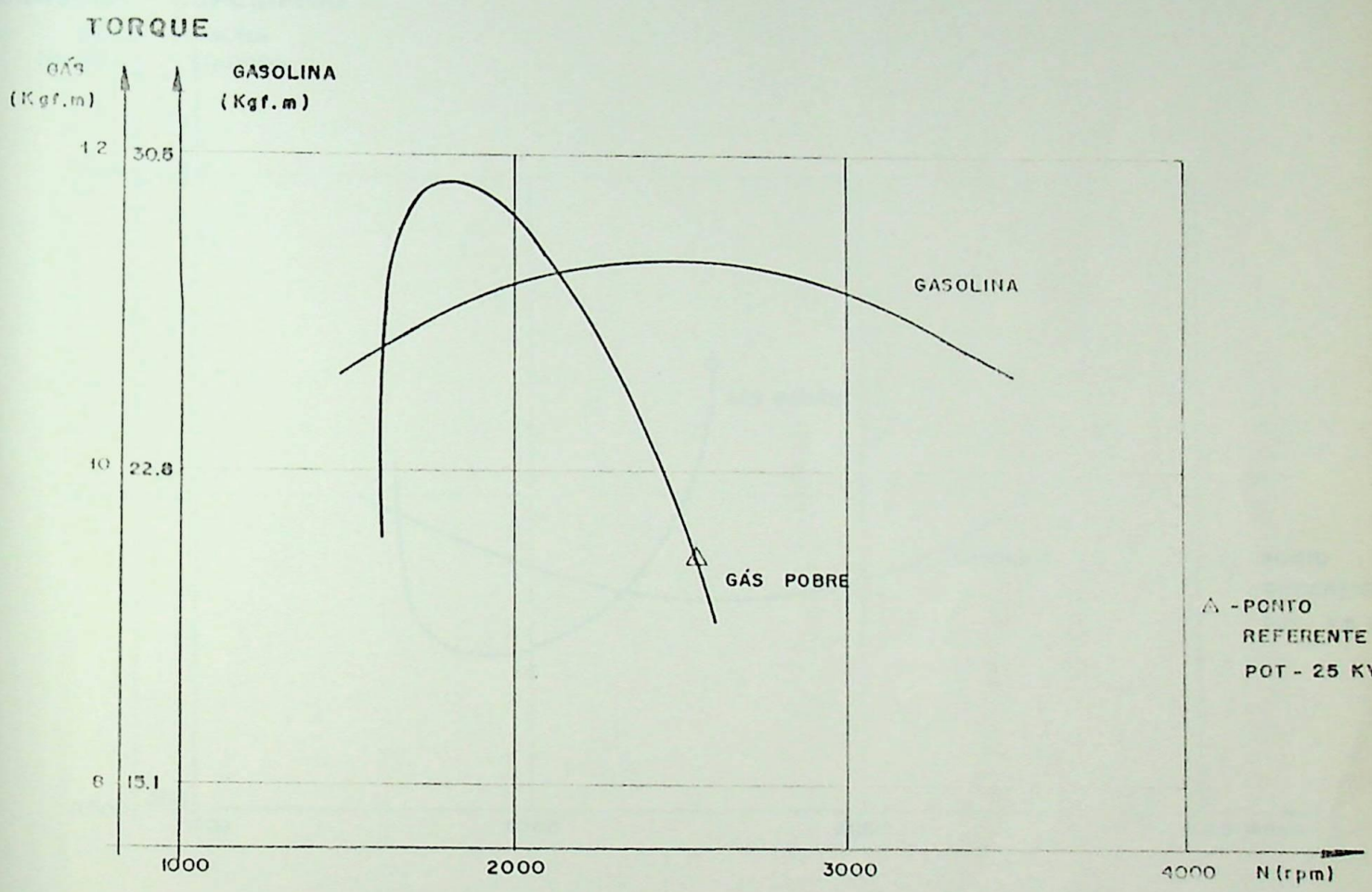


FIGURA 18 - TORQUE x ROTAÇÃO PARA GASOLINA E GÁS POBRE

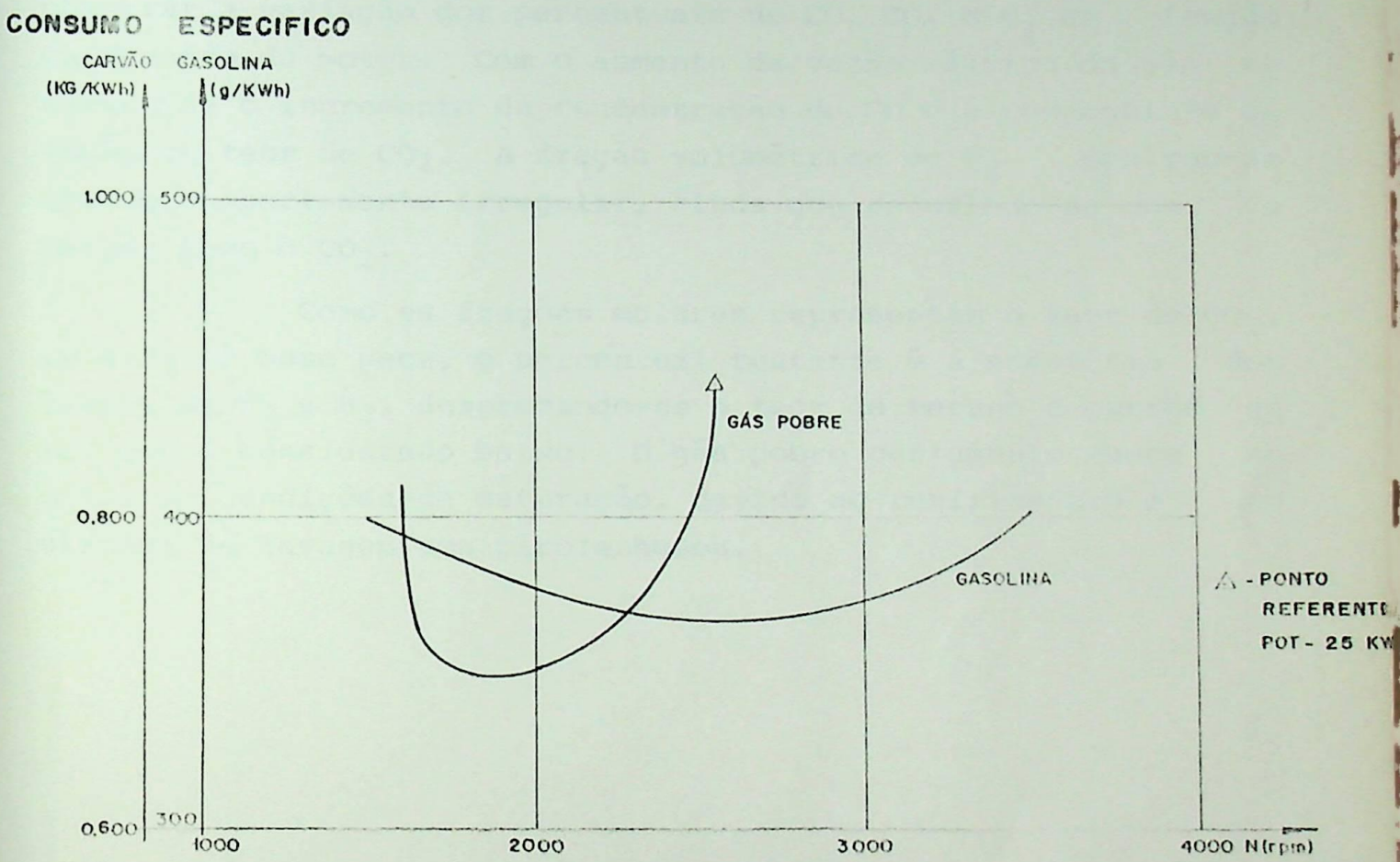


FIGURA 19 - CONSUMO ESPECÍFICO x ROTAÇÃO PARA GASOLINA E GÁS POBRE

4.4. PARÂMETROS DE CONTROLE

4.4.1. COMPOSIÇÃO DO GÁS

A composição do gás pobre, como já comentado, foi avaliado pelo aparelho de Orsat, e no gráfico a seguir pode-se observar a variação dos percentuais de CO, CO_2 e O_2 em função da demanda do motor. Com o aumento da vazão mássica de gás observou-se o incremento da concentração de CO e a conseqüinte redução do teor de CO_2. A fração volumétrica de O_2 mostrou-se com um comportamento irregular, ainda que reduzindo-se com a carga, como o CO_2.

Como as frações molares representam o teor de CO_2, CO e O_2 em base seca, o percentual restante é a somatória dos teores de N_2 e H_2, desprezando-se o teor de metano e outros gases que é considerado baixo. O gás pobre certamente chega ao motor em condições de saturação, devido ao resfriamento e ao sistema de lavagem aos pirolenhosos.

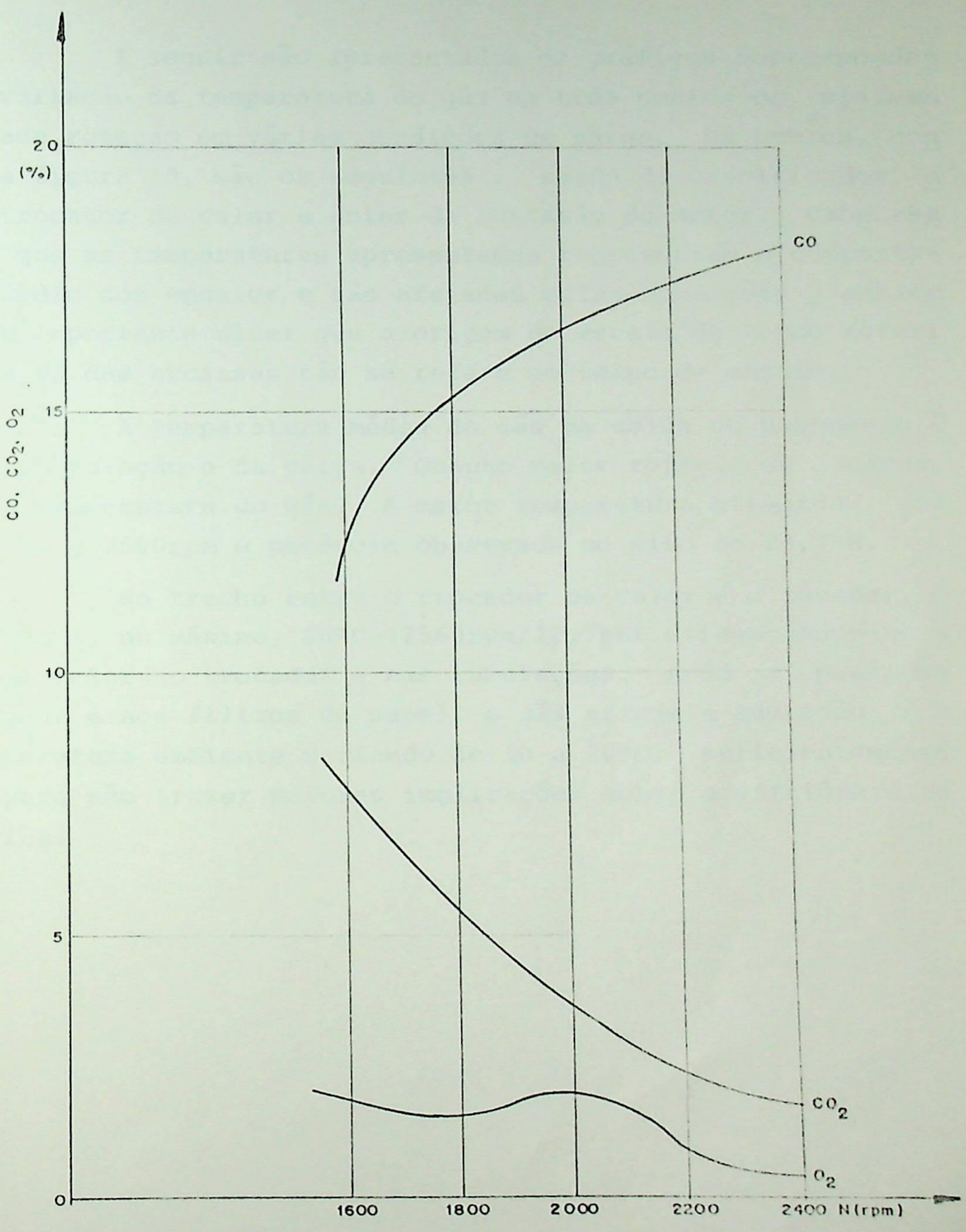


FIGURA 20 - COMPOSIÇÃO DO GÁS POBRE EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO DO MOTOR

4.4.2. TEMPERATURA DO GÁS

A seguir são apresentados os gráficos correspondentes à variação da temperatura do gás em três pontos do sistema para cada rotação em várias condições de carga. Os pontos, conforme a figura 10, são os seguintes : saida do gaseificador, após o trocador de calor e antes da admissão do motor. Cabe ressaltar que as temperaturas apresentadas representam o comportamento médio dos ensaios e são afetadas pelas condições ambientes. É importante dizer que a origem de escala de tempo referida no eixo das abcissas não se refere ao tempo de ensaio.

A temperatura média do gás na saida do gasogênio é função da rotação e da carga. Quanto maior rotação ou a carga, maior a temperatura do gás. A maior temperatura atingida foi de 475^{o}C, à 2560rpm e potência observada no eixo de 23,7kW.

No trecho entre o trocador de calor e o lavador, o gás chega a, no máximo, 60^{o}C (2560rpm/23,7kW) evidenciando-se a perda de calor no trocador e nas tubulações. Após a passagem no lavador e nos filtros de papel, o gás atinge a admissão a uma temperatura ambiente variando de 20 a 30^{o}C, suficientemente baixa para não trazer maiores implicações sobre a eficiência volumétrica.

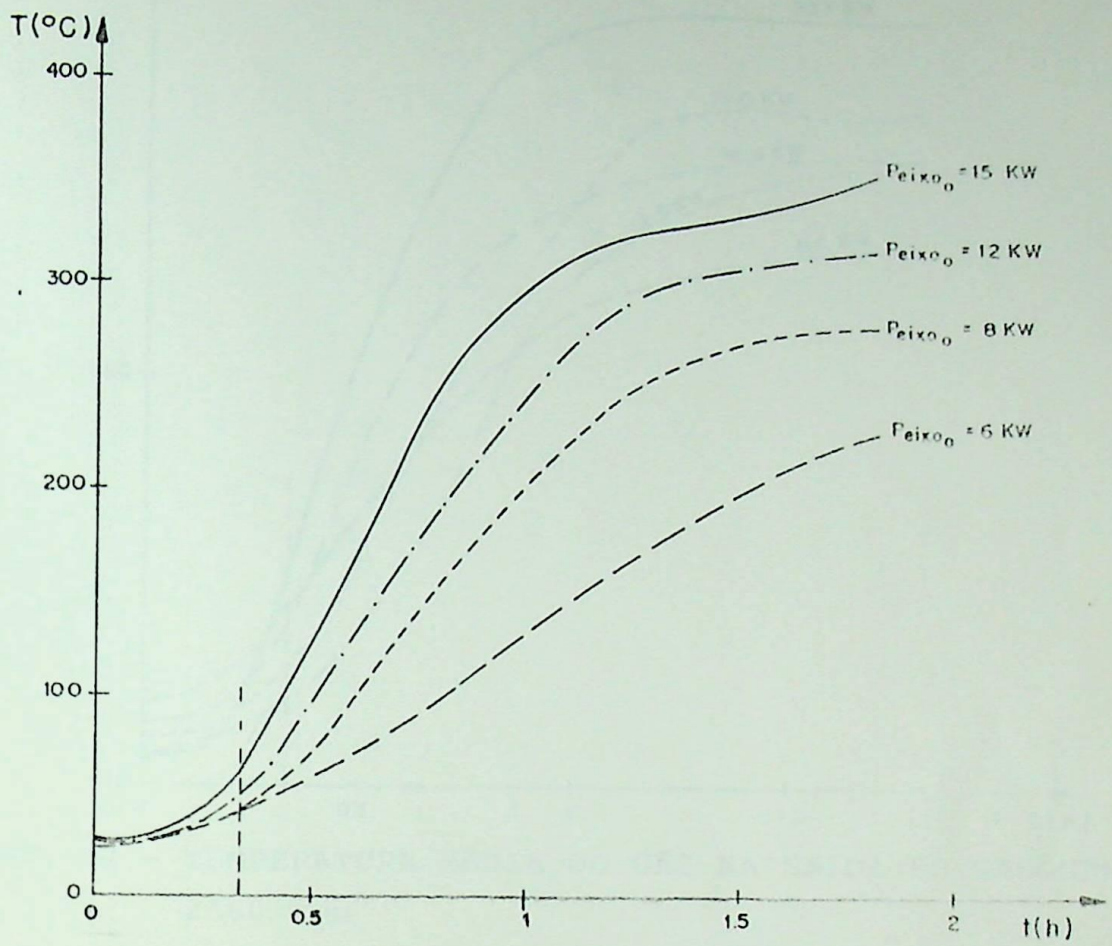


FIGURA 21 - TEMPERATURA MÉDIA DO GÁS NA SAÍDA DO GASOGÊNIO À 1600 rpm

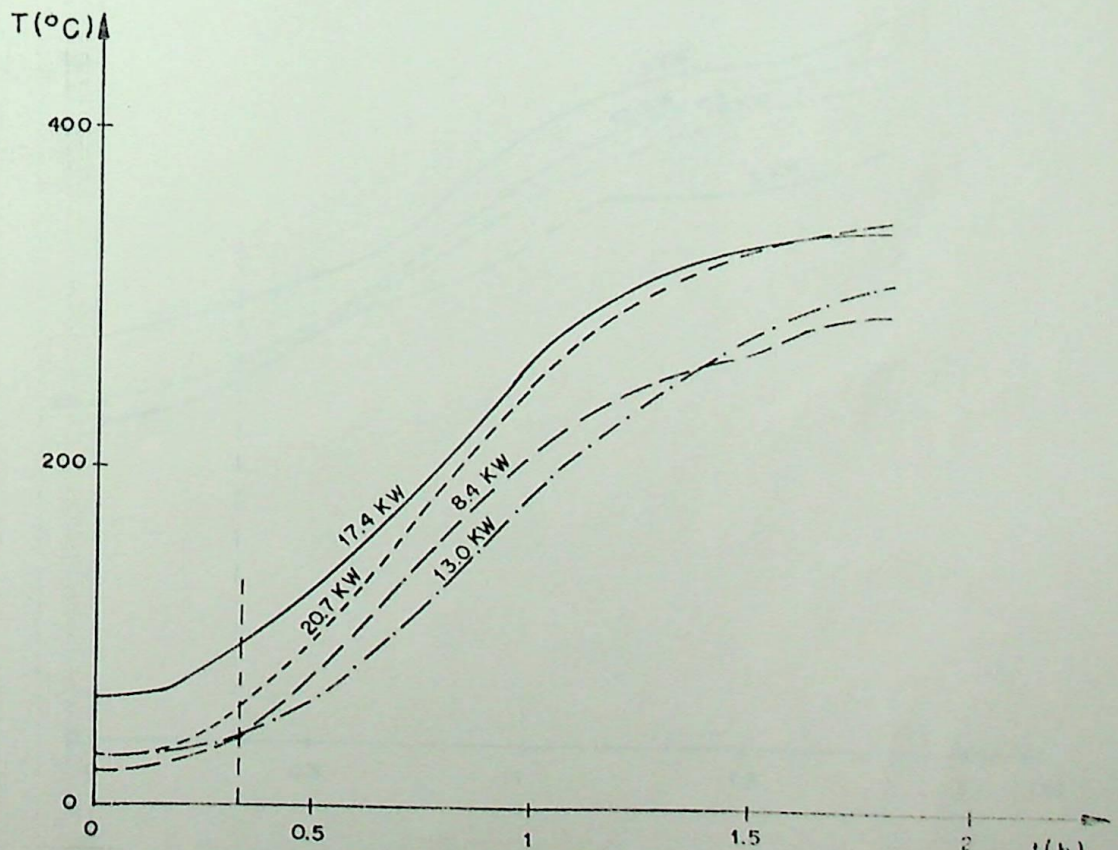


FIGURA 22 - TEMPERATURA MÉDIA DO GÁS NA SAÍDA DO GASOGÊNIO À 1800 rpm

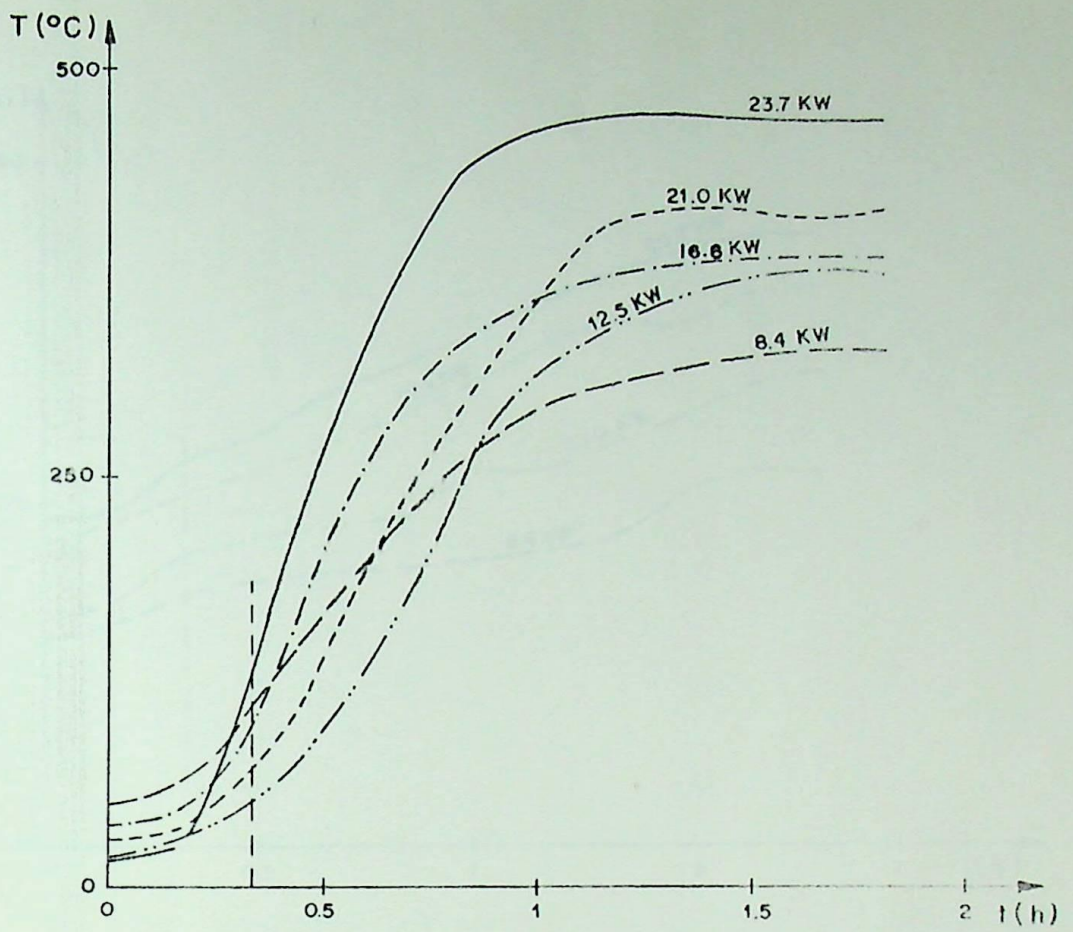


FIGURA 23 - TEMPERATURA MÉDIA DO GÁS NA SAÍDA DO GASOGÊNIO À 2560 rpm

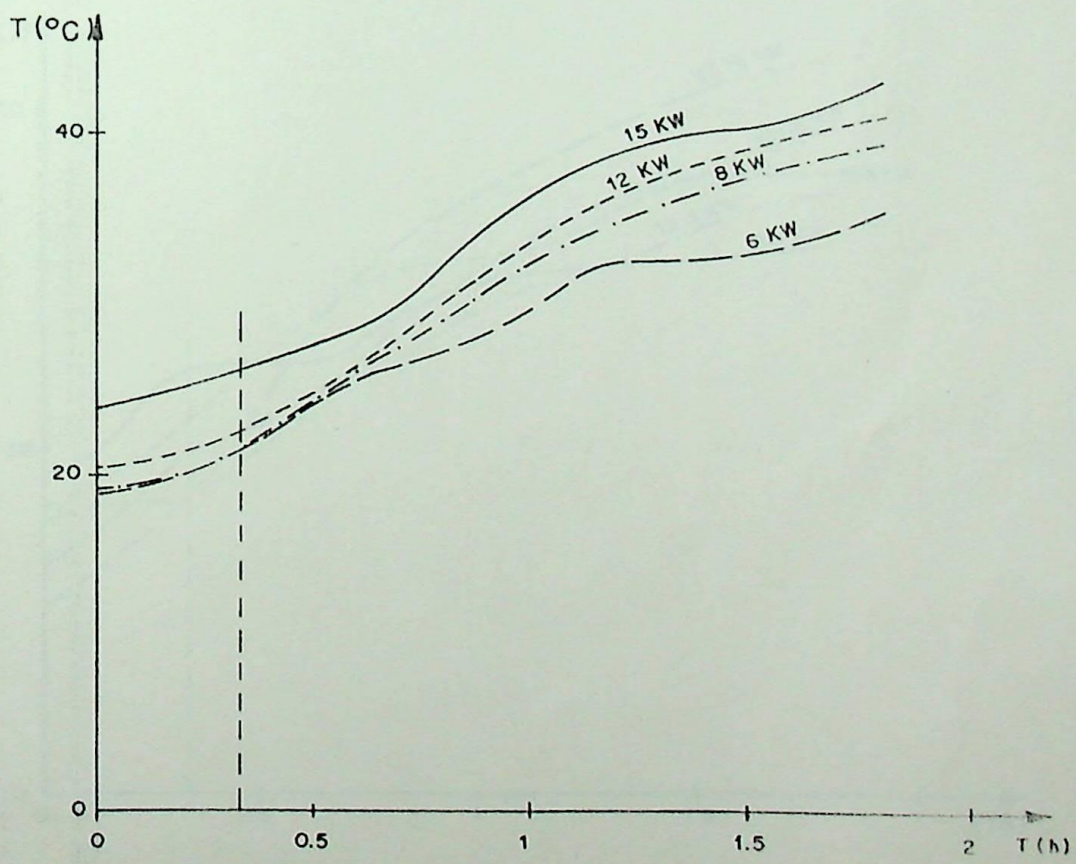


FIGURA 24 - TEMPERATURA MÉDIA DO GÁS DEPOIS DO TROCADOR À 1600 rpm

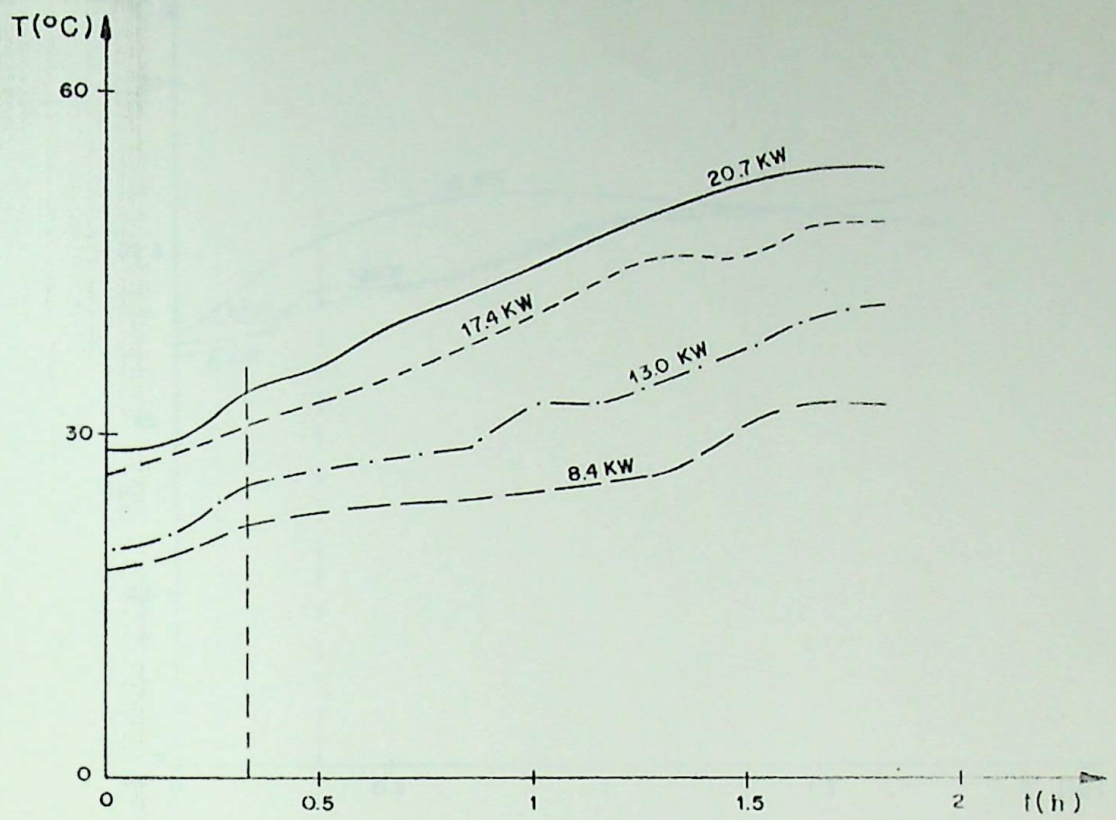


FIGURA 25 - TEMPERATURA MÉDIA DO GÁS DEPOIS DO TROCADOR À 1800 rpm

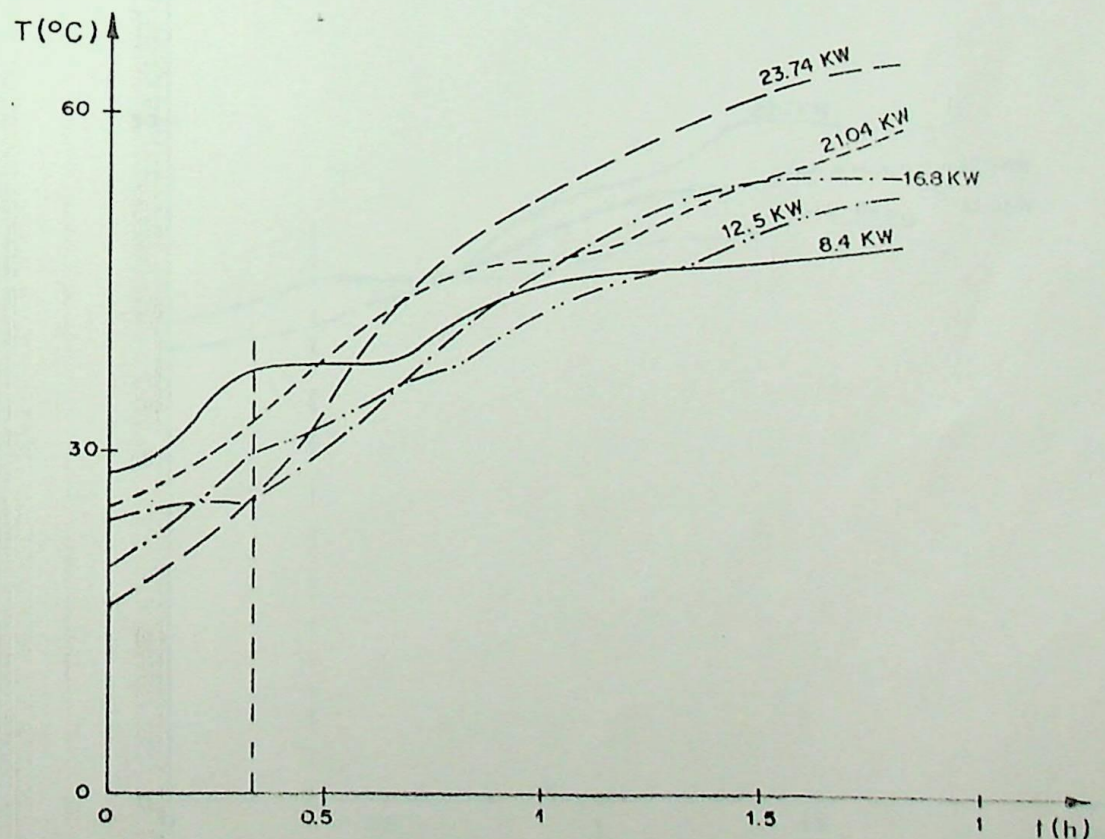


FIGURA 26 - TEMPERATURA MÉDIA DO GÁS DEPOIS DO TROCADOR À 2560 rpm

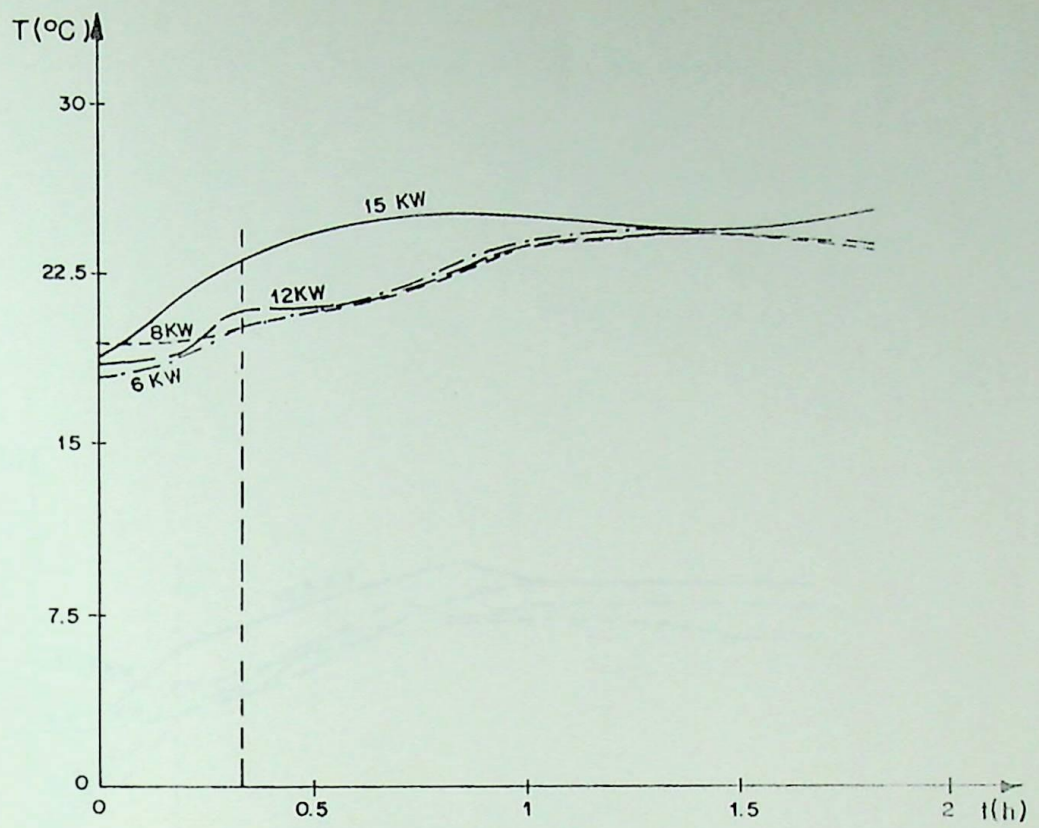


FIGURA 27 - TEMPERATURA MÉDIA DO GÁS ANTES DA ADMISSÃO DO MOTOR À 1600 rpm

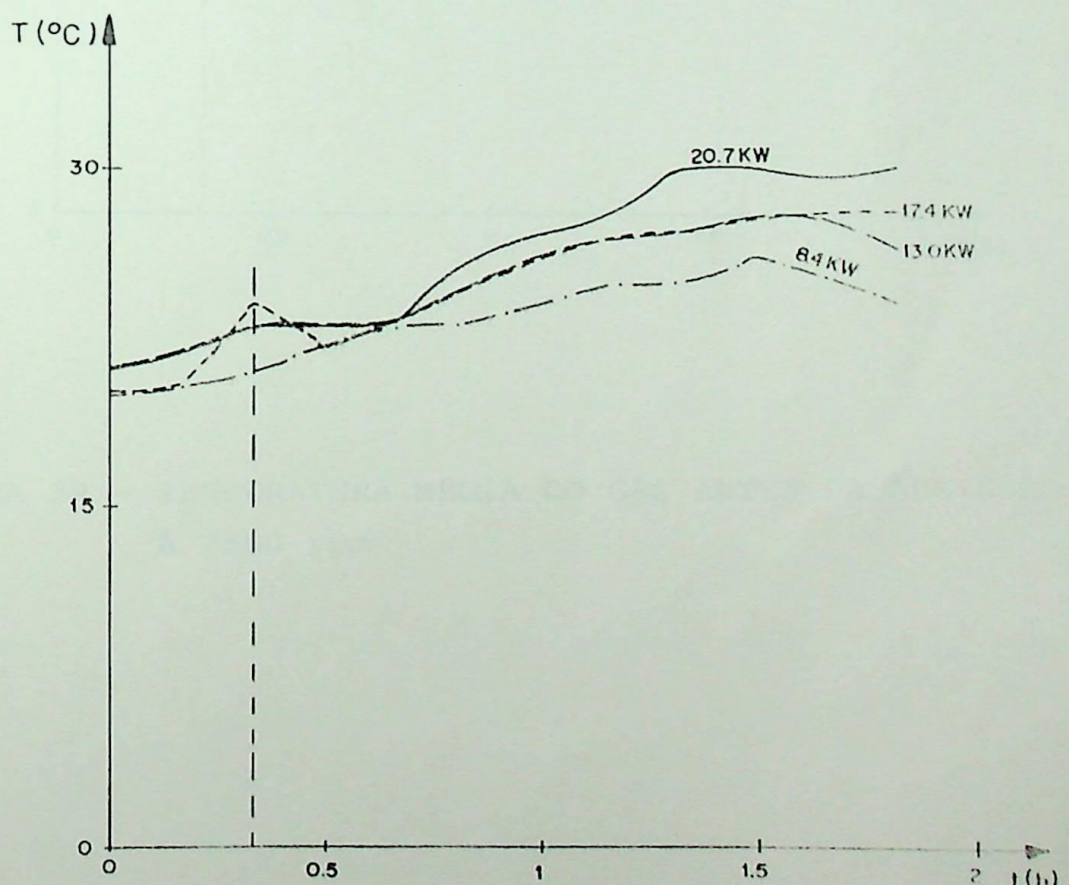


FIGURA 28 - TEMPERATURA MÉDIA DO GÁS ANTES DA ADMISSÃO DO MOTOR À 1800 rpm

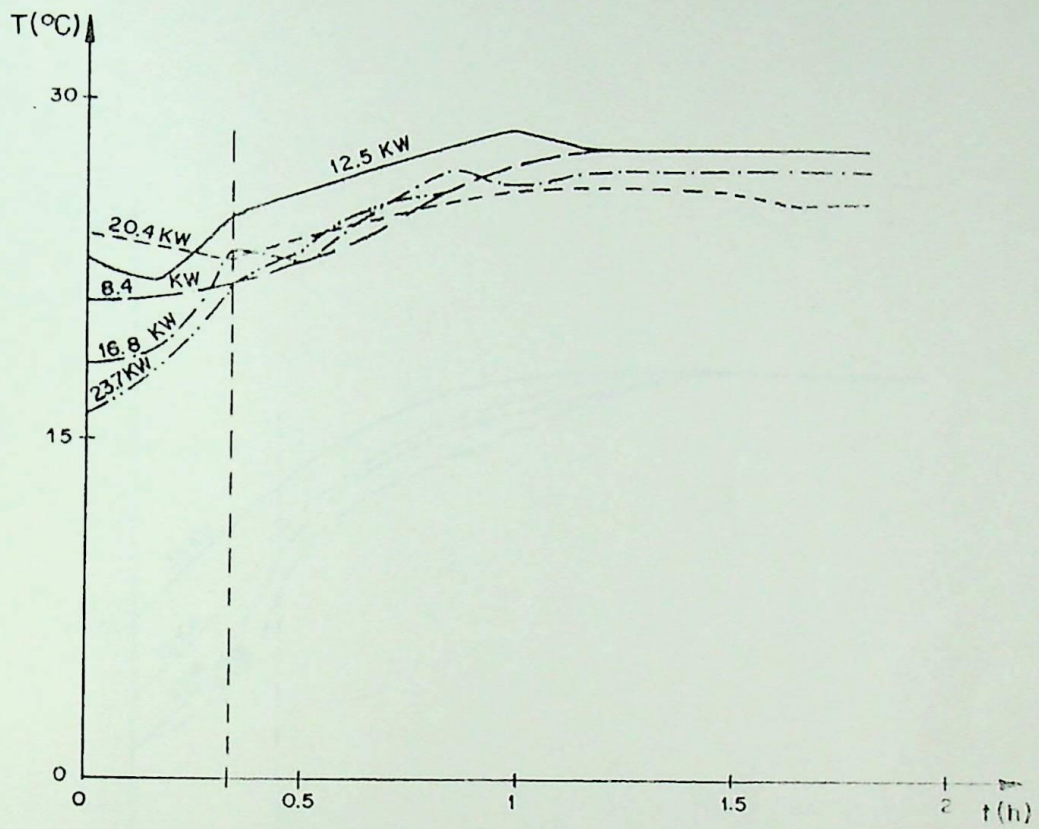


FIGURA 29 - TEMPERATURA MÉDIA DO GÁS ANTES DA ADMISSÃO DO MOTOR À 2560 rpm

4.4.3. TEMPERATURA DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO DA CETILHA

Como mostram as figuras, com relação a temperatura de resfriamento da cetilha, a tendência sempre é estabilizar-se em torno de 90°C, independente da rotação ou carga. Este é um aspecto interessante na eventualidade da destinação deste calor para fins úteis.

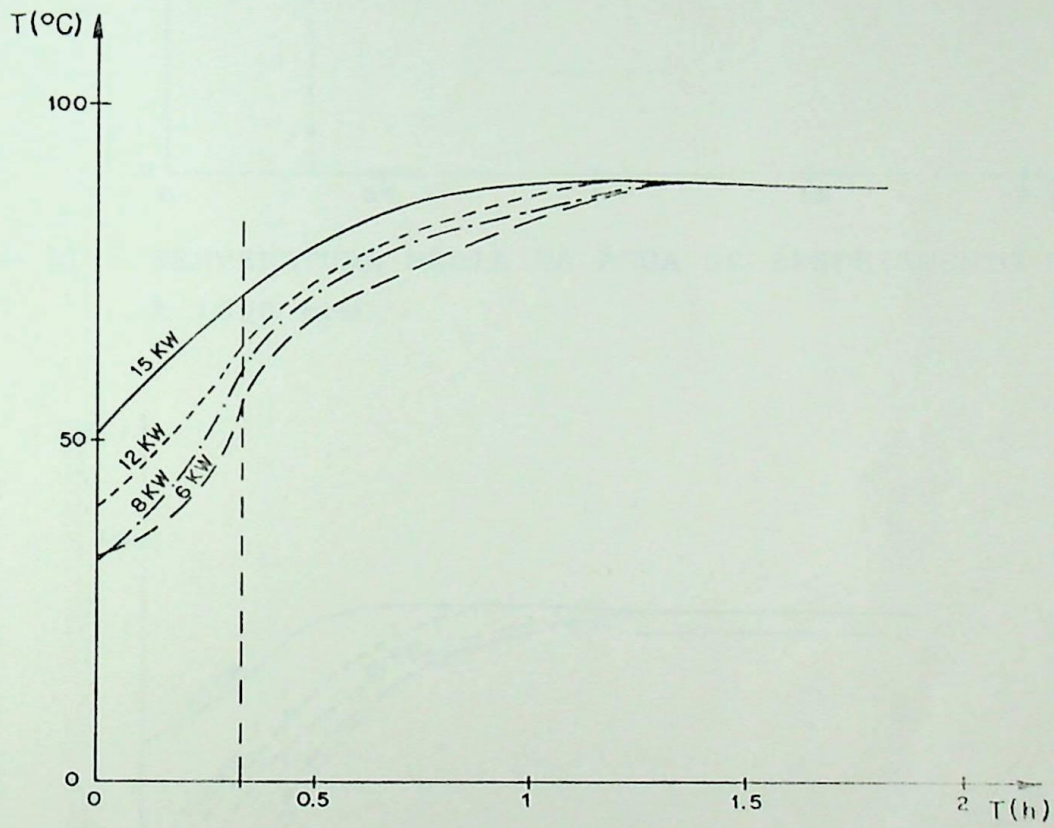


FIGURA 30 - TEMPERATURA MÉDIA DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO DA CETILHA Ã 1600 rpm

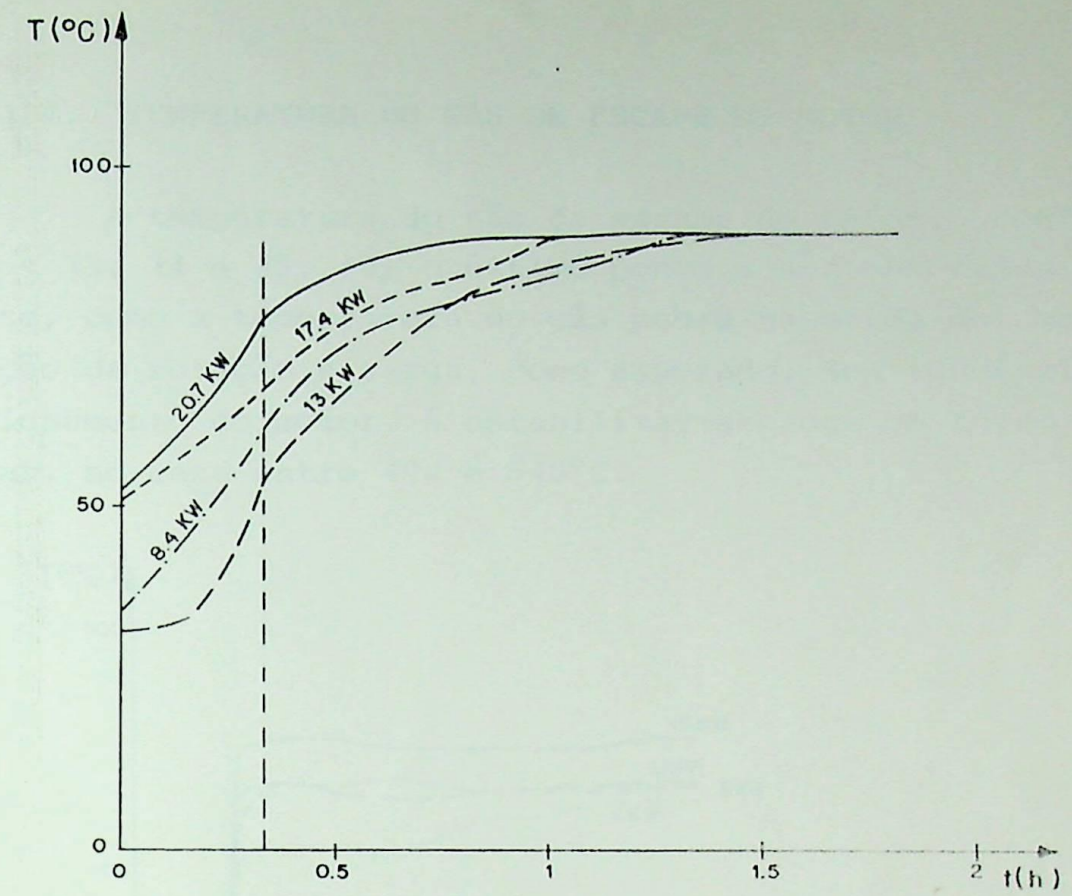


FIGURA 31 - TEMPERATURA MÉDIA DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO DA CETILHA À 1800 rpm

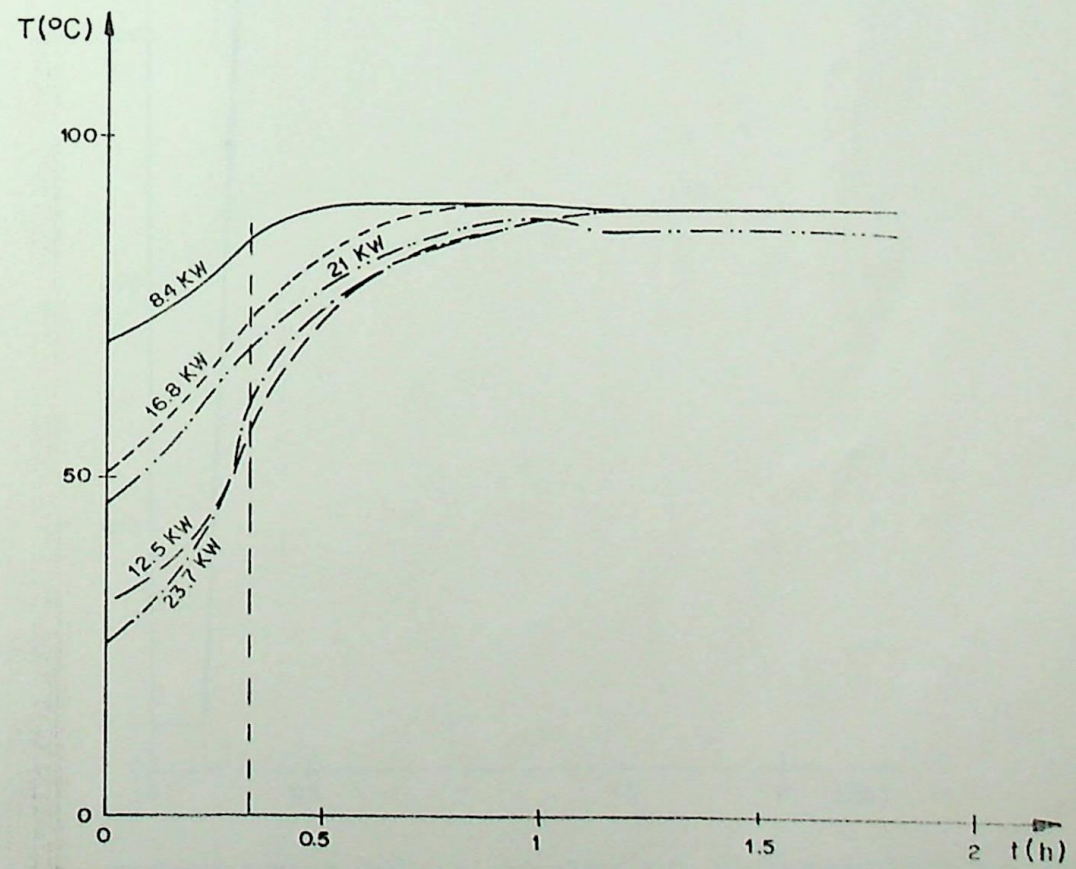


FIGURA 32 - TEMEPRATURA MÉDIA DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO DA CETILHA À 2560 rpm

4.4.4. TEMPERATURA DO GÁS DE ESCAPE DO MOTOR

A temperatura do gás de escape do motor, conforme as figuras 33, 34 e 35, foi o último ponto a ser observado e mostrou-se, como a temperatura do gás pobre na saída do gasogênio, função da rotação e carga, como esperado. Sua tendência, após o acionamento do motor, é estabilizar-se logo em torno de um patamar, no caso entre 400 e 540°C.

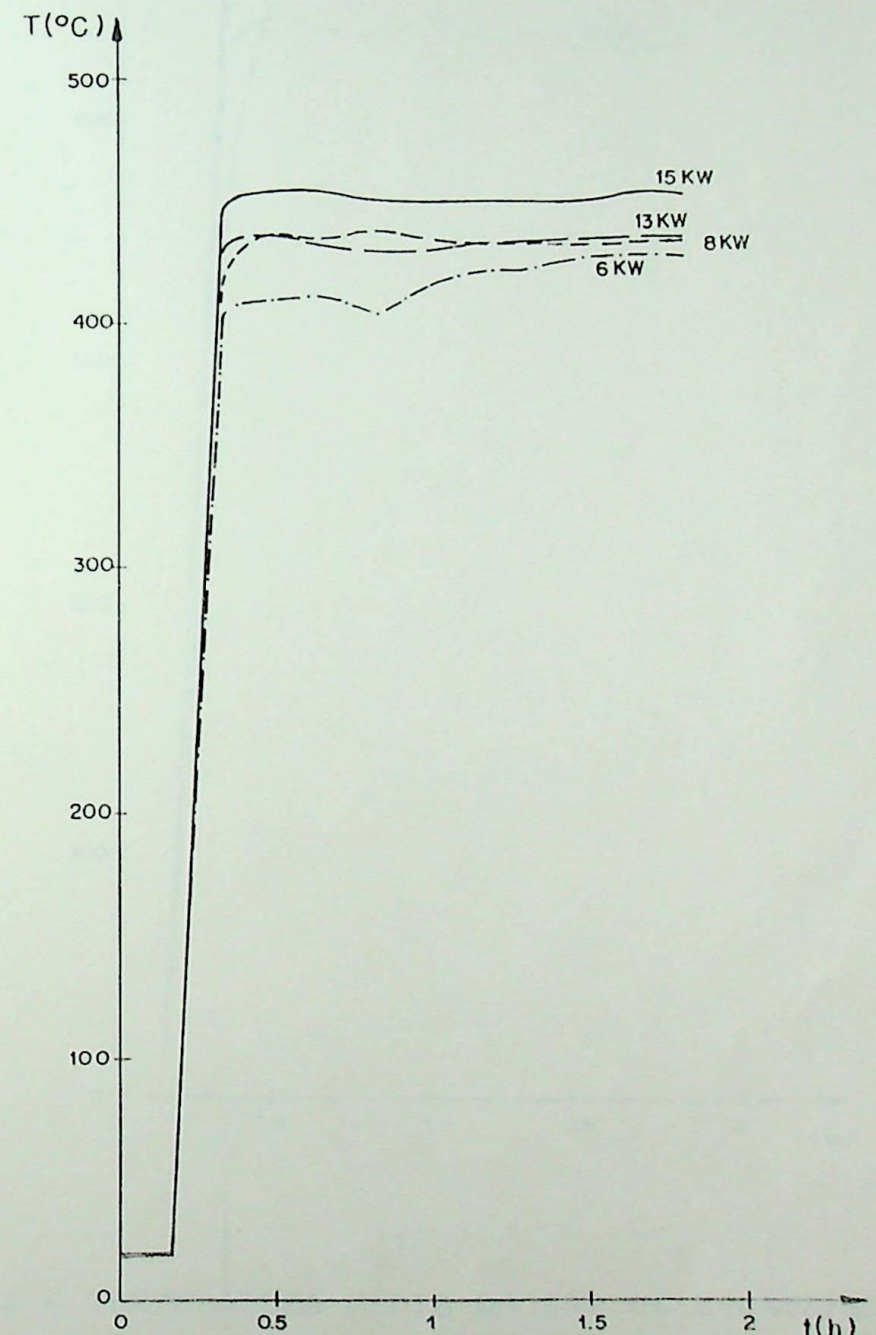


FIGURA 33 - TEMPERATURA MÉDIA DO GÁS DE ESCAPAMENTO NO MOTOR À 1600 rpm

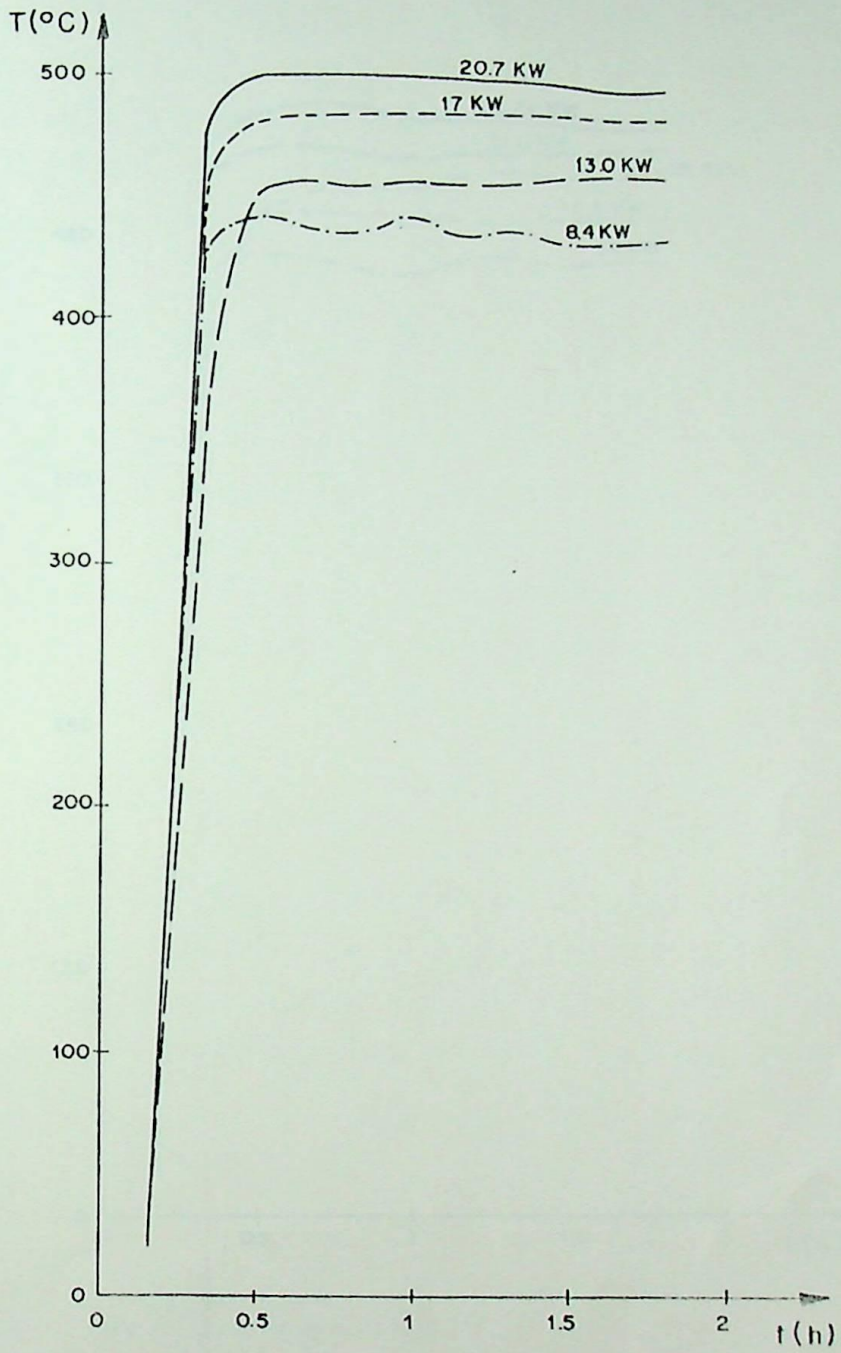


FIGURA 34 - TEMPERATURA MÉDIA DO GÁS DE ESCAPAMENTO DO MOTOR Ã 1800 rpm

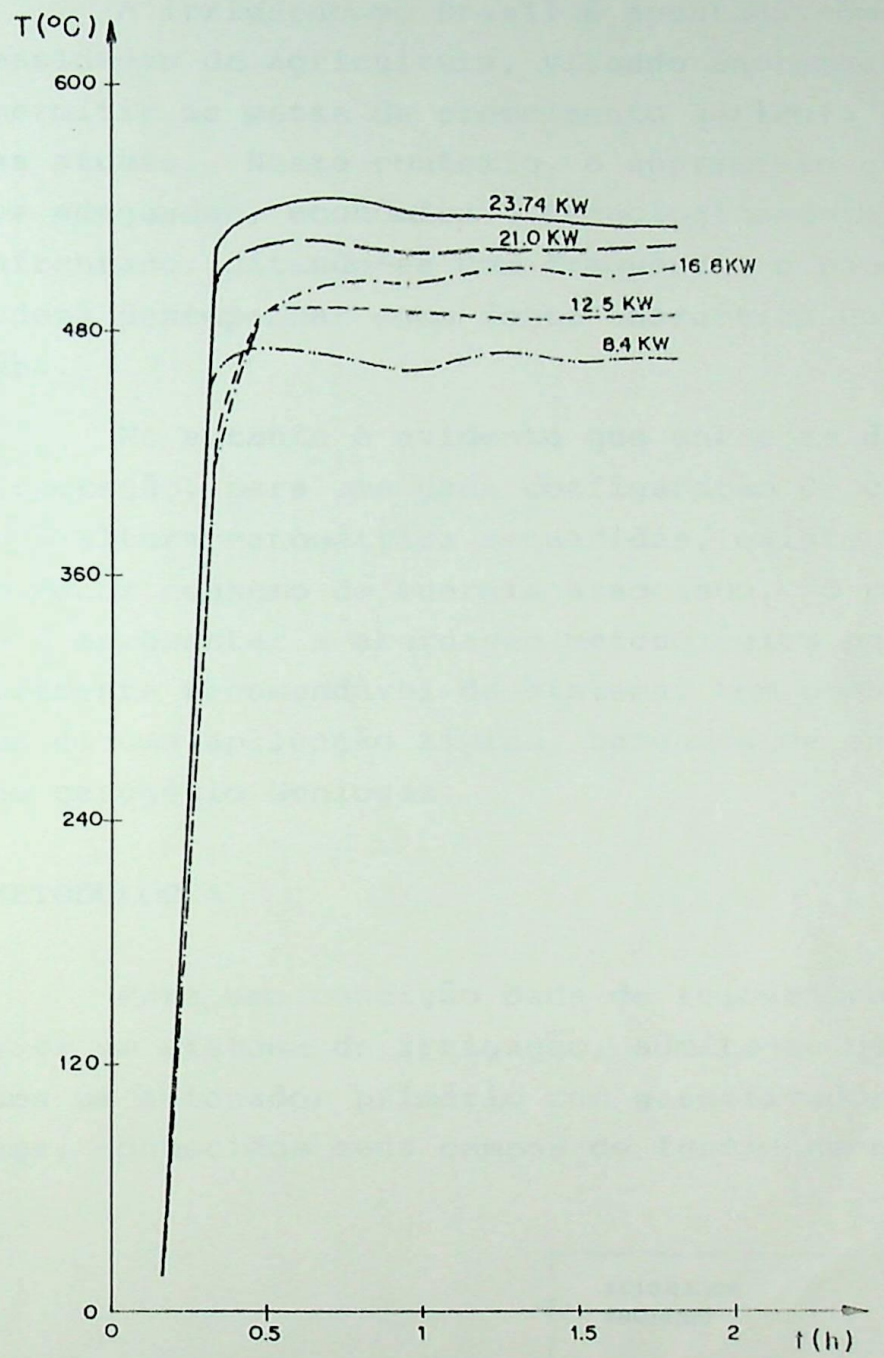


FIGURA 35 - TEMPERATURA MÉDIA DO GÁS DE ESCAPAMENTO DO MOTOR À 2560 rpm

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE UM SISTEMA BOMBA-MOTOR-GASEIFICADOR

A irrigação no Brasil é apontada como uma das maiores necessidades da agricultura, visando incrementar produtividade e permitir as metas de crescimento agrícola impostas pelas carências atuais. Neste contexto, o suprimento energético em condições adequadas, econômica e tecnologicamente, é um desafio a ser enfrentado, citando-se com frequência o papel que a biomassa poderá desempenhar como fonte energética para os grupos moto-bomba.

No entanto é evidente que entre as diversas condições de operação, para uma dada configuração de carga, expressa em vazão e altura manométrica requeridas, existe uma que corresponde ao menor consumo de energia associado. O propósito deste capítulo é apresentar a abordagem metodológica para a operação energeticamente recomendável do sistema, bem como exemplificar com dados de uma aplicação típica, baseados na análise experimental do gasogênio Geniogaz.

5.1. - METODOLOGIA

Para uma condição dada de requerimentos de vazão e altura em um sistema de irrigação, admita-se que possam ser empregados um acionador primário com gaseificador e uma bomba centrífuga, conhecidos seus campos de funcionamento.

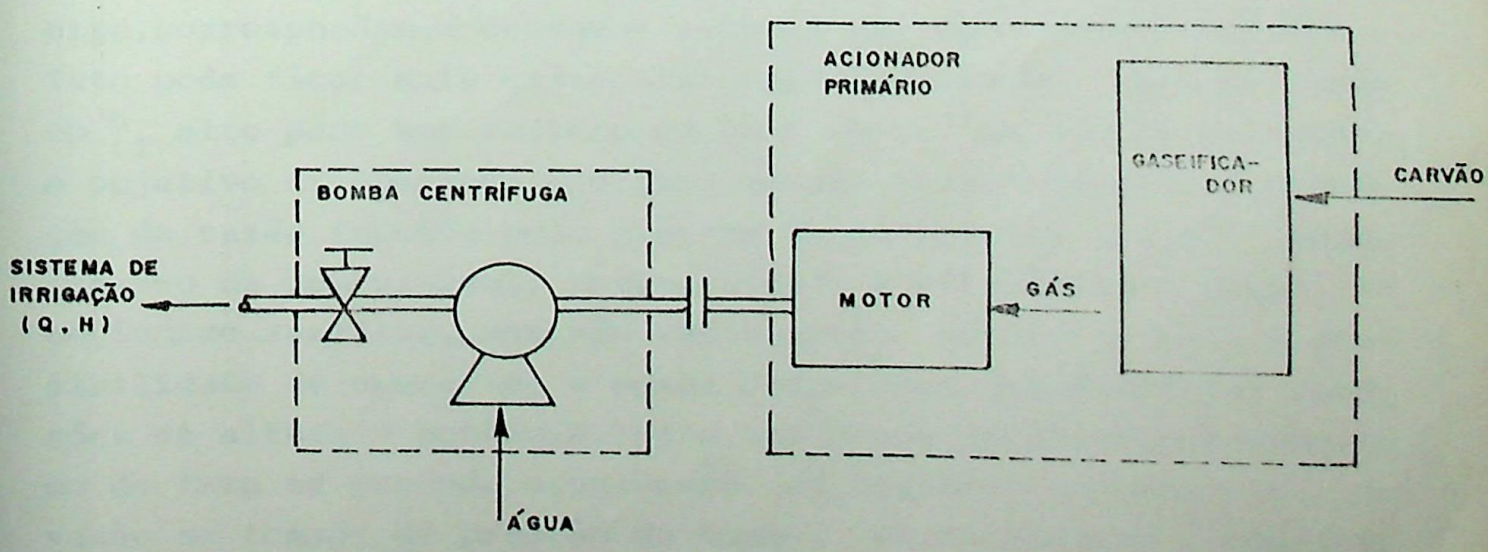


FIGURA 36 - ESQUEMA DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO SUPRIDO PELA GASEIFICAÇÃO

Naturalmente a eficiência total corresponde ao produto das eficiências de cada elemento. Neste caso:

$$\eta_B = \frac{Q.H.}{Pe.364,86} \qquad (5.1.1)$$

$$\eta_G = \frac{Pe}{Pcar} \qquad (5.1.2)$$

$$Pcar = \frac{\dot{m} \cdot Pc}{860} \qquad (5.1.3)$$

portanto,

$$\eta_T = \frac{Q.H.2,357}{\dot{m}\ Pc} \qquad (5.1.4)$$

onde:
- η_B - rendimento da bomba
- η_G - rendimento do conjunto motor-gaseificador
- η_T - rendimento total
- Q - vazão de água, [m³/h]
- H - altura manométrica, [m]
- Pe - potência do eixo, [kW]
- Pcar - potência relativa ao carvão, [kW]
- $\dot{m}$ - consumo de carvão, [Kg/h]
- Pc - poder calorífico do carvão, [Kcal/kg]

Em busca da operação energeticamente recomendável poderia em princípio parecer que deve-se ter o maior valor possível para η_T. No entanto isto pode implicar em níveis de potência elevados o bastante para, ainda que sob altas eficiências, correspondam a consumos maiores que em outras condições. Isto pode ficar mais claro observando a equação (5.1.4) onde um η_T alto pode ser reflexo de um H alto. Em outras palavras, o objetivo da operação energeticamente recomendável é a obtenção da vazão imposta pelo sistema de irrigação, sob o menor consumo de combustível, representando a eficiência o papel de um índice auxiliar, mas não suficiente. Atente-se para a possibilidade de operar-se a bomba centrífuga sob distintas condições de altura e potência, para uma mesma vazão, empregando, como de fato se procede usualmente, um registro de controle de vazão na tomada de pressão da bomba. Assim pode-se concluir que a variável determinante a minimizar é o consumo unitário de

combustível em relação a vazão, CQ:

$$CQ = \frac{\dot{m}}{Q} \quad [Kg/m^3] \qquad (5.1.5)$$

Na figura 37 tem-se o esquema do campo de funcionamento de uma bomba centrífuga, onde a linha tracejada representa as possibilidades de operação da bomba respeitando as necessidades do sistema de irrigação.

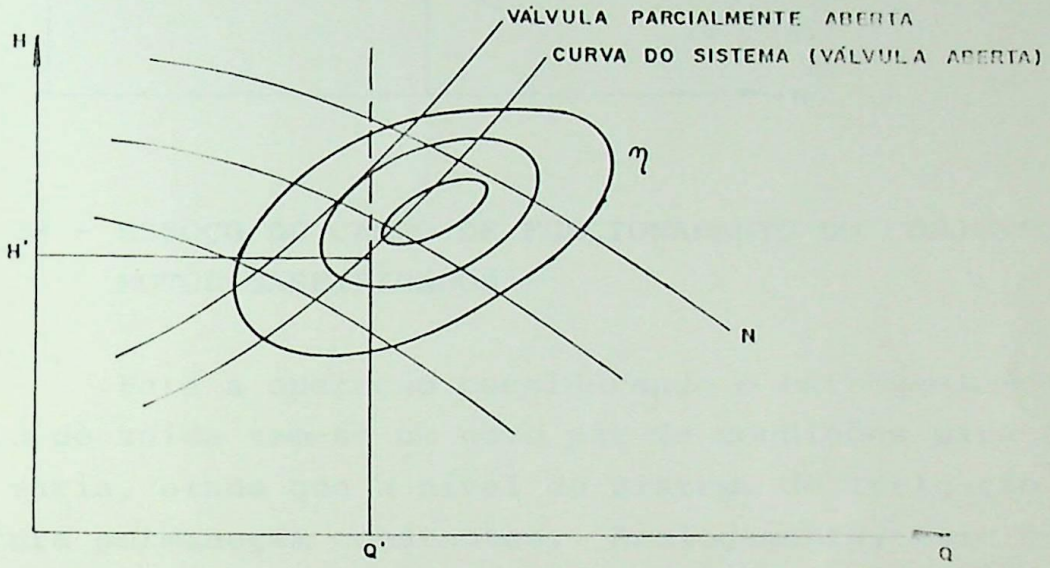


FIGURA 37 - ESBOÇO DO CAMPO DE FUNCIONAMENTO DE UMA BOMBA

H' - altura manométrica mínima do Sistema de irrigação

Q' - vazão requerida pelo Sistema de irrigação

Em uma primeira etapa pode-se considerar a operação do sistema de acionamento exatamente dentro das imposições da bomba, sem regulagem da pressão na saída. Neste caso, tem-se a rotação e potência da bomba determinando as condições do grupo motor-gaseificador, e através do seu campo de funcionamento, é possível obter os valores associados de consumo específico e eficiência, como mostra a figura 38.

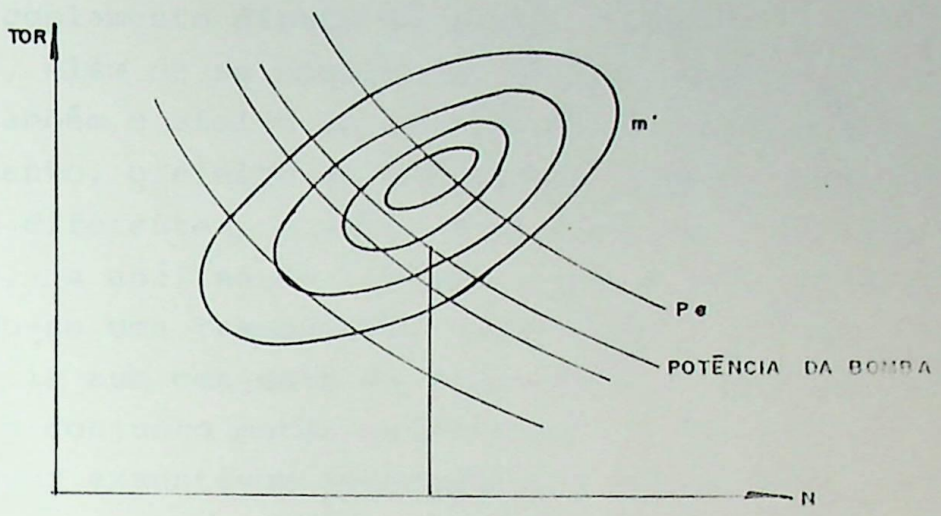


FIGURA 38 - ESBOÇO DO CAMPO DE FUNCIONAMENTO DO CONJUNTO MOTOR-GASEIFICADOR

Para a operação considerando o estrangulamento no registro de saída tem-se um novo par de condições para a bomba, pois H varia, ainda que a nível do Sistema de irrigação a vazão e a altura permaneçam constantes. Analogamente, tais condições definem o ponto de operação do conjunto motor-gaseificador, evidente sob outras condições de rotação e potência, certamente maiores. A análise sucessiva das várias condições de operação permite obter curvas que de forma definitiva apontam a condição energicamente recomendável para a operação, visando fornecer o par (H,Q) desejado e sujeita a configuração da bomba, rotor e transmissão considerados, conforme apresenta a figura 39.

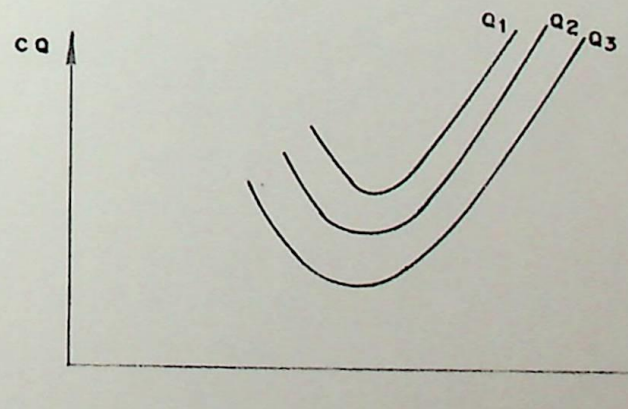


FIGURA 39 - ESBOÇO DAS CURVAS DO CONSUMO UNITÁRIO DE COMBUSTÍVEL EM RELAÇÃO À VAZÃO, CQ, VERSUS ROTAÇÃO.

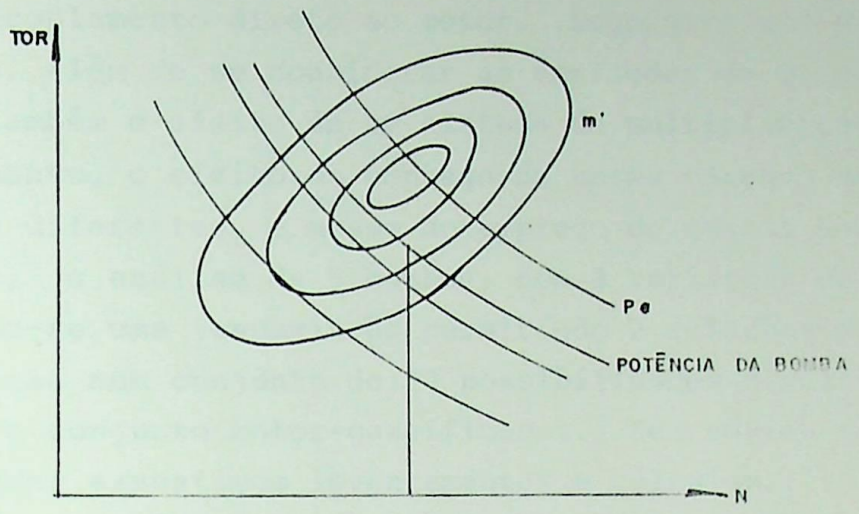


FIGURA 38 - ESBOÇO DO CAMPO DE FUNCIONAMENTO DO CONJUNTO MOTOR-GASEIFICADOR

Para a operação considerando o estrangulamento no registro de saída tem-se um novo par de condições para a bomba, pois H varia, ainda que a nível do Sistema de irrigação a vazão e a altura permaneçam constantes. Analogamente, tais condições definem o ponto de operação do conjunto motor-gaseificador, evidente sob outras condições de rotação e potência, certamente maiores. A análise sucessiva das várias condições de operação permite obter curvas que de forma definitiva apontam a condição energicamente recomendável para a operação, visando fornecer o par (H,Q) desejado e sujeita a configuração da bomba, rotor e transmissão considerados, conforme apresenta a figura 39.

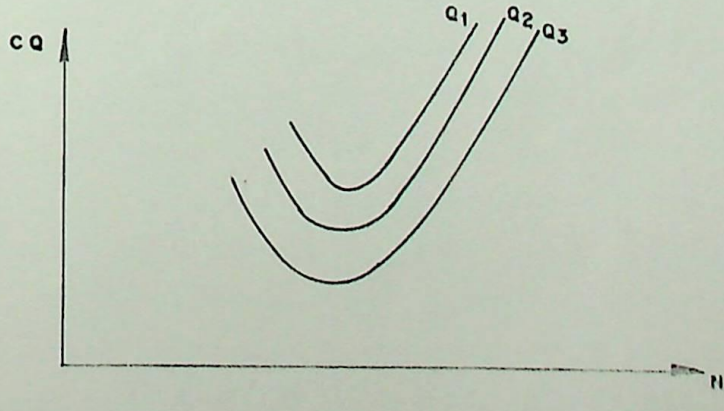


FIGURA 39 - ESBOÇO DAS CURVAS DO CONSUMO UNITÁRIO DE COMBUSTÍVEL EM RELAÇÃO À VAZÃO, CQ, VERSUS ROTAÇÃO.

A seguir serão mostradas aplicações desta metodologia, ressaltando-se que são consideradas bombas com um único rotor e acoplamento direto ao motor. Logo, para uma posterior otimização, além de se considerar as variações de Q, pode-se considerar também o efeito de um sistema de multiplicação/redução no acoplamento, o efeito do emprego da mesma carçaca de bomba com rotores diferentes, e mesmo do emprego de outras bombas. Por exemplo, a análise de 5 bombas, com 3 variações de rotores e adotando-se uma transmissão permitindo 2 relações de velocidades, resultaria num conjunto de 30 possibilidades distintas de análise com o conjunto motor-gaseificador. Sem dúvida tal abrangência requer exaustivos levantamentos e cálculos.

5.2. APLICAÇÕES

Para as aplicações foram utilizados campos de funcionamento de duas bombas centrífugas Worthington. Estes campos, apresentados nas figuras 40 e 41, foram determinados a partir de dados fornecidos pelo fabricante, já que são requeridos os campos de funcionamento em função da rotação.

A partir destes campos, das bombas centrífugas e do conjunto motor-gaseificador, figura 16, pôde-se aplicar a metodologia.

Inicialmente interpolou-se no campo referente a bomba estudada, os valores de rotação e potência para os pares (Q,H) mantendo-se a vazão constante e variando H. De posse destes valores é encontrado então o respectivo valor de consumo de carvão utilizando-se o campo de funcionamento do conjunto motor-gaseificador.

Estes resultados foram obtidos empregando-se uma planilha computacional LOTUS, obtendo-se o consumo unitário de combustível com relação a vazão, CQ, conforme explicitado nas tabelas 18 e 19 para as bombas Worthington 2 DBE 133 Ø 11,80" e 1 1/2 DBE 133, Ø 12,60", respectivamente.

Utilizando a mesma planilha foi possível também obter as curvas CQ x N que devem indicar o ponto energeticamente recomendável referente a uma dada vazão para uma determinada bomba.

É conveniente esclarecer que nem sempre a utilização do ponto energeticamente recomendável é possível, pois dependem dos requerimentos do sistema de irrigação. Por exemplo, se o par (H,Q) requerido estiver localizado na parte crescente da curva CQ x N para a vazão Q, não é possível utilizar-se do ponto energeticamente recomendável para a diminuição do consumo. Por outro lado, se o par (H,Q) requerido encontrar-se na parte decrescente da curva CQ x N para a vazão Q, é possível diminuir o consumo promovendo um aumento de rotação na bomba e fechando adequadamente a válvula de controle de vazão até atingir ao ponto mínimo da curva.

Algumas curvas CQ x N referentes ao cruzamento das bombas estudadas com o conjunto motor-gaseificador são apresen

tadas a seguir (Fig. 42 e 43).

Analisando os gráficos dos casos estudados pode-se constatar que as curvas CQ x N sempre foram crescentes, não aparecendo portanto, nenhum ponto de mínimo. Isto se deve ao fato de que no sistema motor-gaseificador utilizado não se observou grandes diferenças de consumo específico que proporcionassem, mesmo para baixas potências, um consumo horário alto, evidenciando assim o lado decrescente da curva.

Não obstante, os resultados obtidos no entanto indicam a validade da metodologia e apontam a possibilidade de novos estudos segundo esta abordagem.

TABELA 18
CRUZAMENTO DOS DADOS DOS CAMPOS DE FUNCIONAMENTO DO CONJUNTO MOTOR/GASEIFICADOR COM A BOMBA WORTHINGTON 2 DBE 133, Ø 11,80"

Q	H	N	Pe	m	CQ=m/Q
40	50	1797	10,0	10,8700	0,271750
45	50	1805	10,8	11,1240	0,247200
45	60	1867	13,2	11,5500	0,256667
45	70	1936	15,7	11,6180	0,258178
50	50	1798	11,6	11,1360	0,222720
50	60	1870	14,2	11,1612	0,223224
50	70	1942	16,8	12,1296	0,242592
50	80	2020	19,6	13,7200	0,274400
50	90	2110	22,0	15,6200	0,312400
55	50	1807	12,4	11,1600	0,202909
55	60	1881	15,1	11,2495	0,204536
55	70	1955	17,9	12,6195	0,229445
55	80	2034	20,8	14,3936	0,261702
55	90	2131	23,4	17,3160	0,314836
60	40	1667	10,6	10,0700	0,167833
60	50	1808	13,3	11,1720	0,186200
60	60	1885	16,2	11,7288	0,195480
60	70	1961	19,2	13,2864	0,221440
60	80	2048	21,9	15,1548	0,252580
60	90	2147	25,1	20,7075	0,345125
65	40	1701	11,0	10,3400	0,159077
65	50	1825	14,1	10,9980	0,169200
65	60	1902	17,2	12,1604	0,187083
65	70	1969	20,4	13,9740	0,214985
65	80	2070	23,4	17,0820	0,262800
70	40	1724	11,6	10,6720	0,152457
70	50	1827	14,8	11,0260	0,157514
70	60	1911	18,0	12,5460	0,179229
70	70	1992	21,7	14,8862	0,212660
70	80	2089	24,7	19,7600	0,282286
75	40	1749	12,3	10,8240	0,144320
75	50	1838	15,3	11,2914	0,150552
75	60	1928	18,7	12,9404	0,172539
75	70	2012	22,1	15,2490	0,203320
75	80	2114	25,7	23,1300	0,308400
80	40	1770	13,3	10,9725	0,137156
80	50	1859	16,2	11,6802	0,146002
80	60	1948	19,6	13,4652	0,168315
80	70	2043	23,1	16,4010	0,205013
85	40	1793	15,0	11,1000	0,130588
85	50	1881	17,4	12,1626	0,143089
85	60	1974	20,7	14,1795	0,166818
85	70	2072	24,1	18,6775	0,219735
90	40	1818	16,7	11,8570	0,131744
90	50	1912	18,7	12,9217	0,143574
90	60	1992	22,1	15,2269	0,169188
90	70	2104	25,6	22,7840	0,253156
95	50	1948	20,7	14,1795	0,149258
95	60	2037	23,5	17,6250	0,185526
100	50	1982	23,2	16,9360	0,169360
100	60	2081	25,3	21,5050	0,215050

ONDE : Q = VAZAO DE AGUA, [m3/h]
H = ALTURA MANOMETRICA, [m]
N = ROTACAO DO MOTOR, [rpm]
Pe = POTENCIA NO EIXO, [Kw]
m = CONSUMO HORARIO DE CARVAO, [Kg/H]
CQ = CONSUMO UNITARIO DE COMBUSTIVEL C/RELACAO A VAZAO, [Kg/m3]

TABELA 19
CRUZAMENTO DOS DADOS DOS CAMPOS DE FUNCIONAMENTO DO CONJUNTO MOTOR/GASEIFICADOR COM A BOMBA WORTHINGTON 1 1/2 DBE 133, Ø 12,60"

Q	H	N	Pe	m	CQ=m/Q
21	60	1760	9,3	10,4160	0,496000
21	70	1848	11,2	11,4800	0,546667
24	60	1760	10,1	10,5040	0,437667
24	70	1882	12,1	11,8580	0,494083
24	80	1951	14,2	11,9280	0,497000
24	90	2049	16,4	12,1360	0,505667
27	50	1604	8,4	8,8200	0,326667
27	60	1769	10,6	10,8120	0,400444
27	70	1855	12,9	11,4810	0,425222
27	80	1951	15,2	11,5520	0,427852
27	90	2049	17,5	12,7750	0,473148
27	100	2148	19,7	14,3810	0,532630
27	110	2246	22,6	16,6110	0,615222
30	50	1645	8,9	9,2560	0,308533
30	60	1785	11,2	10,9760	0,365867
30	70	1847	13,4	11,2560	0,375200
30	80	1960	16,0	11,7920	0,393067
30	90	2061	18,5	13,3200	0,444000
30	100	2160	21,1	15,1920	0,506400
30	110	2254	23,8	18,0880	0,602933
33	50	1645	9,4	9,5880	0,290545
33	60	1789	11,8	11,0920	0,336121
33	70	1884	14,1	11,4915	0,348227
33	80	1980	16,8	12,2640	0,371636
33	90	2070	19,4	13,8710	0,420333
33	100	2162	22,0	15,8400	0,480000
33	110	2256	24,9	20,6670	0,626273
36	50	1667	10,1	9,8980	0,274944
36	60	1798	12,3	11,1930	0,310917
36	70	1894	15,0	11,2500	0,312500
36	80	1990	17,5	12,6000	0,350000
36	90	2080	20,4	14,4840	0,402333
36	100	2170	22,9	16,8315	0,467542
36	110	2260	25,8	23,2200	0,645000
39	50	1713	10,9	10,4640	0,268308
39	60	1817	13,1	11,2660	0,288872
39	70	1910	15,6	11,5284	0,295600
39	80	1998	18,6	13,2060	0,338615
39	90	2089	21,4	14,9800	0,384103
39	100	2180	24,3	18,7110	0,479769
42	50	1737	11,7	10,6587	0,253779
42	60	1835	13,8	11,1780	0,266143
42	70	1924	16,4	11,8900	0,283095
42	80	2016	19,2	13,4400	0,320000
42	90	2107	22,5	15,9750	0,380357
42	100	2193	25,6	21,7600	0,518095
45	40	1612	10,7	9,8440	0,218756
45	50	1760	12,6	10,9620	0,243600
45	60	1858	14,8	11,1000	0,246667
45	70	1951	16,9	12,2525	0,272278
45	80	2030	19,7	13,7900	0,306444

TABELA 19
CRUZAMENTO DOS DADOS DOS CAMPOS DE FUNCIONAMENTO DO CONJUNTO MOTOR/GASEIFICADOR COM A BOMBA WORTHINGTON 1 1/2 DBE 133, Ø 12,60"

Q	H	N	Pe	m	CQ=m/Q
45	90	2121	22,9	16,6025	0,368944
48	40	1657	11,7	10,2960	0,214500
48	50	1787	13,8	11,0400	0,230000
48	60	1877	16,1	11,6725	0,243177
48	70	1970	18,0	12,7800	0,266250
48	80	2056	20,6	14,3788	0,299558
48	90	2143	23,7	17,7750	0,370313
51	40	1701	12,6	10,7100	0,210000
51	50	1808	15,2	11,2480	0,220549
51	60	1903	17,5	12,2500	0,240196
51	70	1989	19,6	13,5632	0,265945
51	80	2076	21,5	15,0070	0,294255
51	90	2163	24,2	18,6340	0,365373
54	40	1745	13,4	10,9880	0,203481
54	50	1836	16,4	11,5456	0,213807
54	60	1923	18,9	13,0410	0,241500
54	70	2015	21,1	14,4535	0,267657
54	80	2098	23,2	16,8200	0,311481
54	90	2184	25,1	20,7075	0,383472
57	50	1867	17,8	12,3710	0,217035
57	60	1951	20,4	13,9740	0,245158
57	70	2041	22,8	15,9144	0,279200
57	80	2120	25,0	20,6250	0,361842
60	50	1894	20,0	13,7000	0,228333
60	60	1980	21,9	15,1110	0,251850
60	70	2067	25,0	21,0000	0,350000
63	60	2015	23,5	17,6250	0,279762

ONDE : Q = VAZAO DE AGUA, [m3/h]
H = ALTURA MANOMETRICA, [m]
N = ROTACAO DO MOTOR, [rpm]
Pe = POTENCIA NO EIXO, [Kw]
m = CONSUMO HORARIO DE CARVAO, [Kg/H]
CQ = CONSUMO UNITARIO DE COMBUSTIVEL C/RELACAO A VAZAO, [Kg/m3]

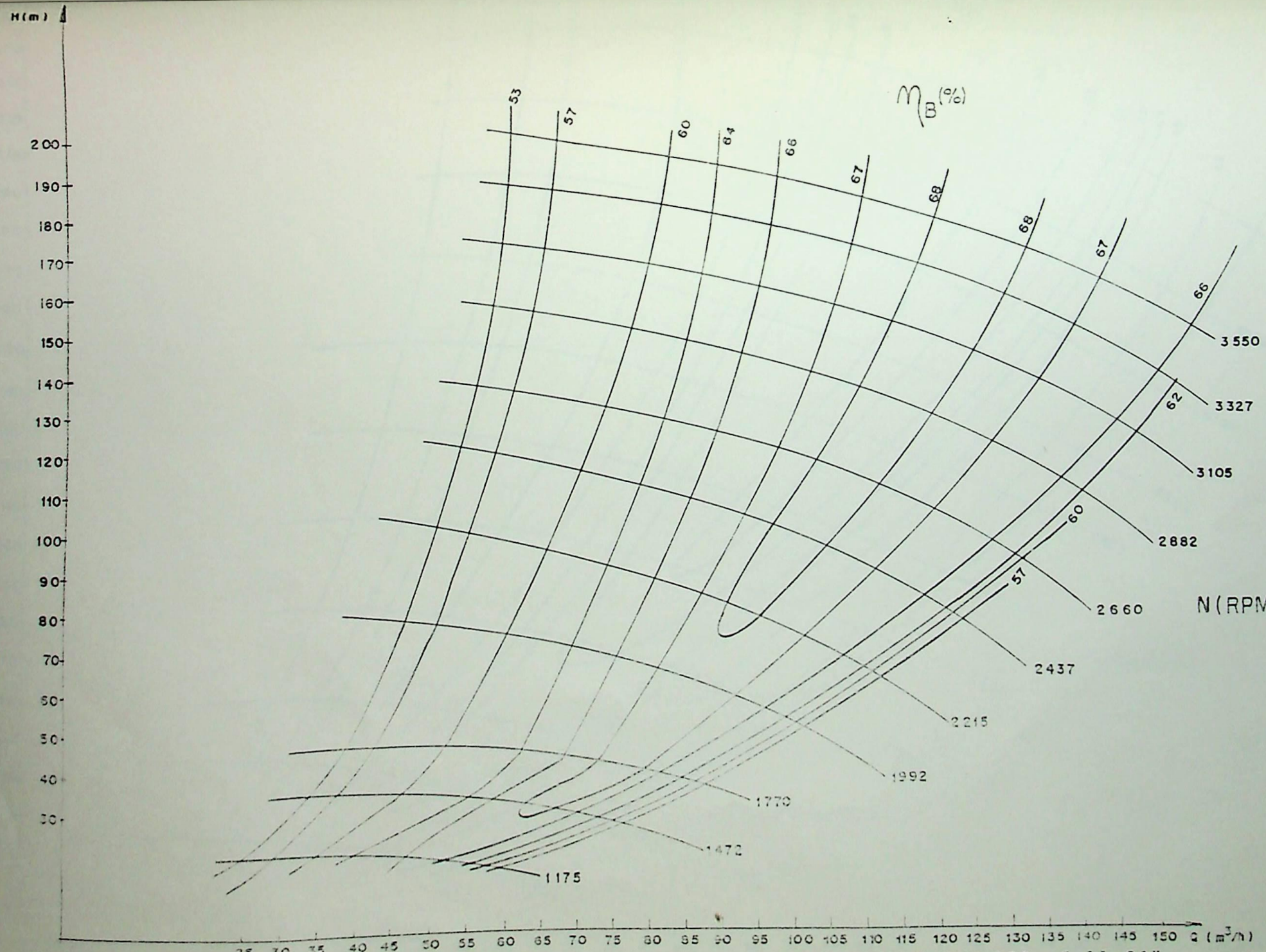


FIGURA 40 - CAMPO DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA WORTHINGTON 2 DBE 133, Ø 11,80"

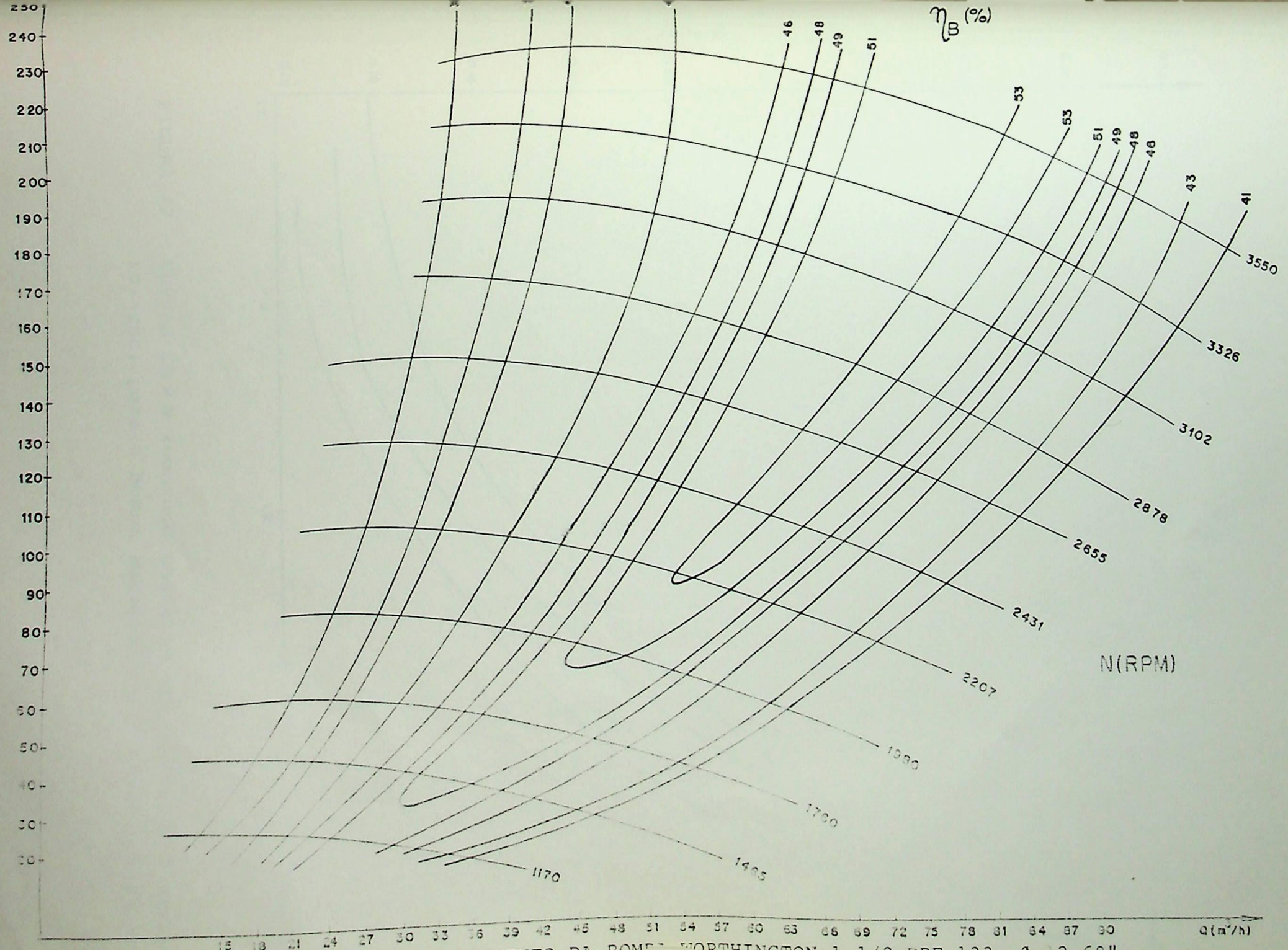


FIGURA 41 - CAMPO DE FUNCIONAMENTO DA BOMBA WORTHINGTON 1 1/2 DBE 133, Ø 12,60"

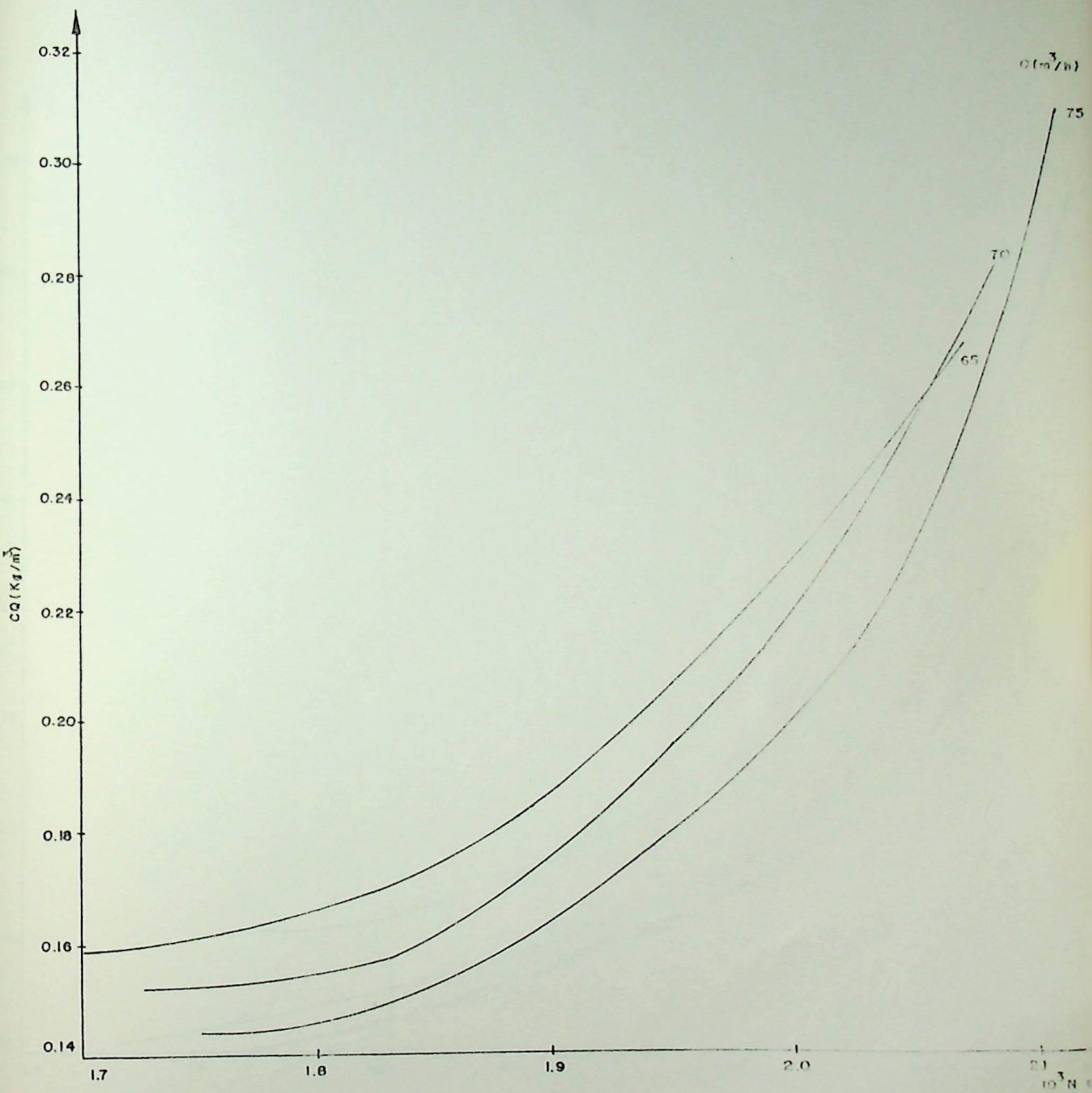


FIGURA 42 - CURVAS CQ x N (consumo unitário de combustível versus rotação) para a bomba Worthington 2 DPE 133,0 11,80"

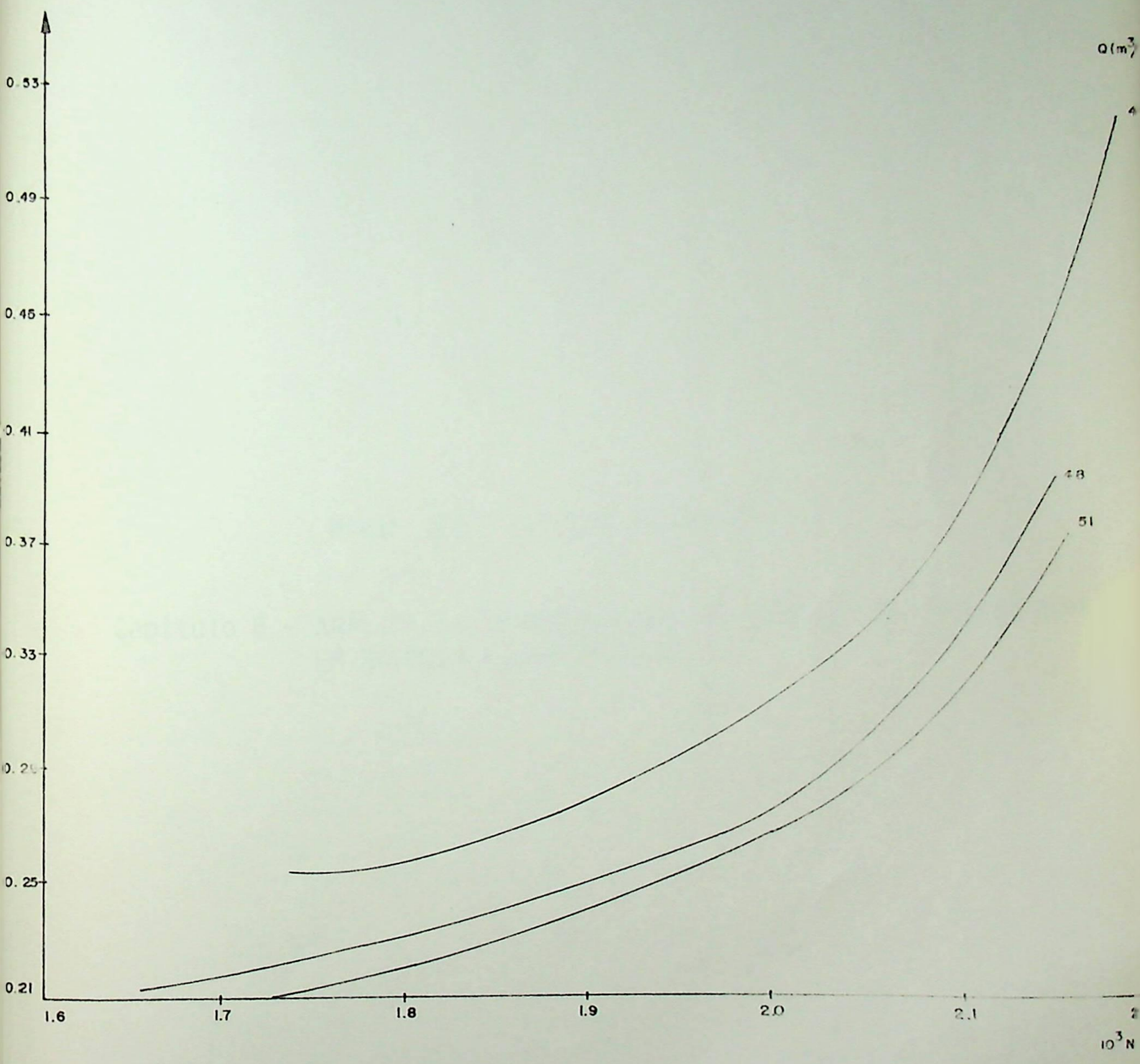


FIGURA 43 - CURVAS CQ x N (Consumo unitário de combustível versus rotação) para a bomba Worthington 1 1/2 DBE 133, Ø 12,60"

PARTE III - ESTUDOS ECONÔMICOS

Capítulo 6 - ANÁLISE DA ECONOMICIDADE DO EMPREGO DE GASEIFICADOR EM MOTORES ESTACIONÁRIOS

CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DA ECONOMICIDADE DO EMPREGO DE GASEIFICADORES EM MOTORES ESTACIONÁRIOS

6.1 INTRODUÇÃO

A maior parte das análises econômicas disponíveis sobre gaseificação de biomassa são estimativas superficiais. Em geral, tais estudos se limitam a comparar as despesas referentes ao combustível convencional e à biomassa, sem considerar o investimento inicial, a vida útil e outros custos envolvidos. Desta forma estas análises são válidas como indicativas de uma provável viabilidade da aplicação da biomassa em sistemas de gaseificação, a requerer maior detalhamento e profundidade para subsidiar decisões.

A seguir se apresentam os resultados principais de alguns estudos econômicos simplificados. Segundo Antunes [2], em 1981, utilizar carvão vegetal na substituição de gasolina em comionetes gerava uma economia de US$ 0,123/km, e para a substituição de 60% do diesel em ônibus urbano economizaria US$0,051/km. Avaliando preços de 1984, a Geniogas [32], fabricante de gasogênios, indicava uma economia mensal de 73 a 89% dos custos com combustível, em diversas aplicações, como motobomba e grupo gerador.

Através do CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais foram divulgados também alguns estudos. Avaliando a aplicação de gasogênios em motores Otto, em 1981 Signeroli [69] efetuou uma comparação entre a gasolina e o carvão vegetal, baseando-se no poder calorífico e nos rendimentos térmicos respectivos, obtendo uma economia de US$ 0,593/kWh, que pode ser considerado atrativo. Na mesma época, Faria [26] realizou estudo semelhante para utilização de gás pobre em motores Diesel, resultando um tempo de retorno de 1,4 ano. Na mesma publicação dos dois trabalhos anteriores, D'Ávila [22] discute aspectos econômicos de gaseificadores estacionários de lenha, de capacidade entre 0,5 a 1 [Gcal/h], considerando os custos fixos e variáveis e uma vida útil de 5 anos e obtendo prazos de amortização entre 15 e 25 meses.

Um trabalho mais recente, desenvolvido no Grupo de Agroenergia da EFEI [53], efetua uma análise econômica detalhada para a aplicação de gasogênio na irrigação, contudo restringindo-se as características de um único equipamento de gaseificação, em

substituição parcial do óleo diesel e considerando os requerimentos típicos da cultura de batata no Sul de Minas Gerais. A figura a seguir resume os resultados obtidos neste contexto.

Como se observa nesta breve revisão existe uma real necessidade de se efetuar análises econômicas abrangentes e consistentes sobre a aplicação de gasogênios em motores estacionários. No levantamento realizado, não se identificaram trabalhos considerando de forma detalhada os vários cenários tecnológicos possíveis, sobretudo no que se refere às estruturas de preços possíveis no caso brasileiro. Assim, buscou-se analisar tais contextos, como se descreve a seguir.

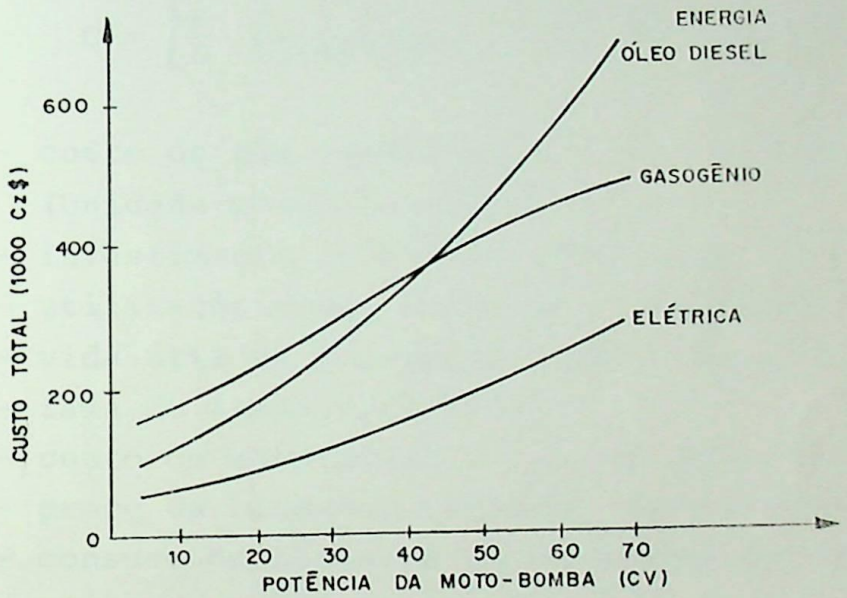


FIGURA 44. Custos totais para irrigação de batata do Sul de Minas, considerando diversos acionadores primários.

6.2 METODOLOGIA

Uma interessante abordagem da economicidade dos gasogênios foi proposta por Butin [11], analisando a situação da Índia. A metodologia apresentada neste trabalho é simples, e bastante consistente na caracterização das variáveis envolvidas, adaptando-se bem ao caso brasileiro.

O método resume-se a determinar o custo do gás de biomassa, equivalente em termos de trabalho útil, a um litro de óleo diesel.

Pode-se mostrar que este custo é dado por:

$$C = \left[\frac{K}{L}\left(\frac{i}{1-(1+i)^{-n}} + m\right) + P.B\right] \frac{1}{S.D} \qquad (6.2.1)$$

onde: C - custo de gás equivalente a um litro de óleo diesel - (Unidade monetária/litro);

K - investimento [unidade monetária];

L - utilização anual prevista [horas/ano];

n - vida útil do gasogênio [anos];

i - taxa de atualização [%];

m - custo de manutenção e mão-de-obra [%];

P - preço da biomassa [unidade monetária/kg];

B - consumo de biomassa em condições da substituição S, considerada $[\frac{kg}{h}]$;

S - taxa de substituição do diesel por gás [%];

D - consumo específico quando operado unicamente com óleo diesel [ℓ/h];

Evidentemente estas variáveis devem ser definidas com o máximo de precisão possível, pois o equacionamento se mostra sensível a pequenas variações. Observe que para cada faixa de potência estudada tem-se um custo de gás diferente, já que, quando existe variação de potência, variam também os consumos específicos do óleo diesel e da biomassa.

O valor do consumo de biomassa depende das condições de utilização e assumindo um comportamento linear, pode ser estimado através das seguintes expressões:

$$B = D'.k.S \quad \text{ou} \quad B = B_{máx}.S \qquad (6.2.2)$$

onde: D': demanda de óleo diesel ou gasolina, a depender do motor considerado [ℓ/h];

k : fator de substituição energética [kg/ℓ];

S : taxa de substituição do diesel por gás [%];

$B_{máx}$: consumo de biomassa máximo, ou seja, na condição de substituição total [kg/h];

Este modelo permite cruzar várias hipóteses de investimento para cada preço de obtenção da biomassa e diante dos resultados obtidos, pode-se estabelecer uma comparação com o preço do óleo diesel e delimitar as situações em que a utilização do gás de biomassa torna-se economicamente viável.

6.3 CENÁRIOS CONSIDERADOS E RESULTADOS

As aplicações mais promissoras dos gasogênios associados a motores estacionários são em sistema de irrigação e em geração elétrica para localidades isoladas.

A seguir, se particularizam cenários correspondentes à irrigação.

Já que grande parte dos motores utilizados para a irrigação por aspersão são movidos à óleo diesel, partiu-se do princípio que os usuários já tenham um motor deste tipo para o acionamento de uma bomba. Evidentemente, "mutatis mutantis" poderia ser admitido outro uso final, como um gerador elétrico.

Assumiram-se portanto, as seguinte opções para acionamento dos sistemas de irrigação.

Caso 1: investimento em um gasogênio à madeira para substituir o diesel em 70%;

Caso 2: investimento de um gasogênio à carvão vegetal para substituir o diesel em 70%;

Caso 3: investimento em um motor ciclo OTTO e em um gasogênio à madeira para substituir totalmente o óleo diesel;

Caso 4: investimento em um motor ciclo OTTO e em um gasogênio à carvão vegetal para substituir totalmente o óleo diesel;

Caso 5: prosseguir a operação com o grupo moto-bomba à óleo diesel.

Estabeleceram-se diferentes hipóteses para o investimento e para o preço da biomassa, conforme se apresenta a seguir. Com relação ao investimento (K), três opções podem ser estudadas: K_1 sendo o preço de custo do gasogênio, K_2 o preço do gasogênio em um mercado com livre concorrência e K_3 o preço do gasogênio em um mercado sem concorrência.

Para a biomassa podem ser considerados o preço de produção (P_1) e o preço médio de compra (P_2). Sendo assim, com três hipóteses para o investimento e duas para o preço da biomassa, tem-se uma vasta gama de possibilidades para serem analisadas. Para os demais parâmetros, acredita-se que os valores abaixo se

jam representativos: L = 1500 [h/ano]; n = 10 anos; m = 10% ; i = 12%.

Observando os valores praticados a partir de 1980, o custo do óleo diesel adotado situa-se numa faixa de 0,206 à 0,313 US$/ℓ que representam, respectivamente, o seu valor mais baixo (1986) e o mais alto (1984). O valor referente ao preço de venda atual (set/88) é de 0,303 US$/ℓ, ainda um pouco abaixo dos valores internacionais médios.

O consumo horário do óleo diesel e da gasolina dependem da potência considerada e podem ser estimados a partir dos seus respectivos consumos específicos médios, 0,200 e 0,205 kg/cvh. Pode-se verificar a proximidade entre os valores, pois apesar do rendimento térmico do motor ciclo Otto ser inferior ao motor ciclo Diesel (tipicamente 25,5% contra 27,5%), o poder calorífico da gasolina supera o do óleo diesel, havendo portanto, uma compensação [40]. Em termos de unidades volumétricas, estes valores de afastam um pouco devido a maior densidade do óleo diesel, ou seja, 0,235 ℓ/cvh para o óleo diesel e 0,275 ℓ/cvh para a gasolina.

Como já se comentou, um motor ciclo Otto não está projetado para operar com o "gás pobre", o que acarreta uma perda em torno de 40% de sua potência original. De forma semelhante acontece com o motor diesel, onde a perda é cerca de 20% já que, neste caso, substitui-se usualmente 70% do óleo diesel consumido - o que não ocorre com o motor Otto onde considera-se a possibilidade de utilização exclusiva do gás pobre. Para se garantir a potência desejada é conveniente adotar-se motores de maior potência que a potência requerida pela bomba ou gerador.

Conforme explicitado na metodologia, o consumo de biomassa (B) é função do fator de substituição energética (k). Este fator é estabelecido a partir da quantidade de energia demandada pelo motor levando-se em conta o rendimento da gaseificação, assumida de 70%, e seus valores são mostrados na Tabela 20.

TABELA 20 - FATORES DE SUBSTITUIÇÃO ENERGÉTICA

Tipo de motor / Biomassa	(kg/ℓ)	
	Ciclo Otto	Ciclo Diesel
Madeira	3,5	3,4
Carvão vegetal	2,4	2,3

As Tabelas 21 e 22 apresentam as variáveis comentadas anteriormente para os casos Motor ciclo Diesel e ciclo Otto. Os valores de potência adotados cobrem a faixa de bombas de 10 a 50 CV, que constituem a grande parte das aplicações no setor rural.

TABELA 21 - CASO MOTOR CICLO DIESEL

Potência do motor (CV)	Potência da Bomba (CV) ou Gerador	Consumo de óleo Diesel (ℓ/h)	$B_{máx}$ madeira (kg/h)	$B_{máx}$ carvão (kg/h)
12	10	2,82	9,58	6,48
36	30	8,46	28,76	19,45
60	50	14,10	47,94	32,43

TABELA 22 - CASO MOTOR CICLO OTTO

Potência do motor (CV)	Potência da Bomba (CV) ou Gerador	Consumo de gasolina (ℓ/h)	$B_{máx}$ madeira (kg/h)	$B_{máx}$ carvão (kg/h)
14	10	3,85	13,47	9,24
42	30	11,55	40,42	27,72
70	50	19,25	67,37	46,20

Poderia aqui ser questionada a utilização de dados teóricos de consumo, já que foram realizadas avaliações experimentais.

A tabela abaixo compara dois pontos da análise anterior em que houve coincidência nas potências estudadas, com os estudos experimentais deste trabalho, 10 e 30 CV no eixo.

TABELA 23 - COMPARAÇÃO ENTRE O CONSUMO TEÓRICO E EXPERIMENTAL (motor Otto, carvão vegetal)

CONSUMO DE CARVÃO MOTOR OTTO (kg/h) / POTÊNCIA (CV)	TEÓRICO	EXPERIMENTAL	Δ %
10	9,24	8,08	12
30	27,72	23,09	16

Pode-se constatar que os consumos teórico e experimental estão em faixas comparáveis e considerando a abrangência do método e os eventuais desvios experimentais dos valores ensaiados, conclui-se pela viabilidade de aplicação dos dados teóricos de consumo na análise econômica, que inclusive se mostram conservadores.

A adoção dos valores teóricos de consumo e a não utilização dos resultados experimentais obtidos nos ensaios efetuados justifica-se também pela coerência que se permite no cotejo das situações diferentes da utilização de carvão vegetal em motor ciclo Otto, que não foram estudadas experimentalmente.

Para o preço da madeira dois casos foram considerados: $P_1 = 0$ e $P_2 = 20$ US$/t = 0,02 US$/kg. O valor P_1 reflete a realidade de onde se possa ter madeira disponível livremente para o suprimento, como na utilização de resíduos de serrarias, e P_2 traduz a situação de compra, sendo obtido através de dados médios na região de Minas Gerais. Para o uso do carvão vegetal a situação é um pouco diferente. O preço P_2 = = 76 US$/t = 0,076 US$/kg é o preço médio de compra em Minas Gerais e serve de parâmetro para P_1, que é o preço de produção, baseado em estimativas de que ao se produzir carvão vegetal no próprio estabelecimento, o custo sofre uma queda de cerca de

50% [17]. Logo, tem-se P_1 = 0,038 US$/kg.

Existe sensível falta de dados sobre os preços e custos de equipamentos de gaseificação de pequeno porte para as condições brasileiras, certamente devido ao mercado ainda em implantação. Para o investimento no gasogênio adotou-se o valor de US$ 7500, relativo a um equipamento à carvão vegetal, normalmente produzido e comercializado no Brasil, capaz de acionar motores até 50 CV [53]. À nível internacional os custos citados são bem mais elevados [41]. Partindo-se deste valor, e, adotando-se as relações de preço versus potência apresentados por Butin [11] pode-se estimar o custo de gaseificadores para as outras faixas de potência. No caso de um gasogênio à madeira, devido a sua maior complexidade, considerou-se 1,5 vezes o preço de um gasogênio à carvão vegetal. Os preço médios de motores ciclo Otto, novos, foram cotados em Itajubá, conforme a tabela abaixo, segundo suas respectivas potências. Caso sejam utilizados motores recondicionados, existiria uma economia de até 35% neste investimento, embora houvesse uma queda na vida útil de 20%.

TABELA 24 - PREÇOS MÉDIOS DE MOTORES CICLO OTTO

POTÊNCIA (CV)	PREÇO (US$)
15	680
45	1920
70	3160

A partir destes dados iniciais, pode-se estabelecer os cenários com relação aos investimentos, adotando-se as relações estimadas por Butin [11]; o custo de investimento para um mercado sem concorrência (K_3) representa o dobro do custo no caso de livre concorrência (K_2), e o custo de produção (K_1), cerca de 55% do mesmo. Logo, tem-se a tabela a seguir.

TABELA 25 - CENÁRIOS COM RELAÇÃO AOS INVESTIMENTOS

Potência/Biomassa (CV) / Hip. de investimento (US$)	10		30		50	
	Madeira	Carvão	Madeira	Carvão	Madeira	Carvão
K_1	2145	1430	4125	2750	6250	4150
K_2	3900	2600	7500	5000	11250	7500
K_3	7800	5200	15000	10000	22500	15000

Para a utilização com o motor ciclo Otto, evidentemente, os investimentos devem ser acrescidos do preço deste motor, já que, equacionou-se o problema no caso da existência de um motor ciclo diesel. Com estes parâmetros a equação apresentada na metodologia, obteve-se as tabelas e gráficos a seguir, com os estudos de competividade nos casos propostos. Destacou-se, nas tabelas, os casos onde se verifica a economicidade no emprego de gaseificadores. Com relação as figuras, tal economicidade se verifica quando os custos equivalentes do óleo diesel são inferiores aos valores observados no mercado nacional, mostrados nas linhas tracejadas.

TABELA 26 - CUSTO EQUIVALENTE DO ÓLEO DIESEL NO CASO:
Motor Diesel/Gasogênio à madeira (US$/ℓ)

Opções / Pot (CV)		10	30	50
K_1	P_1	0,202	0,130	0,118
	P_2	0,270	0,198	0,186
K_2	P_1	0,368	0,236	0,212
	P_2	0,436	0,304	0,280
K_3	P_1	0,737	0,472	0,425
	P_2	0,805	0,540	0,493

TABELA 27 - CUSTO EQUIVALENTE DO ÓLEO DIESEL NO CASO:
Motor OTTO/Gasogênio à madeira (US$/ℓ)

Opções \ Potência (CV)		10	30	50
K_1	P_1	0,186	0,133	0,124
	P_2	0,282	0,228	0,220
K_2	P_1	0,303	0,207	0,190
	P_2	0,398	0,303	0,286
K_3	P_1	0,561	0,373	0,339
	P_2	0,656	0,468	0,435

TABELA 28 - CUSTO EQUIVALENTE DO ÓLEO DIESEL NO CASO:
Motor Diesel/Gasogênio à carvão vegetal (US$/ℓ)

Opções \ Potência (CV)		10	30	50
K_1	P_1	0,222	0,174	0,165
	P_2	0,309	0,261	0,253
K_2	P_1	0,333	0,244	0,229
	P_2	0,420	0,332	0,316
K_3	P_1	0,579	0,402	0,371
	P_2	0,666	0,489	0,458

TABELA 29 - CUSTO EQUIVALENTE DO ÓLEO DIESEL NO CASO:
Motor Otto/Gasogênio à carvão vegetal (US$/ℓ)

Opções \ Potência (CV)		10	30	50
K_1	P_1	0,264	0,200	0,188
	P_2	0,388	0,324	0,312
K_2	P_1	0,423	0,277	0,249
	P_2	0,548	0,401	0,373
K_3	P_1	0,677	0,414	0,364
	P_2	0,802	0,539	0,489

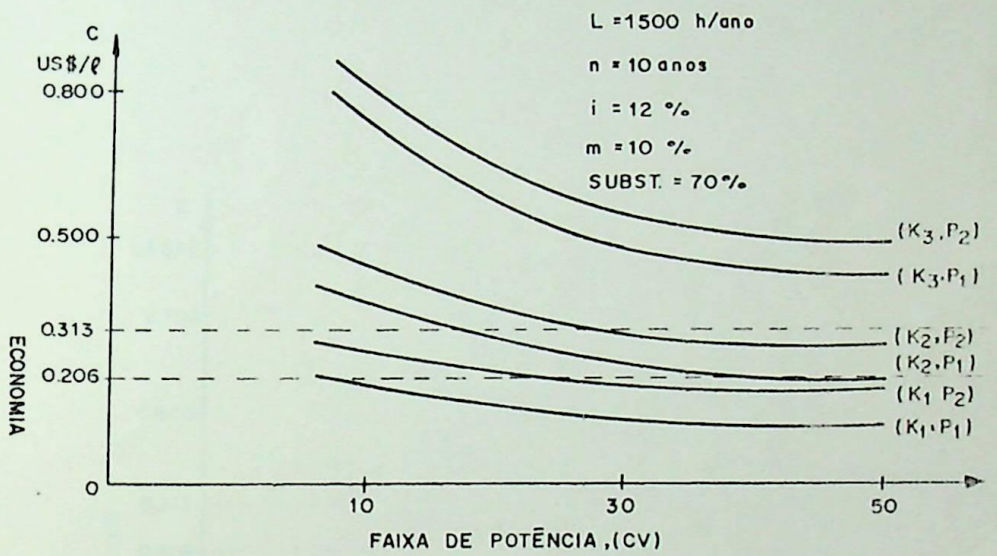


FIGURA 45 - COMPETITIVIDADE GASOGÊNIO DE MADEIRA x MOTOR DIESEL

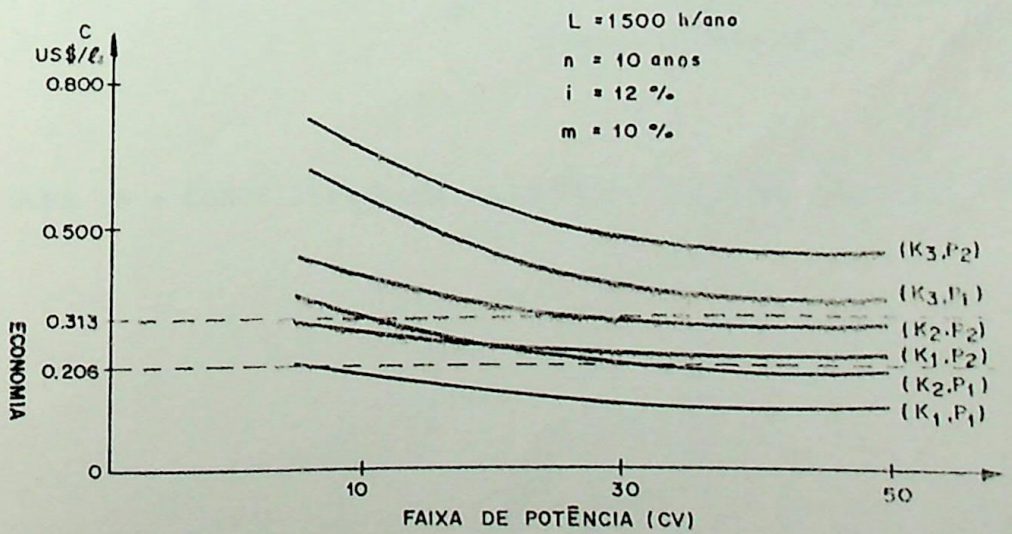


FIGURA 46 - COMPETITIVIDADE GASOGÊNIO DE MADEIRA x MOTOR OTTO

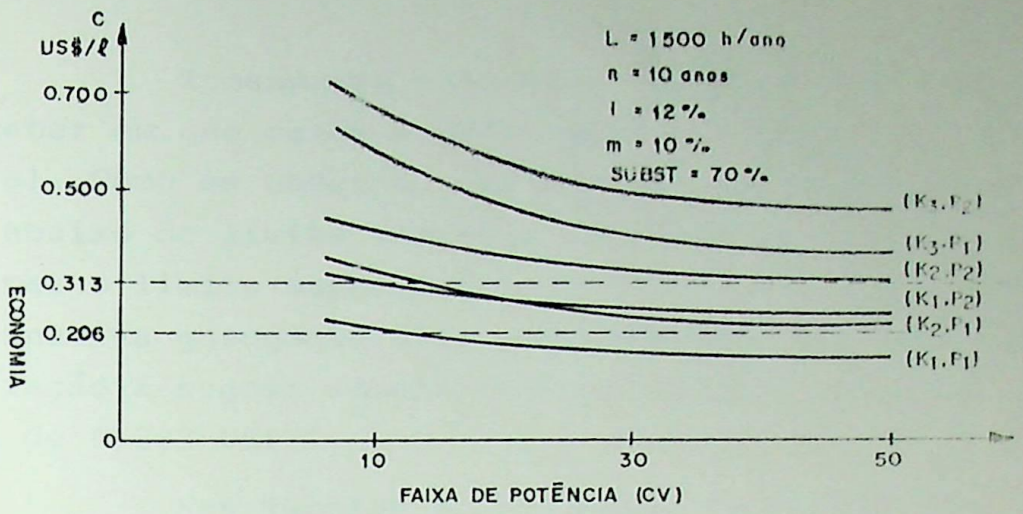


FIGURA 47 - COMPETITIVIDADE GASOGÊNIO À CARVÃO VEGETAL x MOTOR DIESEL

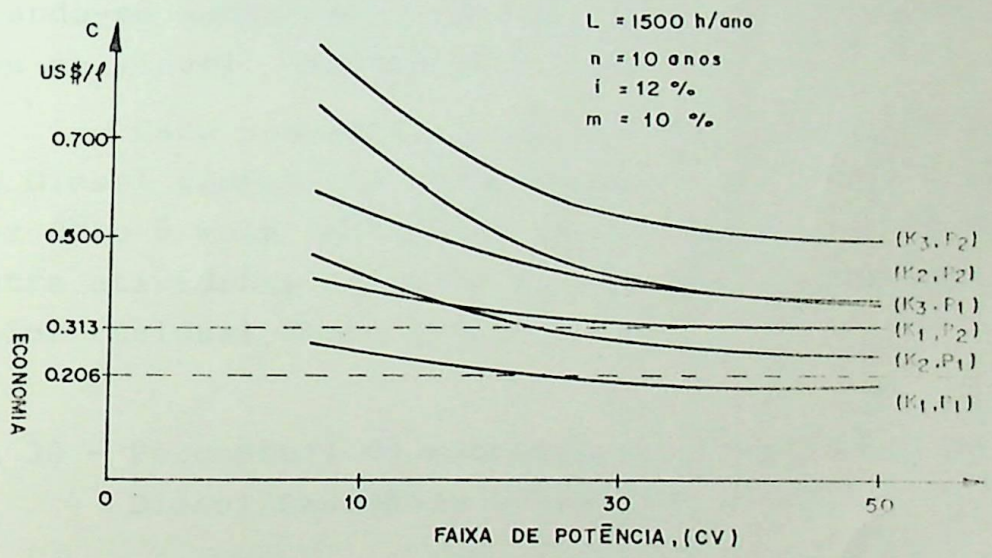


FIGURA 48 - COMPETITIVIDADE GASOGÊNIO À CARVÃO VEGERAL x MOTOR OTTO

6.4 - ALGUMAS CONCLUSÕES

Tomando-se como base os resultados obtidos, pode-se perceber em que casos a opção proposta torna-se economicamente viável. Como se observa, existem situações que estão localizadas abaixo do limite inferior do custo do óleo diesel. Ao considerar o limite superior, 0,313 US$/ℓ, as situações em que a alternativa gasogênio traz economia aumentam bastante. Para a avaliação a seguir adotou-se como parâmetro limite o custo atual de 0,303 US$/ℓ.

Nas Tabelas 30 a 33 estão explicitados os percentuais de economia em todos os casos estudados, porém algumas observações devem ser feitas. A situação de investimento K_1 combinada com o preço de biomassa P_1 é viável para todos os casos sem exceção, inclusive para menores potências. Para a utilização de gasogênios à madeira a combinação K_1 e P_2 também é interessante, além do K_2 P_1 para 30 e 50 CV e K_2P_2 para 50 CV. Utilizando-se gasogênio à carvão vegetal a situação K_2P_1 também mostrou-se viável excetuando a faixa de 10 CV.

Cabe ressaltar no entanto, que nos casos onde os motores Otto e Diesel competirem em situação de igualdade, a opção com o motor Otto é mais vantajosa, pois libera o motor diesel para uma outra atividade, ou mesmo para a venda. Não se considerou seu valor residual neste caso.

TABELA 30 - Percentual de economia no caso do uso do motor Diesel/Gasogênio à madeira (%)

Opções \ Pot (CV)		10	30	50
K_1	P_1	+ 33,3	+ 57,1	+ 61,1
	P_2	+ 10,9	+ 34,7	+ 38,6
K_2	P_1	- 21,4	+ 22,1	+ 30,0
	P_2	- 43,9	0	+ 7,6
K_3	P_1	-143,2	- 55,8	- 40,3
	P_2	-165,7	- 78,2	- 62,7

TABELA 31 - Percentual de economia no caso do uso do motor Otto/Gasogênio à madeira (%)

Opções \ Pot (CV)		10	30	50
K_1	P_1	+ 38,6	+ 56,1	+ 59,1
	P_2	+ 6,9	+ 24,8	+ 27,4
K_2	P_1	0	+ 31,7	+ 37,3
	P_2	- 31,3	0	+ 5,6
K_3	P_1	- 85,1	- 23,1	- 11,9
	P_2	-116,5	- 54,4	- 43,6

TABELA 32 - Percentual de economia no caso do uso do motor Diesel/Gasogênio à carvão vegetal (%)

Opções \ Pot (CV)		10	30	50
K_1	P_1	+ 26,7	+ 42,6	+ 45,5
	P_2	- 2,0	+ 13,9	+ 16,5
K_2	P_1	- 10,0	+ 19,5	+ 24,4
	P_2	- 38,6	- 9,6	- 4,3
K_3	P_1	- 91,1	- 32,7	- 22,4
	P_2	-119,8	- 61,4	- 51,2

TABELA 33 - Percentual de economia no caso do uso do motor Otto/Gasogênio à carvão vegetal (%)

Opções \ Pot (CV)		10	30	50
K_1	P_1	+ 12,9	+ 34,0	+ 37,9
	P_2	- 28,0	- 6,9	- 3,0
K_2	P_1	- 39,6	+ 8,6	+ 17,8
	P_2	- 80,8	- 32,3	- 23,1
K_3	P_1	-123,4	- 36,6	- 20,1
	P_2	-164,7	- 77,9	- 61,4

Pode-se observar que as opções tornam-se recomendáveis na medida que se aumenta a faixa de potência ou se diminui o custo de investimento. Outra verificação interessante, é que a madeira apresenta melhores resultados que o carvão vegetal, apesar da maior dificuldade em se operar um gasogênio à madeira.

É oportuno fazer uma breve análise de sensibilidade dos parâmetros adotados. Nas figuras 49, 50, 51 e 52, pode-se verificar, para três casos escolhidos, o comportamento do custo do gás equivalente a um litro de diesel [C] em função de variações de i, ℓ, n e s, respectivamente. Assim uma queda na taxa de atualização para 10% acarreta uma redução no custo do gás de 4 a 8%, não sendo suficiente para tornar ainda os casos mais próximos da faixa econômica, em casos viáveis. Isso não acontece com a variação da utilização anual. Quando aumentado em 30% é capaz de reduzir bastante o custo do gás. Com relação à vida útil, adotando-se uma vida útil de 5 anos, observa-se uma elevação de 25 a 35% do custo do gás. Finalmente um outro parâmetro não desprezível é a taxa de substituição, no caso de uso de motores ciclo diesel, que se aumentado para 85%, a depender do caso, pode viabilizar o emprego de biomassa.

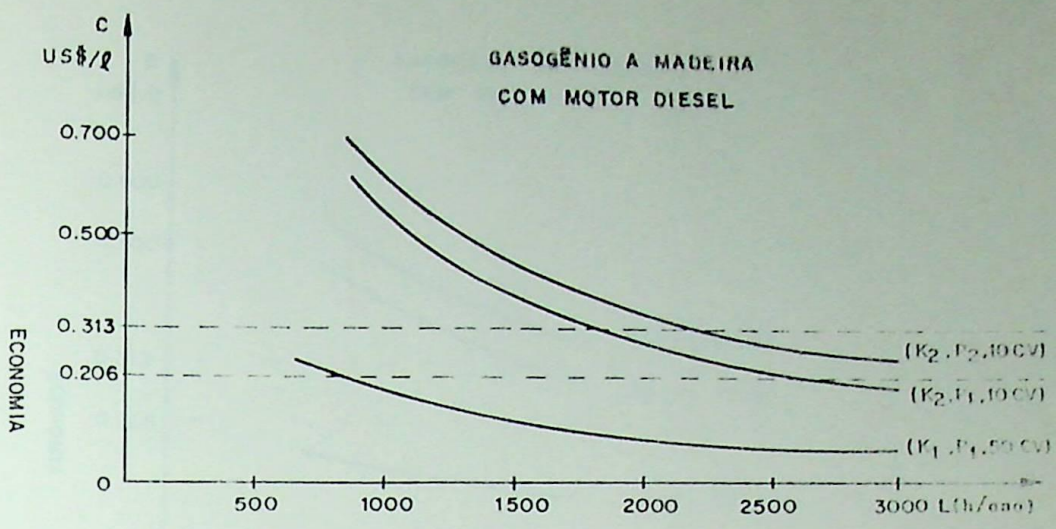


FIGURA 49 - Efeito da utilização anual do gasogênio

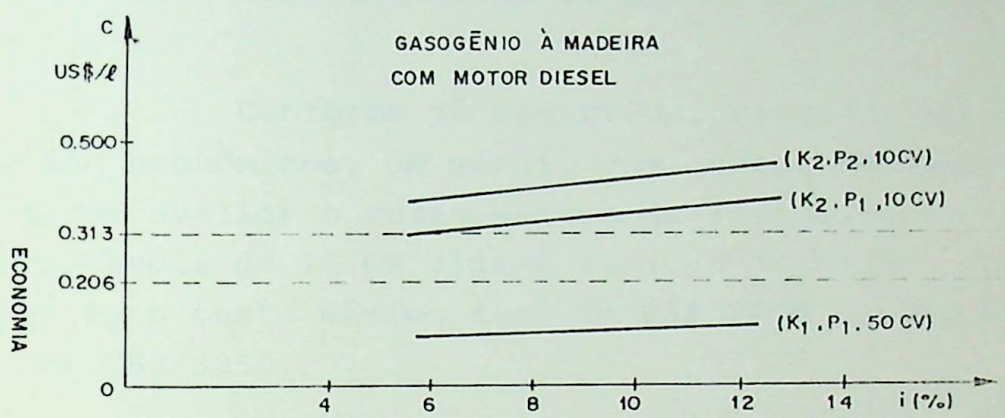


FIGURA 50 - Efeito da taxa de atualização

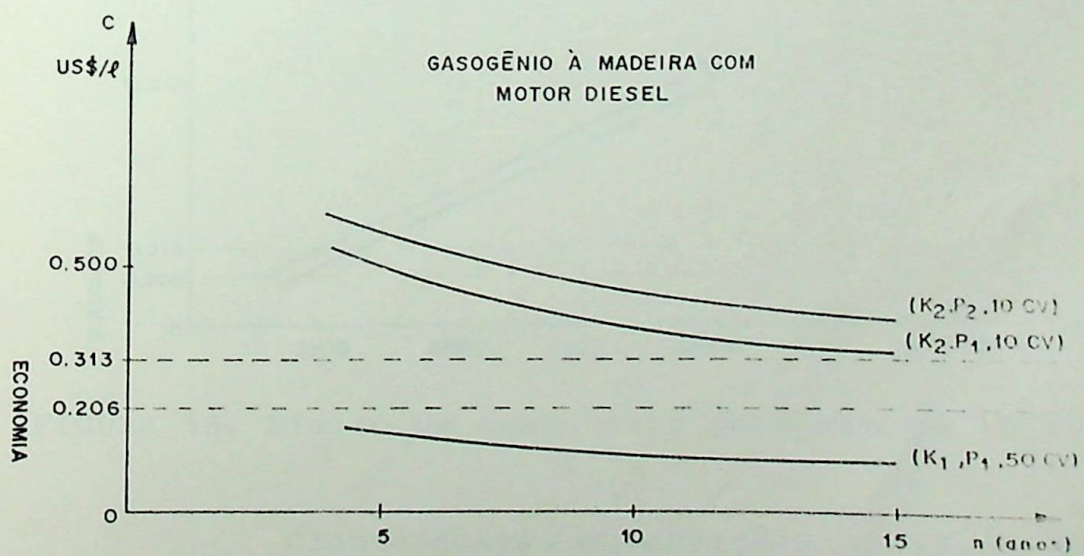


FIGURA 51 - Efeito da vida útil

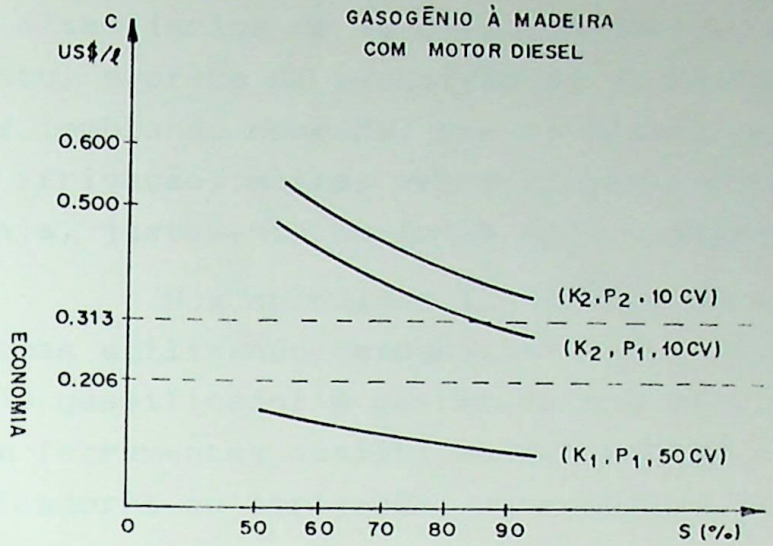


FIGURA 52 - Efeito da taxa de substituição

Conforme já observado, gaseificadores de menor porte só são econômicos, em geral, com custos de investimentos menores. Pode-se avaliar o custo máximo de investimento que torne a faixa de potência de 10 CV viável através da Figura 53. Observa-se que para P_2 o custo máximo fica em US$ 2500 e para P_1 este custo fica em US$ 3250.

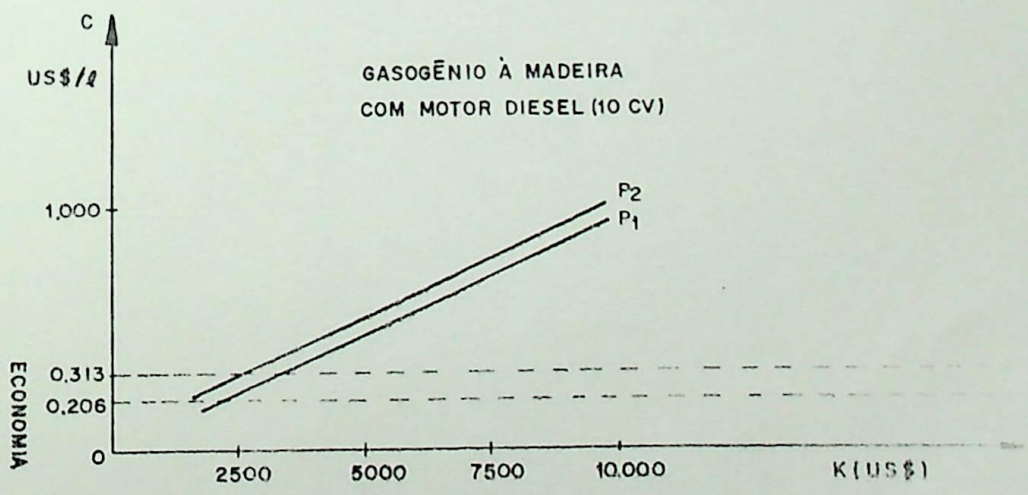


FIGURA 53. Efeito do custo para potência de 10 CV

Diante destas observações verifica-se o quanto é necessário uma análise mais criteriosa para se optar ou não pela alternativa gasogênio, ficando evidente o risco de uma análise superficial. Não é sempre que um gaseificador traz economia. Um gaseificador deve ser indicado, de preferência, para potências

mais altas (acima de 30 CV), sob determinadas condições de investimento, e preço de aquisição de biomassa. É importante concluir lembrando contudo, que os requerimentos, principalmente para a irrigação, muitas vezes exigem potências maiores que 50 CV, ou seja, justamente na faixa onde o gasogênio é mais competitivo.

Nos apêndices 1 -"Estudo da superfície irrigavél em sistemas utilizando Gasogênios" e 2 - "Dimensionamento da potência do gaseificador a partir de uma área a ser irrigada" se fornecem ferramentas analíticas adicionais para a utilização de gaseificadores em irrigação, alternativa que se configura, como visto, oportuna.

No apêndice 4 se aborda com maior detalhe a aplicação em geração elétrica em sistemas isolados.

PARTE IV - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A tecnologia de gaseificação de combustíveis sólidos, especialmente biomassa e seus derivados, com a produção de gás pobre e acionamento de motores de combustão interna pode ser considerada conhecida e dominada. No Brasil já existiram períodos de grande difusão e interesse no assunto, associados à dificuldades de abastecimento de combustíveis convencionais, mas a atual estrutura de preços dos derivados do petróleo reduz o potencial de penetração desta rota de conversão. Contudo, a nível de aplicações rurais, o crítico quadro da oferta deveria justificar maior atenção dos planejadores energéticos para estes sistemas.

Nos estudos experimentais realizados, sobre um produto normal de um fabricante brasileiro, não foram observadas maiores dificuldades e após uma fase de adaptação operacional, os ensaios se procederam normalmente. Deve ser destacado contudo a dificuldade do abastecimento de combustível com a homogeneidade e granulometria desejáveis, que impõe um penoso trabalho adicional. Os índices de desempenho e os parâmetros de controle observados experimentalmente apresentaram coerência com as análises teóricas, correspondendo a eficiências globais de cerca de 12% e consumos específicos ao redor de 1kg de carvão vegetal por kWh. A análise de regressão dos dados experimentais confirma o acerto do procedimento de ensaio, não obstante por limitações do sistema de carregamento mecânico do motor, uma parte do campo de funcionamento teve que ser estimada.

Uma contribuição considerada relevante neste trabalho refere-se à proposta metodológica para determinação das condições energeticamente recomendáveis para operação de um sistema de bombeamento empregando gaseificador. A minimização do consumo de combustível é conseguida através da análise conjunta dos campos de funcionamento. Sua aplicação mais sensível ocorre em sistemas de irrigação.

Nos estudos econômicos conclui-se que, sob condições determinadas de investimento e preço de aquisição da biomassa, o emprego de gaseificadores apresenta competitividade

com os sistemas energéticos convencionais. Estes cenários favoráveis ocorrem sobretudo sob potências acima de 30 CV e para biomassa produzida pelo usuário, quando os percentuais de economia face ao uso de óleo diesel atingem a mais de 50%.

Tais conclusões confirmam a expectativa inicial que justificou o trabalho. A gaseificação de biomassa, no contexto rural é uma tecnologia de efetivo potencial.

A nível de recomendações diversas observações podem ser feitas:

- os gaseificadores atuais devem ser avaliados sob condições reais, com variações de carga, no sentido de selecionar os equipamentos realmente viáveis;

- devem ser desenvolvidos programas de pesquisa por orgãos competentes no sentido do desenvolvimento de novos equipamentos, produção de combustíveis, uso de outros combustíveis (resíduos agrícolas) e maior eficiência no sistema de purificação do gás;

- são oportunos estudos para melhor adaptação dos motores ciclo Otto ou Diesel, evitando-se grandes perdas de potência, e mesmo um projeto visando um motor adequado ao uso de biomassa;

- deve-se buscar a utilização de materiais visando aumentar a vida útil dos equipamentos, sobretudo reduzindo os efeitos de corrosão;

- são recomendáveis análises com relação a demanda de energia e disponibilidade de matéria prima ressaltando as excepcionais condições do Brasil desenvolver florestas energéticas;

- recomendam-se, finalmente, avaliações técnico-econômicas do mercado para gaseificadores, inclusive com o estabelecimento de linhas de fomento e financiamento específicas para tais equipamentos aplicados em sistemas rurais.

BIBLIOGRAFIA

1. ALMANAQUE Abril Rural, Editora Abril, São Paulo, 1986.

2. ANTUNES, R. "Aplicações de Gasogênio em Motores Ciclo Otto e Ciclo Diesel", CNI, Rio de Janeiro, 1981.

3. APOSTILAS do Seminário "Lenha e Carvão Vegetal - Energéticos Renováveis". Salvador, agosto, 1984.

4. ARBO, J. The simplex coal and biomas gasification process - Energy from biomass and wates - Inst. of Gas Technology, Chicago, 1980.

5. ASSUMPÇÃO, Rosely - Gaseificação de Madeira e Carvão Vegetal. Princípio e Aplicações. CETEC, Belo Horizonte, 1981

6. BALANÇO Energético Nacional - 1987 - Ministério das Minas e Energia - Brasília, 1988.

7. BAPTISTA, C.D. O problema do gasogênio. Boletim do Instituto de Engenharia, outubro/1938.

8. BERNARD, G.W. The use of Agricultural Residue as fuel. Ambio, Vol.14, nº 4/5, 1985.

9. BRITO, J.O. Biomassa florestal como recurso energético - ESALQ/USP. Piracicaba, sem data.

10. BRITO, S. Análise experimental de um gaseificador contra-corrente - Tese de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas - 1982.

11. BUTIN, V. Bois irrigues et gazogenes, Gret, Agence Française pour la Matrise de L'Energie. Paris, 1987.

12. CARDÃO, C. Gasogênio Forluminas - Revista Mineira de Engenharia, Belo Horizonte, dezembro, 1942.

13. Catálogo General Motors - motores GM - sem data.

14. CEMIG. Gaseificação de Biomassa. Belo Horizonte, junho,1986.

15. CETEC. Gaseificação de Madeira e Carvão Vegetal. Belo Horizonte, 1981

16. CETEC. Manual de Construção e Operação de Fornos de Carbonização. Belo Horizonte, 1982.

17. CETEC. Produção e Utilização de Carvão Vegetal. Belo Horizonte, 1981.

18. CETEC. Uso da Madeira para fins Energéticos. Belo Horizonte, 1981.

19. CNI. Gasogênio. Rio de Janeiro, 1981.

20. COUSINS, W.J. A Theoretical Study of Wood Gasification Process, New Zealand Jounal of Science. Vol. XXI, 175-83, 1978.

21. DASAPPA, S.; REDDY, V.; MUKUNDA, H.S. Experiente with gasifiers for 3,7kW Engines. Ambio, vol.14, número 4/5,1985.

22. D'ÁVILA, S.; MAKROY, Z. Gaseificadores de Madeira - Aspectos Técnicos e Econômicos. CETEC, Belo Horizonte, 1981.

23. DUMON, R. A Valorização dos Combustíveis Pobres: uma solução energética para países em desenvolvimento. Revista Tecnológica Brasileira, Vol.VI, nº 33/34, outubro/1984.

24. EDELMAN, D. Biomass Gasification Opportunities for Nigéria and Cameroon. Energy Exploration, Vol. 3, nº 2, 1985.

25. EMBRATER. Gasogênio de Alvenaria - folheto, Brasília, 1986.

26. FARIA, L.A. Uso do Gasogênio em Motores de Ciclo Diesel. - CETEC, Belo Horizonte, 1981.

27. FEUSTEL, J.E.; LEUCHIS, M. Gasification of Biomass for Heartand Power Generation. Energy Progress, Vol.II,nº4, december, 1982

28. FIALA, M.; RIVA,G. Energia Termica dai residui agricoli e florestali - Energie alternative HTE, anno 7,nº 36,agosto, 1985.

29. FINLAYSON, P.C.; ROBINSON, I.M. O uso de carvão de qualidade inferior.Revista Tecnológica Brasileira, dezembro/1979.

30. FLORES, L.F.V. Sistemas Térmicos I/EFEI

31. FOÁ, A. O problema do Gasogênio. Boletim do Instituto de Engenharia, junho/1940.

32. FOLHETO da Geniogás Equipamentos Energéticos Ltda, São Paulo, sem data.

33. FURTADO FILHO, P.; ZEFERINO, R. Cenário Atual da Gaseificação no Brasil. - Seminário de Energia de Biomassa e Resíduos. Belo Horizonte, 1988.

34. GASOGÊNIO, na Indústria e Transporte, solução já comprovada. Planejamento e Desenvolvimento, novembro/dezembro/1979.

35. GASOGÊNIO, no campo, uma forma barata de movimentar tratores. Planejamento e Desenvolvimento, novembro-dezembro/1979.

36. GOUPILLON. Produção de Energia Mecânica em pequena e média potência por gaseificação de Biomassa. CEMAGREF. Revista Energia - fontes alternativas. Volume VI, 1984, nº 33/34

37. HILST, A.; KOSIM, F. Gaseificadores para pequenos e médios consumidores. Revista Tecnológica Brasileira, Vol. III , nº 14, junho/1981.

38. HOLMAN, J.P. Transferência de Calor - Editora McGraw Hill , 1985.

39. JORNAL Estado de Minas. 1º caderno, Domingo, 6.2.77.

40. JÓVAJ, M.S. e outros. Motores de Automóvel. Ed.Mir. Moscou, 1982.

41. KAUPP, A; GOSS, J. Small scale gas producer - Engine Sistems German Appropriate Technology Exchouse, Eschborn, 1984

42. KJELLTROM, B. Biomass gasifiers for energy supply to agriculture and smale industry. Ambio, Vol.14, nº 4/5 - New York, 1985.

43. KULNING, F. Estudo elementar dos gasogênios. Revista Brasileira de Engenharia, agosto/1939.

44. LAURIN, M; CHAMBERLAND, A. Gasification of Agricultural Residues for Energy Production. Energy Sources, vol. V, Nº 4, 1981.

45. LEGEY, J.C.; LUCHI,N.R. Aproveitamento de Biomassa e seus Resíduos. Seminário de Energia de Biomassa e Resíduos - Belo Horizonte, abril, 1988.

46. LEROY, L.M.; SILVA, L.C. Produção de Eletricidade em pequenas localidades e no meio rural. Análise da alternativa grupo gasogênio - IX SNPTEE - Belo Horizonte - 1987.

47. MAKRAY, Z. Gaseificação em leito fixo para aplicações industriais. Seminário de Energia de Biomassa e Resíduos.Belo Horizonte, abril/1988.

48. MAMMANA, V. Consulta pessoal, 1988

49. MANUAL DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO. Geniogás Equipamentos Energéticos Ltda.

50. MANUAL DE OPERAÇÃO PARA EQUIPAMENTOS A GASOGÊNIO. Acesita Energética.

51. MARRI, A; AIRES, N.P. Carbonização no Brasil: Cenário atual Seminário de Energia de Biomassa e Resíduos. Belo Horizonte, abril/1988.

52. MORAES, P.L. Gaseificação para produção de energia elétrica. Seminário de Energia de Biomassa e Resíduos. Belo Horizonte, 1988.

53. NOGUEIRA, L.A.; RODRIGUES, V; SANTOS, A.M. Análise energética e econômica da irrigação da batata no sul de Minas Gerais. Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico, Vol.XIV , nº 1, Itajubá, 1988.

54. NOGUEIRA, L.A.; RODRIGUES, V.L. Uma breve introdução à tecnologia de irrigação. EFEI. 1986

55. NOGUEIRA, L.A.H.; SANTOS, A.H. Considerações técnico-econômicas aplicadas à cogeração elétrica e calor de processos industriais. EFEI.

56. NORMA PMB-454 da ABNT - Método de Ensaio para a determinação do poder calorífico. 1968

57. NORMA PMB-749 da ABNT - Motores alternativos de combustão interna. 1976.

58. OSTLE, Bernard. Estadística Aplicada. México, 1974

59. PATHAK, B.S.; JAIN, A.K. Gasification of rice husk in an upchaught reactor. Energy Mannagement, july, 1985.

60. PAYNE, F.A.; CHANDRA, P.K. Mass Balance for Biomass Gasifiers - Combustors. ASAE, 1985. VOL. XXVIII.

61. POWER from Producer gas in Developing countries. Appropriate Technology. Vol. XII, nº 2.

62. PROJETO: Reatores automotivos à carvão vegetal. CAEEB. MME.

63. QUEIROZ, Honorino C. Gasogênio. Rio de Janeiro, outubro 1943.

64. REED, T.B. Biomass Gasification. Park Ridge, New Jersey,USA 1981.

65. REVISTA Sol e Solo. Acesita nº 2 a 9, outubro/78 - março/83.

66. SALES, J.E.; CASTRO, L.F.; TAVARES, R. Cinética de gaseificação do carvão vegetal com CO_2 - Metalurgia: ABM. Vol. XLI, nº 326, janeiro, 1985

67. SANTOS, A.M.; BAJAY, S.V. Sistematização do estudo da demanda de energia elétrica para irrigação. XI Conferência Latino Americana de Eletrificação Rural - Rio de Janeiro - 1988.

68. SANTOS, A.M.; NOGUEIRA, L.A.; FLORES, L.F.; NEVES, M.T. - Instrumentação e Controle em Caldeiras. FUPAI, 1988

69. SIQUIEROLI, W. Uso do gasogênio em motores ciclo Otto. - CETEC, Belo Horizonte, 1981.

70. TERMOQUIP. Gaseificação de lenha aplicada a processos térmicos industriais.- folheto - 1984

71. TORRES, E.A.; CENCIN, E.P. Avaliação do teste de combustão em leito fluidizado de mucilagem de sisal - CEPED, novembro, 1983.

72. VAN WYLEN, R. e SONNTAG, R. Fundamentos da Termodinâmica Clássica - Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1976.

73. VYARAWALLA, F; PARIKH, P.; DAK, M.C.; JAIN, B.C. Utilisation of Biomass for Motive Power Generation. Gasifier Engine System. Biomass Pg 227-242. England, 1984.

74. WILTGEN FILHO, L. Gaseificadores para carvão mineral. Revista Tecnológica Brasileira, Vol. III, nº 16, setembro/1981.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - ESTUDO DA SUPERFÍCIE IRRIGÁVEL EM SISTEMAS UTILIZANDO GASOGÊNIOS

Neste apêndice se apresenta uma modelagem da demanda de energia para irrigação e da disponibilidade energética em uma área florestal permitindo estimar a superfície irrigável, a partir de biomassa, através de gaseificadores.

A. ENERGIA REQUERIDA PARA IRRIGAÇÃO

O tipo de irrigação considerado nesta análise é por aspersão. Tal método requer menor mão-de-obra, menor consumo de água, pode ser usada na grande maioria dos solos, não exige sistematização do solo e é mais eficiente se comparado ao método tradicional de irrigação por escoamento superficial.

Santos [67] apresenta um equacionamento no sentido de avaliar a energia requerida para a irrigação resultante do revezamento das áreas à irrigar. Este equacionamento tem como base dois argumentos fundamentais. Primeiro, não há necessidade de irrigar toda uma área de uma vez só. Pode-se dividi-la em áreas menores e otimizar a sequência de irrigação levando-se em conta o ponto de murcha da planta. Segundo, se for aplicada ao solo uma lâmina de água numa velocidade maior que a velocidade de infiltração básica, fatalmente ocorrerá escoamento superficial, o que é inconveniente.

Antes de apresentarmos as equações básicas é necessário caracterizar algumas variáveis:

- capacidade de campo (CC) é a quantidade máxima de água que pode ser retirada pelo solo em condições naturais, por um solo bem drenado (%);
- densidade aparente (Da) é a relação entre peso e volume de uma determinada amostra de solo ao natural, após sua secagem em estufa (g/cm^3);
- ponto de murcha (PM) representa a percentagem de umidade que o solo ainda conserva, quando as plantas mostram pela primeira vez sinais de murcha permanente (%);

- velocidade de infiltração básica (VIB) representa a taxa de infiltração da água em um solo, quando este se apresenta saturado (cm/hora).

Todas estas variáveis dependem do tipo de solo e são, em geral, encontradas na literatura.

Com relação à cultura, dois parâmetros são importantes: a profundidade efetiva do sistema radicular (hr) e a evapotranspiração (ET). Define-se hr como a profundidade do solo onde se encontra 70 a 80% de todo o sistema radicular; a evapotranspiração é a quantidade de água que se perde por evaporação na cultura, no solo e na transpiração da cultura.

Desta forma, a lâmina de água (LF) a ser aplicada na cultura é dada por:

$$LF = \frac{CC - PM}{10} \cdot Da \cdot hr \cdot f$$

onde f é o fator cultural que indica as respostas dos cultivos aos teores de umidade.

A lâmina bruta (LB) é dada por:

$$LB = LF/E$$

onde E é a eficiência do sistema de irrigação (cerca de 70%).

O turno de rega é o intervalo de tempo entre as aplicações da lâmina d'água, e é dado por:

$$TR = LF/ET$$

O tempo de aplicação na lâmina bruta é dada por:

$$TP = LB/VIB$$

E, finalmente, a energia requerida no eixo da bomba, para a irrigação, é dada por:

$$\varepsilon_{ir} = 9{,}81 \cdot LB \cdot H \cdot \frac{n_{ir}}{\eta_B}$$

com $H = Hp + Ha + Ht$ e $n_{ir} = \frac{PE}{TR}$

onde: H - altura manométrica de bombeamento;

Ht - desnível médio entre o ponto de captação de água e o de irrigação.

Hp - perda de carga na tubulação (assumida igual à 10% de Ht);

Ha - pressão de trabalho do aspersor escolhido;

η_B - rendimento da bomba;

n_{ir} - nº de vezes que se irrigará durante o período PE;

PE - período de irrigação.

EXEMPLO: Deseja-se irrigar feijão, no período seco, num terreno barro-argiloso, no Norte de Minas Gerais, onde a evapotranspiração fica em média 5,5mm/dia. O desnível médio da área a se irrigar, com relação ao ponto de captação de água, é de 7 metros. Para um terreno barro-argiloso tem-se: CC = 27%, PM = 13%, Da = 1,35g/cm³ e VIB = 0,8cm/hora. Para o feijão tem-se: f = 0,7 e hr = 25cm. Dessa forma:

$$LF = \frac{27 - 13}{10} \cdot 1,35 \cdot 25 \cdot 0,7 = 33,07mm$$

$$LB = 33,07/0,7 = 47,25mm$$

$$TR = 33,07/5,5 = 6,01 \text{ dias}$$

$$TP = 47,25/0,8 = 59,06 \text{ horas}$$

$$n_{ir} = \frac{60}{6,01} = 9,98 \simeq 10$$ (considerando-se como 2 meses o período de irrigação)

$$H = 7 + 0,7 + 30 \simeq 38m$$ (30m é a pressão de trabalho de um aspersor médio)

$$\mathcal{E}_{ir} = \frac{9,81 \cdot 47,25 \cdot 38 \cdot 10}{0,65} = 270,982 \cdot 10^3 \ [J/m^2/safra]$$

$$\mathcal{E}_{ir} = 71,677 \cdot 10^{-3} \ [kWh/m^2/safra]$$

$$\mathcal{E}_{ir} = 71,677 \cdot 10^{-3} \ [kWh/m^2 safra] \ 10000 \ [m^2/ha] =$$

$$= 716,77 \left[\frac{kWh}{ha \ safra} \right]$$

$$NP = \frac{TR \cdot 24}{TP} = \frac{6,01 \cdot 24}{59,06} = 2,44$$

NP é o número de partes que deve se dividir a área irrigável. Observe-se que cada porção deverá ser irrigada 10 vezes durante os dois meses de irrigação.

B. ENERGIA DISPONÍVEL A PARTIR DE UMA FLORESTA DE MADEIRA

No Brasil, a produção média das florestas plantadas de eucalipto, mesmo de forma inadequada, atinge 8,4 a 10,5m³/ha/ano. No Vale do Jequitinhonha, em regiões de solo pobre, alguns projetos apresentaram medições de 21 m³/ha/ano, no Vale do Rio Doce, um plantio de "Eucalipto Grandis" apresentou um rendimento de 37,7 m³/ha/ano e no Espírito Santo chegou-se a mais de 56 m³/ha/ano [65]. Considerou-se nesta análise um rendimento de produção de 21 m³/ha/ano ou 12,6 t/ha/ano, já que a densidade da madeira é de aproximadamente 0,6 t/m³.

Assumiu-se também que o 0,74 kWh é produzido por 1 kg de madeira, e que 0,37 kWh é produzido pelo carvão obtido em 1 kg de madeira, já que 50% da energia é perdida no processo de carbonização. Dessa forma, a energia disponível fica em 9.324 kWh/ha/ano para a madeira e 4.662 kWh/ha/ano em termos de carvão.

C. ÁREA IRRIGÁVEL GRAÇAS A GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA PRODUZIDA EM 1 ha.

A área irrigável a partir de 1 hectare florestal resulta da comparação entre a necessidade energética do sistema de irrigação, mostrado no item (a) deste apêndice, e a disponibilidade existente na biomassa, apresentada no item (b). Assim, considerando por exemplo a cultura do feijão, e que haja uma safra durante o período seco, tem-se, ao relacionar os dados anteriores, uma área irrigável de 13 ha para a gaseificação de madeira e de 6,5 ha para a gaseificação de carvão vegetal.

APÊNDICE 2 - DIMENSIONAMENTO DA POTÊNCIA DO GASEIFICADOR A PARTIR DE UMA ÁREA A SER IRRIGADA

É demonstrado facilmente que a potência requerida do sistema gaseificador é dada pela expressão abaixo:

$$P_{ir} = \frac{\mathcal{E}_{ir} \cdot S_i}{PE \cdot T_D} \quad [kW]$$

onde, S_i - área a se irrigar [m²]

T_D - período de irrigação diário [h/dia]

PE - período de irrigação [dias]

$\mathcal{E}_{ir}$ - energia requerida para a irrigação [kWh/m²]

Exemplo: $\mathcal{E}_{ir}$ = 0,071677 kWh/m² (exemplo apresentado no Apêndice 1)

S_i = 100 ha

T_D = 10 h/dia

PE = 60 dias

$$P_{ir} = \frac{0,071677 \cdot 100 \cdot 10^4}{60 \cdot 10} = 119,46 \simeq 120 \text{ kW}$$

Para as condições assumidas a potência requerida para o conjunto gasogênio/motor seria nesta caso 120 kW. Como já mencionado esta forma de se chegar a potência baseia-se no revezamento de áreas e, tem como principal consequência uma sensível redução na capacidade do equipamento necessário para executar a tarefa. Resta verificar agora se a melhor solução seria um único gasogênio ou vários de menor capacidade para atender a potência desejada. Para isso é necessário uma análise econômica de acordo com as opções do mercado.

No sentido de exemplificar esta análise, supõe-se que o mercado ofereça gaseificadores de 75,0, 37,5, 18,75 e 3,75 kW.

Na tabela seguinte tem-se os custos de investimento estimados para o conjunto gaseificador/motor transformados em custos anuais através do fator de recuperação de capital, consi

derando-se uma taxa de atualização de 10% e uma vida útil de 10 anos ($FRC = A/PR = i(1+i)^n / (1+i)^n-1$).

Supõe-se que a unidade agrícola se localize longe de pontos de abastecimento de derivados de petróleo. Isso justifica a adoção de motores ciclo otto. Para obter um gaseificador menos complexo escolhe-se o carvão vegetal como combustível. A tabela A2 revela os custos anuais de manutenção e operação (10% do custo de investimento do gasogênio) e os custos anuais relativos ao combustível considerando-se uma utilização anual (L) de 1200 h, e que o carvão seja obtido na própria propriedade (preço de custo (P) = 0,038 US$/kg).

TABELA A1 - CUSTO ANUAL (A)

POTÊNCIA DO GASOGÊNIO (kW)	CUSTO DO GASOGÊNIO (US$)	POTÊNCIA DO MOTOR OTTO (kW)	CUSTO DO MOTOR (US$)	VALOR PRESENTE PR (US$)	CUSTO ANUAL A (US$)
75,00	13600	103,6	6250	19850	3230
37,50	7500	51,8	3150	10650	1730
18,75	4400	25,9	1600	6000	976
3,75	2000	5,2	370	2370	385

TABELA A2 - CUSTO TOTAL ANUAL (CTA)

POTÊNCIA GASOGÊNIO (kW)	CUSTO DE M e O (CMO) (US$)	DEMANDA DE GASOLINA DO MOTOR OTTO (D') (ℓ/h)	CUSTO ANUAL DO CARVÃO (CAC) [1] (US$)	CUSTO TOTAL ANUAL (CTA) [2] (US$)
75,00	1360	38,50	4213	8803
37,50	750	19,25	2106	4589
18,75	440	9,62	1052	2468
3,75	200	1,92	210	795

(1) $CAC = P \cdot L \cdot D' \cdot k$ (onde k é o fator de substituição energética, igual a 2,4 kg /ℓ neste caso)

(2) $CTA = A + CMO + CAC$

Diante desses custos totais anuais pode-se fazer várias combinações entre gasogênios de diferentes capacidades, sendo assim a opção de menor CTA evidentemente é a melhor.

Na Tabela A3 tem-se várias combinações para atender a potência requerida de 120 kW e a tendência observada é que a adoção de vários gasogênios de menor capacidade não traz economia.

TABELA A3 - COMBINAÇÕES VISANDO OBTER A POTÊNCIA REQUERIDA

COMBINAÇÕES Nº GASOGÊNIOS VERSUS POTÊNCIA UNITÁRIA	CTA (US$)
32 de 3,75kW	25440
6 de 18,75kW e 2 de 3,75kW	16398
4 de 18,75kW, 1 de 37,5kW e 2 de 3,75kW	16051
3 de 37,5kW e 2 de 3,75kW	15357
1 de 75 kW, 1 de 37,5kW e 2 de 3,75kW	14987

APÊNDICE 3 - AVALIAÇÃO DO PARÂMETRO β E DA EFICIÊNCIA DE COGERAÇÃO EM GASEIFICADORES

Um aspecto interessante no gasogênio estudado é a dupla possibilidade de cogeração existente.

Segundo Nogueira [55], cogerar seria produzir sequencialmente calor útil e energia mecânica/elétrica, a partir da queima de um único combustível. Existem duas maneiras de se cogerar calor e energia mecânica/elétrica. A primeira são os chamados ciclos "topping", em que a energia térmica de maior temperatura atende inicialmente a geração de energia elétrica e/ou mecânica. A segunda são os chamados "bottoming", em que inicialmente a necessidade de calor é atendida em primeiro plano.

No caso em questão pode-se haver cogeração das duas formas. Por exemplo, a utilização do gás de escape do motor para secagem do carvão a ser usada no reator consiste num ciclo "topping", resgatando a energia perdida no escapamento e evitando que se perca muita energia na zona de secagem. Um ciclo "bottoming" se configura na hipótese do aproveitamento do calor gerado pelo sistema de resfriamento da cetilha. Este calor pode ser aproveitado perfeitamente para o aquecimento de água, por exemplo para fins domésticos, no meio rural.

Um sistema de cogeração pode ser esquematizado em função dos fluxos energéticos associados. Ou seja:

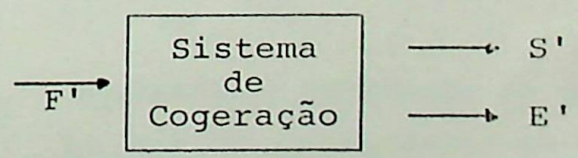


FIGURA A1 - ESQUEMA DO SISTEMA DE COGERAÇÃO

onde: F' - consumo de combustível na cogeração
S' - energia térmica produzida
E' - energia elétrica/mecânica produzida

Nogueira [55] defino o parâmetro $\beta = E'/S'$ que ca

racteriza o sistema de cogeração, e é este parâmetro que será avaliado a seguir. Na realidade para fazer uma estimativa realmente precisa seria necessário colocar um medidor de vazão na tubulação do gás antes da admissão de forma que se pudesse desagregar os rendimentos reais da gaseificação e do motor, que como se verá a seguir, permitem obter β.

O rendimento global, ηG, do conjunto motor-gaseificador é o produto entre o rendimento da gaseificação, ηg, e rendimento do motor, ηm.

Na impossibilidade de se efetuar estas medidas, para estimar-se o potencial de cogeração, deve-se considerar que a eficiência do motor ciclo OTTO à gás não difere muito da sua eficiência com combustível líquido, em torno de 20%.

A energia térmica recuperável proveniente do gás de escape do motor, S_1', pode ser definida como:

$$S_1' = P \text{ eixo } R \cdot \frac{0,3}{0,2}$$

onde: P eixo R - potência mecânica no eixo reduzida [kW]

Esta definição considera que a energia do gás de escape representa 30% da energia admitida no motor.

A energia térmica cedida a água do resfriador da cetilha e trocador de calor, considerada recuperável, S_2', é expressa por:

$$S_2' = \frac{2}{3} (1 - \eta_g) \text{ Pcar}$$

Onde: η_g - rendimento estimado da gaseificação, a partir do rendimento global e do rendimento assumido para o motor [%]

Pcar - potência relativa ao carvão vegetal [kW]

Nesta caso considera-se que 1/3 da energia térmica produzida na gaseificação não possa ser recuperada para fins úteis.

Dessa forma, o parâmetro admencional de cogeração, β, pode ser estimado:

$$\beta = \frac{P \text{ eixo } R}{S_1' + S_2'}$$

Pode-se calcular ainda um novo rendimento global , η_{NG}, incluindo o aproveitamento do calor cogerado.

Assim, η_{NG} é dado por:

$$\eta_{NG} = \frac{P \text{ eixo } R + S_1' + S_2'}{Pcar}$$

Observe-se o expressivo ganho de rendimento energético que a cogeração permite, sobretudo sob cargas parciais, como demonstra a tabela a seguir. Isto se deve ao fato do rendimento global, η_G, ser menor nessas circunstâncias.

Conforme apresentado, a cogeração implica em dar uma finalidade útil ao calor necessariamente perdido na conversão energética, o que racionaliza a utilização do combustível. Assim, existindo uma demanda térmica no nível de temperatura dos fluxos S_1' e S_2', estaria caracterizada a possibilidade de se utilizar a cogeração em sistema de gaseificação.

TABELA A4 - ESTIMATIVAS DE S_1', S_2', e η_{NG}

N (rpm)	P eixo R (kW)	η_G (%)	η_g (%)	η_m (%)	Pcar (kW)	S_1' (kW)	S_2' (kW)	β	η_{NG} (%)
1600	6,71	10,16	50,80	20,00	66,18	10,06	21,71	0,211	58,1
1600	8,75	13,76	68,80	20,00	63,88	13,12	13,29	0,331	55,0
1600	13,23	13,80	69,00	20,00	95,83	19,84	19,80	0,334	55,2
1600	16,09	15,67	78,35	20,00	102,71	24,13	14,82	0,413	53,6
1800	9,34	11,37	56,85	20,00	82,15	14,01	23,63	0,248	57,2
1800	13,99	16,13	80,65	20,00	86,74	20,98	11,19	0,435	53,2
1800	19,03	16,36	81,80	20,00	116,39	28,54	14,12	0,446	53,0
2560	13,68	10,90	54,50	20,00	125.52	20,52	38,07	0,233	57,6
2560	18,08	12,38	61,90	20,00	146.08	27,12	37,10	0,282	56,3
2560	23,23	13,97	69,85	20,00	166.60	34,84	33,48	0,340	54,9
2560	25,25	13,83	69.15	20.00	182.57	37,87	37,54	0,334	55,1

APÊNDICE 4 - DISCUSSÃO DOS ÍNDICES TÉCNICOS DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EMPREGANDO GASEIFICADORES

Os gaseificadores, como já citado neste trabalho, podem ser utilizados na conversão de biomassa para geração de energia elétrica em localidades onde o atendimento através da rede de distribuição rural não seja competitivo.

O conceito de localidade isolada, segundo Leroy [46], não é exatamente definido, variando sua classificação de acordo com indicadores tais como número de residências, existência de rua aberta, de igreja, venda, etc. Dentro dessa variação é extremamente difícil estimar-se o nº de localidades ainda não eletrificadas em uma região. Mais difícil ainda é definir-se, dentro deste total, aquelas cuja eletrificação através de gasogênios seria economicamente competitiva e/ou socialmente adequadas, considerando-se como tal aquelas onde a instalação desses equipamentos poderia gerar empregos, fixar o homem, estimular a produção, etc.

Para o caso das propriedades rurais, as estatísticas são conhecidas e apresentadas na tabela seguinte, referentes a 1986.

TABELA A5 - PERCENTUAL DE PROPRIEDADES RURAIS ELETRIFICADAS, POR REGIÕES

REGIÕES	NÚMERO DE PROPRIEDADES RURAIS	PROPRIEDADES RURAIS ELETRIFICADAS	% ELETRIFICADAS
Sul	1.146.578	501.689	43,7
Sudeste	892.532	276.529	31,0
Nordeste	2.450.700	95.155	3,9
Centro-Oeste	267.980	22.824	8,5
Norte	409.787	4.164	1,0
TOTAL	5.167.577	900.361	17,4

Fonte : Guia Rural [1].

Como se verifica, nestes dados, as propriedades rurais, nas regiões Norte e Nordeste, se apresentam com baixíssimos índices de eletrificação rural, o que representa um grande espaço para fontes não convencionais, já que a adoção de métodos convencionais de eletrificação através de linhas de distribuição apresenta dificuldades econômicas e mesmo de ordem técnica dado ao baixo fator de adensamento.

Além desses índices, outra variável importante que deve ser considerada quando se analisa o mercado potencial para esta tecnologia, é a distribuição de cargas na eletrificação rural. Nos estados onde as propriedades são na maioria menores que 10 hectares, boa parte das cargas situam-se abaixo de 15KVa [46]. Dessa forma existe a necessidade de desenvolvimento de gasogênios com faixa de potência mais compatíveis, já que os menores encontrados são de 30kW.

No caso do gasogênio Geniogáz de 30kW, estudado nesse trabalho, estima-se a seguir quantos hectares de florestas deveriam ser plantados para seu abastecimento de forma sustentada, quando sujeito a uma determinada configuração de carga. Para isso é necessário adotar o fator de carga, o que se constitui em um primeiro obstáculo, uma vez que é variável em função das características de suprimento. No entanto, diversas avaliações no contexto rural brasileiro tem mostrado que o fator de carga típico situa-se entre 3 a 8%.

Para as estimativas aqui apresentadas considerou-se um fator de carga de 5%, densidade da lenha de 600kg/m^3st [13], consumo específico de carvão = 0,914kg/kWh (medido experimentalmente neste trabalho) e rendimento da carbonização igual a 50%

A Energia anual requerida, EA, em kWh, é dada por :

$$EA = FC \cdot 8760 \cdot P'$$

onde : FC - fator de carga [5%]

P' - potência fornecida pelo conjunto [30kW]

Considerando-se os valores adotados, tem-se : EA = 13140kWh. Este valor de Energia requerida representa 12,01 toneladas anuais de carvão vegetal, ou seja, 44,48 toneladas de lenha, conforme já analisado no Apêndice 1.

A seguir se apresenta o número de hectares a ser plan

tado considerando diferentes rendimentos florestais em faixas usuais para o cultivo de eucalipto.

TABELA A6 - ÁREA A SER PLANTADA PARA VÁRIOS RENDIMENTOS FLORESTAIS

RENDIMENTO FLORESTAL (m^3/ha/ano)	ÁREA A SER PLANTADA (ha)	COMENTÁRIOS
10,5	7,06	Média de florestas plantadas de forma inadequada
21	3,53	Dados de regiões de solo pobre, bem manejadas.
70	1,06	Melhores valores registrados no Espírito Santo

Chama a atenção a reduzida área requerida, sobretudo quando se adotam altas produtividades florestais. Observe-se, no entanto, que efetivamente o fator de carga afeta este parâmetro de forma linear nesta abordagem, ou seja, um fator de carga de 10% corresponde a uma área florestal duas vezes maior. Da mesma forma, a potência instalada também afeta diretamente esta área.

O uso de gasogênios pode causar impactos positivos quando se consideram os aspectos sociais, ambientais e mesmo tecnológicos. A geração de empregos que pode ser proporcionada por indústrias de equipamentos, pelo incremento à atividade florestal e de carvoejamento, tenderia a fixar o homem em sua região de origem, contendo os fluxos migratórios. Os eventuais problemas operacionais e de durabilidade dos materiais pode induzir o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias de equipamentos, materiais e combustíveis.

Por outro lado é preciso reconhecer a necessidade de um adequado e cuidadoso planejamento, sobretudo quanto ao uso dos recursos florestais, devido a possibilidade de danos ecológi

cos por sobre exploração, como erosão acentuada e empobrecimento do solo.

APÊNDICE 5 - MANUTENÇÃO DO SISTEMA

Os aspectos de manutenção do Gasogênio Geniogáz foram observados, como já observado, no decorrer dos estudos experimentais e referem-se, em sua maior parte à limpeza. A seguir se apresentam as recomendações de manutenção.

A. MANUTENÇÃO DO REATOR

O reator deve ser limpo após cerca de 50 horas de funcionamento, dependendo da qualidade do carvão e da frequência de limpeza do cinzeiro.

Deve-se abrir a tampa de abastecimento e retirar o resto do carvão pelo cinzeiro, verificando o estado do combustível e as possíveis escórias aderidas ao redor da cetilha, que devem ser eliminadas (caso de utilização de carvão úmido de má qualidade ou de utilização de carvão com muitos finos).

Um sintoma característico do momento de fazer a limpeza do reator é a formação de bolsas de ar na zona de reação por causa da obstrução da passagem de gás, podendo haver até mesmo uma contra-pressão no momento da formação do gás expulsando cinzas e pó pela cetilha.

Deve-se verificar a junta de silicone. Um sintoma de deterioração da borracha é a presença de fumaça na junta durante o funcionamento.

B. MANUTENÇÃO DO CINZEIRO

O cinzeiro deve ser limpo com o gasogênio apagado e de 10 em 10 horas ou depois de um dia de operação. Nesta operação escória e cinzas são removidas com a pá apropriada e reduz a necessidade de manutenção no reator. Verificar junta de cortiça.

C. MANUTENÇÃO DAS CAIXAS DE PÓ

Se o carvão utilizado for bem peneirado, a manutenção deve ser feita de 30 em 30 dias, porém a depender da qualidade do carvão este tempo pode ser menor.

Deve-se soltar as caixas, limpar esgotando o pó e fixá-los de volta.

Um sintoma característico do momento limite de limpeza das caixas de pó é quando ao acionar o ventilador observar-se a presença de pó arrastado pelo ar.

D. MANUTENÇÃO NO LAVADOR DE GÁS

A cada 30 horas de trabalho deve-se limpar a tela, a espuma e esfregar o lavador por dentro com uma pequena escova de fibra, removendo o alcatrão grudado nas paredes.

A água do lavador deve ser trocada de 10 em 10 horas de funcionamento, eliminando o alcatrão contido nela.

E. MANUTENÇÃO NOS FILTROS DE PAPEL

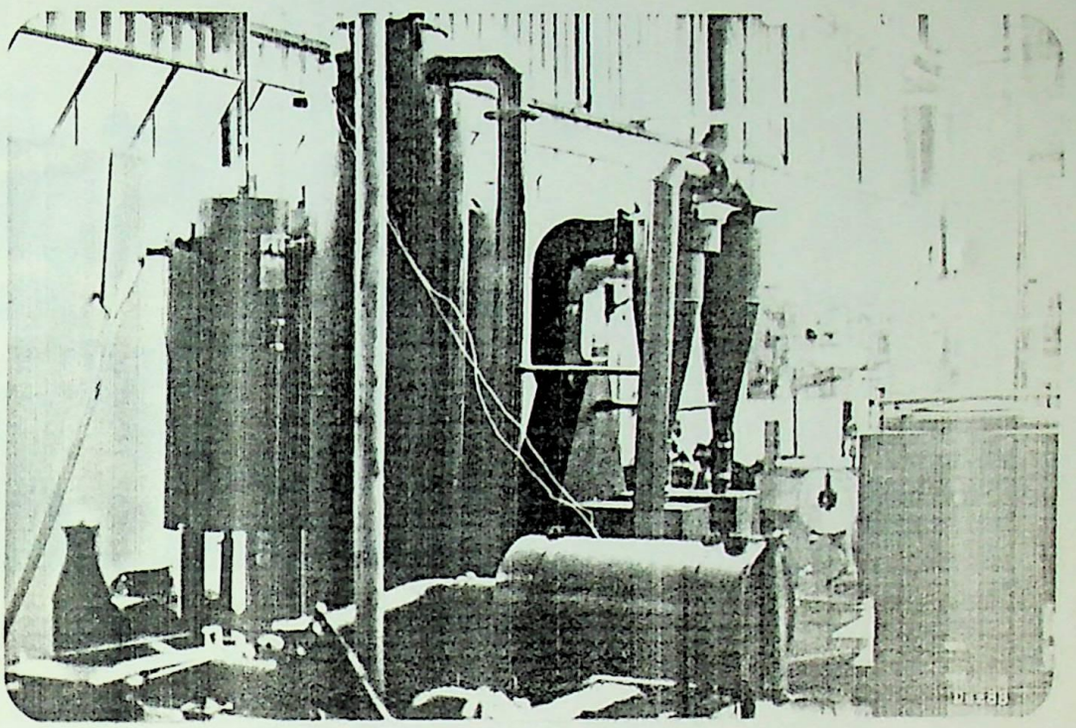
Retirar para secar de 15 em 15 dias em caso de funcionamento diário. Sempre que o gasogênio ficar parado evitar deixá-los dentro dos tambores para não haver oxidação pela presença de vapor d'água retido. O ideal seria a utilização de ar comprimido para limpeza.

Para aplicação no meio rural pode-se utilizar aglomerado de esponja vegetal em substituição aos filtros de papel, evitando-se o custo de filtros novos, já que sua vida útil é reduzida. Esta sugestão foi efetuada por Mammana [48].

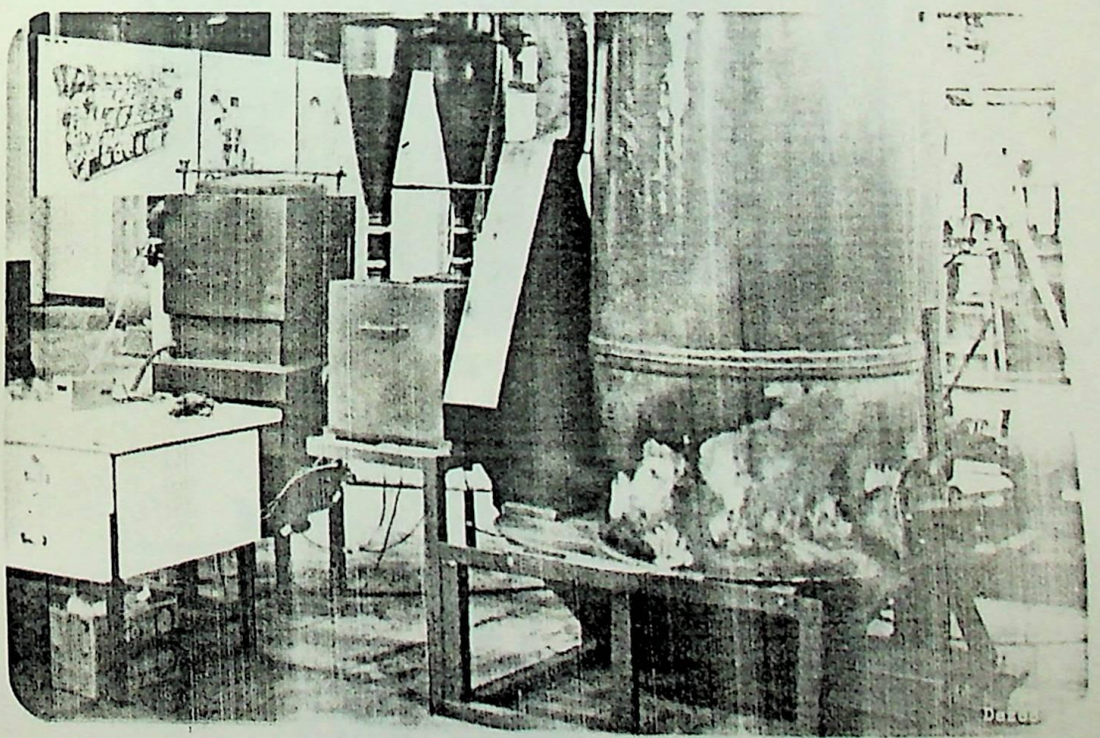
F. GASOGÊNIO (GERAL)

Sem uma periodicidade exata recomenda-se verificar, sempre que possível o estado das juntas, braçadeiras, controles, borboletas, bóias e tubulações.

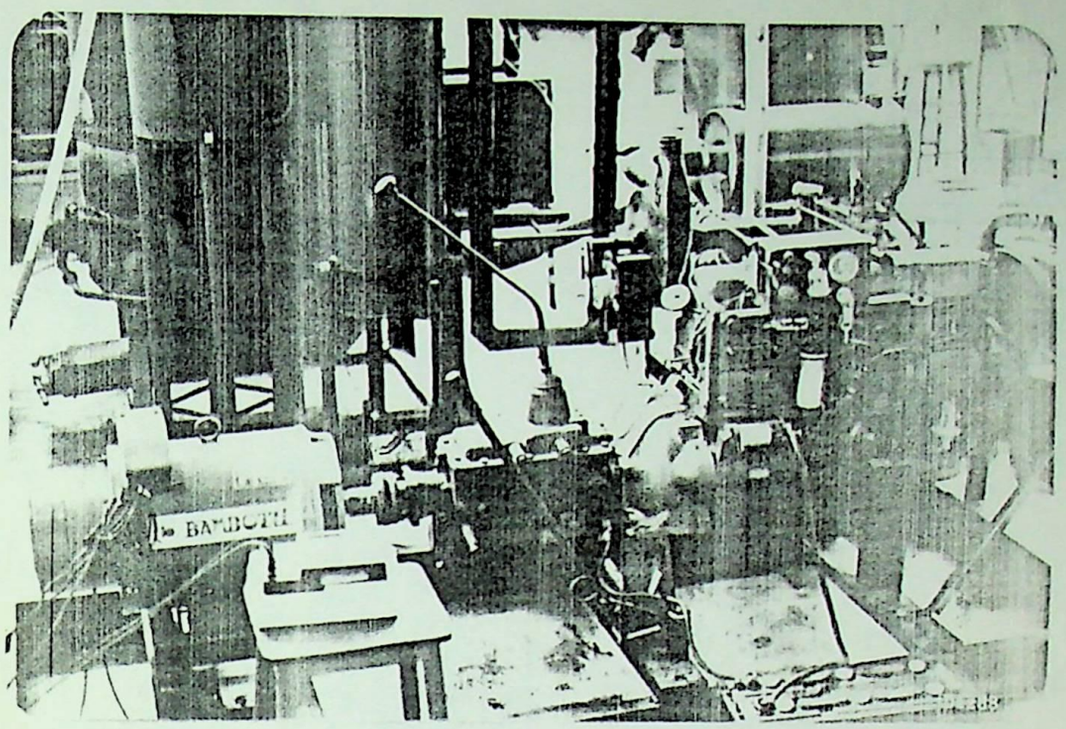
APÊNDICE 6 - FOTOS



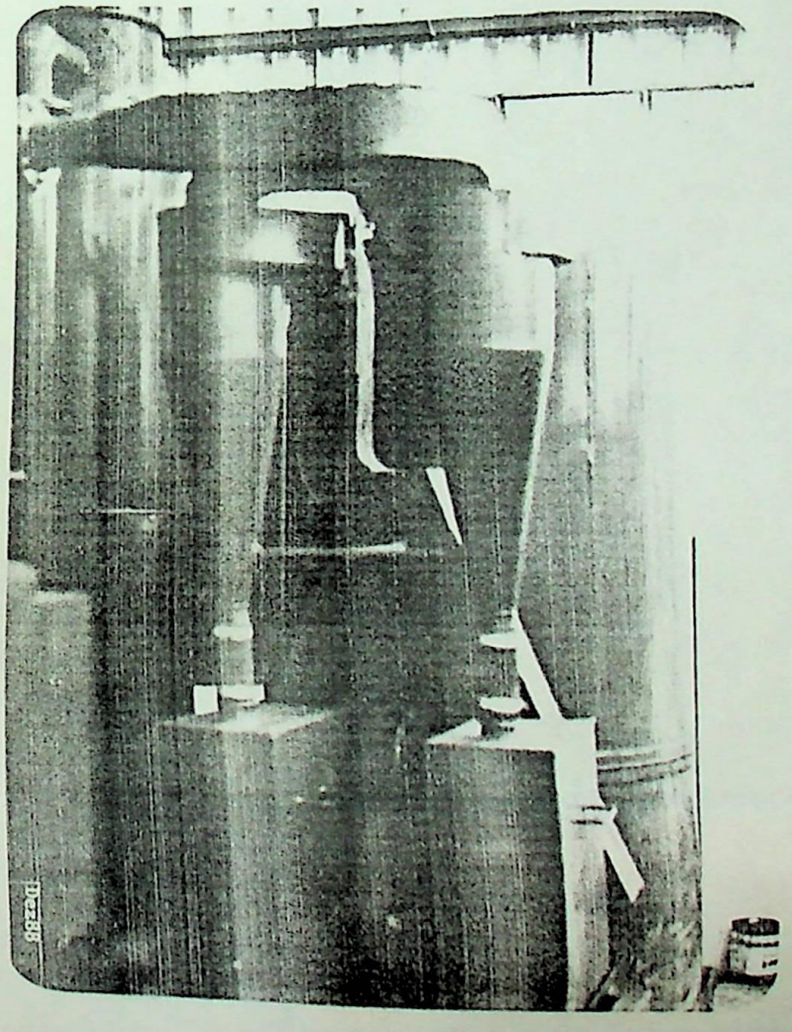
a) VISTA GERAL DO GASOGÊNIO



b) SISTEMA DE FILTRAGEM



e) VISTA DO MOTOR CHEVROLET BRASIL



f) GEOMETRIA DE SAÍDA E CICLONES

DATA 15 DEZ / 19 89
PROC
PED. PPG.
LIV.
Cz$ DOACAO

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200605
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA