

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

ESTUDOS SOBRE A GASEIFICAÇÃO DA MADEIRA
COM AR EM GASEIFICADOR CO-CORRENTE

MÁRCIA MARIA LIMA DUARTE
Engenheira Química

ORIENTADOR:

Prof. Dr. João A.F.R. Pereira

Tese Submetida à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de Campinas-UNICAMP como parte dos requisitos necessários para obtenção do Grau de MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA.

Campinas - SP - Brasil

ABRIL - 1983

A meus pais,
Marcelo e
Zaïde (em memória).

A meu esposo,
Adrião.

A meu filho,
José Marcelo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram e tornaram possível a realização do presente trabalho.

Ao Prof. Dr. João Alexandre Ferreira da Rocha Pereira pela orientação e apoio prestados.

Ao M.Sc. Zsolt Tamas Makray um agradecimento sincero pelo grande interesse e empenho com que se dedicou na colaboração do presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Mário de Jesus Mendes pelo empréstimo do integrador utilizado nas análises.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte-Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia Química.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa concedida.

Ao Departamento de Engenharia Química - UNICAMP.

À Sra. Odette Ropello pelo trabalho de datilografia.

Ao José Elias pela elaboração dos desenhos.

Um agradecimento muito especial ao meu esposo, Adrião, pela compreensão, paciência e incentivo que sempre me dispensou durante todo o curso de Mestrado.

4.2. Procedimento Experimental	50
4.2.1. Determinação da umidade da madeira	50
4.2.2. Processo de gaseificação	50
4.2.3. Controle do fluxo de ar	50
4.2.4. Análise cromatográfica	51
5. RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO	54
5.1. Testes de gaseificação. Resultados experimentais	54
5.2. Balanços de massa e de energia	54
a) Balanços de massa	54
b) Balanços de energia	56
5.3. Taxa de gaseificação de madeira	59
5.4. Variação da composição do gás com o tempo após o início do teste	66
5.5. Variação da temperatura no interior do gaseificador em função do tempo	73
5.6. Influência da umidade da madeira na composição média do gás	77
5.7. Efeito da umidade da madeira no poder calorífico inferior calculado do gás	82
5.8. Efeito da umidade da madeira na temperatura adiabática de chama	84
5.9. Efeito da umidade da madeira na eficiência de gaseificação e na entalpia do gás	86
5.10. Influência da vazão de ar no poder calorífico inferior e na composição média do gás e na eficiência de gaseificação	88

6. MODELAGEM TERMODINÂMICA DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO	92
7. CONCLUSÕES	109
8. SUGESTÕES	112
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS	114
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS E NÃO CITADAS	118
APÊNDICE A. Cálculos de calibração da placa de orifício de entrada	120
APÊNDICE B. Cálculo de calibração do cromatógrafo	125
APÊNDICE C. Resultados dos testes de gaseificação	128
APÊNDICE D. Resultados dos testes de gaseificação	145
APÊNDICE E. Resultados dos balanços de massa e de ener <u>g</u> gia. Programa para realização dos cálculos	152
APÊNDICE F. Resultados do modelo de equilíbrio termodi <u>n</u> âmico na gaseificação de madeira	170

RESUMO

O presente trabalho apresenta estudos realizados sobre gaseificação de madeira em gaseificador co-corrente. Os efeitos da umidade da madeira, vazão de agente de gaseificação (ar) sobre a taxa de gaseificação e características do gás produzido são analisados detalhadamente. A umidade da madeira variou de 10 a 40% em peso e a vazão do agente de gaseificação de 10 a 30 Kg ar/hora.

A composição do gás produzido foi observada durante cada teste a fim de se analisar sua variação no tempo em virtude de o gaseificador operar em regime de batelada. Medidas de temperatura também foram realizadas em diferentes estágios do processo de gaseificação.

Os resultados apresentados permitem concluir que a composição de gás é extremamente afetada pela umidade da madeira apresentando um valor máximo de hidrogênio para cerca de 25% de umidade, embora o poder calorífico inferior decresça sempre com o aumento da umidade. A vazão de agente de gaseificação tem um efeito mínimo sobre a qualidade de gás embora a taxa de gaseificação aumente com a vazão para umidade constante. O presente trabalho analisa também o efeito simultâneo da umidade e da taxa de gaseificação.

1. INTRODUÇÃO

Os combustíveis primários podem ser queimados direta ou indiretamente. A queima indireta envolve a conversão do combustível em outra forma mais conveniente de utilização. O carvão, por exemplo, pode ser convertido em gás e em coque, os quais são usados como combustível.

Muitas experiências na produção e uso do gás de carvão foram realizadas no século XVIII. William Murdock, em 1792, estudou a produção do gás a partir de vários tipos de carvão e sob diferentes condições.

A primeira companhia de gás de carvão para iluminação começou em Londres, em 1812.

A gaseificação de combustíveis sólidos, um processo bastante antigo, é realizada com a finalidade de obter um combustível gasoso, com melhor eficiência e controle de combustão, melhores características de transporte e, também que possa ser utilizado como matéria-prima para outros processos.

A conversão da madeira em gases, que é manipulado mais facilmente, é de grande importância na obtenção de transporte de energia mais barato e para tornar possível a utilização da energia da madeira na forma de combustível gasoso.

Os combustíveis gasosos apresentam as seguintes vantagens sobre os combustíveis sólidos: são facilmente queimados, apresentam menores problemas de poluição e possuem a combustão facilmente controlada e automatizada, característica essa muito importante em processos industriais.

A produção de gás na Europa foi consideravelmente mu dada a partir de 1940, devido à descoberta do gás natural, e a importância do processo de gaseificação foi reduzida sensi velmente.

No presente século devido à escassez de petróleo, o processo de gaseificação foi desenvolvido principalmente antes e durante a segunda guerra mundial. Foram utilizados pequenos gaseificadores para fins automotivos usando a madeira ou o carvão vegetal como combustível.

A partir da década de setenta, devido à crise energética, ressurgiu o interesse na gaseificação. Isto fez com que as pesquisas fossem orientadas para a gaseificação de combustíveis sólidos. A atual crise energética renovou o interesse na gaseificação do carvão e de outros combustíveis sólidos e, conseqüentemente, proporcionou o desenvolvimento dos gaseificadores já conhecidos. Fez também com que novos tipos fossem desenvolvidos.

Embora a gaseificação seja um processo antigo, só re centemente têm sido realizados trabalhos de engenharia de reação química para este processo. Isto devido as propriedades física e química do combustível sólido serem complexas.

A gaseificação é um processo químico complexo. Esta é a razão porque o conhecimento do projeto e operação do gaseificador foi baseado largamente em investigações empíricas, usando madeira como combustível.

Para o presente trabalho foi escolhido o gaseifica dor de leito móvel co-corrente devido à simplicidade de cons-

trução e operação e por produzir um gás livre de alcatrão. Apesar da intensa utilização do carvão no passado, para gaseificação, as mudanças devidas à crise energética prevêem que a biomassa será uma das fontes mais importantes de combustível para gaseificação. A produção de gás de médio poder calorífico a partir da madeira é um processo importante na sua utilização. A madeira possui um alto teor de cinzas e de enxofre. Seu poder calorífico porém, é baixo comparado com o do carvão. A pirólise da biomassa ocorre a baixas temperaturas (300-450°C) e é extremamente rápida a temperaturas mais altas. O carvão de biomassa tem alta reatividade com o vapor, ou seja, a biomassa pode ser gaseificada a baixas temperaturas (650-800°C).

No Brasil, a escassez de combustíveis minerais, as condições climáticas favoráveis e a disponibilidade de biomassa tornam viável sua utilização. Por esta razão e pelas que foram apresentadas anteriormente, a madeira foi escolhida como combustível no presente trabalho. Porém os estudos realizados até então utilizaram o carvão mineral, mas a maioria dos resultados publicados para o caso do carvão mineral é aplicável ao carvão vegetal. Como agente de gaseificação foi empregado o ar devido à gaseificação com tal comburente ser um processo mais simples e de menor custo, apesar de produzir um gás de baixo poder calorífico.

Nos seguintes capítulos são apresentados os objetivos do presente trabalho - capítulo II - assim como uma análise da literatura - capítulo III. No capítulo IV serão descritos os equipamentos e procedimentos empregados na realização da parte experimental do trabalho, e no capítulo V serão

apresentados os resultados obtidos juntamente com uma análise e discussão dos mesmos. Uma modelagem termodinâmica do comportamento do processo de gaseificação está no capítulo VI. Por fim serão apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

2. OBJETIVOS

De acordo com resultados publicados sobre gaseificação de madeira, e levando em conta as variáveis que influem na composição do gás produzido, no presente trabalho foram estudados a influência da umidade da madeira e o efeito da vazão de ar na composição do gás. Também foram estudados os perfis de temperatura, visando um melhor conhecimento do projeto e operação do gaseificador co-corrente usando madeira de eucalipto como combustível e o ar como agente de gaseificação para se obter um gás com poder calorífico mais elevado.

O presente trabalho visa os seguintes objetivos:

- 2.1 - Analisar a influência da umidade da madeira na composição dos gases.

Utilizar madeira de eucalipto com diversas umidades variando entre 10 e 40%, e analisar as variações da composição do gás combustível com a umidade da madeira mantendo a vazão de ar aproximadamente constante.

- 2.2 - Analisar a influência da vazão de ar na composição dos gases.

Utilizar madeira de eucalipto com umidade constante e analisar as variações da composição do gás combustível obtido, variando a vazão de ar na faixa de 10 a 30 Kg/h.

- 2.3 - Analisar a temperatura no interior do gaseificador em função do tempo.

Registrar a variação da temperatura através de um termopar fixado na garganta do gaseificador e assim verificar o tempo necessário para a estabilização da temperatura.

2.4 - Analisar a variação da composição do gás em função do tempo.

Verificar como varia a composição do gás produzido durante o processo de gaseificação, através de análise cromatográfica.

2.5 - Analisar o balanço de massa da composição média do gás.

Apresentar e analisar o balanço de massa para a composição média do gás combustível produzido em cada experimento e a partir desses resultados calcular o balanço energético e a composição dos gases em base úmida.

2.5 - Analisar os resultados obtidos.

Utilizar um modelo termodinâmico do comportamento do gaseificador e analisar os desvios entre os resultados experimentais e os calculados.

3. GASEIFICAÇÃO E GASEIFICADORES. ANÁLISE

No presente capítulo será feita uma análise, baseada na literatura, da gaseificação e dos tipos de gaseificadores existentes, assim como dos diversos tipos de combustíveis que são utilizados no processo de gaseificação, e da influência da umidade na composição dos gases produzidos.

Será dado um enfoque maior na gaseificação de madeira em gaseificador de leito móvel co-corrente utilizando-se o ar como agente de gaseificação em processos autotérmicos a baixa pressão.

3.1 - Gaseificação

A gaseificação é um processo térmico para converter a matéria orgânica em gás combustível usando um agente de gaseificação. As transformações termoquímicas da matéria orgânica compreendem a secagem, a pirólise, a oxidação e a redução. As reações básicas da gaseificação e o esquema de um gaseificador co-corrente são apresentados na Figura 3.1. Os agentes de gaseificação mais utilizados são: o ar, ar com oxigênio, oxigênio puro, oxigênio com vapor ou ar com vapor e hidrogênio (11). Os principais componentes do gás combustível obtido são: CO , CO_2 , H_2 e dependendo das condições de operação, hidrocarbonetos leves (metano, etc.), nitrogênio e vapor de água em diferentes proporções. A qualidade final do gás produzido depende da taxa de redução de CO_2 para CO , além de outros fatores. A taxa de redução de CO_2 é função do tamanho das partículas de combustível, da sua reatividade e da vazão de ar. Outros fatores que afetam a composição dos gases são:

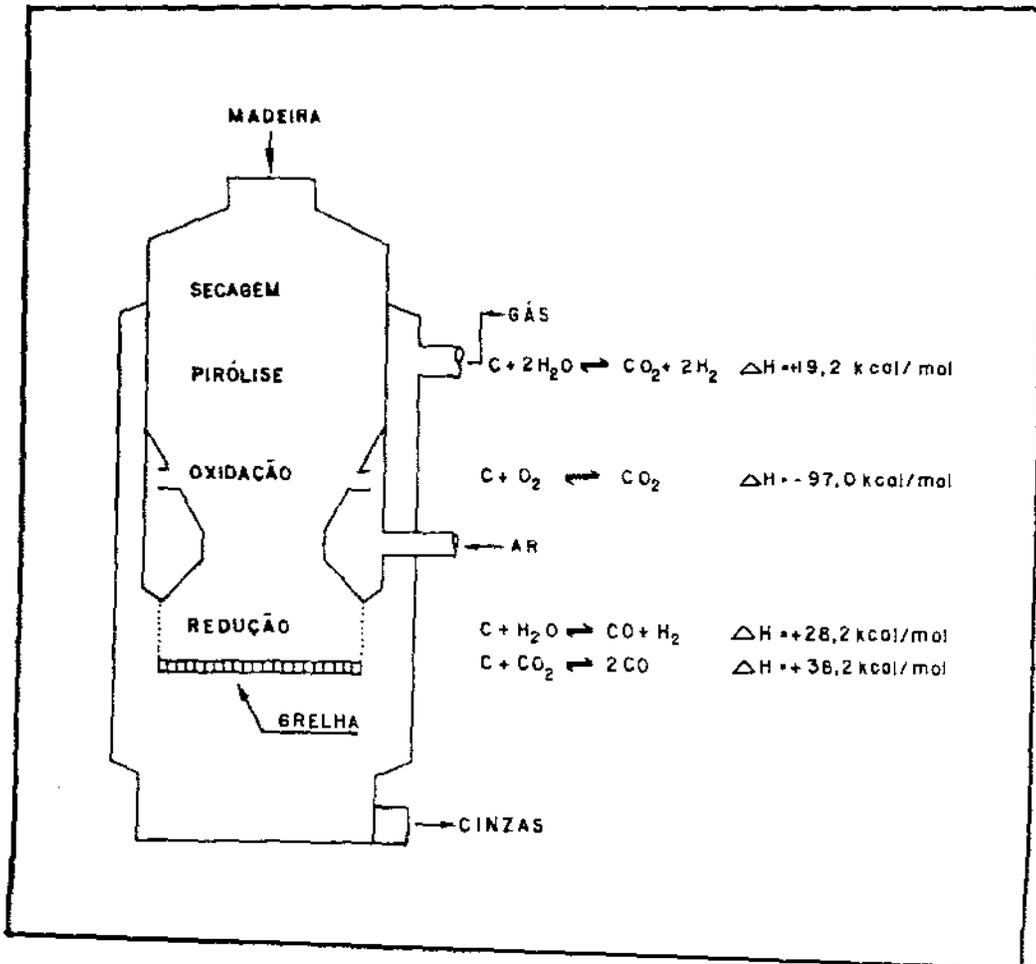


FIGURA 3.1 - Gaseificador co-corrente e reações de gaseificação

nos preciso quando as condições de processo variam devido ao teor de umidade no combustível.

O modelo de Desrosiers (8), que utiliza a energia livre de Gibbs, é baseado no algoritmo desenvolvido por Cruise (7), no qual são feitas as seguintes considerações: todos os produtos gasosos comportam-se idealmente e todos os condensados são tratados como fase pura. O usuário pode especificar a temperatura ou permitir um cálculo iterativo da temperatura adiabática de chama. Neste caso é necessário fornecer o calor de formação dos reagentes. Em cada cálculo foram consideradas como possíveis produtos as seguintes espécies: H, H₂, N, N₂, NH₃, NO, NO₂, CN, HCN, O, O₂, H₂O, OH, C, CO₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, CH₂O, C_s. O único sólido considerado foi o carbono (como grafite). Para todas as condições investigadas, os únicos produtos presentes em quantidade significativa (> 10⁻⁴ % molar) foram C_{sólido}, H₂, H₂O, CO, CO₂, CH₄ e N₂. O acetileno, etileno e hidrocarbonetos mais pesados (óleo e alcatrão), que são produzidos por muitos gaseificadores, são produtos de não-equilíbrio. Os resultados são apresentados através de gráficos, analisados separadamente, que relaciona o efeito de uma variável com a razão equivalente. Esta é definida como a razão entre o oxidante e o combustível dividida pela razão estequiométrica, ou seja, para completa combustão do combustível para dióxido de carbono e água, a razão equivalente deve ser maior ou igual a 1.0.

Verificou-se também que nos modelos apresentados, que usam o tradicional método das constantes de equilíbrio, obtém-se um sistema de equações não linear de resolução altamente

tipo de gaseificador, agente de gaseificação (ar , oxigênio) usado, uso de vapor, fonte de energia para gaseificação, tempo de retenção da carga, combustível utilizado e temperatura de operação.

Os gases produzidos podem ser utilizados em caldeiras, fornos, secadores, motores de combustão interna e na produção de gás de síntese para metanol, amônia e hidrocarbonetos (18).

Os fatores essenciais no processo de sistemas de gaseificação são:

- temperatura e pressão na câmara de reação
- taxas de reação
- difusão dos reagentes e dos gases produzidos
- relação ar/vapor ou oxigênio/vapor injetados
- fluxos da matéria orgânica e dos gases reagentes, se co-corrente ou contra-corrente
- tipo do combustível utilizado

É muito importante levar em consideração o estabelecimento rápido do equilíbrio e por esta razão são preferidos os combustíveis de alta reatividade. O grau de obtenção do equilíbrio depende da taxa de reação, da temperatura, do tempo de residência e dos métodos empregados no contato gás-sólido no equipamento de gaseificação.

Os processos de gaseificação podem ser: alotérmicos, quando o processo necessita de uma fonte de energia externa, ou autotérmico, baseado no fato de que a energia para as reações endotérmicas do carbono com vapor de água ou com dióxido de carbono é fornecida pelas reações exotérmicas com ar ou

com oxigênio e as que produzem o metano ($C + 2 H_2 \rightleftharpoons CH_4$, $\Delta H = - 21.2 \text{ Kcal/mol}$). O processo de gaseificação sem combustão pode receber energia de várias maneiras, ou seja, aquecimento por recirculação de sólidos. É o caso do gaseificador de leito fluidizado Battelle-Columbus (23) que se encontra em fase de desenvolvimento. O reator pode ser aquecido externamente pela combustão de gases produzidos na gaseificação. Outra maneira de receber energia externa é pela circulação de gases, além das energias solar, elétrica e nuclear. Todas estas formas de fornecimento externo de energia estão em fase de pesquisa.

Os processos autotérmicos podem ser classificados de acordo com o calor de combustão do gás produzido:

- gás de baixo poder calorífico ($4000-5000 \text{ KJ/m}^3$), obtido pela gaseificação com ar (ou ar + vapor)
- gás de médio poder calorífico ($\pm 10.000 \text{ KJ/m}^3$), obtido pela gaseificação com oxigênio (ou oxigênio + vapor)
- gás de alto poder calorífico ($\pm 40.000 \text{ KJ/m}^3$), obtido pela gaseificação com hidrogênio (hidrogaseificação (11))

Quando o gaseificador opera com uma pressão acima da atmosférica diz-se que é um processo de gaseificação a alta pressão, e a baixa pressão quando opera com pressões próximas à atmosférica.

Quanto ao tipo de leito classificam-se os processos de gaseificação de: leito móvel e em suspensão, podendo esta ser realizada em leito fluidizado ou em corrente fluida. Na

gaseificação em leito fluidizado as partículas do combustível são mantidas em suspensão por um fluido, e na gaseificação em corrente fluida as partículas são misturadas com o agente de gaseificação e a mistura injetada numa câmara onde ocorrem as reações.

Uma descrição mais detalhada dos gaseificadores tipo leito móvel e leito fluidizado será feita mais adiante.

Classificam-se ainda os processos de gaseificação quanto ao tipo de descarga de cinzas, que pode ser líquida ou sólida, dependendo da temperatura (ponto de fusão entre 900 e 1100°C).

3.2 - Gaseificadores

No estudo dos processos de gaseificação podem-se classificá-los quanto ao tipo de leito, ou seja, leito móvel, que podem ser contra-corrente, co-corrente e misto, leito fluidizado, em suspensão e outros.

O gaseificador de leito móvel misto é aquele que opera parte em contra-corrente e parte em co-corrente ou então com fluxo transversal.

3.2.1 - Gaseificador contra-corrente

No gaseificador em contra-corrente o combustível é introduzido no topo e os gases também são retirados pelo topo. Pela base são retiradas as cinzas, e o agente de gaseificação (ar ou oxigênio) é introduzido.

Apresenta como vantagem a secagem dos sólidos descen

dentos no gaseificador pelo gás quente ascendente, retirando assim a umidade da carga alimentada. Com isto pode-se utilizar matérias-primas com teores de umidade mais elevados. As zonas de pirólise, redução e oxidação operam sempre com material muito seco apresentando assim condições básicas para obter elevado rendimento.

Como desvantagem pode-se citar a dificuldade no controle das temperaturas que requer adição de vapor ao ar introduzido. Quando os gases vão além da zona de redução, eles entram em contato com a alimentação sólida mais fria e sua temperatura cai abaixo de 900 K. Estes gases são misturados com os produtos de pirólise de baixa temperatura, e mesmo em condições operacionais otimizadas, o gás que sai do gaseificador contém um elevado teor de produtos que não são característicos do equilíbrio estabelecido na zona de redução, ou seja, água, ácidos e alcatrão que são produtos de pirólise. Este fato diminui o rendimento em 20 a 25% (14) e requer consideráveis recursos para sua condensação e alimentação final com vistas à sua utilização e à proteção ambiental. Porém após remoção dos alcatrões e vapor de água, o gás produzido pelo gaseificador contra-corrente é de melhor qualidade, ou seja, possui maior poder calorífico que o gás produzido no gaseificador co-corrente.

No gaseificador tipo contra-corrente as cinzas podem ser removidas no estado sólido ou fundidas, dependendo do agente de gaseificação (12). A remoção de cinzas fundidas é mais difícil de operar.

Exemplos típicos deste tipo de gaseificador é o gaseificador Davy da Powergas Corp. (34) que utiliza ar como agente de gaseificação, e o sistema Purox da Union Carbide (23) que foi desenvolvido para gaseificação de resíduos urbanos utilizando o oxigênio como agente de gaseificação.

3.2.2 - Gaseificador co-corrente

O gaseificador tipo co-corrente tem sido usado para gaseificação de matéria vegetal, requerendo pouco tratamento dos gases produzidos. Este gaseificador é de simples construção e controle, produz gás livre de alcatrão para temperatura de saída mais elevada e apresenta a possibilidade de remoção de H_2S e/ou HCl pela adição de componentes contendo cálcio (12). O gás combustível assim obtido pode ser utilizado em caldeiras, fornos, turbinas e motores de combustão interna(3).

O desempenho do gaseificador co-corrente depende de sua geometria, das características do sólido e do agente de gaseificação usado.

Na utilização da biomassa os sistemas co-correntes são superiores aos contra-correntes nos seguintes aspectos:

- quantidade de efluentes líquidos após limpeza dos gases é menor, reduzindo a poluição.
- a eficiência de gaseificação é mais elevada para o gás quente (6).
- o gaseificador é mais compacto e portanto de custo menor.
- o gás quente pode ser utilizado diretamente como gás combustível em um grande número de aplicações industriais.

- como a quantidade de alcatrão formada é pequena, a limpeza e esfriamento do gás para utilização em sínteses é mais simples.

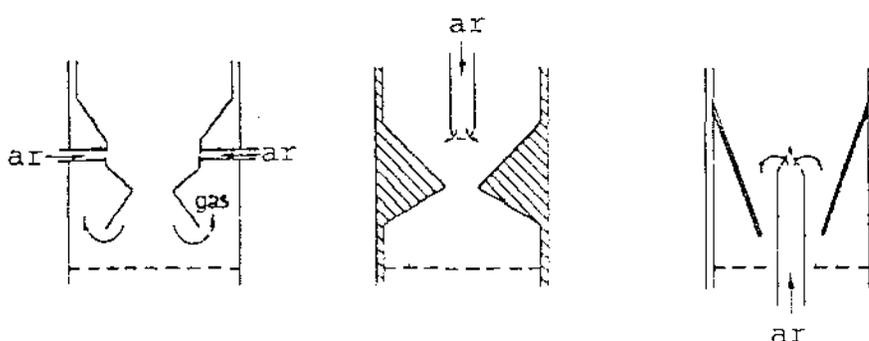
Devido o gaseificador de leito móvel co-corrente apresentar as vantagens e usos acima mencionados, e como pouco estudo tem sido realizado sobre sua operação, ele foi escolhido para ser estudado com mais detalhe no presente trabalho.

Neste tipo de gaseificador os gases quentes produzidos na zona de reação são removidos pela base assim também como as cinzas. A matéria-prima é introduzida no topo e o agente de gaseificação é injetado a uma altura pré-determinada do corpo do equipamento. Com isso o calor transmitido à parte superior do equipamento seca parcialmente a camada mais elevada da matéria-prima.

Em camadas mais baixas começa a pirólise do material sólido a 250°C. A pirólise é o conjunto de transformações sofridas pela biomassa obtendo-se um gás de poder calorífico médio, um óleo de pirólise de composição complexa (alcatrões e condensáveis leves e pesados) e carbono residual. Os processos de pirólise podem ser lentos ou rápidos dependendo da taxa de aquecimento como das dimensões da biomassa (2). Os produtos de pirólise são forçados a migrar no sentido descendente passando pela zona de oxidação.

Nesta zona o agente de gaseificação (ar) é introduzido. O gás procedente da zona de oxidação é quente devido as reações com oxigênio serem altamente exotérmicas. É na zona de oxidação que todos os produtos orgânicos condensáveis que

vêm da zona de pirólise são oxidados. Um controle na distribuição do agente de gaseificação e da geometria do gaseificador evita regiões frias na zona de oxidação, nas quais o alcatrão poderia passar sem craqueamento. Para tanto, é feito um estrangulamento na área da seção transversal normalmente chamada de garganta. Sem esta não é possível obter gases "limpos", livres de alcatrão (12). Este estrangulamento garante que todos os gases passem pela região quente. O controle na distribuição de ar pode ser feito das seguintes maneiras: introduzindo o ar em pontos na parede do gaseificador na seção transversal completa (Figura 3.2) ou usando um tubo central que introduza o ar pelo topo (Figura 3.3) ou pela base (Figura 3.4).



FIGURAS 3.2, 3.3 e 3.4 - Zona de oxidação com diferentes pontos de injeção de ar.

Os produtos da zona de oxidação são carvão e um gás quente rico em CO_2 e H_2O , o qual não contém alcatrão. Estes produtos atingem a zona de redução onde sofrem craqueamento térmico.

Na zona de redução o calor sensível dos gases e do carvão favorece cinética e termodinamicamente as reações endotérmicas de dióxido de carbono e vapor de água com o carbono. Consequentemente um gás combustível contendo hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrogênio, vapor de água e traços de metano é produzido.

Este tipo de gaseificador caracteriza-se por operar a temperaturas inferiores à fusão das cinzas da madeira, retirando-se estas em estado sólido.

O gaseificador tipo co-corrente apresenta como desvantagem a sua sensibilidade à umidade da matéria-prima que influi no rendimento e no poder calorífico inferior do gás. Para evitar este tipo de problema pode ser feita uma pré-secagem da matéria-prima e/ou um pré-aquecimento do ar. Outra desvantagem é a alta temperatura de saída dos gases.

As temperaturas desejáveis nas zonas do gaseificador são:

- zona de pirólise : $200-600^{\circ}\text{C}$
- zona de oxidação : $900-1200^{\circ}\text{C}$
- zona de redução : $900-650^{\circ}\text{C}$

Na Tabela 3.1 são apresentadas as temperaturas de saída do gás e o tamanho das partículas do combustível para os três tipos de gaseificador.

GASEIFICADOR	TEMPERATURA DE SAÍDA DO GÁS	TAMANHO DO MATERIAL ALIMENTADO
contra-corrente	250-400 ^o C	20-100 mm
co-corrente	400-500 ^o C	20-100 mm
leito fluidizado	600-700 ^o C	< 15 mm

TABELA 3.1 - Tipos de gaseificador com suas respectivas faixas de temperatura de saída do gás e de tamanho do material alimentado (14).

O gaseificador do leito móvel co-corrente é utilizado para gaseificar refugos agrícolas e florestais nos países em desenvolvimento, bem como rejeitos domésticos nos países desenvolvidos. Este último produz menos poluição do que a incineração e, talvez, seja mais econômico (16).

Exemplos típicos deste tipo de gaseificador são o gaseificador DAVIS, desenvolvido na Universidade da Califórnia (24) e o gaseificador Codegas desenvolvido pela CODETEC/TERMOQUIP (Campinas). Milhares de gaseificadores co-corrente de pequeno porte foram largamente usados em veículos automotivos durante a segunda guerra mundial.

3.2.3 --Gaseificador de leito fluidizado

O gaseificador de leito fluidizado consiste de um

reator vertical dotado de grelha no fundo, através do qual é soprado o ar de gaseificação. A matéria-prima é introduzida acima da grelha através de um dispositivo alimentador lateral. Ao entrar em contato com o sopro através da grelha, o material é fluidizado, formando um leito de material em suspensão na qual ocorrem as reações termoquímicas já citadas.

Cinzas e/ou carvão residual abandonam o reator por uma saída superior. O gás deixa o reator pelo topo, para em seguida atravessar um ciclone, no qual são retidos os particulados.

A intensa troca de energia e massa proporcionada pelo leito fluidizado estabelece uma temperatura uniforme em todo o leito, não se distinguindo zonas de secagem, pirólise, oxidação e redução como nos gaseificadores de leito móvel.

Com a temperatura acima de 650°C assegura-se a total decomposição das frações orgânicas mais leves. A 900°C também os últimos traços de alcatrão são decompostos.

O gaseificador de leito fluidizado é mais complexo de ser operado e requer uma redução no tamanho das partículas de combustível. Quanto à remoção das cinzas, a temperatura no gaseificador pode ser controlada facilmente e mantida abaixo do ponto de fusão das cinzas. Assim ela pode ser removida na estado sólido.

As vantagens deste tipo de gaseificador são: grande gama de tamanhos e ampla variedade de matérias primas, em particular biomassas pulverulentas, tais como serragem, palha de arroz, bagaço de cana e outras.

Apresenta como desvantagens o fato de não aceitar matérias primas aglomerantes e necessitar de instrumentação mais sofisticada em relação aos outros tipos de gaseificadores apresentados anteriormente, além de ter baixa flexibilidade operacional (pequeno "turn down ratio") e alto custo de investimento no soprador de ar/compressor.

Um exemplo de gaseificador de leito fluidizado é o reator "Thermex" (23) que usa o ar como agente de gaseificação e o gaseificador tipo Winkler (34) que utiliza o oxigênio.

3.2.4 - Gaseificador de leito em suspensão

O gaseificador de leito em suspensão requer a redução do material a partículas finas, que é um processo caro e de alto consumo energético, mas produz gases mais ou menos livre de alcatrão a altas temperaturas (aproximadamente 1500°C). Ele opera com pequenos tempos de residência (aproximadamente poucos segundos). As cinzas podem ser removidas como líquido.

Para gaseificação em pequena escala, este processo apresenta enorme desvantagem econômica.

O processo de gaseificação Koppers-Totzak (18), usa a técnica de gaseificação do carvão em suspensão, utilizando o oxigênio como agente de gaseificação.

3.2.5 - Outros tipos de gaseificadores

Ainda podem-se citar os gaseificadores com aquecimento externo como é o caso do gaseificador da Wright-Malta Corp. de Albany, N.Y. U.S.A. (23), que se encontra em fase de

pesquisa e desenvolvimento.

A gaseificação a elevadas pressões com vapor de água e baixa temperatura usando energia solar para promover as reações de pirólise, e gaseificação com vapor de água usando energia elétrica para aquecimento, são processos que acham-se em fase de pesquisa.

3.3 - Combustíveis

No processo de gaseificação podem ser utilizadas as seguintes matérias-primas: carvões mineral e vegetal e biomassa tal como lenha, resíduos de madeira e agrícolas, turfas, lixo, resinas, borracha e outras.

Em princípio, pode-se gaseificar a lenha diretamente, ou transformá-la inicialmente em carvão vegetal e posteriormente gaseificar este carvão. As duas alternativas são viáveis, apresentando cada uma vantagens e desvantagens que devem ser pesadas para cada projeto individualmente.

Na obtenção do carvão vegetal pelo processo de carbonização convencional, grande parte dos voláteis se desprende e se queima, ou é simplesmente arrastada para a atmosfera. Há também perdas de calor e grande formação de finos concorrendo para que a eficiência global do processo seja pequena.

Os rendimentos de produção de carvão vegetal a partir da lenha dependem do processo utilizado, oscilando entre 25-35%. Os 65-75% restantes constituem a fração de voláteis que se divide entre os gases não condensáveis e as frações orgânica e aquosa. O carvão poderia ser produzido de forma a se

recuperar os voláteis, mais isto acarretaria custos adicionais, tornando-o pouco viável. Utilizando o carvão vegetal no gaseificador co-corrente, será obtido um gás "pobre", úmido, com baixo teor de alcatrão e com teor de particulados elevados.

Ao se gaseificar o carvão, o gás produzido é praticamente isento de pirolenhosos, podendo portanto ser utilizado em veículos automotivos e inclusive, em processos de síntese (2).

Gaseificando-se a madeira diretamente, a secagem, pirólise, oxidação e redução se fazem em um único equipamento aumentando assim a eficiência global do processo e tornando os custos totais de construção e operação menores.

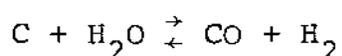
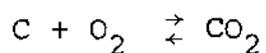
O poder calorífico da biomassa é em torno de 3500 a 5000 cal/g, enquanto que o do carvão é de aproximadamente 7400 cal/g.

O quadro a seguir apresenta outras comparações entre a biomassa e o carvão vegetal (29).

	Materiais voláteis	cinzas	enxofre	relação H ₂ /C
Biomassa	70-90%	2%	< 0.1%	1.5%
Carvão	- 20%	5-20%	4%	< 1.0%

Williams e Goss (32), utilizando um gaseificador co-corrente de laboratório para estudar as propriedades de várias biomassas concluíram que a madeira é um combustível ideal para usar no gaseificador devido ao seu alto poder calorífico e baixo teor de cinzas.

A composição da biomassa varia de espécie para espécie, mas em um mesmo vegetal varia muito pouco. A madeira seca contém, em valor médio, cerca de 7% de substâncias extratíveis, 43% de celulose, 28-35% de hemicelulose e 29-22% de lignina. O teor de voláteis na biomassa é de aproximadamente 80%, característica essa que facilita sua gaseificação. Outra facilidade de gaseificação da biomassa é o fato de ela conter oxigênio e água que são dois elementos importantes para as reações de gaseificação



A madeira quando utilizada como combustível de gaseificação apresenta vantagens sobre os combustíveis comuns por gerar pouca poluição, por existir em grande quantidade e por ser uma fonte inesgotável, caso seja constantemente renovada.

A umidade apresenta-se como uma desvantagem porque acarreta problemas de combustão. Outras desvantagens que a madeira possui com relação aos combustíveis convencionais dizem respeito à dificuldade de transporte, de armazenamento, devido ao volume que ocupa, e à queima, bem como à produção de cinzas e a não uniformidade no tamanho.

Goss e Coppock (9), observaram uma leve redução na eficiência térmica da caldeira quando o gás natural foi substituído pelo gás combustível gerado na gaseificação de madeira.

A biomassa quando coletada contém umidade elevada e impurezas, como certos materiais inorgânicos. Um pré-tratamento então faz-se necessário para remover os materiais inertes, subdividir em tamanhos pequenos e reduzir o teor de umidade.

Pelas razões anteriormente expostas, conclui-se que a biomassa é, sem dúvida, a fonte de energia que seguramente no futuro irá substituir os combustíveis minerais. No entanto, pesquisa e desenvolvimento deverão ser realizados para se atingir tal objetivo.

Para a escolha e tipo de combustível a ser utilizado devem ser levados em conta fatores importantes que afetam a gaseificação em leito móvel co-corrente, ou sejam, forma, tamanho, teor de umidade, como foi dito anteriormente, conteúdo de inerte do combustível empregado.

O tamanho da partícula determina o tempo necessário para completa desvolatilização. O material efetivamente gaseificado na zona de reação é o carvão vegetal gerado a partir da madeira alimentada. Esse carvão é sempre muito reativo e a gaseificação propriamente dita é um fenômeno bastante rápido. A pirólise, porém, é um processo lento que depende do tamanho da partícula. Assim, nos gaseificadores de leito móvel, é a pirólise que comanda o tempo de retenção da matéria-prima no equipamento para a formação do carvão vegetal.

A granulometria da matéria prima exerce influência na seleção do sistema de gaseificação em leito móvel (5), uma vez que materiais de granulometria pequena permite uma troca térmica eficiente entre os gases quentes produzidos na zona de reação, aumentando assim a capacidade de produção desse equipamento. Deve-se, entretanto, ter o cuidado de não ultrapassar certos limites, evitando assim o problema de compactação do carvão vegetal na zona de reação, ou mesmo a produção excessiva de finos que dificultariam o fluxo de gases.

Um outro aspecto a ser considerado é a uniformidade em tamanho da matéria-prima, caso contrário tem-se uma porosidade não uniforme favorecendo o aparecimento de canais preferenciais de fluxo, com formações de regiões quentes e frias. Caso a granulometria do material seja heterogênea, a distribuição de tamanhos em cada carga deverá ser razoavelmente constante.

O teor de umidade, além do tamanho e da forma da partícula, influi na aglomeração acima da garganta do gaseificador, pois com o aumento no teor de umidade, as partículas do combustível incham e tendem a se aderirem. Este fenômeno foi observado durante as experiências com partículas planas ou de forma irregular (16).

O teor de inertes e de cinzas deve ser levado em consideração, pois se o material inerte tiver alto ponto de fusão, nenhuma fusão ocorrerá durante a gaseificação. Caso o material inerte ou as cinzas tenham baixo ponto de fusão, será obtido um resíduo fundido, com dificuldades operacionais na região de redução.

Goss e Coppock (9) verificaram que a taxa de gaseificação afeta a qualidade e a eficiência de conversão do gás. Em suas experiências eles obtiveram uma boa gaseificação quando nem altas nem baixas taxas de gaseificação foram utilizadas.

3.4 - Influência da umidade da madeira

A umidade da madeira é um fator muito importante nos gaseificadores de leito móvel co-corrente.

Hos (16) estudou a gaseificação de madeira com vários teores de umidade. Os resultados por ele obtidos são apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6. De acordo com seus dados experimentais, a gaseificação da madeira com 46% de umidade ainda foi possível, porém os desvios de balanço de massa com relação ao carbono e ao hidrogênio foram considerados muito altos. Com esta umidade foi obtido um poder calorífico inferior médio do gás de 1812 KJ/Nm^3 em um gaseificador co-corrente com a capacidade de 5 Kg/h. Utilizando a madeira com 53% de umidade o processo de gaseificação foi muito instável, e o poder calorífico inferior variou entre 500 e 2500 KJ/Nm^3 . Porém com 60% de umidade não foi mais possível manter o processo de gaseificação. Hos (16) chegou à conclusão de que a madeira contendo acima de 42.5% em peso de umidade pode ser gaseificada satisfatoriamente em pequenos reatores de gaseificação. Para o reator usado por Hos (16) o limite para gaseificação de madeira, sem serem tomadas medidas adicionais, é de aproximadamente 50% em peso de umidade.

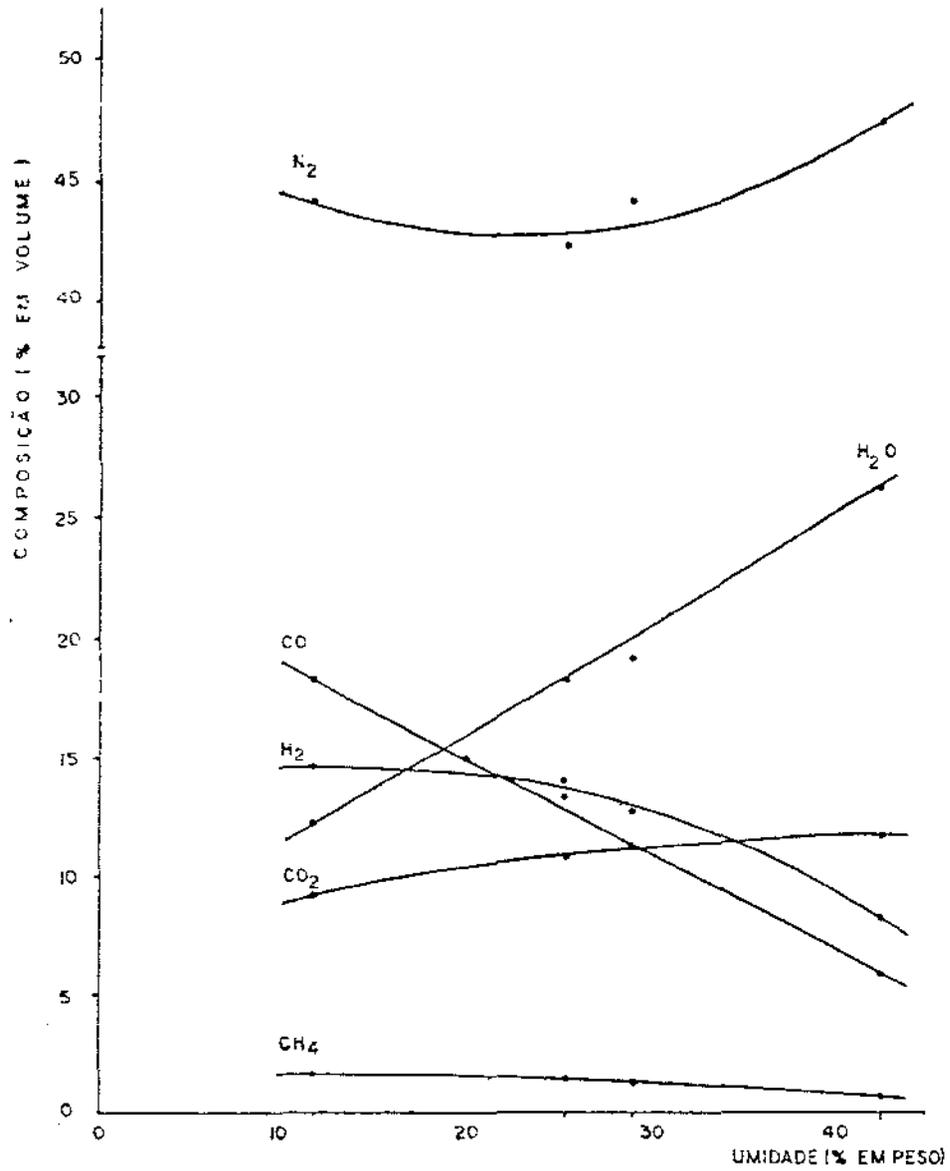


FIGURA 3.5 - Composição do gás (base úmida) em função da umidade da madeira.

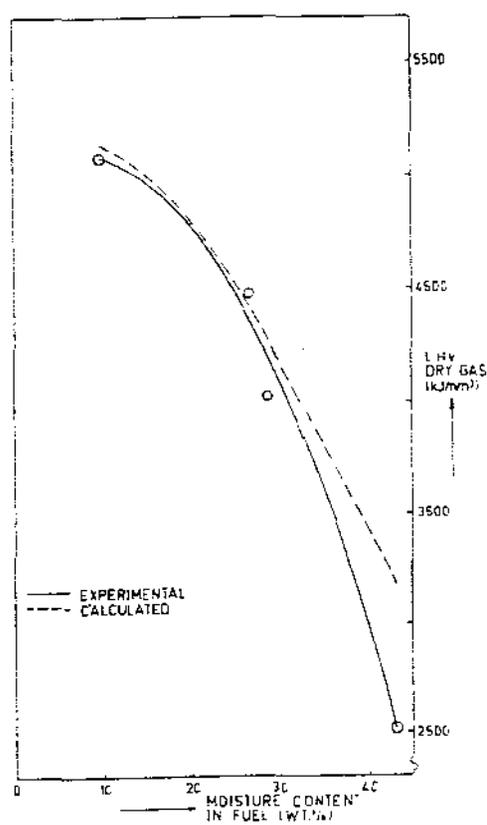


FIGURA 3.6 - Calor de combustão do gás em função do teor de umidade da madeira.

Assumpção (3) no seu trabalho sobre gaseificação direta de madeira apresenta a Tabela 3.2, tirada da literatura, que mostra a composição média e o poder calorífico do gás obtido em gaseificadores co-corrente utilizando madeira com teor de umidade entre 12 e 20% em volume.

Tabela 3.2 - Composição dos gases de gaseificadores

Componentes	% Volume (madeira 12 a 20% umidade)
CO ₂	10-15
C _n H _m	0.2-0.4
CO	17-32
H ₂	16-20
CH ₄	2-3
N ₂	45-50
Poder calorífico (Kcal/Nm ³)	1200-1400

Na Tabela 3.3 têm-se alguns resultados da composição calculada do gás de madeira para diferentes valores da umidade apresentados por Gunz (13).

Tabela 3.3 - Influência da umidade do combustível na composição do gás de gaseificadores co-corrente.

Componente (% vol.)	0%	10%	20%	30%
CO	21.0	16.5	12.0	6.8
CO ₂	10.0	12.7	15.3	17.9
H ₂	18.1	18.2	18.9	17.5
H ₂ O	4.6	6.7	9.4	13.7
CH ₄	0.7	1.1	1.7	2.7
N ₂	45.6	44.8	42.7	41.4
PCI(Kcal/Nm ³)	1162	1071	992	887
Eficiência(%)	77.8	76.4	75.4	72.9

De acordo com a Tabela 3.3 conclui-se que a umidade da madeira influi fortemente no poder calorífico inferior do gás produzido, portanto, faz-se necessário um fornecimento adicional de calor. Aumentando o teor de umidade, menos calor é utilizado para as reações de gaseificação e, consequentemente aumenta o teor de CO₂ e reduz o teor de CO no gás, obtendo-se assim um gás combustível de baixa qualidade.

A Figura 3.7 apresenta a influência da umidade da madeira na composição do gás, no poder calorífico inferior e no rendimento conforme determinação experimental em gaseificador co-corrente (27).

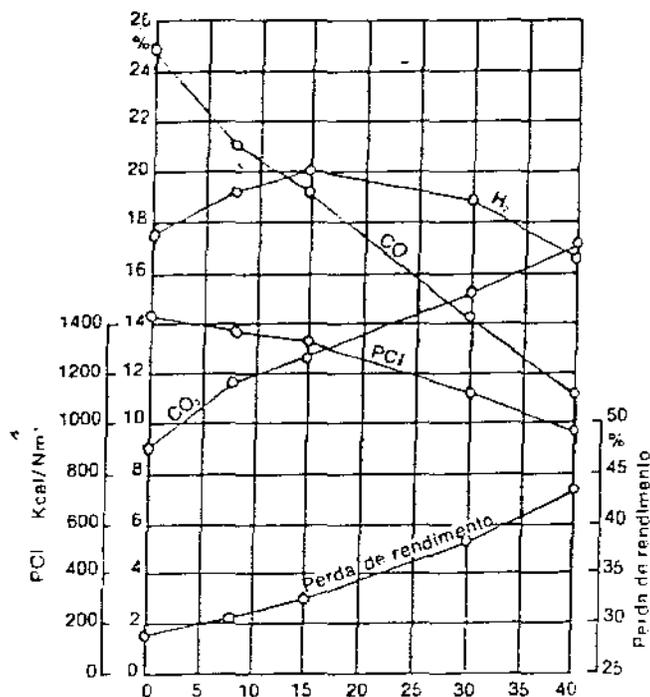


FIGURA 3.7 - Composição do gás, poder calorífico inferior e perda de rendimento em função da umidade de madeira.

Para a utilização de madeira com teor de umidade mais elevado em gaseificadores de leito móvel co-corrente, é necessário pré-aquecer o ar alimentado, seja com calor sensível do gás efluente, ou seja com outra fonte disponível. A Tabela 3.4 apresenta os resultados obtidos por Gumz (13) através de cálculos considerando o ar entrando a 20°C, com 80% de saturação em vapor d'água, e uma perda para o exterior de 7.5%.

Tabela 3.4 - Influência do pré-aquecimento do ar na gaseificação de madeira com 30% de água.

Componente (% vol.)	Sem pré- aquecimento	Ar pré-aquecido a 650°C
CO	7.91	23.0
CO ₂	20.71	13.9
H ₂	20.21	35.5
CH ₄	3.15	2.6
N ₂	48.02	25.0
PCI (Kcal/Nm ³)	1028	1829

Realizando a secagem da matéria-prima no próprio gaseificador, parte da energia dos gases será usada para a remoção do vapor. Ou seja, em termos energéticos não apresenta vantagens mas melhora a qualidade do gás, pois reduz a taxa de condensáveis no produto de pirólise.

Redding e Goss (24) estudaram o efeito da umidade da madeira na qualidade do gás utilizando um gaseificador co-corrente de laboratório, madeira como combustível e ar como agente de gaseificação. O gás produzido resfriado foi considerado saturado e portanto apenas a temperatura do gás neste ponto precisou ser medida para determinar o teor de água no gás resfriado pela carta psicrométrica. No cálculo do teor de água no gás foram desprezados a umidade do ar de entrada e o condensado coletado do gás produzido. Para determinar o teor

da água no gás foi necessário apenas o teor de umidade da madeira

$$MC_{V/V} = 0.570 MC_{WB} + 3.455 \quad (3.1)$$

onde: $MC_{V/V}$ é o teor de água no gás em % volumétrica

MC_{WB} é o teor de umidade (base seca) da madeira

Para obter o poder calorífico do gás seco Redding e Goss (24) usaram a composição média dos gases em % de volume e o calor de combustão dos componentes combustíveis individuais do gás nas condições padrões, chegando nas seguintes correlações.

$$H_2 \quad HV = 38.12 + 0.426 MC_{WB} - 0.011 MC_{WB}^2 \quad (3.2)$$

$$CO \quad HV = 79.32 - 0.624 MC_{WB} \quad (3.3)$$

onde: HV é o poder calorífico em Btu/ft³ nas condições padrões.

Usando os valores do calor de combustão empregados no cálculo do poder calorífico para os componentes gasosos nas condições padrões, determinaram-se as composições médias dos gases obtidos por Redding e Goss (24). A Figura 3.8 mostra o efeito da umidade da madeira na composição média dos gases de acordo com os resultados de Redding e Goss (24). As curvas poderão ser alteradas com a vazão da taxa de ar, taxa de combustível, com diferentes tipos de combustíveis lignocelulósicos e com

gaseificadores com diferentes profundidades de leito de combustível na região do acendimento e de leito de carvão na zona de redução. A composição dos gases depende da altura dos leitos de madeira e de carvão. Redding e Goss (24) concluíram que o poder calorífico do gás seco é máximo quando o teor de umidade do combustível está na faixa de equilíbrio até 15% e decresce significativamente para teores de umidade mais elevados. O poder calorífico do gás úmido é máximo para o teor de umidade zero e decresce rapidamente com o aumento da umidade do combustível.

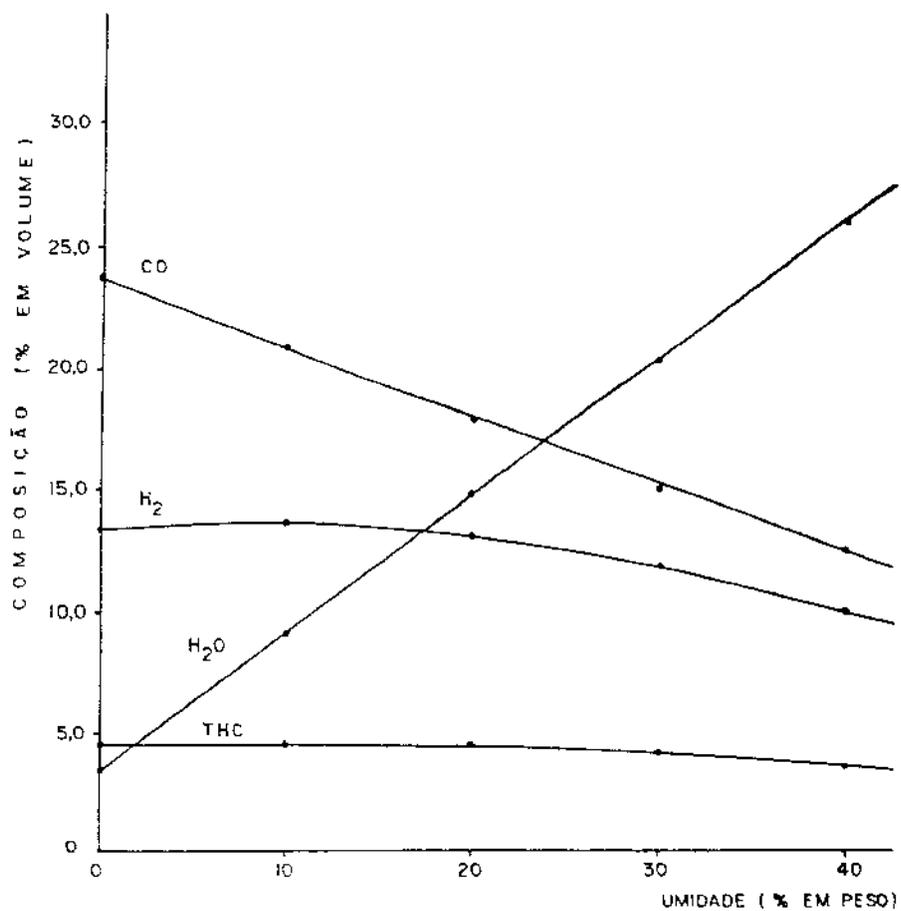


FIGURA 3.8 - Efeito da umidade da madeira na composição do gás (base úmida).

Pela análise dos dados apresentados nesta seção conclui-se que os resultados são bastante diversificados uma vez que foram utilizadas condições de operação e processo distintos. Os trabalhos não foram amplos no sentido de que não foram estudados muitos parâmetros em um mesmo sistema de gaseificação. É relevante pois, um trabalho que relacione a umidade da madeira com composição, poder calorífico inferior, temperatura adiabática de chama e eficiência dos gases em base seca e úmida em um gaseificador tamanho piloto. A temperatura adiabática de chama é determinada como sendo a temperatura na qual a variação de entalpia da reação é zero. Outro aspecto ainda não analisado e que será objeto de estudo no presente trabalho é a influência da vazão do agente de gaseificação na composição do gás produzido, além da análise da variação da temperatura na zona de redução. Apesar de se ter na literatura resultados experimentais para o carvão mineral, os mesmos não podem ser aplicados para o carvão vegetal, visto que o último apresenta uma estrutura porosa bem diferente da do carvão mineral, que o torna mais reativo.

4. PARTE EXPERIMENTAL

Na presente seção são apresentados o material e os equipamentos utilizados para desenvolver o processo de gaseificação de madeira, bem como o procedimento experimental de cada etapa do experimento.

4.1 - Material

4.1.1 - Madeira de Eucalipto

A madeira usada para desenvolver a parte experimental do presente trabalho, denominada de *Eucalyptus grandis* e de *Eucalyptus saligna*, picada sem casca na forma de cavacos, foi gentilmente cedida pela RIPASA S.A., fábrica de celulose e papel.

4.1.2 - Equipamentos

4.1.2.1 - Gaseificador

Foi utilizado um gaseificador móvel tipo co-corrente de capacidade nominal de 12 Kg/h de madeira. O material usado na sua fabricação foi o aço carbono, com exceção das paredes da zona de reação, da tubulação de oxigênio e do disco da garganta que são de aço inoxidável refratário.

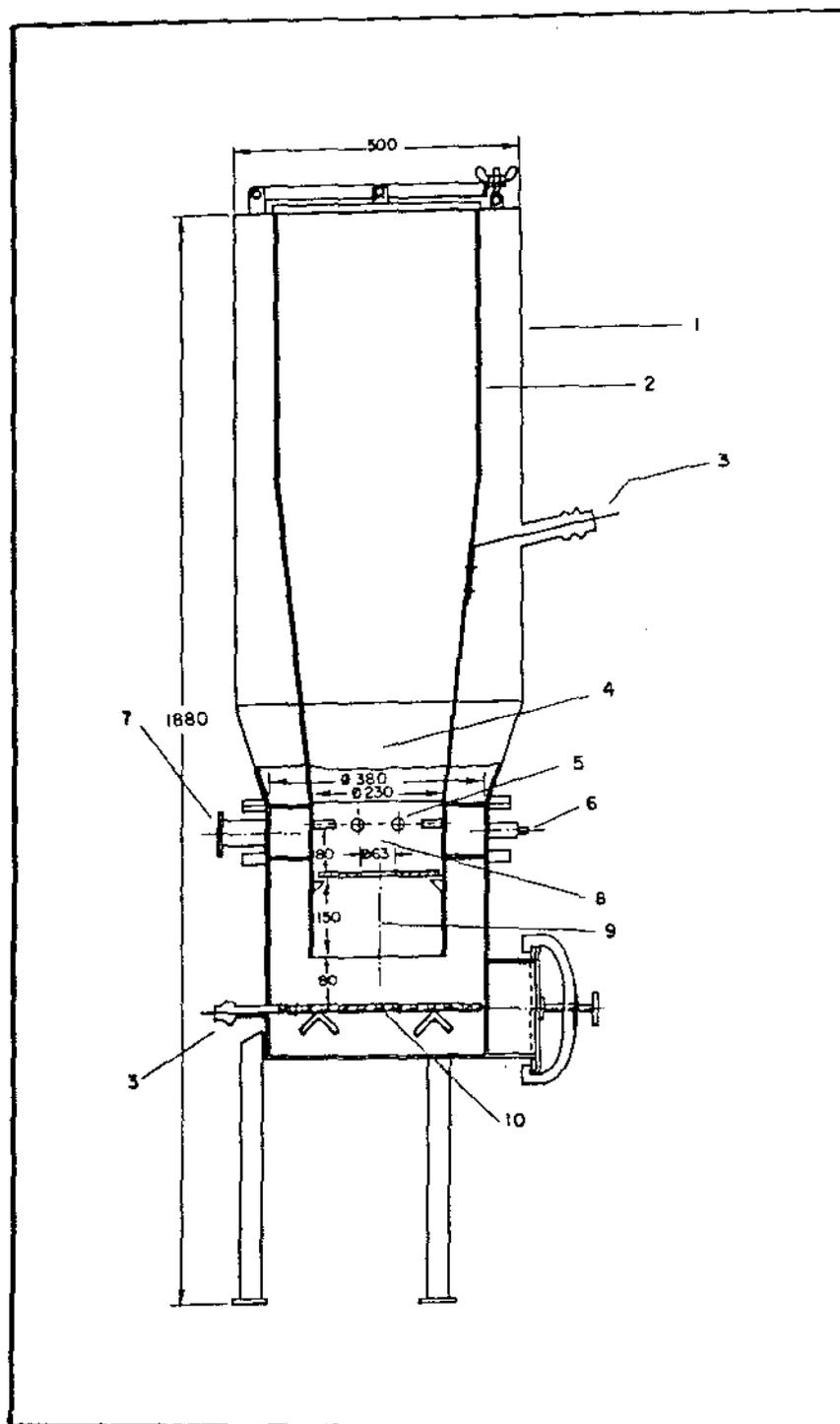
A Figura 4.1 apresenta a seção transversal deste gaseificador, desenvolvido pela CODETEC/UNICAMP, com suas principais dimensões.

A parte superior é um silo que armazena madeira para carga intermitente. Em sua parte inferior inicia-se a pirólise da madeira, decorrente do aquecimento da zona de combustão.

A parte intermediária consiste do reator propriamente dito, das entradas e distribuição de ar e oxigênio, da saída de gás, de um visor e do bocal de acendimento. É nessa seção que fica um disco removível (garganta) com furo central de 6.3cm, cujas funções são formar uma camada isolante de carvão perto das paredes, aumentar a velocidade dos gases no centro e manter uma baixa produção de alcatrões.

A seção inferior desse equipamento contém a grelha fixa de chapa perfurada, sobre a qual é formado um leito de carvão, e a câmara de retorno dos gases por fora da zona de reação. Os gases provenientes da zona de oxidação acima, sofrem redução nesta região do gaseificador.

LEGENDA



1. Depósito
2. Silo vibratório
3. Vibrador magnético
4. Zona de pirólise
5. Bicos de oxigênio e ar
6. Saída de gás
7. Entrada de ar
8. Zona de oxidação
9. Zona de redução
10. Grelha

FIGURA 4.1 - Seção transversal do gaseificador co-corrente.

As Figuras 4.2, 4.3 e 4.4 mostram a montagem do gaseificador sobre uma balança, a fim de se verificar a taxa de consumo de madeira.

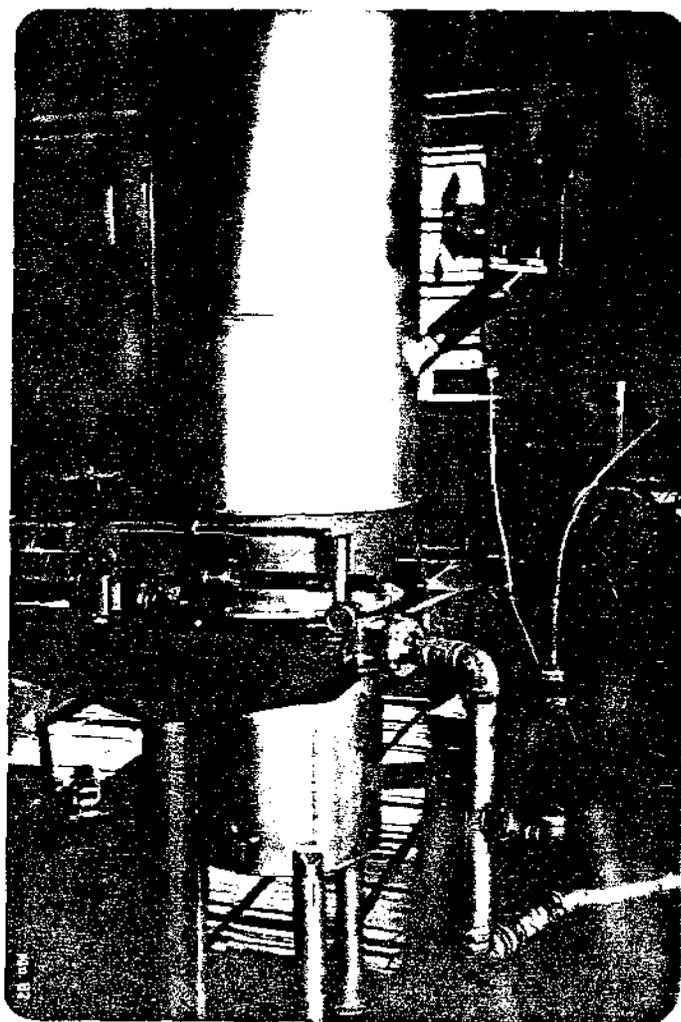


FIGURA 4.2

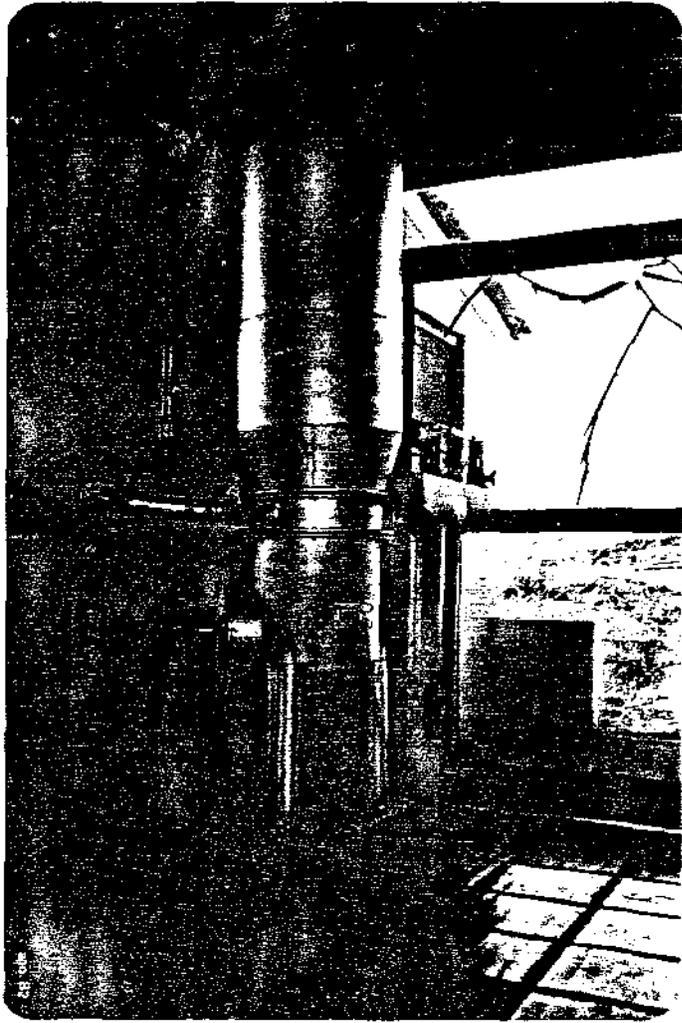


FIGURA 4.3

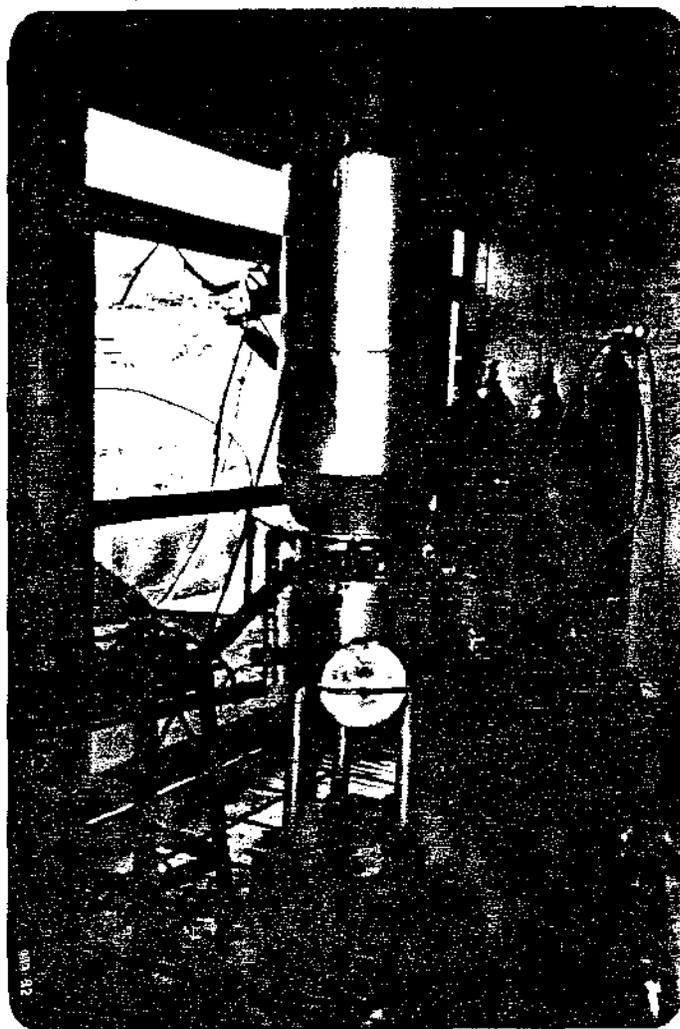


FIGURA 4.4

O gás produzido é queimado em um queimador de difusão, situado externamente ao laboratório, que tem as funções de permitir a observação da qualidade do gás e de dispor dos gases de uma forma segura. Uma pequena amostra do gás é aspirada da linha de gás por uma bomba de vácuo DIA-PUMP modelo CA da Fanem Ltda., passando por um filtro de lâ-de-vidro, para reter as impurezas, por três lavadores de gás, nos quais ele é borbulhado e resfriado, por um tubo com sílica gel, a fim de que a água contida no gás seja retida, chegando finalmente ao cromatógrafo. Um fluxograma do processo de gaseificação utilizado no presente trabalho está ilustrado na Figura 4.5.

Interligando o soprador ao gaseificador tem-se a válvula de ar, e acoplado à uma barra soldada à grelha tem-se um vibrador e outro na altura do silo de madeira, que tem como função vibrar o silo evitando assim o engaiolamento dos cavacos.

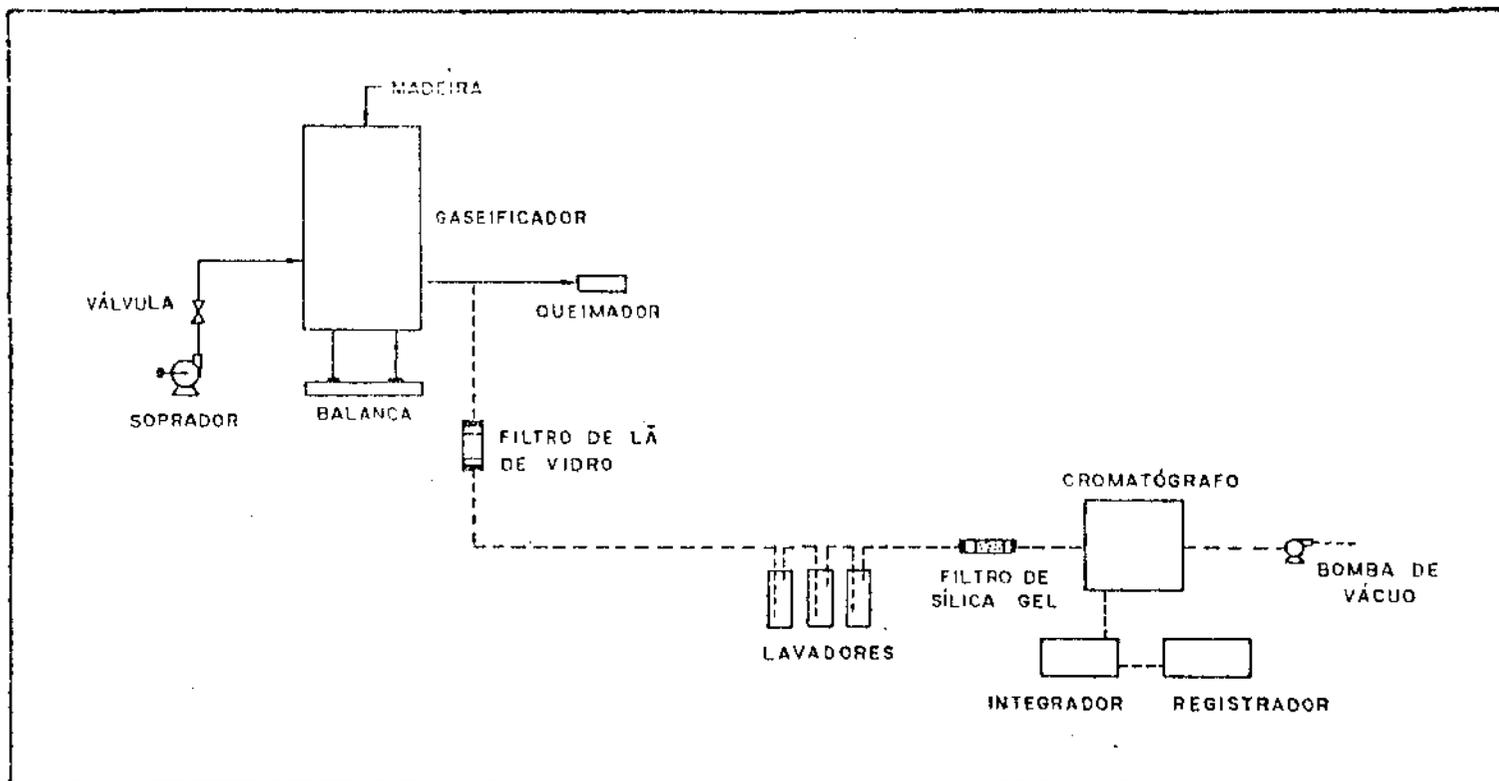


FIGURA 4.5 - Fluxograma do processo de gaseificação

4.1.2.2 - Medidor de vazão de ar

Foi utilizado um soprador de vazão de ar constante da Metalúrgia Abramo Eberle S.A., uma placa de orifício de entrada com 13.5mm de diâmetro e outra com 6.3mm para as experiências com menor vazão de ar. Estas placas foram conectadas em um tubo de 4.5cm de diâmetro anexado ao soprador de ar e a um manômetro diferencial (Figuras 4.6 e 4.7). Ambas as placas foram calibradas com um tubo de Pitot e os resultados encontram-se no Apêndice A.

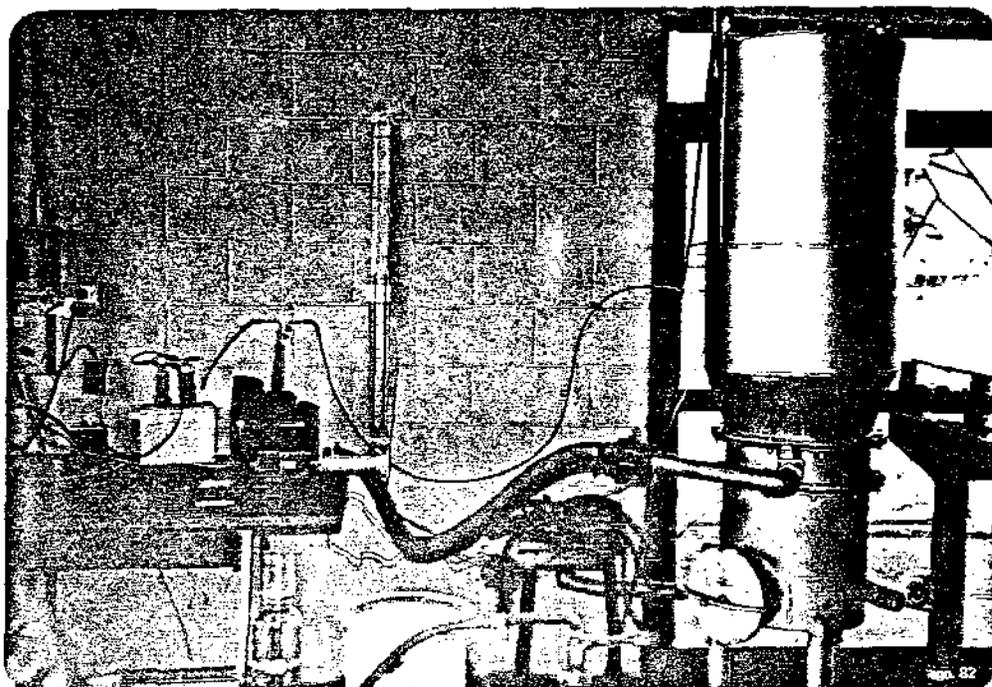


FIGURA 4.6

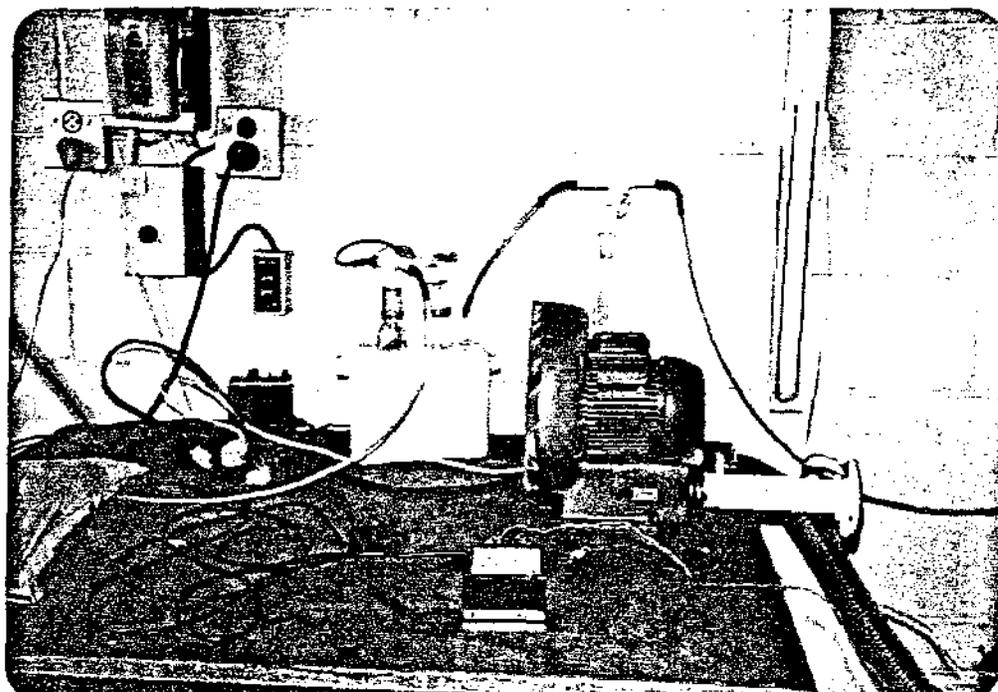


FIGURA 4.7

4.1.2.3 - Termopares e milivoltímetro

Os termopares do tipo "chromel-alumel" acoplados ao milivoltímetro de modelo 2000 da Instrumentos Elétricos Engro S.A. foram usados para medir a temperatura na zona de redução.

4.1.2.4 - Conjunto para análise cromatográfica

Para a análise do gás utilizou-se um cromatógrafo modelo 1420 da Varian equipado com detetor de condutividade térmica, com uma válvula série/by pass, com uma coluna de peneira molecular 5A e com uma coluna de polímero orgânico poroso Porapak Q (Figura 4.8). Foram utilizados ainda um Integrador Processador modelo CG-100, um registrador, ambos da Instrumentos Científicos C.G., e o argônio "U" da Oxigênio do Brasil como gás de arraste. Para padronização das análises usou-se um gás com 12.16% de H_2 , 57.22% de N_2 , 4.97% de CH_4 , 16.50% de CO e 19.15% de CO_2 , cujos cálculos encontram-se no Apêndice B.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam o conjunto para análise cromatográfica.

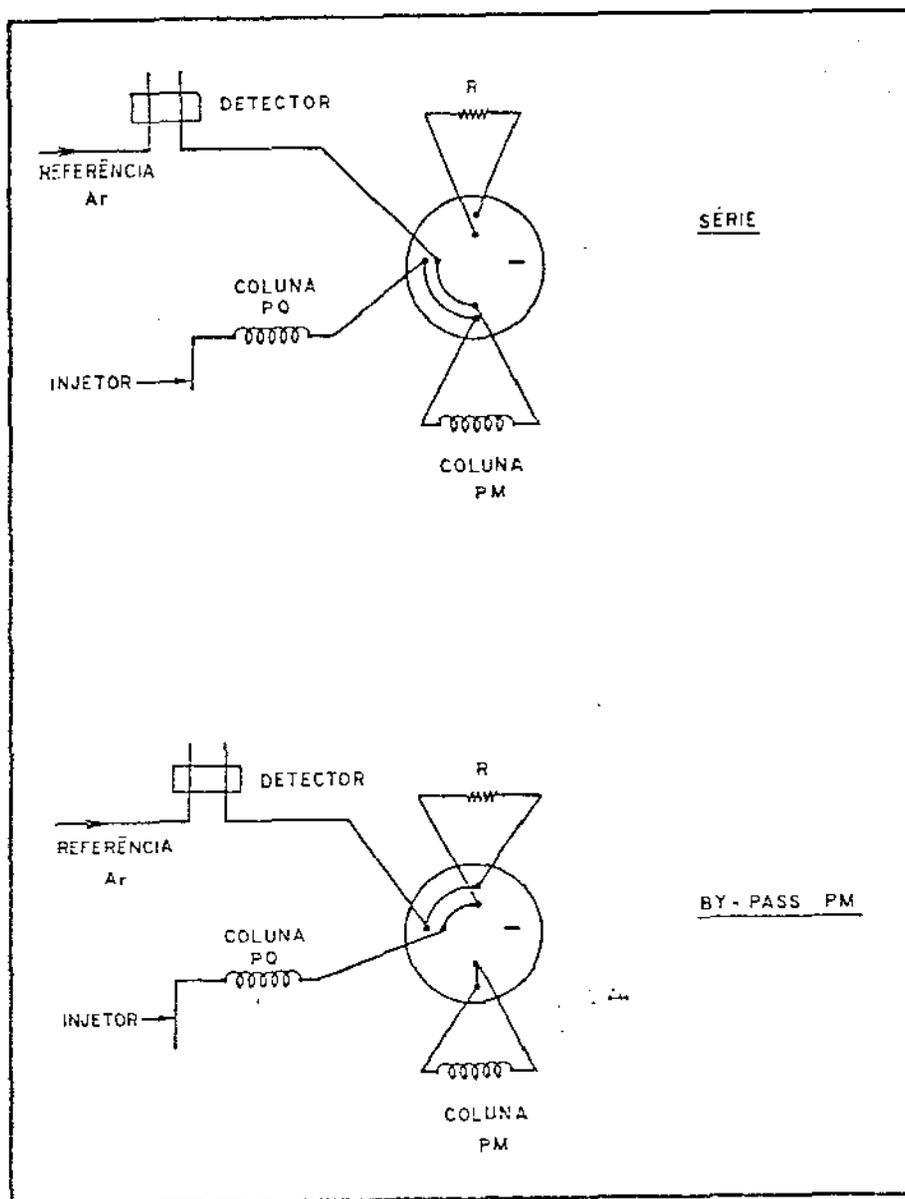


FIGURA 4.8 - Esquema de ligação de válvula no cromatômetro para análise contínua de gás.

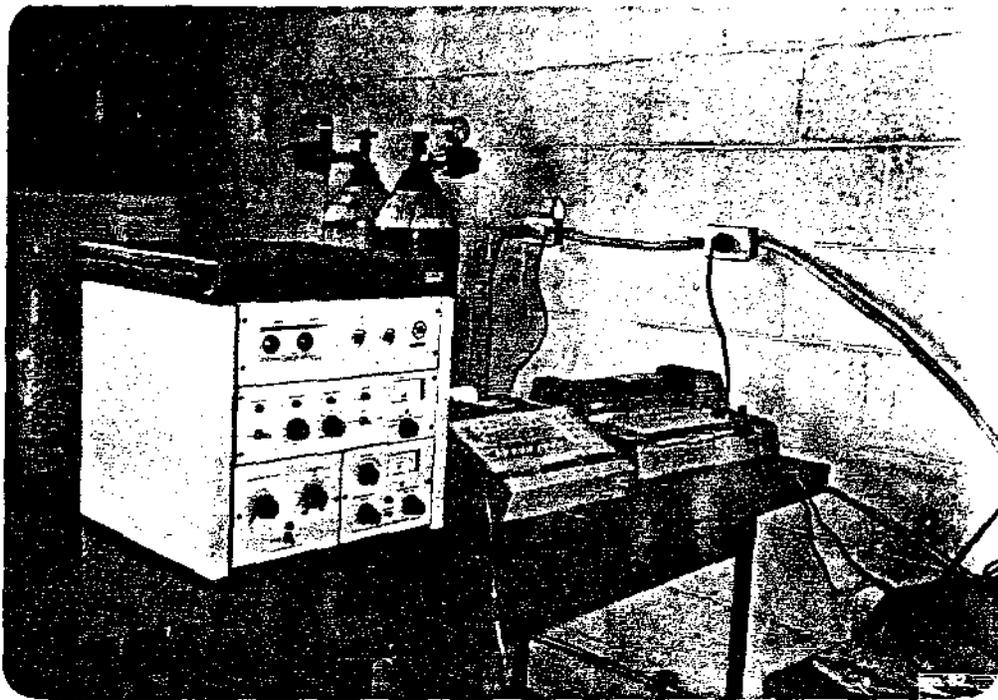


FIGURA 4.9

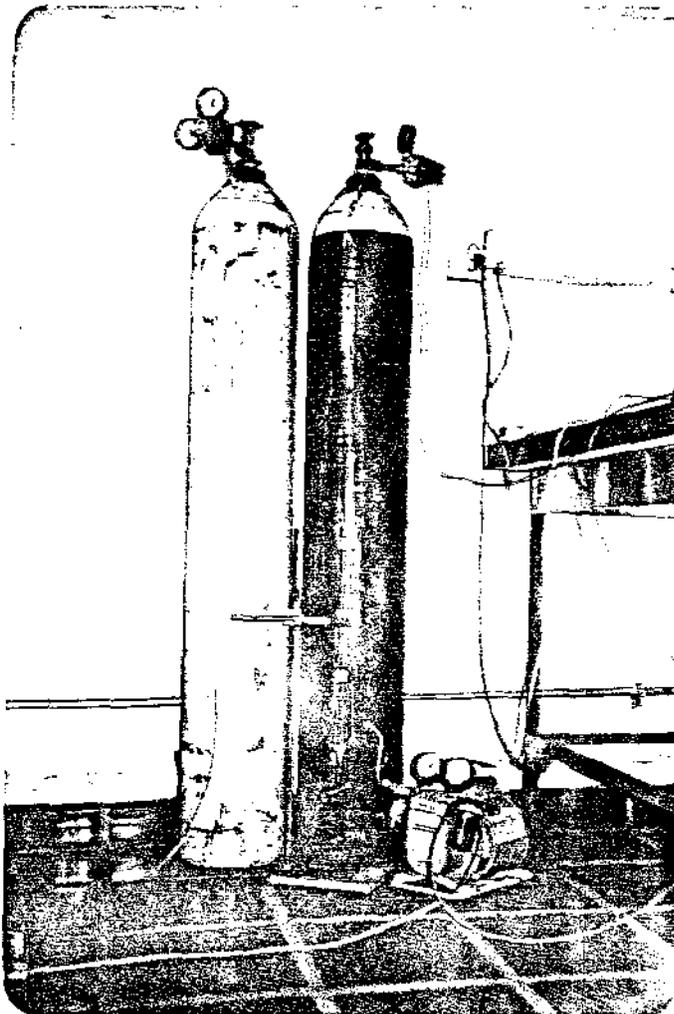


FIGURA 4.10

4.1.2.5 - Outros Equipamentos

Para a determinação da umidade da madeira foram utilizadas uma estufa Olidef cz e uma balança analítica Chyo Jupiter SDP-160.

4.2 - Procedimento Experimental

4.2.1 - Determinação da umidade da madeira

Os cavacos de madeira foram classificados e utilizaram-se os cavacos com tamanho de 1.5 x 1.8cm aproximadamente.

Após homogeneização retirava-se uma amostra representativa que foi subdividida em cinco partes na faixa de 30 a 38g. A determinação da umidade foi feita por diferença de peso após a secagem em estufa a 110°C, até peso constante, e utilizou-se, para efeito de cálculo, a média das umidades obtidas nas cinco amostras.

4.2.2 - Processo de Gaseificação

Para cada experimento carregou-se o gaseificador com 7 a 17 Kg de madeira, dependendo de sua umidade e da vazão de ar usada. Iniciava-se a queima da madeira e a introdução de ar, que controlava-se através da válvula de ar. Pela observação qualitativa da chama no queimador, dava-se início às análises cromatográficas do gás produzido.

4.2.3 - Controle de fluxo de ar

Através das leituras feitas no manômetro diferencial controlava-se a vazão de ar em um determinado valor evitando-se flutuações por meio de uma válvula situada após o sopra-

dor, na tubulação que conduz o ar para o gaseificador. O valor da vazão de ar seco era obtido através da equação (A.7) do Apêndice A.

4.2.4 - Análise cromatográfica

Inicialmente foram realizados todos os preparativos para se dar início à análise cromatográfica do gás padrão. Esses preparativos consistem de: estabilização do detetor (110°C), injeção do argônio, que foi utilizado como gás de arraste, estabilização do fluxo na saída do detetor (0.63 ml/seg), estabilização da corrente do detetor (75m A) e da temperatura da coluna (40°C), ligar o ventilador e o forno da coluna e o programador de tensão na posição zero. Com o registrador ligado ajustou-se a linha base mudando a posição da válvula série/by pass no cromatógrafo. A Figura 4.8 ilustra as posições série e by pass da referida válvula. Na posição série foram analisados o H_2 , N_2 , CH_4 , C_2H_4 e CO . Após a inversão da válvula para a posição by pass foi analisado o CO_2 .

O gás padrão foi utilizado inicialmente para aceitar as condições do cromatógrafo, ou seja, temperaturas, vazão e comprimento das colunas e depois para calcular o fator para cada componente do gás, bem como para otimizar os parâmetros do integrador a fim de se melhorarem as condições de integração.

O integrador eletrônico utilizado, automatizava as operações cromatográficas, pois tendo recebido os fatores de cálculo, apresentava os resultados das amostras em concentração (% vol.)

A Figura 4.11 mostra uma listagem típica do integrador.

Para cada análise cromatográfica de uma amostra do gás produzido, obtinha-se um registro dos picos do tipo apresentado na Figura 4.12.

C-1	0	
	15	SC
	42	N
RT	AR	
151	203853	
205	48701	
302	4711T	
345	26936V	
577	6935	
750	855V	
	291993T	
ID	RT	CONC
2	151	18.286
1	205	43.862
4	302	1.722T
5	345	25.716V
6	577	10.050
7	750	0.361V
		100.000T

FIGURA 4.11

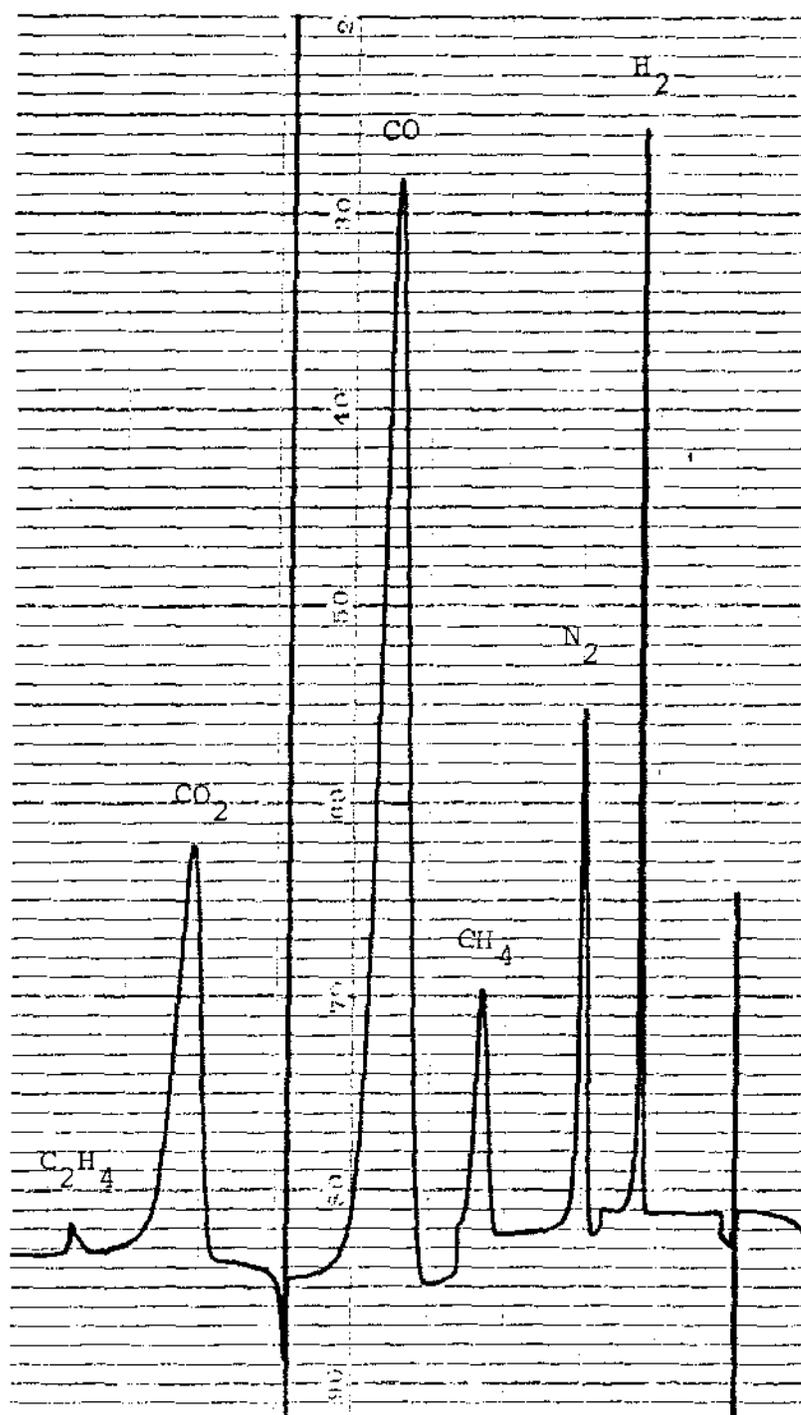


FIGURA 4.12 - Registro de picos dos gases de uma análise cromatográfica. (Velocidade do papel = 1.06 cm/s , fundo de escala no registrador = 50 mV para H_2 e N_2 e 2 mV para os demais).

5. RESULTADOS, ANÁLISE E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados os resultados experimentais.

5.1 - Testes de gaseificação. Resultados experimentais

Diversos testes preliminares foram realizados para estabelecer as condições de gaseificação e análise dos gases. Os resultados desses testes, assim como os dos testes definitivos, encontram-se nos Apêndices C e D.

Os resultados apresentados no Apêndice C dizem respeito aos testes realizados para verificar a influência da umidade da madeira na composição média do gás, procurando-se manter a vazão de ar constante em torno de 12 Kg/h. Testes definitivos foram feitos com a umidade variando na faixa de 10 a 40% de umidade na madeira.

No Apêndice D são apresentados os resultados dos testes nos quais manteve-se a umidade da madeira constante, em 22.94% em peso, variando-se a vazão de ar entre 10 e 30 Kg/h para assim analisar o efeito da vazão do ar na composição média do gás. Foram realizados três testes com a relação da vazão de ar máxima e mínima de 3:1.

5.2 - Balanços de massa e de energia

a) Balanço de massa

Os balanços de massa e de energia foram calculados para cada teste de gaseificação para determinar a produção de gás combustível de uma dada quantidade de biomassa, a composição em base úmida, a eficiência do processo, as proprie-

dades do gás e para verificar a confiabilidade dos resultados experimentais. A vazão (Kg/h) do gás produzido foi calculada a partir da quantidade de ar na entrada, por meio do balanço de nitrogênio. Se a taxa de ar de entrada e o teor de N_2 do ar, a composição da madeira e do gás combustível (base seca) são conhecidos, a taxa de fluxo do gás produzido pode ser determinada. A taxa do ar seco de entrada é determinada pela equação (A.7) do Apêndice A, da placa de orifício, a partir da leitura do manômetro, das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido e da pressão barométrica. O teor de N_2 do ar foi obtido de Himmelblau (15). A composição da madeira foi obtida da referência (1) de uma análise de amostra de eucalyptus grandis fornecida pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica-IPT, São Paulo, realizada no Southwest Research Institute - SWRI, Texas, descontando-se as cinzas. A taxa de consumo de madeira e a composição do gás seco foram obtidas experimentalmente nos testes de gaseificação. A umidade do ar foi determinada utilizando-se as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, a pressão barométrica, as Tabelas da referência (28) e as equações da referência (26) baseadas na carta psicrométrica.

Para os cálculos considera-se que os elementos carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio entram com a madeira seca, e para tanto são necessários a taxa de consumo de madeira e o teor dos elementos na madeira. Os elementos hidrogênio e oxigênio entram ainda como água na madeira e na umidade do ar sendo necessários a taxa de consumo de madeira e sua umidade, a taxa de ar seco e da umidade deste. Oxigênio e nitrogênio entram no ar seco e para os cálculos do balanço de

massa necessitam-se da taxa de ar seco.

Para os cálculos de saída o nitrogênio foi usado como elemento de amarração. Os elementos carbono, hidrogênio e oxigênio no gás seco foram calculados a partir da análise do gás e da vazão do gás (base seca) calculada anteriormente. No cálculo do vapor de água no gás utilizou-se de um balanço de oxigênio, isto é, o oxigênio foi totalizado no gás produzido e subtraído do oxigênio que entra.

Nos totais por elementos em erro de fechamento foi obtido do balanço de hidrogênio e do balanço de carbono. O teor de alcatrão e fuligem no gás é baixo e de difícil determinação experimental, portanto não foi considerado.

No cálculo da composição do gás em base úmida considerou-se o argônio do ar de entrada, utilizando-se a vazão de ar, seu peso molecular e a taxa de argônio nele, obtido de Himmelblau (15).

b) Balanço de energia

O cálculo da temperatura adiabática de chama foi baseado nas seguintes equações:

$$\Delta H_T = \Delta H_R + \Delta H_{25} + \Delta H_P = 0 \quad (5.1)$$

onde: ΔH_T é a variação de entalpia total para um processo adiabático, ΔH_R é a variação de entalpia dos reagentes da temperatura de entrada até 25°C, ΔH_{25} é a variação de entalpia da reação a 25°C, ΔH_P é a variação dos produtos de 25°C até a temperatura de chama.

$$\Delta H_{25} = n_i^o \Delta H_{C_i}^{25} \quad (5.2)$$

onde: n_i^o é o número de moles inicial e

ΔH_C^{25} é o calor de combustão a 25°C , o subscrito i indica componente combustível.

$$\Delta H_R = H_{R_{\text{gás}}} + H_{R_{\text{ar}}} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \Delta H_P = & (T_C - 298) \sum_i n_i A_i + \\ & + \frac{(T_C^2 - 298^2)}{2} \sum_i n_i B_i + \\ & + \frac{(T_C^3 - 298^3)}{3} \sum_i n_i C_i + \\ & + \frac{(T_C^4 - 298^4)}{4} \sum_i n_i D_i \end{aligned} \quad (5.4)$$

onde: T_C é a temperatura adiabática de chama e

n é o número de moles

A, B, C e D são as constantes do calor específico e o subscrito i , indica componente do produto de combustão.

Os valores das constantes $A, B, C,$ e D e do calor de combustão a 25°C dos componentes foram obtidos de Hougen (17), de Himmelblau (15) e de Smith e Van Ness (30).

No cálculo da temperatura adiabática de chama foi su posto que o gás úmido sai do gaseificador à temperatura de 450°C, por ser esta a temperatura em que os gases podem ser manipulados em finalidades práticas. A temperatura do gás seco e do ar usada nos cálculos foi 25°C.

Na determinação do poder calorífico inferior do gás foram utilizados os calores de combustão dos gases nas condições padrões retirados de Smith e Van Ness (30).

A eficiência de gaseificação apresentada no Apêndice E foi definida da seguinte maneira:

$$\eta = \frac{\text{VAZÃO DO GÁS} \times (\text{ENTALPIA} + \text{PODER CALORÍFICO INFERIOR})_{\text{GÁS}}}{\text{CONSUMO DE MADEIRA} \times (\text{PODER CALORÍFICO INFERIOR})_{\text{MADEIRA}}} \quad (5.5)$$

O poder calorífico inferior da madeira foi calculado a partir do poder calorífico superior, de acordo com a equação do Institute of Gas Technology - IGT (10).

$$\text{HHV} = 146.58 C + 568.78 H + 29.45 - 6.58 A - 51.53 (O + N) \quad (5.6)$$

onde: HHV é o poder calorífico superior, Btu/lb, C, H, O e N são carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio respectivamente e A é a cinza.

Os resultados dos balanços de massa e de energia encontram-se no Apêndice E. O mesmo Apêndice também apresenta a listagem do programa que realiza os balanços.

5.3 - Taxa de gaseificação de madeira

Os gráficos das Figuras 5.1 a 5.5 mostram a variação do peso do gaseificador com o tempo de gaseificação, sendo determinada a taxa de consumo de madeira para cada teste. Neste peso foi suposto que as cinzas foram acumuladas fazendo-se necessária uma limpeza a cada 3 ou 4 testes, pois aumentava a perda de carga no gaseificador. Desses gráficos verifica-se uma relação linear entre o peso do gaseificador e o tempo de gaseificação, com coeficiente de correlação, R^2 , superior a 0.999. Os primeiros pontos das Figuras 5.3 e 5.4, obtidos antes do processo de gaseificação entrar em regime foram desprezados na determinação da taxa de consumo de madeira. Assim como o último ponto da Figura 5.4. O processo entrava em regime entre 20 e 30 minutos após o início do teste, quando a temperatura no interior do gaseificador estabilizava-se.

Da Tabela 5.1 conclui-se que a taxa de gaseificação de madeira diminui quando aumenta o teor de umidade da madeira, nos testes onde procurou-se manter a vazão de ar aproximadamente constante. Verifica-se que, para os testes com a umidade da madeira constante a razão da vazão de ar seco e taxa de gaseificação variou em apenas 7.14%.

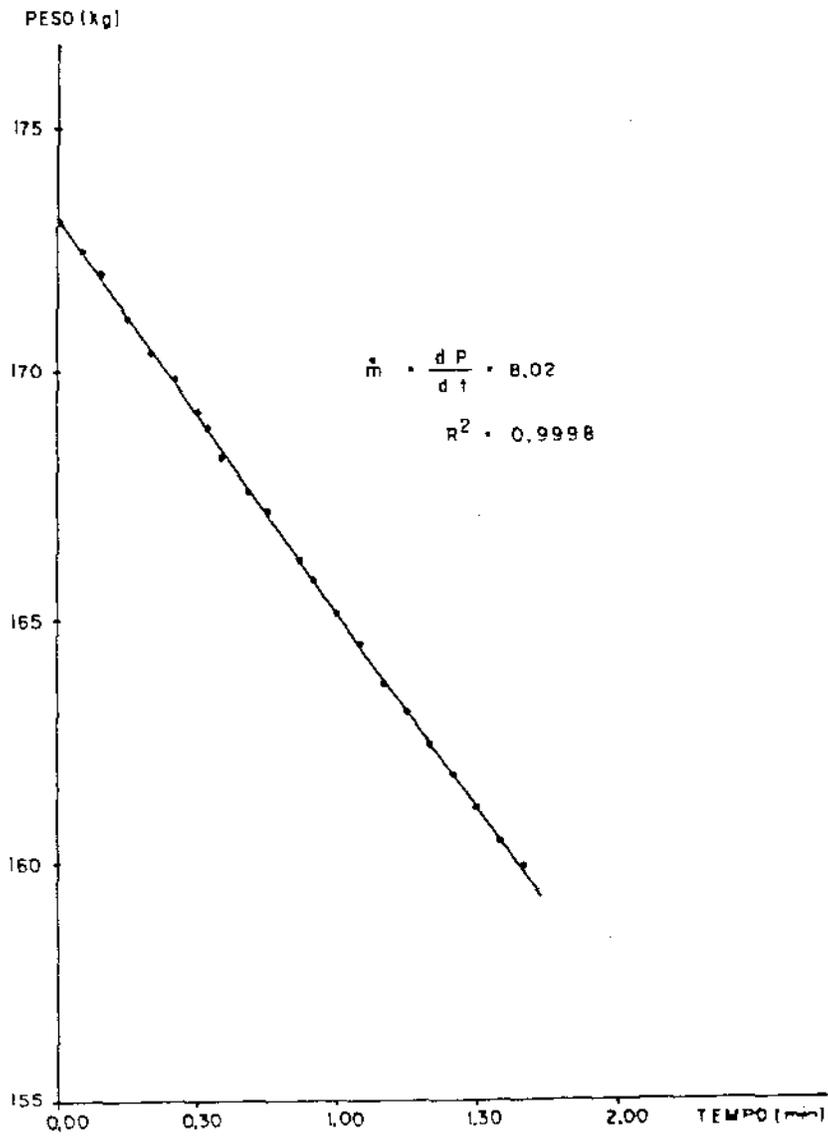


FIGURA 5.1 - Peso do gaseificador em função do tempo.

Teste nº 26.

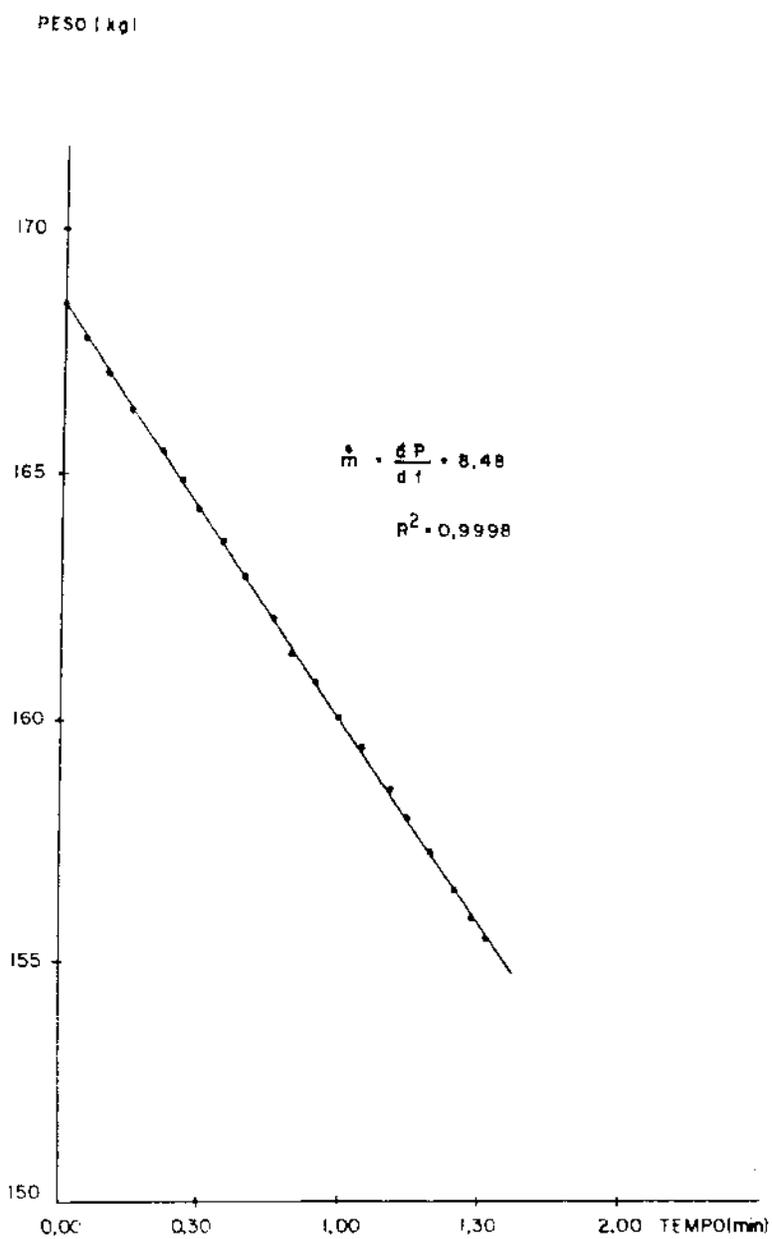


FIGURA 5.2 - Peso do gaseificador em função do tempo.

Teste nº 11.

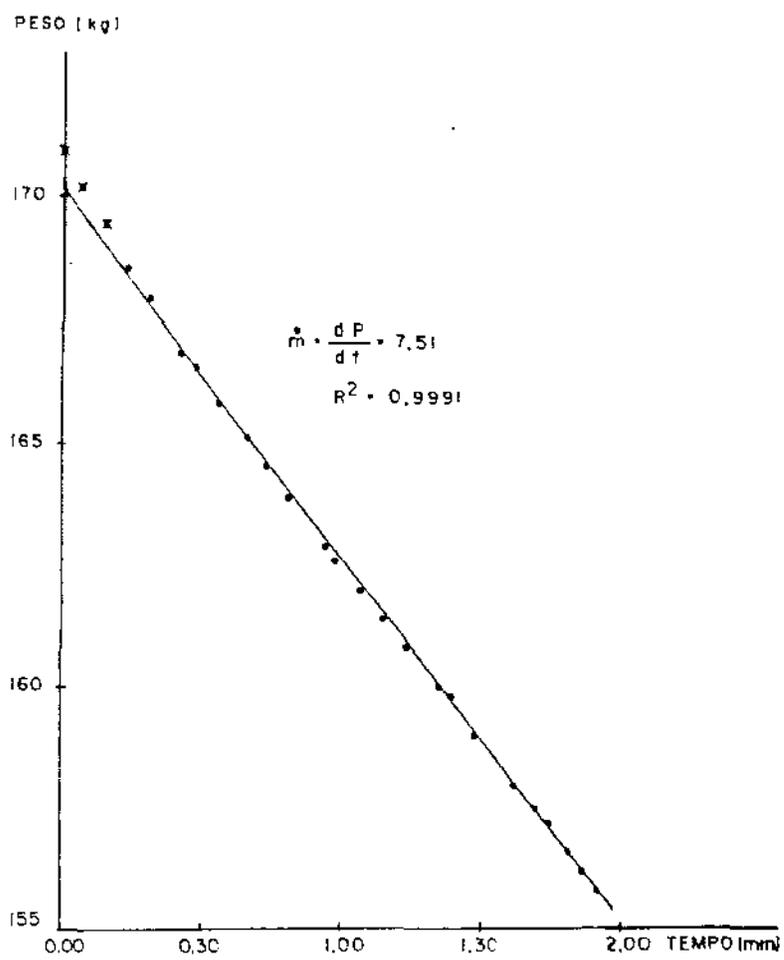


FIGURA 5.3 - Peso do gaseificador em função do tempo.

Teste nº 9.

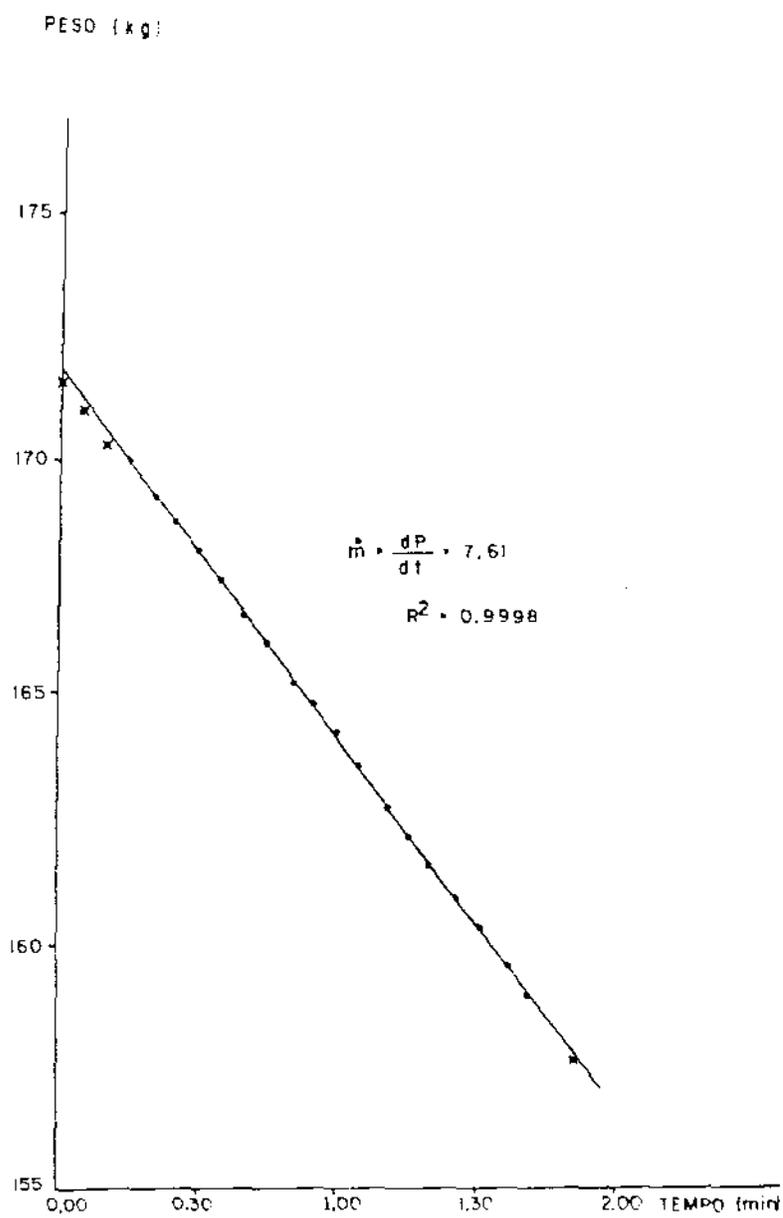


FIGURA 5.4 - Peso do gaseificador em função do tempo.
Teste nº 10.

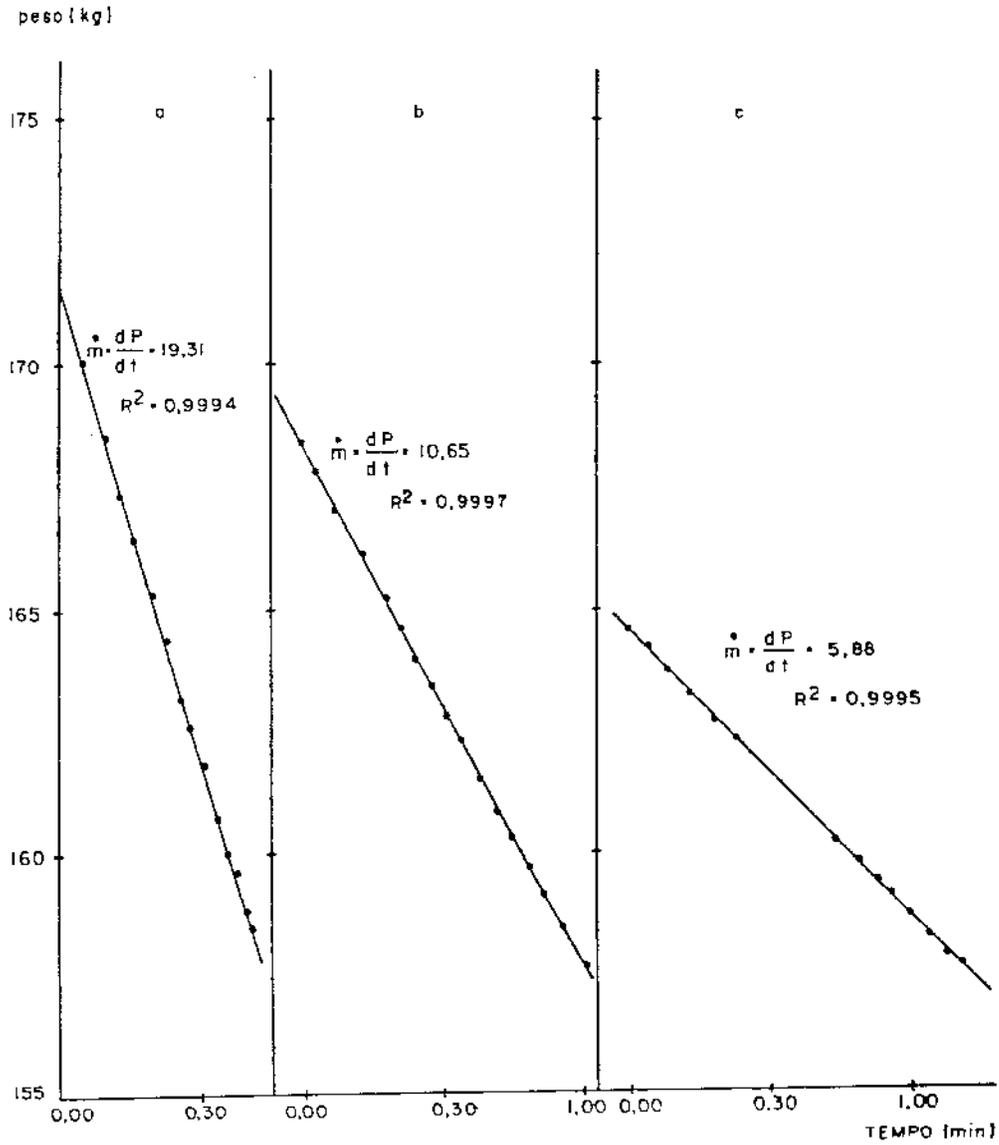


FIGURA 5.5 - Peso do gaseificador em função do tempo.

a: Teste nº 16.

b: Teste nº 17.

c: Teste nº 18.

Tabela 5.1 - Vazão de ar e umidade da madeira utilizadas nos testes de gaseificação e taxa de gaseificação obtida.

Figura	Vazão de ar seco (Kg/h)	Umidade da madeira %	Taxa de gaseificação (Kg/h)
5.1	12.09	9.23	8.02
5.2	12.74	20.47	8.48
5.3	11.92	28.42	7.51
5.4	12.47	38.11	7.61
5.5a	30.02	22.94	19.31
5.5b	17.62	22.94	10.65
5.5c	9.04	22.94	5.88

5.4 - Variação da composição do gás com o tempo após o início do teste

As Figuras 5.6 até 5.10 apresentam as curvas da variação da composição do gás com o tempo de gaseificação. Os dados foram registrados após observar que a chama no queimador apresentava-se estável, ou seja, mantendo-se acesa e sem fumaça. Observa-se que, de um modo geral, a variação na composição do gás é muito pequena, sendo no máximo 5% em volume, o que pode ser incluído no erro experimental. Onde não foi possível traçar uma curva devido à dispersão e ao número de pontos, optou-se por uma reta entre os pontos.

Analisando as curvas das Figuras 5.6 a 5.9 verifica-se que a composição do N_2 tende a diminuir com o tempo em todas elas. Verifica-se também que a composição de CO comporta-se de maneira semelhante. O teor de H_2 aumenta com o tempo, enquanto o de CO_2 ou permanece praticamente constante ou aumenta ligeiramente. Os teores de CH_4 e de C_2H_4 são constantes ao longo do tempo em todos os testes. A quantidade de H_2 no gás é superior a de CO_2 com o tempo até o teste da Figura 5.8, sendo inferior no da Figura 5.9. O teor de CO é sempre mais alto que o de H_2 com o tempo nos dois primeiros testes, no segundo ele é mais alto até 56 minutos de gaseificação e no último teste o teor de CO é sempre menor que o de H_2 com o tempo. Devido ao efeito da umidade a composição de CO no teste da Figura 5.9 é o mais baixo em relação aos demais testes e as composições de N_2 e de CO_2 são as maiores. Verifica-se ainda, que o teor de H_2 é maior nos testes das Figuras 5.7 e 5.8, e as composições de CH_4 e de C_2H_4 não variam de um tes-

te para outro.

No ítem 5.6 será analisado mais especificamente o efeito da umidade da madeira na composição média do gás.

Nos testes das Figuras 5.10a, b e c observa-se que o teor de N_2 diminui com o tempo de gaseificação, e aparentemente, é o que ocorre também com o CO, com exceção do teste da Figura 5.10a que permanece constante. As composições de H_2 e de CO_2 aumentam com o tempo em todos os testes e as de CH_4 e de C_2H_4 permanecem constantes. A quantidade de CO_2 no gás é sempre inferior, com o tempo, à de CO e à de H_2 em todos os testes. O teor de CO só é inferior ao de H_2 no teste da Figura 5.10b a partir de 37 minutos do início da gaseificação. Verifica-se ainda que o maior teor de H_2 é obtido no teste da Figura 5.10b enquanto o de CO é o menor. As composições de CO_2 , de CH_4 e de C_2H_4 praticamente estão na mesma faixa para os três testes. A quantidade de N_2 aumenta levemente do primeiro ao último teste.

Para os cálculos de balanços de massa e de energia utilizaram-se as composições médias dos gases em cada teste.

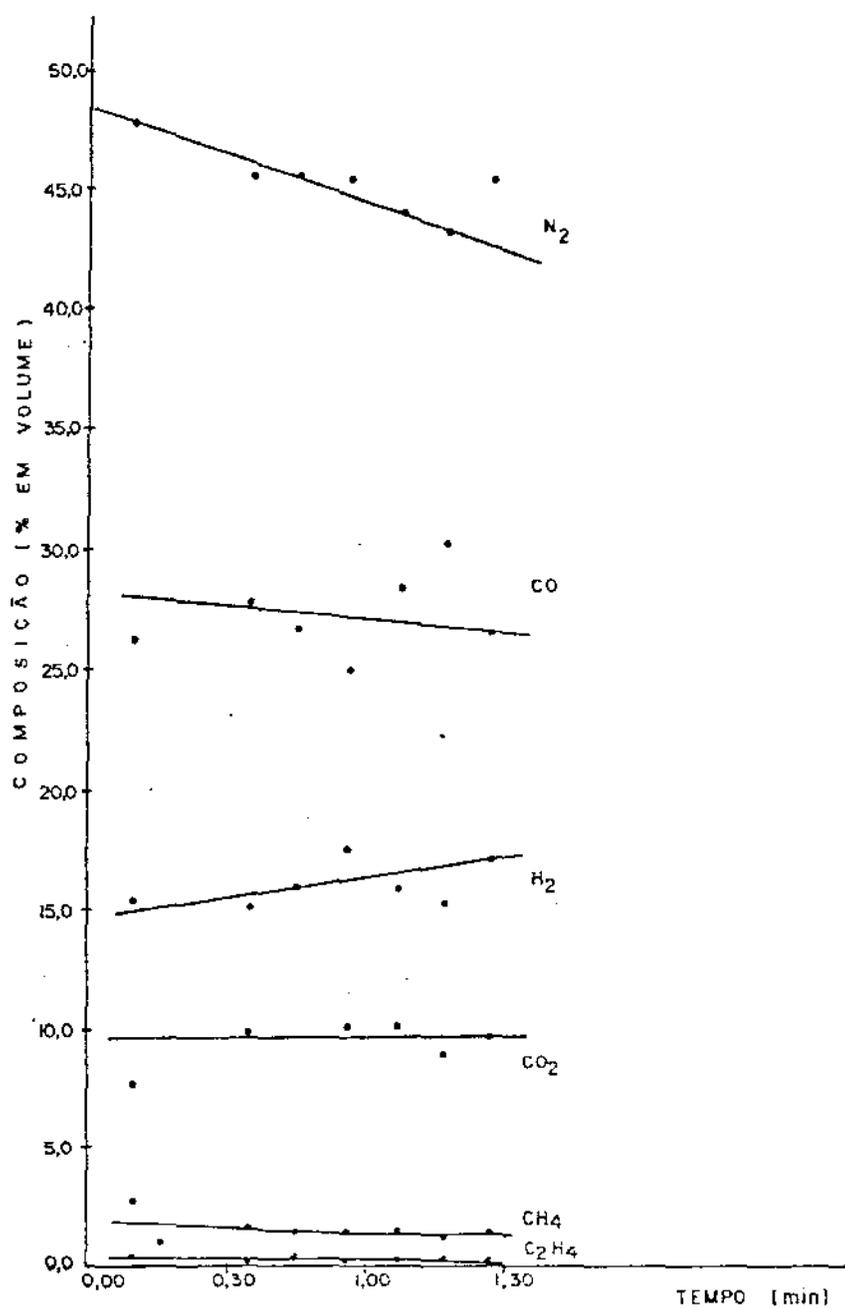


FIGURA 5.6 - Composição (base seca) do gás em função do tempo.

Teste nº 26.

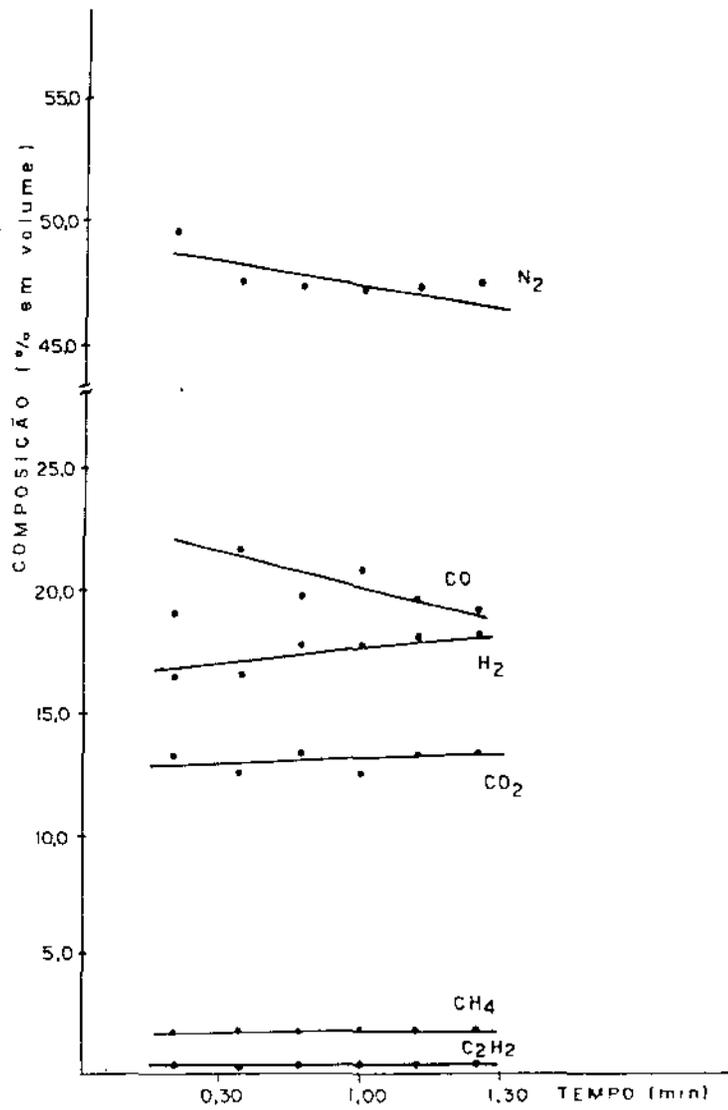


FIGURA 5.7 - Composição (base seca) do gás em função do tempo.

Teste nº 11.

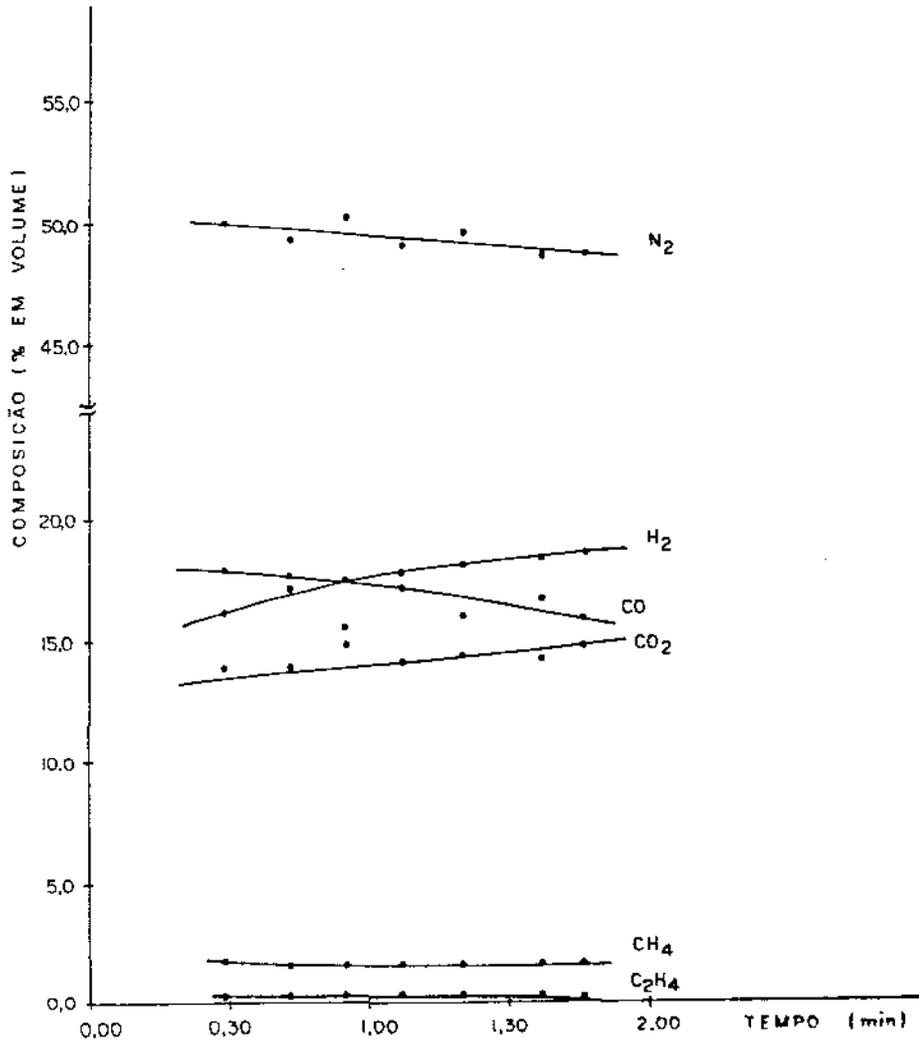


FIGURA.5.8 - Composição (base seca) do gás em função do tempo.

Teste nº 9.

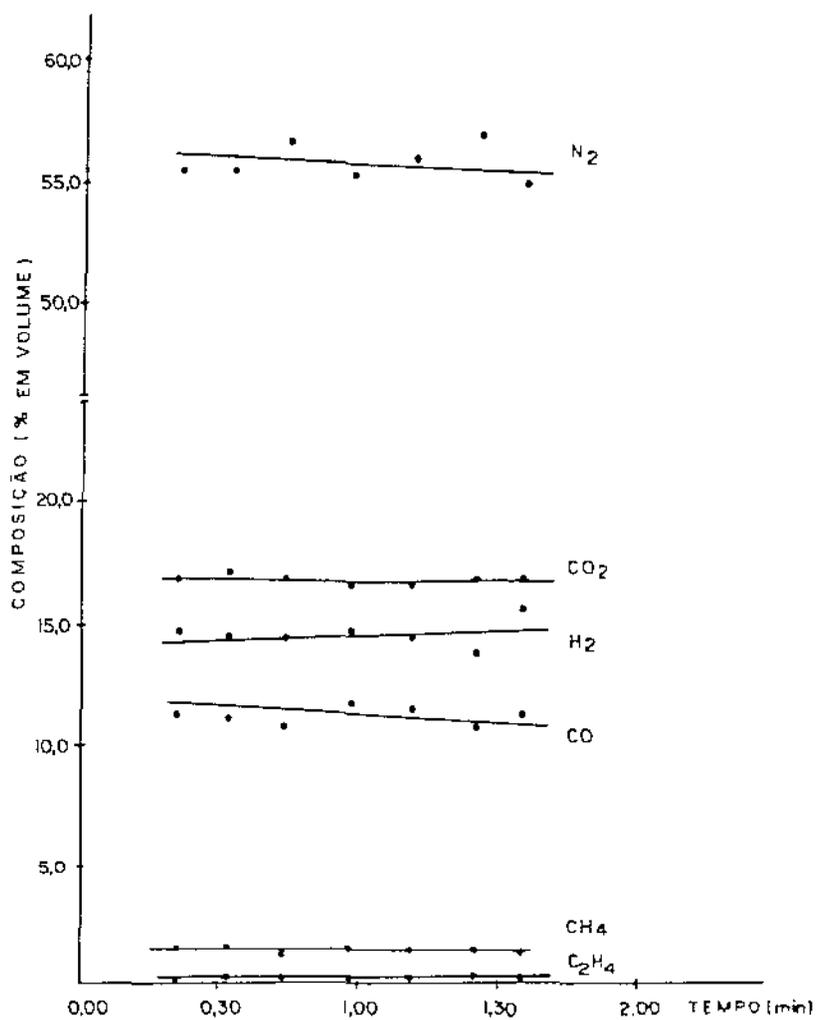


FIGURA 5.9 - Composição (base seca) do gás em função do tempo.
Teste nº 10.

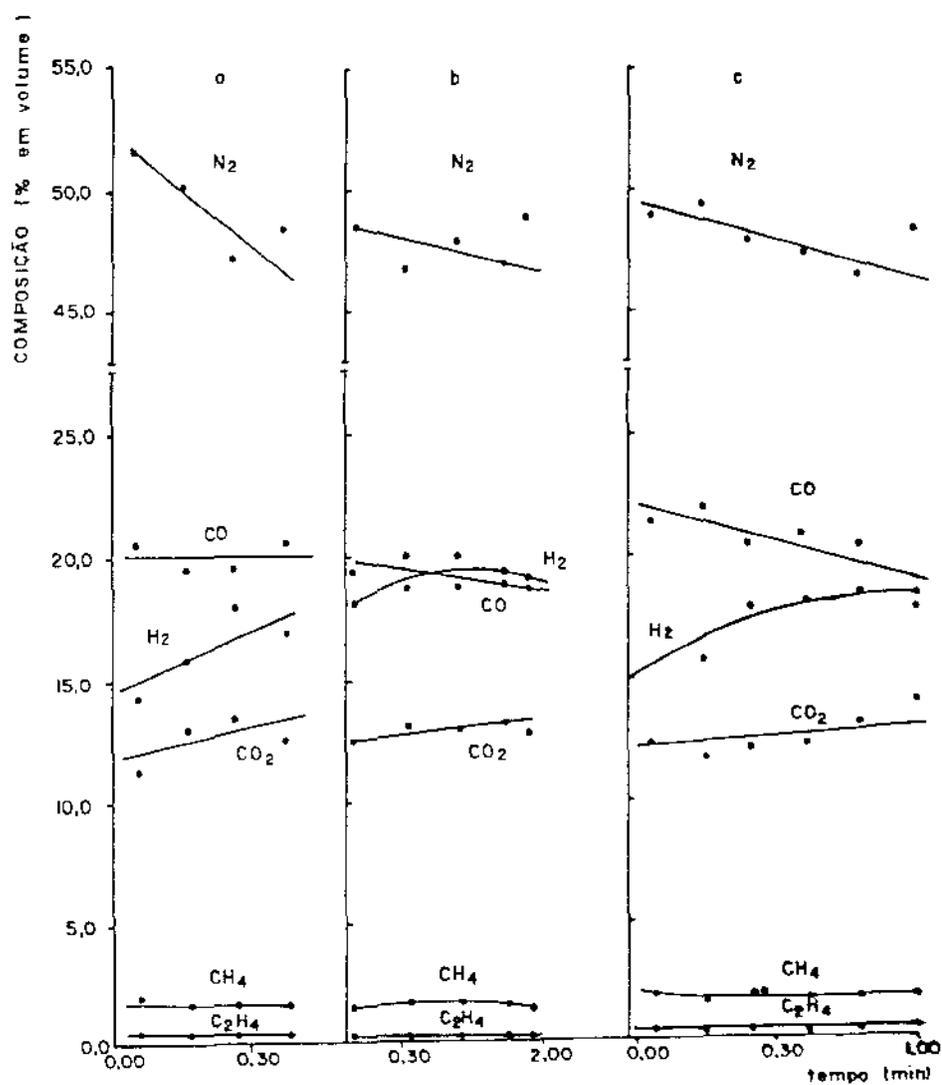


FIGURA 5.10 - Composição (base seca) do gás em função do tempo.

a: Teste nº 16.

b: Teste nº 17.

c: Teste nº 18.

5.5 - Variação da temperatura no interior do gaseificador em função do tempo.

Na Figura 5.11 é apresentada a variação da temperatura na garganta do gaseificador co-corrente e nas Figuras 5.12 e 5.13 na zona de redução em função do tempo. As demais curvas não foram traçadas, pois, devido à sensibilidade do termopar usado inicialmente, as temperaturas oscilaram muito. Através das curvas constata-se claramente que o comportamento da temperatura no interior do gaseificador é aumentar rapidamente durante cerca de 30 minutos estabilizando-se em seguida. Para madeira com 9.23% de umidade a temperatura estabilizou -se em torno de 947°C , para 22.94% de umidade em 878°C e para madeira com umidade de 28.42% em peso a temperatura estabilizou-se em torno de 853°C . Verifica-se portanto uma influência da umidade na madeira sobre a temperatura no interior do gaseificador, ou seja, quanto maior a umidade na madeira, menor a temperatura. Isso porque uma parte do calor é utilizada para secagem da madeira.

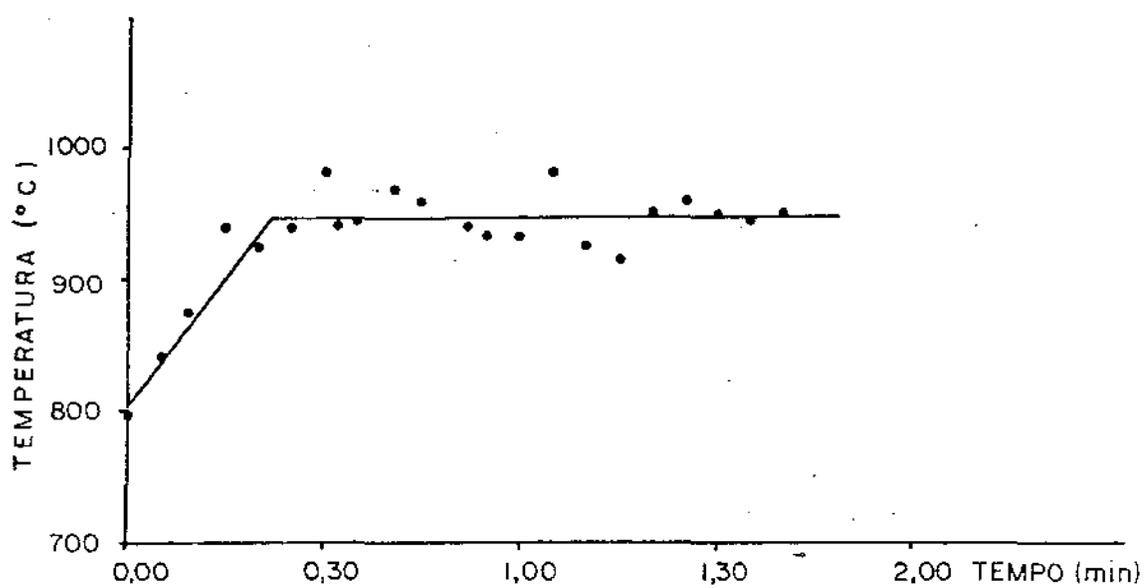


FIGURA 5.11 - Temperatura na garganta do gaseificador em função do tempo.

Teste nº 26.

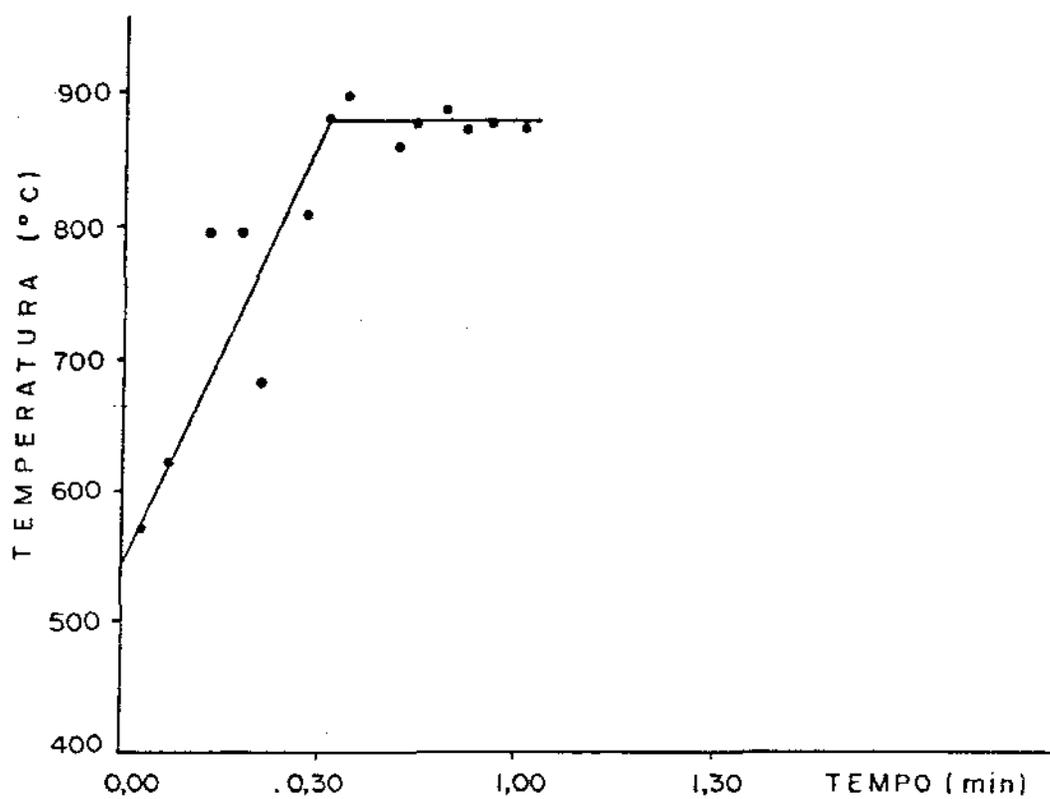


FIGURA 5.12 - Temperatura na zona de redução do gaseificador em função do tempo.

Teste nº 17.

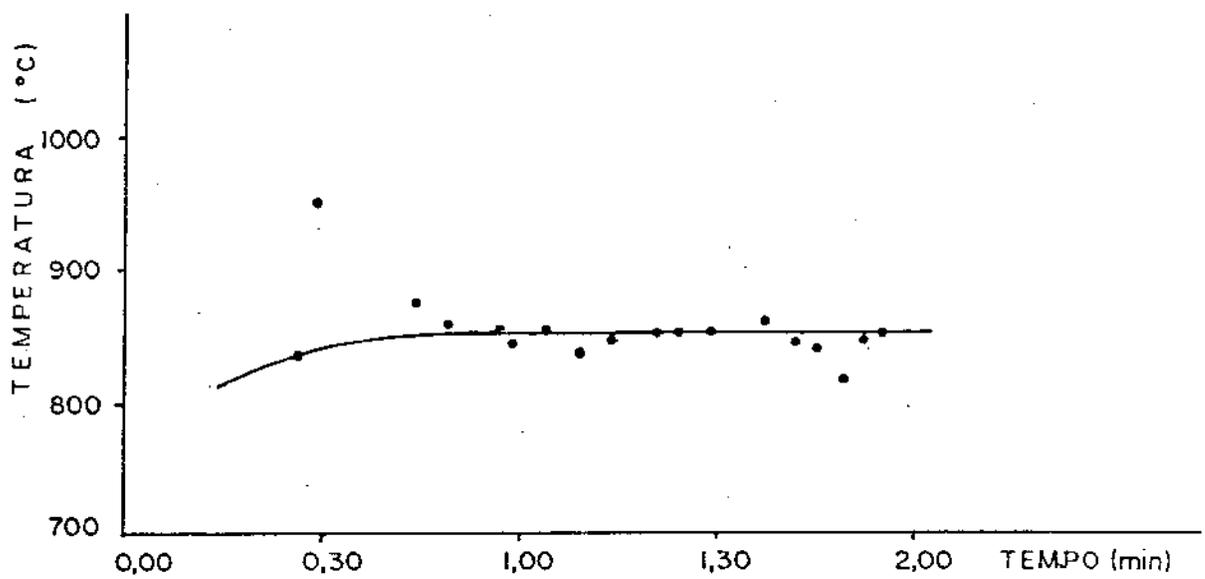


FIGURA 5.13 - Variação da temperatura na zona de redução do gaseificador em função do tempo.

Teste nº 9.

5.6 - Influência da umidade da madeira na composição média do gás.

Nas Figuras 5.14 e 5.15 são apresentados os teores de N_2 , H_2O , CO_2 , CO , CH_4 e C_2H_4 no gás produzido em função da umidade na madeira à pressão de 1 atm. Pode-se constatar que a umidade da madeira tem grande influência na composição média do gás. À medida que o teor de umidade aumenta um gás rico em N_2 , H_2O e CO_2 é produzido. O teor de CO diminui sensivelmente com a elevação da umidade da madeira e isto influencia diretamente em diversas propriedades do gás produzido devido ao seu alto poder calorífico. A quantidade de H_2 no gás aumenta ligeiramente até um teor de umidade em torno de 25% decrescendo entre 30 a 40%, sofrendo menor influência com a umidade da madeira do que o CO . Os teores de CH_4 e de C_2H_4 são constantes.

Comparando os resultados obtidos no presente trabalho referentes ao efeito da umidade na composição do gás (base úmida), Figura 5.14, verifica-se que os teores de H_2 , CO_2 , H_2O e CH_4 no gás são razoavelmente consistentes com os resultados obtidos por Hos (16), Figura 3.5, em toda faixa de umidade, ocorrendo uma diferença nas composições de CO e de N_2 . Na gaseificação da madeira com 10% de umidade obteve-se, no presente trabalho, um gás com aproximadamente 23.7% de CO enquanto que para a mesma umidade foi obtido no outro trabalho um gás com 19% de CO aproximadamente. Com o aumento da umidade na madeira, no entanto, esta diferença diminui para 7.2% e 6.9% de CO no gás obtido nos testes do presente trabalho e no outro, respectivamente, a 40% de umidade na madeira. Por ou-

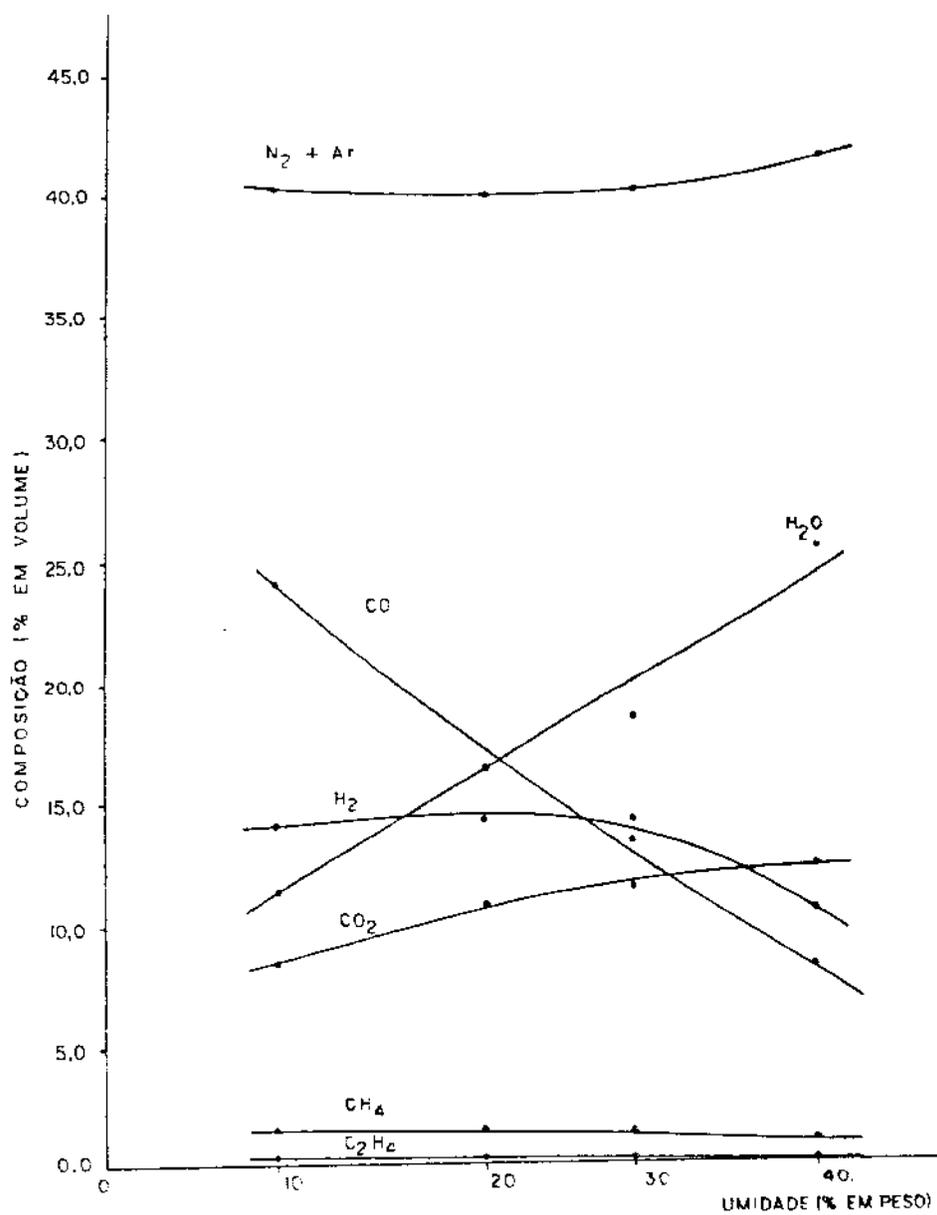


FIGURA 5.14 - Efeito da umidade da madeira na composição média do gás (base úmida).

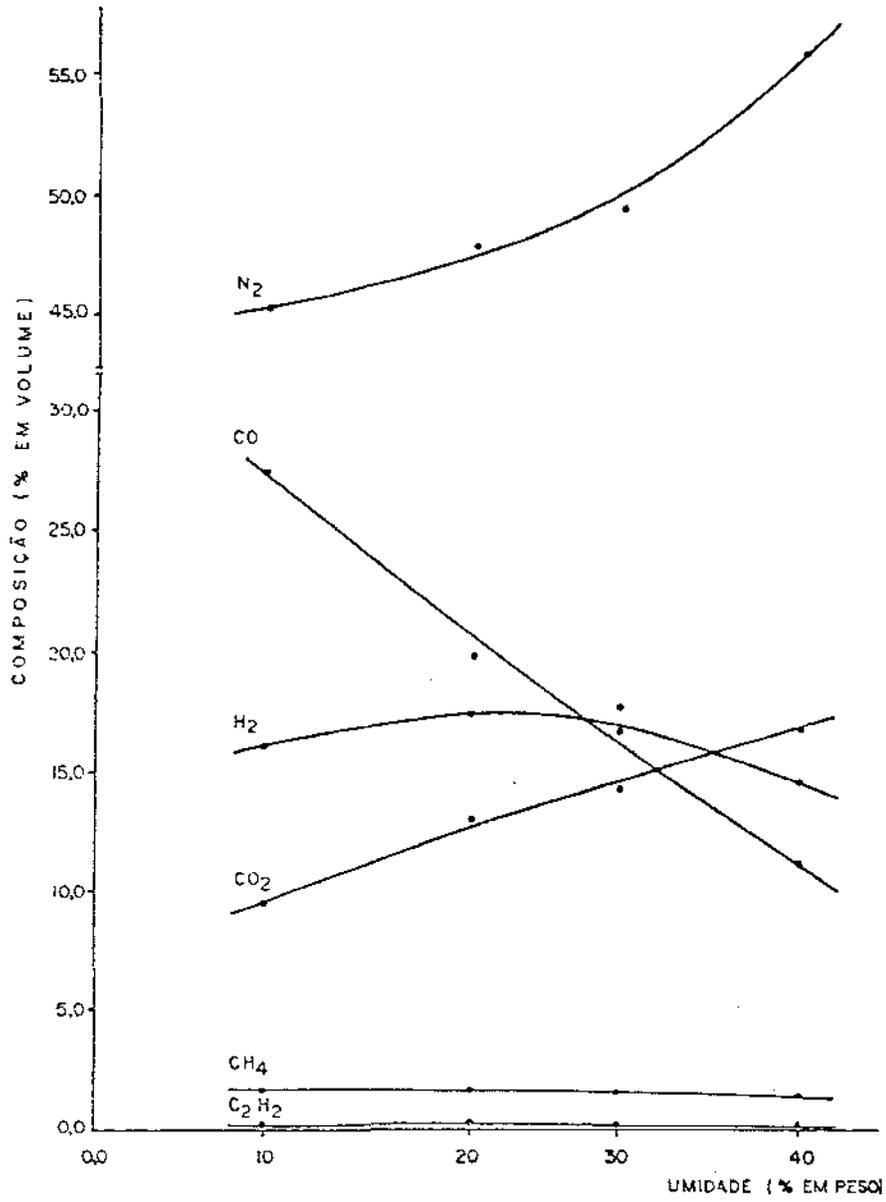


FIGURA 5.15 - Efeito da umidade da madeira na composição média do gás (base seca).

tro lado, o teor de N_2 no gás apresentado na Figura 5.14 é menor que o da Figura 3.5. Para um teor de umidade de 10% em peso, a composição de N_2 no gás obtido por Hos (16) foi em torno de 44.4% e no do presente trabalho 40.3 aproximadamente. Entre 20 e 30% de umidade na madeira as composições de N_2 em ambos os gases estão mais próximas, 40.2% para o gás obtido no presente trabalho e em torno de 42.7% para o gás produzido nos testes realizados por Hos (16). A partir de 30% de umidade na madeira as curvas afastam-se novamente chegando, em 40% de umidade a 42.1 e 46.3% de N_2 no gás obtido no presente trabalho e no outro respectivamente.

Hos (16) utilizou um gaseificador de dimensões menores em relação ao gaseificador usado no presente trabalho. Enquanto a taxa de gaseificação de madeira obtida por ele variou entre 2.6 e 4.4 Kg/h, no presente trabalho essa taxa ficou na faixa de 4.7 e 7.3 Kg de madeira por hora (base seca) para vazões de ar semelhantes. Para gaseificadores menores, devido a relação área/volume ser maior do que para gaseificadores maiores, ocorre maiores perdas fazendo com que as condições de equilíbrio não sejam atingidas. Esse fato pode justificar a diferença na composição de CO para baixas umidades de madeira, entre os resultados de Hos (16) e os resultados do presente trabalho. Quanto menor a umidade da madeira, temperaturas mais elevadas são atingidas ocorrendo maiores perdas.

Nos resultados de Redding e Goss (24), Figura 3.8, verifica-se que a composição de H_2O no gás obtido por eles varia, com o teor de umidade na madeira, de uma maneira semelhante à composição de H_2O no gás obtido no presente trabalho.

O teor de H_2 no gás produzido nos testes de Redding e Goss (24) é menor que o obtido no presente trabalho sendo essa diferença mais acentuada na faixa entre 20 a 32% de umidade na madeira. A composição de CO no gás produzido nos testes de gaseificação do presente trabalho diminui com o aumento da umidade na madeira de uma maneira mais sensível do que o outro gás. Ou seja, a composição de CO no gás apresentado na Figura 5.14 é a que varia mais acentuadamente, em relação aos demais, com o aumento do teor de umidade na madeira, seguida da composição de CO no gás obtido por Hos (16) e por fim no obtido por Redding e Goss (24). Neste último, a 10% de umidade, o teor de CO está por volta de 21% e para 40% em torno de 12.7%. Os teores de CH_4 e de C_2H_4 não foram analisados separadamente, sendo utilizado um analisador de ionização de chama para todos hidrocarbonetos, inclusive alcatrão. Por isso a composição total de hidrocarbonetos no gás produzido nos testes de Redding e Goss (24) é bem superior à soma dos teores de CH_4 e de C_2H_4 no gás obtido no presente trabalho, tanto para madeira seca como para úmida. Eles usaram um gaseificador maior do que o utilizado no presente trabalho, isto é, condições de operação diferentes foram utilizadas. Pelas mesmas razões apresentadas na análise com os resultados de Hos (16) justifica-se a obtenção de teores diversificados dos gases produzidos nos testes realizados por Redding e Goss (24) e os realizados no presente trabalho. Outro fator que influi fortemente na obtenção dos gases é o tempo de residência que é maior para gaseificadores maiores.

5.7 - Efeito da umidade da madeira no poder calorífico inferior calculado do gás.

As curvas da Figura 5.16 mostram como varia o poder calorífico inferior calculado do gás seco e do gás úmido em função da umidade da madeira. Para o cálculo do poder calorífico inferior do gás nas condições padrões foram usadas as composições médias experimentais dos gases. Verificou-se que com o aumento do teor de umidade a quantidade de CO no gás diminui, isto acarreta a redução do poder calorífico inferior como se pode observar na Figura 5.16. O poder calorífico inferior do CH_4 e o do C_2H_4 , apesar de serem os mais elevados, não apresentam efeito marcante no poder calorífico inferior do gás pelo fato dos teores de CH_4 e de C_2H_4 serem constantes e muito baixos.

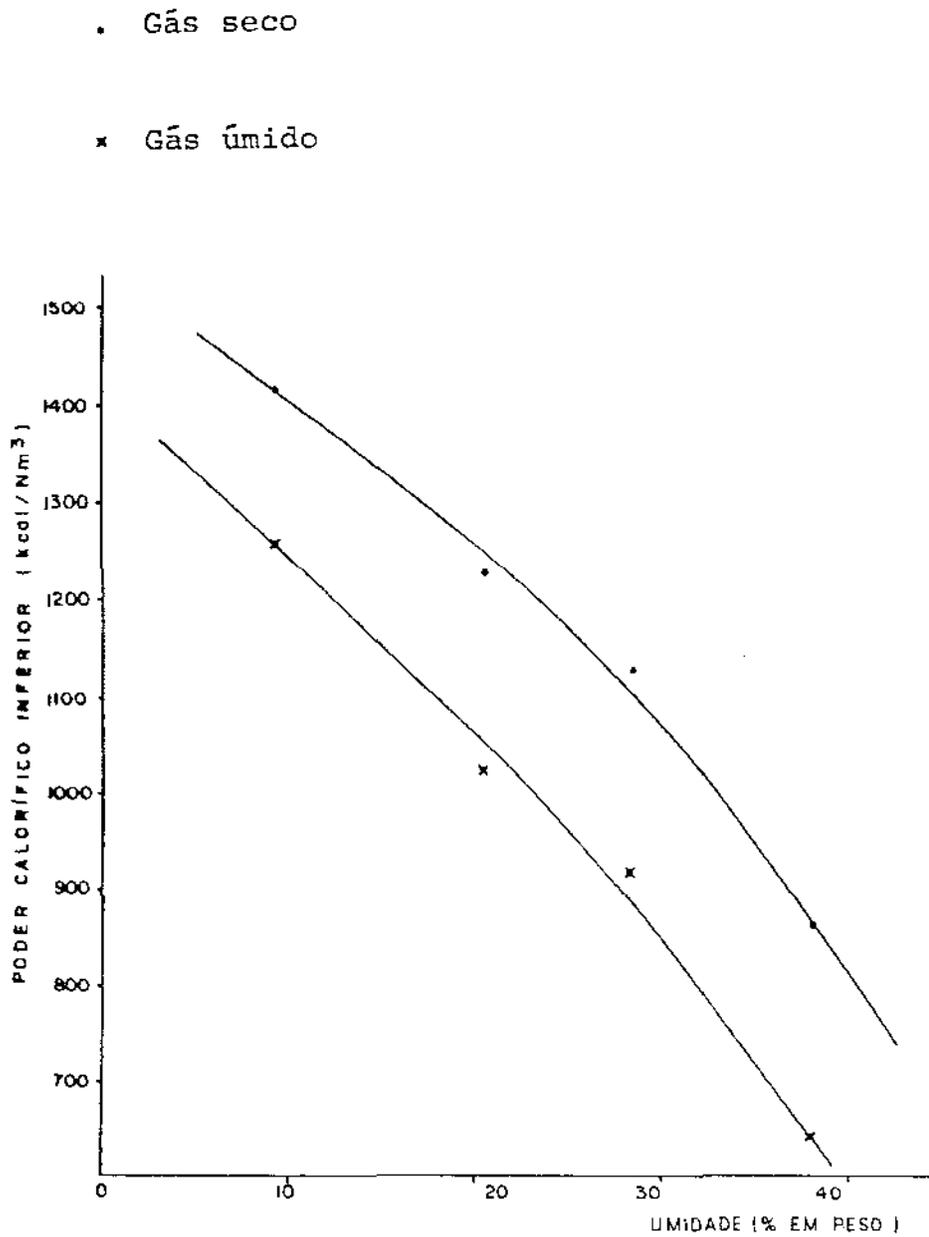


FIGURA 5.16 - Efeito da umidade da madeira no poder calorífico inferior calculado do gás.

5.8 - Efeito da umidade da madeira na temperatura adiabática de chama.

A Figura 5.17 mostra a variação da temperatura adiabática de chama do gás seco e do gás úmido com a umidade da madeira. Utilizaram-se as composições médias experimentais dos gases para o cálculo da temperatura adiabática de chama. Constatou-se que a temperatura adiabática de chama diminui gradativamente com a umidade da madeira. Para o gás seco a 25°C a TAC é sempre mais elevada do que para o gás úmido à temperatura arbitrária de 450°C.

• Gás úmido (450°C)

× Gás seco (25°C)

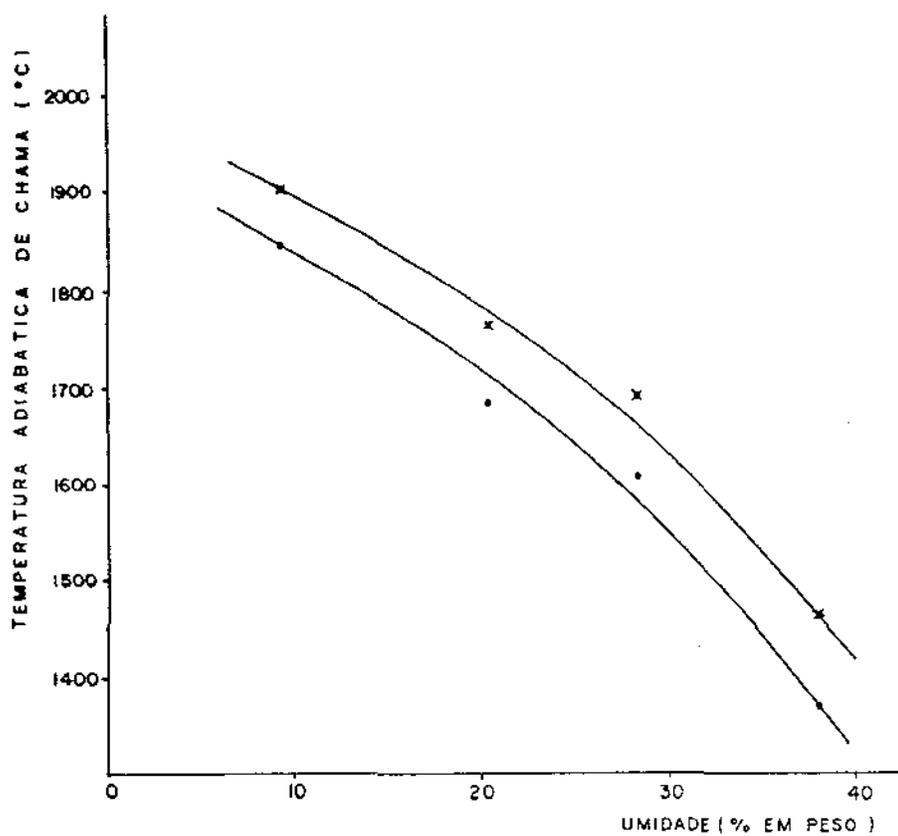


FIGURA 5.17 - Efeito da umidade da madeira na temperatura adiabática de chama calculada.

5.9 - Efeito da umidade da madeira na eficiência de gaseificação e na entalpia do gás.

Pelas curvas da Figura 5.18, que apresenta a influência da umidade da madeira na eficiência de gaseificação, verifica-se que, para o gás seco, a eficiência é aproximadamente constante com a umidade da madeira até em torno de 25% em peso, decrescendo acentuadamente a partir de 30% de umidade. No cálculo da eficiência de gaseificação para o gás úmido, supõe-se arbitrariamente uma temperatura de 450°C para efeito de cálculo. Verifica-se que se obtêm eficiências superiores a 80% se o gás for utilizado quente com a umidade na madeira até 30% em peso. A elevação inicial da eficiência deve-se ao fato da influência relativa da entalpia do gás aumentar com o aumento da umidade. Este fato também justifica o maior afastamento entre as curvas a partir de 30% de umidade na madeira.

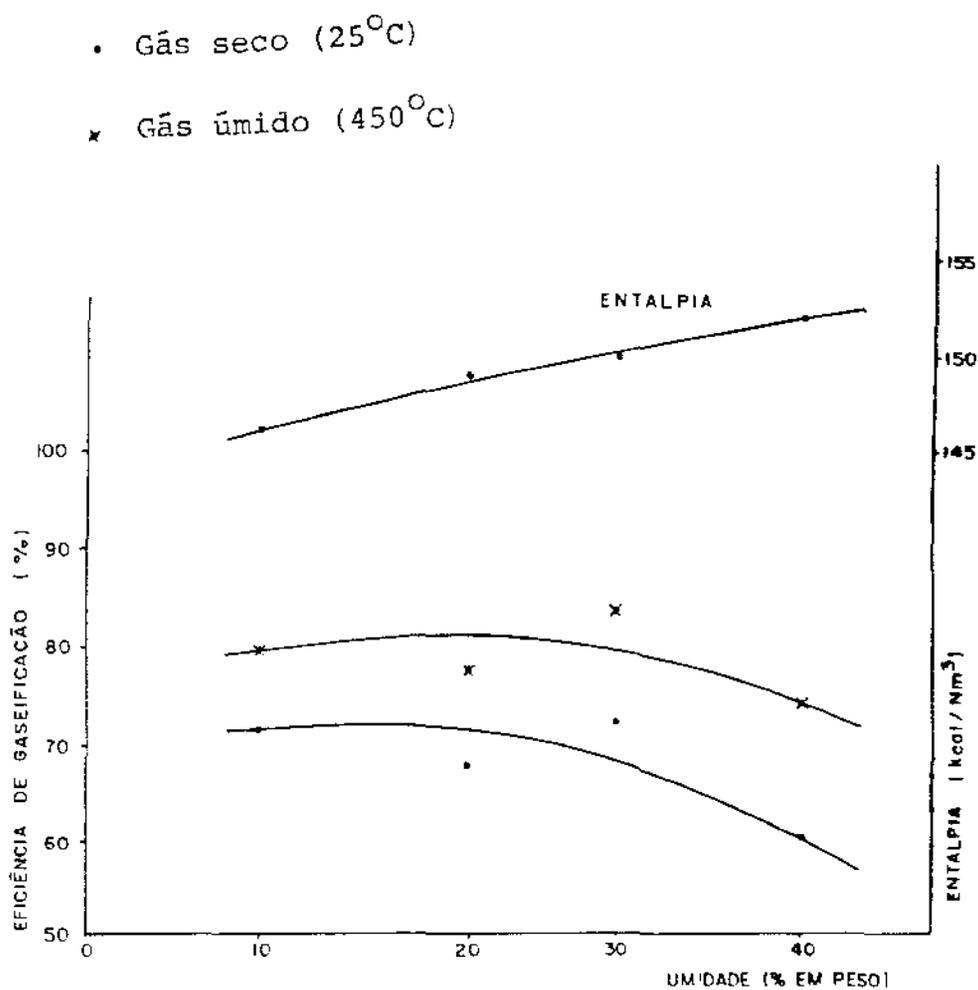


FIGURA 5.18 - Efeito da umidade da madeira na eficiência de gaseificação calculada e na entalpia do gás.

5.10 - Influência da vazão de ar no poder calorífico inferior e na composição média do gás e na eficiência de gaseificação.

Através da Figura 5.19, que mostra o efeito da vazão de ar no poder calorífico inferior e na composição média do gás assim também como na eficiência de gaseificação, observa-se que a vazão de ar na faixa de 10 a 20 Kg de ar por hora não influi muito na composição média dos gases. O teor de H_2 aparentemente aumenta entre 12 e 20 Kg de ar seco por hora diminuindo entre 20 e 30 Kg/h. Com o teor de H_2O ocorre o inverso na mesma faixa de vazão.

Na Figura 5.20 verifica-se que o teor de N_2 varia mais acentuadamente com a vazão de ar assim como o teor de CO. A variação da composição de H_2 no gás comporta-se de uma maneira semelhante ao da Figura 5.19 na qual tem-se a composição média do gás em base úmida.

O poder calorífico inferior do gás úmido eleva-se na faixa de 12 a 20 Kg de ar seco por hora, enquanto o do gás seco diminui ligeiramente com o aumento da vazão de ar.

As curvas da eficiência de gaseificação são semelhantes, verificando-se que para o gás em base úmida ela é mais elevada para qualquer faixa de vazão de ar.

Como só foram obtidos três pontos nas Figuras 5.19 e 5.20, as curvas não apresentam resultados conclusivos.

Nas curvas das Figuras 5.19 e 5.20 foi acrescentado mais um ponto obtido com a umidade da madeira ligeiramente in

inferior (20.47%) à umidade determinada para os outros pontos, e com a vazão de ar seco igual a 12.74 Kg/h, a fim de se observar melhor as tendências das curvas. Constata-se que os teores de CO, H₂ e de H₂O estão afastados das curvas devido provavelmente à diferença de umidade. A eficiência obtida para este ponto também difere da indicada pela curva tanto para o gás úmido como para o seco.

* Umidade da madeira = 20.47% em peso.

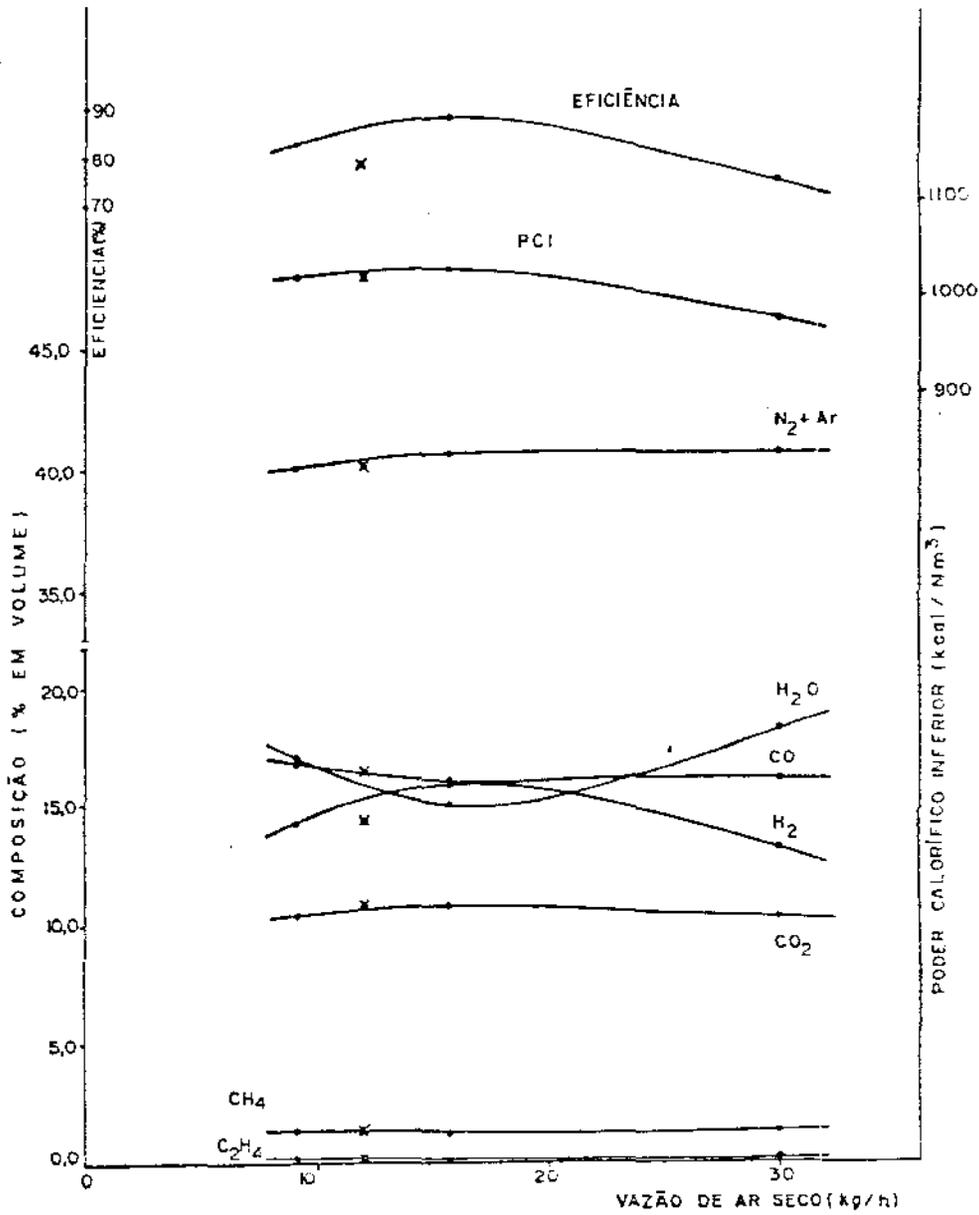


FIGURA 5.19 - Influência da vazão de ar na composição média (base úmida), no poder calorífico do gás e na eficiência de gaseificação.

Umidade da madeira = 22.94% em peso.

Umidade da madeira = 20.47% em peso.

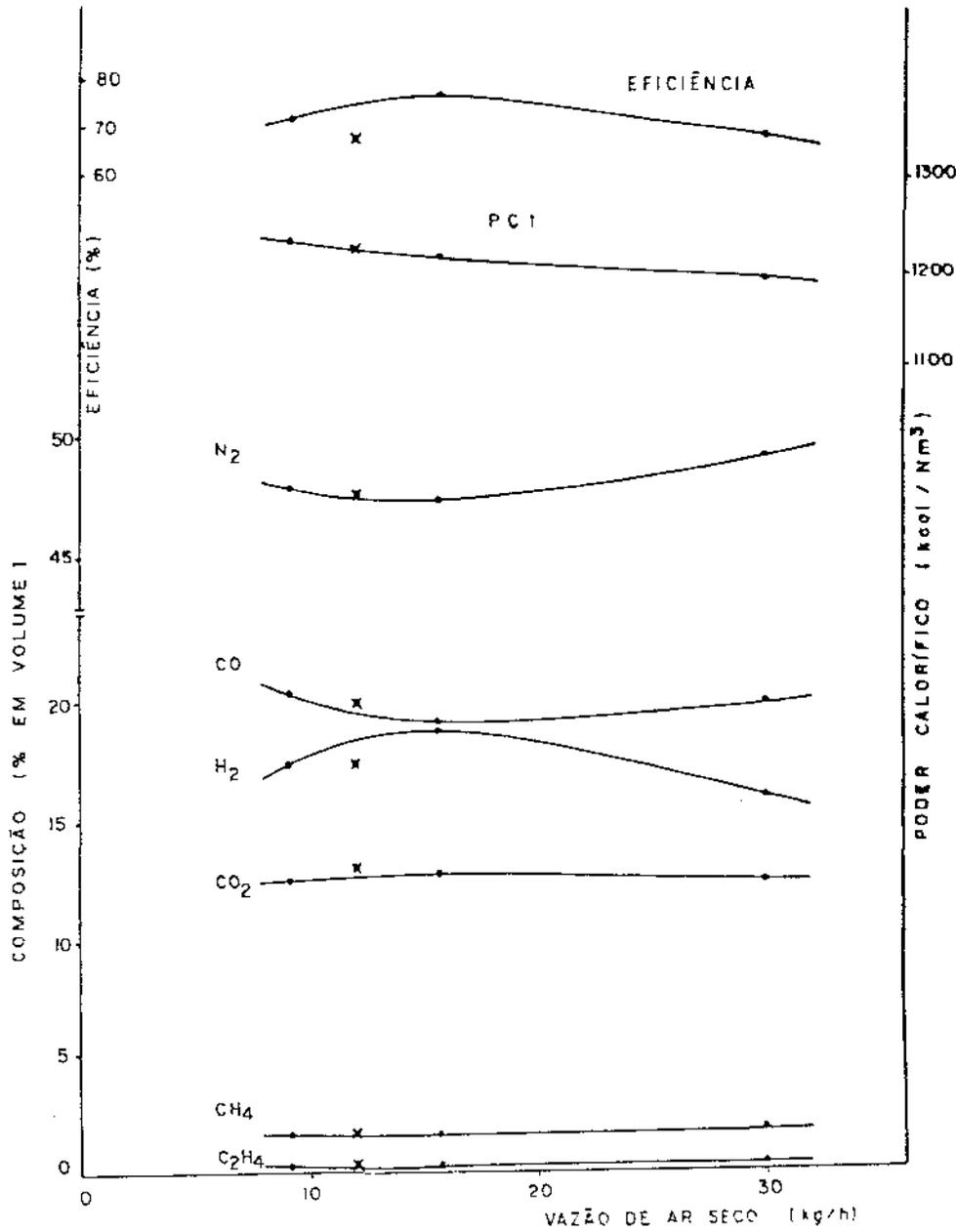


FIGURA 5.20 - Influência da vazão de ar na composição média (base seca), no poder calorífico inferior do gás e na eficiência de gaseificação.

Umidade da madeira = 22.94% em peso.

6. MODELAGEM DO COMPORTAMENTO DO GASEIFICADOR

O modelo termodinâmico do processo de gaseificação permite calcular as composições dos gases produzidos a partir de determinadas condições de reação, que podem ser temperatura, pressão e quantidades de reagentes, estabelecendo conversões máximas possíveis. Variando as condições de reação obtém-se o efeito nos demais parâmetros que estão interrelacionados, sendo assim possível otimizar um processo em desenvolvimento, ou comparar os resultados obtidos no modelo termodinâmico com os resultados experimentais para desse modelo compreender melhor o processo e o efeito das diferentes variáveis envolvidas.

Todos os modelos termodinâmicos encontrados na literatura basearam-se na suposição de que uma ou mais reações entre C, CO, CO₂, H₂ e H₂O atingirão o equilíbrio químico. Há dois grupos de modelo: um, o mais antigo, é baseado na constante de equilíbrio das reações o qual resulta num sistema de equações não linear. O outro baseia-se na minimização da energia livre de Gibbs que calcula as composições de equilíbrio simultâneo de até dez espécies químicas e não depende de esquemas de estequiometrias arbitrárias.

Os modelos mais antigos que se conhece são o apresentado por Schläpfer (27), 1937, baseado na constante de equilíbrio, assim também como o modelo de Gumz (13), 1950.

Cousins (6) desenvolveu um modelo baseado nas seguintes suposições:

- o combustível é formado apenas de C, H, O e N

- as reações do enxofre presente no combustível são desprezadas
- todo nitrogênio que entra na zona de reação sai na forma de N_2 no gás produzido
- a reação entre nitrogênio e hidrogênio para formar amônia é desprezada
- todo carbono e hidrogênio do combustível passam a CO_2 e H_2O na zona de oxidação, incluindo também os pirolenhosos.

Foram consideradas as seguintes reações independentes:

reação de Boudouard



reação do gás de água



reação de formação de metano



Para as reações acima têm-se as seguintes constantes de equilíbrio:

$$K_{pB}(T) = \frac{P(v_{CO})^2}{v_{CO_2}} \quad (6.1)$$

$$K_{pW}(T) = \frac{P v_{CO} v_{H_2}}{v_{H_2O}} \quad (6.2)$$

$$K_{PM}(T) = \frac{v_{CH_4}}{P(v_{H_2})^2} \quad (6.3)$$

onde: v_i é o volume parcial do gás i

P é a pressão

Outra equação a ser levada em conta no equilíbrio das reações é:

$$v_{CO} + v_{H_2} + v_{CO_2} + v_{H_2O} + v_{CH_4} + v_{N_2} = 1 \quad (6.4)$$

Pelo que foi apresentado, têm-se quatro equações (6.1, 6.2, 6.3 e 6.4) e 8 variáveis (T, \hat{P}, v_i), sendo necessárias ainda as equações de balanço de massa dos elementos C, H, O e N per fazendo um total de 8 equações e 13 variáveis.

A temperatura de equilíbrio, o volume total do gás produzido, a pressão total e a composição do combustível e do agente de gaseificação são fixados. Assim ficam-se com 8 variáveis e 8 equações.

Esse modelo determina a composição dos gases (CO, CO_2, H_2, H_2O, N_2 e CH_4) e as quantidades de combustível e de agente de gaseificação empregadas.

Em princípio é possível resolver um sistema com 8 equações e 8 incógnitas, mas na prática pode ser extremamente tedioso, especialmente quando as constantes de equilíbrio e as entalpias dependem não linearmente de uma das incógnitas (T).

Outro motivo que fez com que se procurasse um outro modelo foi o fato de que os gráficos apresentados por Cousins

(6) são todos apresentados em função da temperatura de reação, e no presente trabalho pretende-se relacionar a composição dos gases efluentes e outros parâmetros com a umidade da madeira.

O modelo descrito por Hos (16) consiste em realizar os balanços de elementos (C, H, O e N) combinados com a lei de Dalton de gás ideal, um balanço de entalpia no qual a razão $\eta = \frac{\Delta H_{\text{gás}}}{\Delta H_{\text{combustível}}}$ ($\Delta H =$ calor inferior de combustão) é um valor fixado empiricamente, e o equilíbrio homogêneo da reação de shift com o valor da constante de equilíbrio desta reação, função da temperatura.

$$K_s (T) = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{CO}}}{P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2}} \quad (6.5)$$

Assim têm-se oito equações. São empregadas onze variáveis, ou sejam, fração de CH_4 no gás produzido, temperatura de equilíbrio, calor perdido, constante de equilíbrio, frações de CO , CO_2 , H_2 , H_2O e N_2 no gás produzido, quantidade de ar e de combustível. As três primeiras são fixadas. A fração de CH_4 foi de 1.5% em volume. A temperatura e η foram variadas até ajustar a composição experimental do gás. E assim obteve-se uma correlação satisfatória entre o modelo e a experiência, achando-se a temperatura de equilíbrio e o calor perdido que melhor se ajustaram à composição experimental do gás combustível. O modelo foi utilizado para calcular as demais variáveis.

Uma desvantagem relevante deste modelo é a fixação da quantidade de metano e do calor perdido, pois torna-se me-

complicada e lenta. Por isto foi utilizado um modelo que calcula as composições de equilíbrio simultâneo, baseado na minimização da energia livre de Gibbs total do sistema reacional, também utilizado por Makray et al. (19). A energia livre de Gibbs do sistema reacional é dada por:

$$\frac{G}{RT} = n_c \frac{G_c^0}{RT} + \sum_{i=1}^m n_i \frac{G_i^0}{RT} + \ln \frac{n_i}{n} + \ln P \quad (6.6)$$

onde: G é a energia livre de Gibbs

G^0 é a energia livre de Gibbs no estado padrão

R é a constante dos gases

T é a temperatura absoluta

n é o número de moles

m é o número de componentes gasosos

P é a pressão

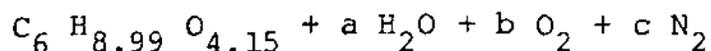
e os subscritos:

c indica carbono sólido e

i indica componente gasoso.

A minimização da energia livre de Gibbs dada pela equação (6.6) é realizada através do método "steepest descent method" (4).

No modelo utilizado é suposto que o combustível sólido reage com o agente de gaseificação e produz um gás contendo CO , CO_2 , H_2 , CH_4 , H_2O e N_2 , caso se utilize o ar, conforme a reação química global da gaseificação da madeira dada a seguir:



O modelo aproxima-se da realidade quando a conversão dos combustíveis sólidos é alta e quando não são produzidos alcatrões nem outros sub-produtos. As condições de operação de pressão e temperatura são tais que permitem considerar comportamento ideal dos gases. Considerou-se também o carbono como o único sólido presente no sistema em equilíbrio.

São fornecidos ao programa as relações de conservação de átomos entre produtos e reagentes e as propriedades termodinâmicas que permitem o cálculo da energia livre de Gibbs das substâncias envolvidas, nas condições de reação. O método empregado é geral e não é necessário estipular esquemas de estequiometrias arbitrárias, como no método de constantes de equilíbrio.

Nos cálculos de equilíbrio, fixadas a temperatura, a pressão e a umidade da madeira, determina-se iterativamente por um método de convergência para o valor que resulta no consumo total do carbono reagente, a quantidade de ar, de oxigênio ou de vapor de água necessários para a gaseificação total.

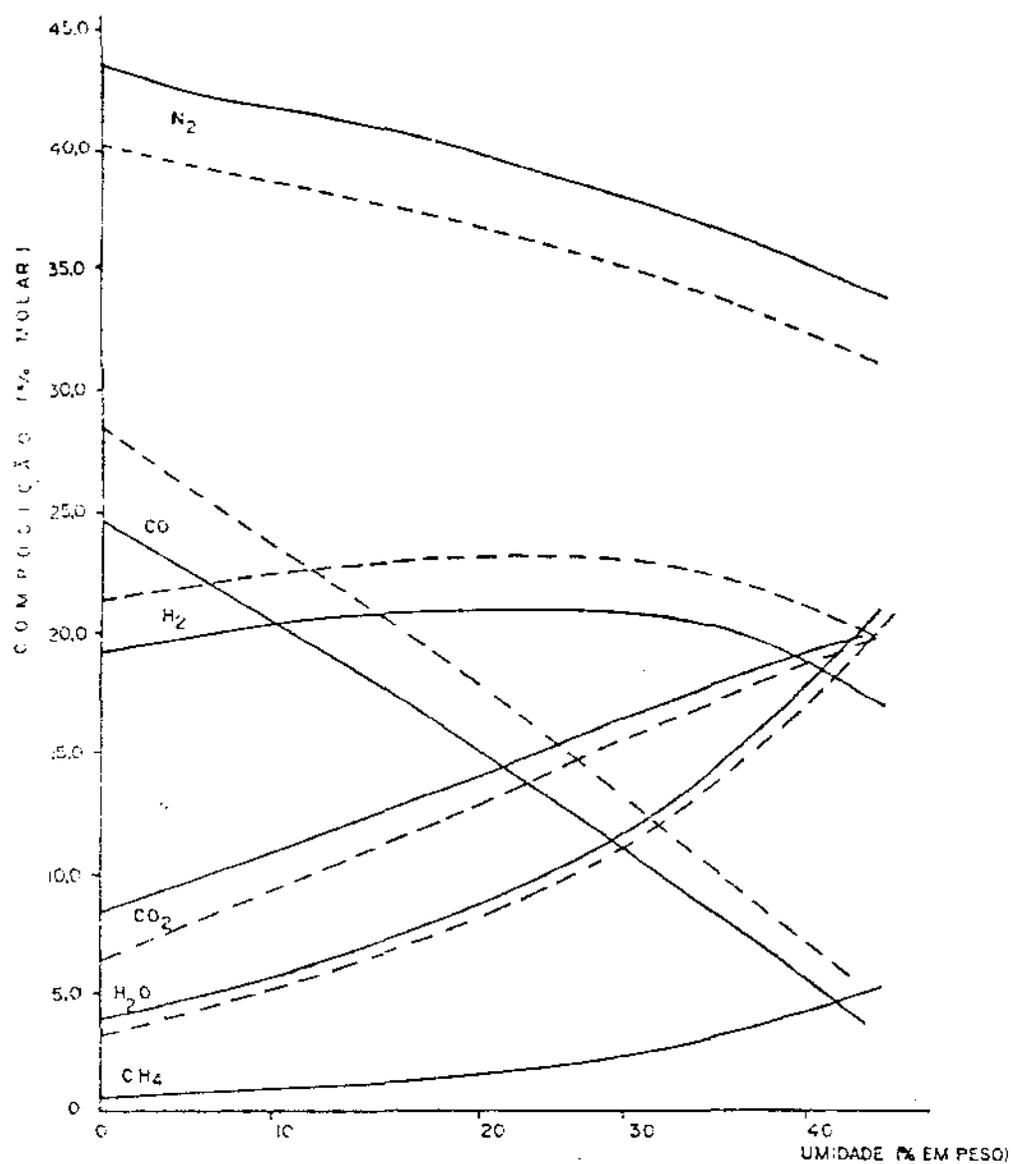
O programa foi executado com ar (21% O_2 e 79% N_2) como agente de gaseificação, pressão da reação de 1 atm e com teores de umidade da madeira variando de zero a 40% em base úmida. A partir desses resultados foram feitos gráficos que mostram como variam as composições de H_2 , N_2 , CH_4 , CO , CO_2 e H_2O no gás produzido em função da umidade da madeira e o po-

der calorífico do gás, que é função do teor dos três gases combustíveis na mistura. A influência da umidade da madeira na temperatura de reação é apresentada, assim como a variação da composição e do poder calorífico inferior do gás em função da temperatura de reação.

A Figura 6.1 apresenta o efeito da umidade da madeira na composição do gás úmido produzido na gaseificação a 1 atm de pressão com ar a 25°C, sem perdas (adiabático) e admitindo-se 5% de perdas em relação ao poder calorífico inferior da madeira gaseificada.

Verifica-se que, de um modo geral, todas as curvas de composição dos gases obtidos experimentalmente (Figura 5.14) apresentam forma e inclinação semelhantes às do modelo termodinâmico. Observa-se uma diferença aproximadamente constante entre elas de, no máximo, 8% (valor absoluto) em volume, se se comparar as curvas obtidas na parte experimental do presente trabalho e as obtidas através do modelo considerando o ar a 25°C e com 5% de perdas. Nestas condições a temperatura de reação variou na faixa de 800.1 a 976.4 K. A Figura 6.2 apresentada por Yang (33) mostra a energia livre de Gibbs de diversas reações importantes na gaseificação como função da temperatura. Essa Figura ajuda na análise do modelo e dos resultados experimentais, pois se o valor da energia livre de Gibbs for negativo, indica que o equilíbrio é favorável para determinada reação.

Comparando-se a variação do teor de CO com a umidade da madeira obtida nos testes do presente trabalho com a do

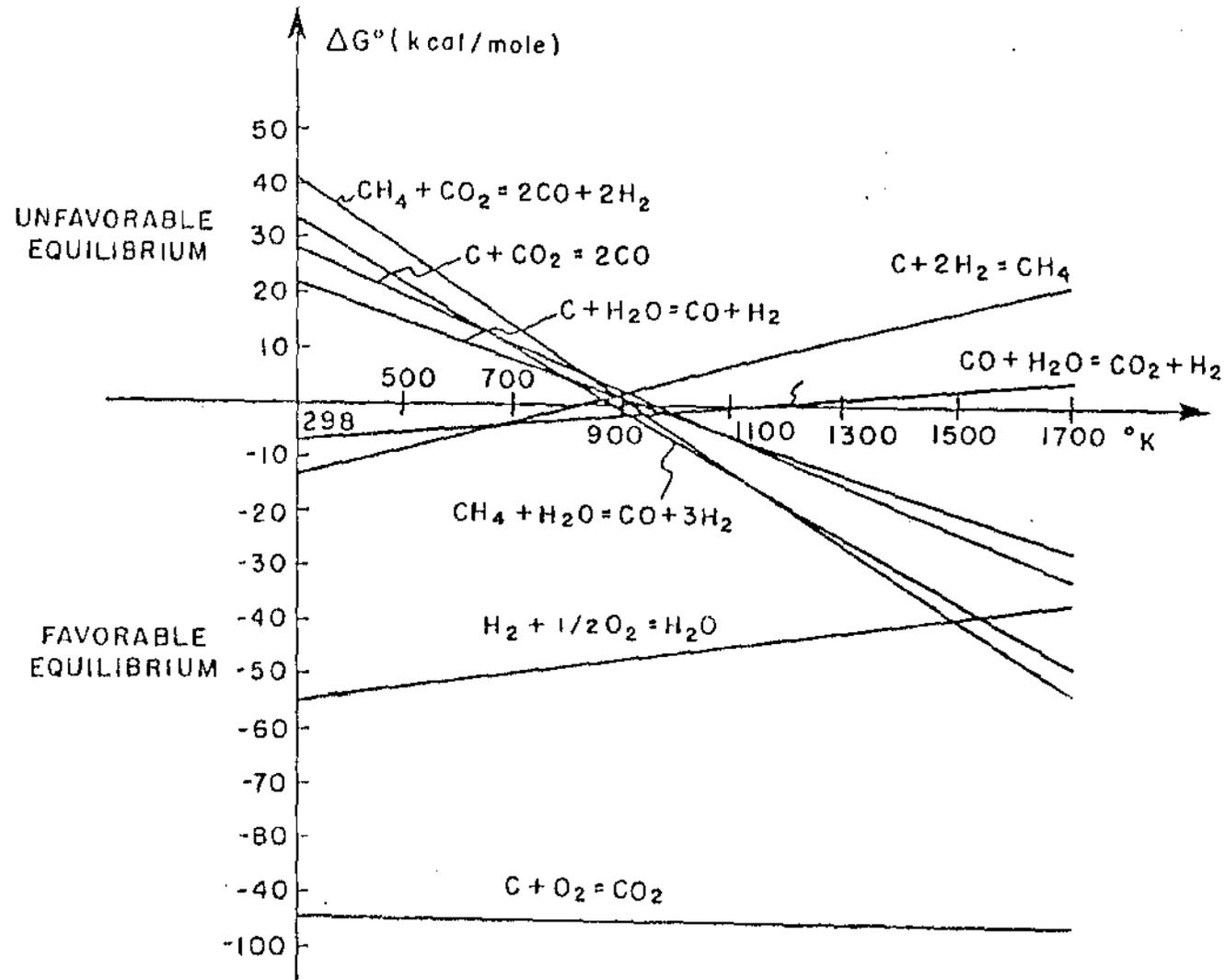


— sem perdas

--- com 5% de perdas

FIGURA 6.1 - Influência da umidade da madeira na composição do gás (base úmida) com temperatura do ar = 25°C.

BC/4922



Source of primary data: JANAF tables

FIGURA 6.2 - Gibbs free energy of important gasification reactions.

modelo, admitindo-se ar a 25°C e sem perdas, verifica-se que são semelhantes. A formação de CO dá-se pela reação de redução de carbono



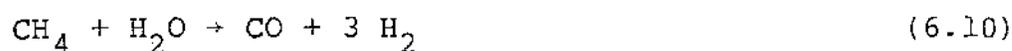
pela reação



pela reação



e pela reação composta



todas favorecidas por temperaturas elevadas (na faixa de 850-1000 K), ou seja, à medida que aumenta a umidade da madeira, diminui a temperatura e desfavorece a formação de CO.

A reação do gás de água



que tem o equilíbrio favorável até a temperatura em torno de 1200 K consome CO a temperaturas mais baixas, e produz CO₂. Isto é, para temperaturas mais baixas a formação de CO₂ é estimulada, o que se comprova pelo modelo e pelos resultados do presente trabalho. Provavelmente o equilíbrio não foi atingido durante o processo de gaseificação do presente trabalho, pois foram obtidos teores mais baixos de CO₂. As reações (6.7) e (6.9) consomem CO₂ em temperaturas mais elevadas, ou em umidades mais baixas.

O mesmo tipo de curva que representa a composição de H_2 no gás foi obtido tanto no modelo termodinâmico como nos testes do presente trabalho, porém neste último, com a composição bem mais baixa, mesmo quando comparado com os resultados onde foi admitido 5% de perdas. Em contrapartida a quantidade de H_2O no gás do modelo é bem menor do que a do presente trabalho. Provavelmente a reação (6.8) e a reação do gás de água (6.11) tenham contribuído para a obtenção de altos teores de H_2 e de baixos teores de H_2O . Assim como a influência da reação (6.10), que é favorecida a partir de aproximadamente 850 K. Porém, por outro lado, a reação



favorecida por temperaturas até em torno de 820 K utiliza o H_2 para formação de metano.

No modelo é suposto que a reação (6.12) atinge o equilíbrio e por esta razão um teor elevado de CH_4 é obtido, principalmente em umidades da madeira mais altas, ou seja, onde a temperatura de reação está em torno de 800 e 820 K. Pode-se concluir que no processo de gaseificação empregado no presente trabalho, a formação de CH_4 provavelmente não se deu pela reação (6.12) e sim pelo craqueamento de hidrocarbonetos mais pesados ao passarem como voláteis através do leito de carvão incandescente, isto é, na região onde ocorrem as reações de oxidação e de redução. A reação (6.9) é responsável pelo teor de CH_4 mais baixo para umidades mais baixas onde a temperatura de reação é bem mais elevada, pois essa reação é favorecida a partir de aproximadamente 920 K. Tem-se ainda a

influência da reação (6.10) que desfavorece a formação de metano a temperaturas mais elevadas.

A diferença no teor de N_2 no gás é devido ao fechamento na composição total do gás.

Devido ao grande número de reações e componentes envolvidos optou-se por um modelo que apresenta um estudo do efeito global de todos componentes e de todas reações. Verifi

ca-se que no processo de gaseificação do presente trabalho o tamanho do gaseificador, que reduz o tempo de retenção dos cavacos de madeira e o agente de gaseificação utilizado, que não permite que temperaturas mais elevadas sejam atingidas, contribuem para que o equilíbrio não seja alcançado em todas reações. O fato do teor de CO ter sido o único semelhante ao do modelo termodinâmico pode ser justificado devido a reação (6.10) chegar ao equilíbrio em reatores menores, com baixo teor de umidade e tempo de residência reduzido.

A Figura 6.3 apresenta o efeito da umidade da madeira na temperatura de equilíbrio da reação e no poder calorífico inferior do gás. Verifica-se que considerando o ar a $25^{\circ}C$ e com 5% de perdas obtém-se temperaturas de reação na faixa 784 a 954 K. Levando em conta o pré-aquecimento do ar a $400^{\circ}C$ elevam-se as temperaturas cerca de 14 K. Admitindo-se que o processo é adiabático, as temperaturas elevam-se cerca de 16K em relação ao processo com 5% de perdas. Para se obter maiores temperaturas (814 a 998 K) é necessário não haver perdas além de pré-aquecer o ar. Em todas essas condições a temperatura de equilíbrio da reação decresce com o aumento da umidade na madeira.

- × Temperatura do ar = 400°C, sem perdas
- Temperatura do ar = 25°C, sem perdas
- ◊ Temperatura do ar = 400°C, com 5% de perdas
- ◑ Temperatura do ar = 25°C, com 5% de perdas

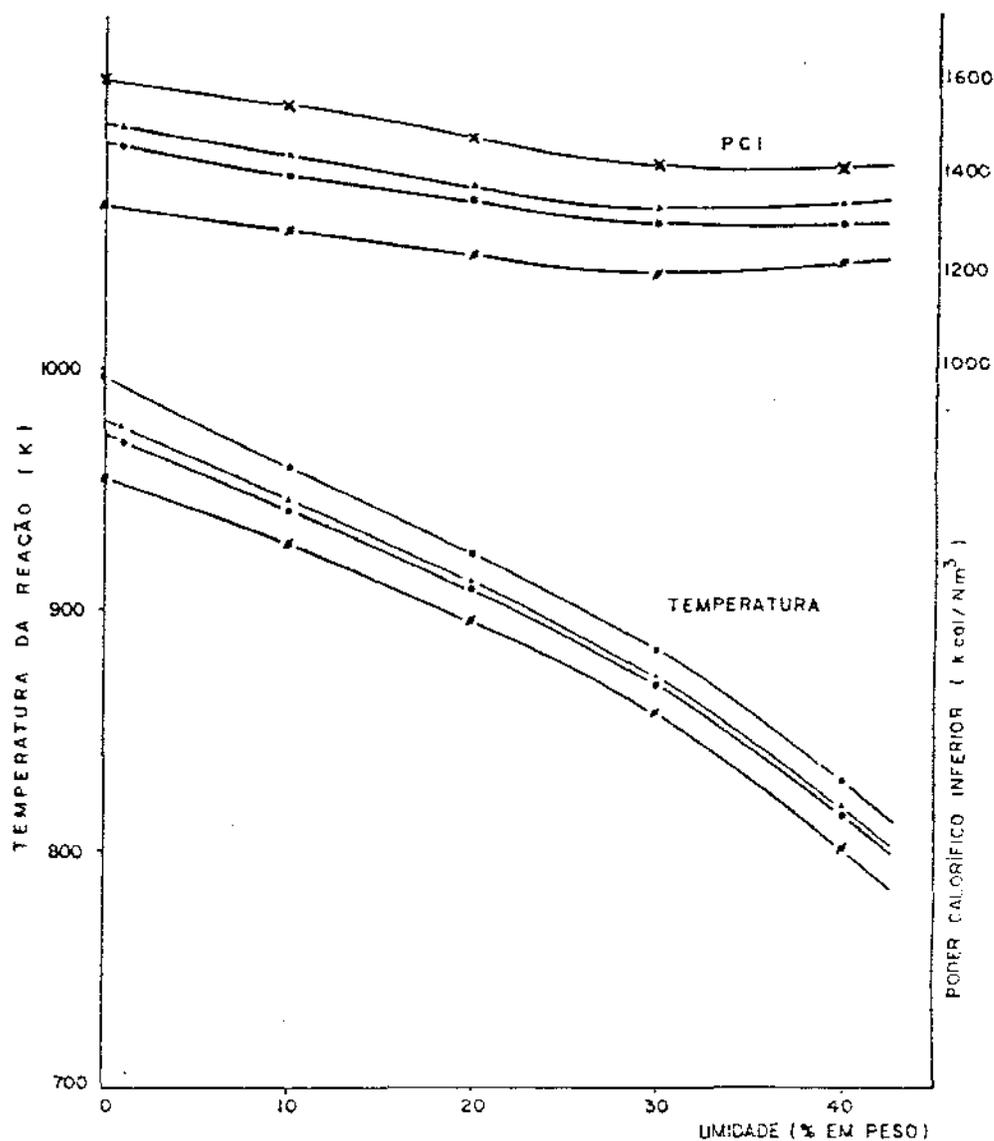
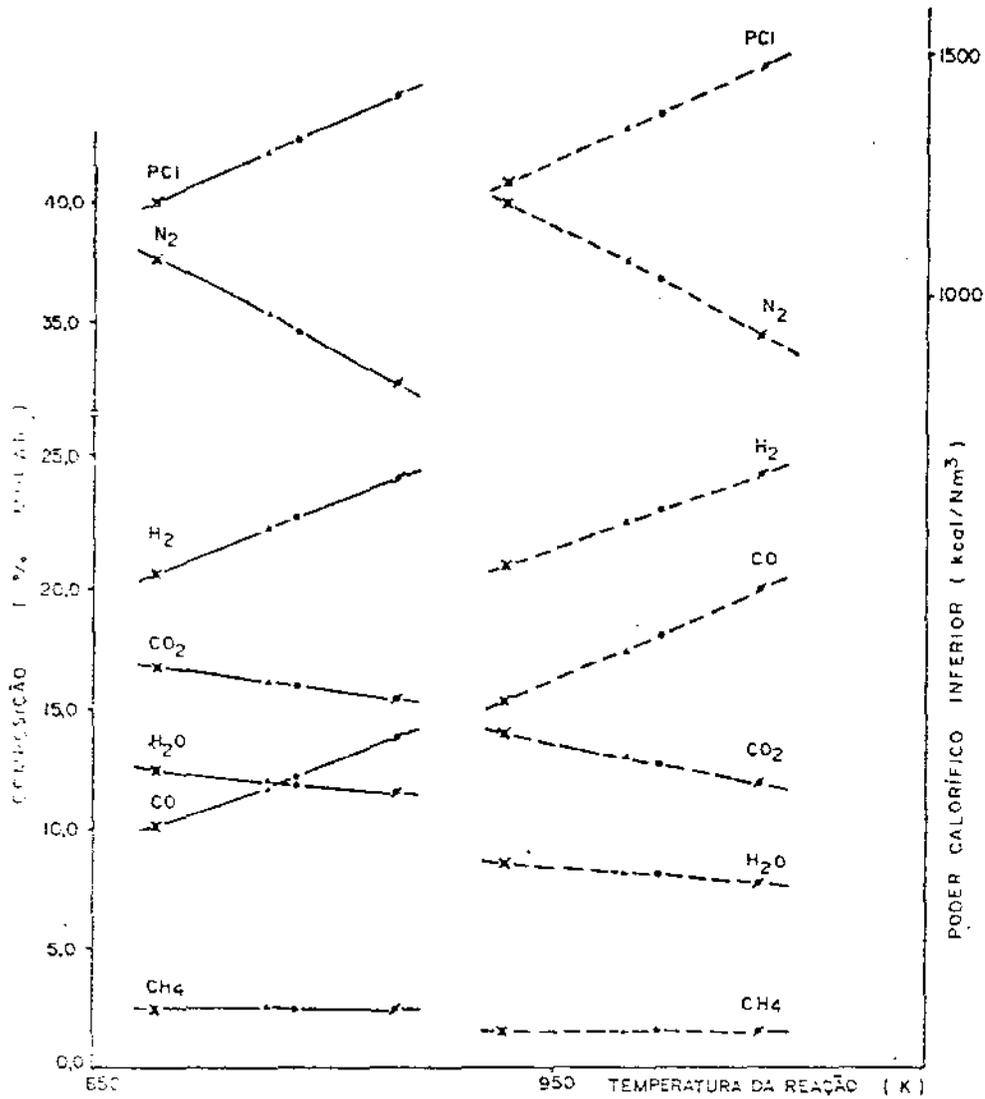


FIGURA 6.3 - Efeito da umidade da madeira na temperatura da reação e no poder calorífico inferior do gás.

Quanto ao poder calorífico inferior do gás constata-se que é crescente nas mesmas condições que a temperatura da reação. Isto é, supondo que não há perdas (adiabático) e fazendo pré-aquecimento do ar a 400°C obtém-se gás com o mais alto poder calorífico, na faixa de 1420 a 1600 Kcal/Nm^3 . O poder calorífico inferior do gás não sofre uma redução acentuada com o aumento da umidade, como nos resultados da parte experimental do presente trabalho (Figura 5.16), devido ao alto teor de CH_4 obtido através do modelo termodinâmico. Ou seja, o teor de CO diminui com o aumento da umidade na madeira, mas é compensado, em parte, com a elevação da quantidade de CH_4 , que possui calor de combustão maior. Então o poder calorífico inferior do gás reduz apenas ligeiramente na faixa de 25 a 35% em peso de umidade na madeira.

Pela Figura 6.4, que apresenta a composição dos gases em função da temperatura de reação, observa-se que, para uma dada umidade da madeira, os teores de N_2 , CO_2 e H_2O crescem com o aumento da temperatura na seguinte ordem: temperatura do ar a 25°C e com 5% de perdas, temperatura do ar a 400°C e com 5% de perdas, e considerando que não há perdas, temperatura do ar a 25°C e por fim a 400°C . Os teores de H_2 e CO crescem na mesma ordem enquanto o de CH_4 permanece constante. Verifica-se ainda que, pelo teor de CO, por exemplo, utilizando-se madeira mais seca obtém-se teores mais elevados com relação à umidade mais alta mesmo se o ar estiver pré-aquecido. Com o teor de H_2 não ocorre variação acentuada se usar madeira mais seca, porém o teor de CO_2 será mais baixo utilizando madeira com 20% de umidade, temperatura do ar igual

- Temperatura do ar = 25°C, com 5% de perdas
- Temperatura do ar = 400°C, com 5% de perdas
- Temperatura do ar = 25°C, sem perdas
- Temperatura do ar = 400°C, sem perdas



— Umidade da madeira = 30% em peso

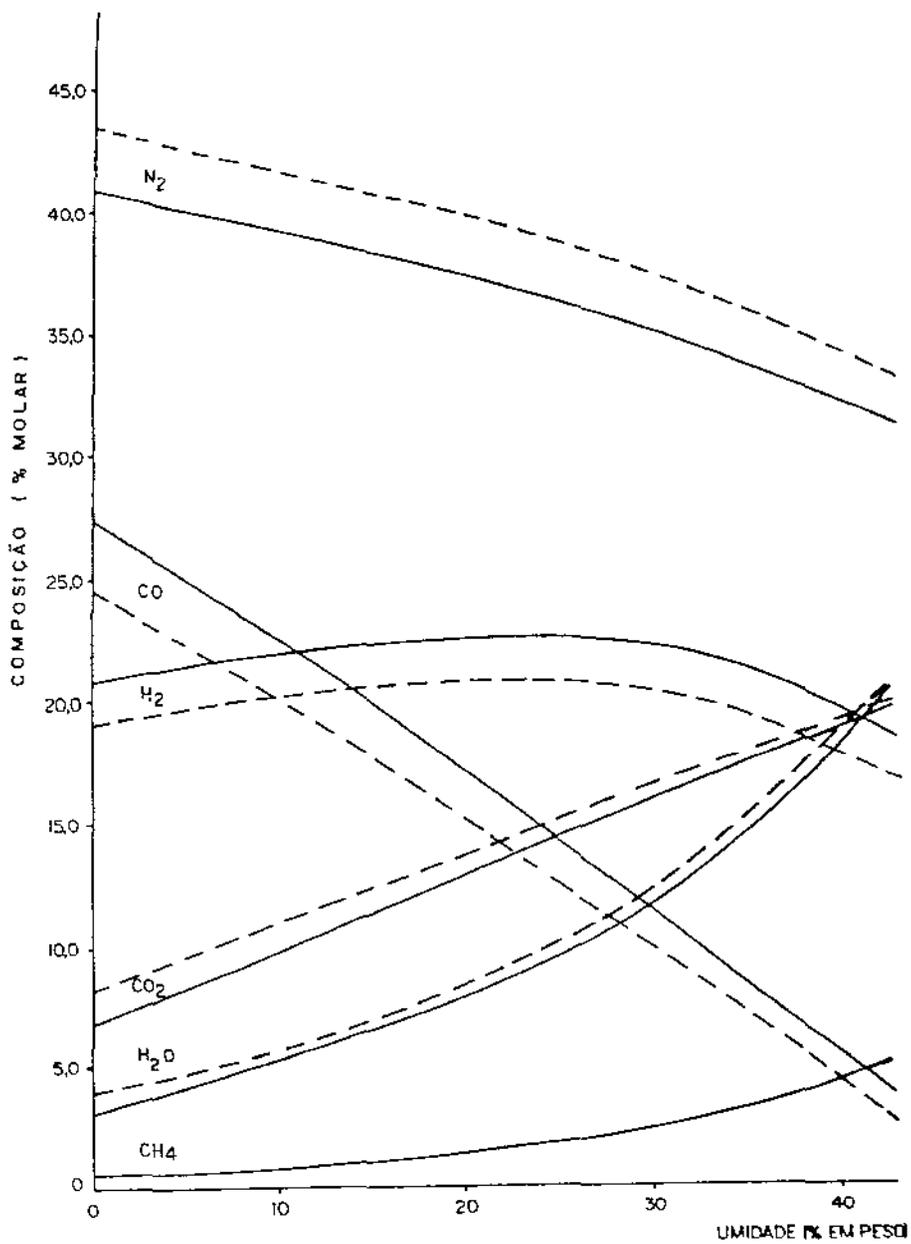
--- Umidade da madeira = 20% em peso

FIGURA 6.4 - Gaseificação da madeira com ar.

a 25^oC e admitindo 5% de perdas, com relação à madeira com 30% de umidade nas condições de temperatura do ar a 400^oC e sem perdas. A quantidade de CH₄ no gás diminui utilizando-se madeira com umidade mais baixa e a quantidade de N₂ fica em torno de 2% em volume mais elevada para madeira mais seca.

Analisando o poder calorífico inferior do gás em madeiras com umidades diferentes constata-se que, pré-aquecendo o ar a 400^oC consegue-se elevar o poder calorífico inferior do gás em cerca de 100 Kcal/Nm³ ou seja, em 33.3%. Observa-se também que o efeito do pré-aquecimento e perdas no poder calorífico é muito maior que o efeito da umidade da madeira.

A Figura 6.5 apresenta o efeito da umidade da madeira na composição do gás admitindo-se perda, em relação ao poder calorífico da madeira gaseificada, de 5%. Verifica-se, através dessa figura, o efeito do pré-aquecimento do ar na composição do gás. Isto é, com o pré-aquecimento do ar à temperatura de 400^oC um gás com mais alto teor de CO e H₂ e com mais baixo teor de N₂, CO₂ e H₂O é obtido. A quantidade de CH₄ porém, não é alterada pelo efeito do pré-aquecimento do ar.



— Temperatura do ar = 400°C

--- Temperatura do ar = 25°C

FIGURA 6.5 - Influência da umidade da madeira na composição do gás (base úmida), com 5% de perdas.

7. CONCLUSÕES

Baseado nos resultados obtidos experimentalmente, na análise e discussão, e nas comparações desses resultados com os resultados existentes na literatura e com o modelo termodinâmico de equilíbrio, conclui-se que:

7.1. O teor de umidade na madeira afeta consideravelmente a composição média do gás combustível, sendo o gás de melhor qualidade (temperatura adiabática de chama e poder calorífico inferior mais elevados) obtido na gaseificação de madeira com teor de umidade mais baixo. Experimentalmente determinou-se que o poder calorífico inferior do gás frio e seco cai em 39.2% do seu valor quando a umidade da madeira aumenta de 9.23 a 38.11% em peso. A temperatura adiabática de chama do gás frio e seco cai de 23.2% do seu valor na mesma faixa de umidade.

7.2. Para se obter temperaturas adiabáticas de chama elevadas é preferível esfriar o gás e condensar a água a utilizar o gás quente e úmido.

7.3. A eficiência de gaseificação considerando gás frio e seco é praticamente constante, em torno de 72%, até 25% de umidade da madeira caindo para 58% para teor de umidade de 40%.

7.4. A entalpia do gás quente e úmido representa uma parcela considerável da energia total do gás. A utilização dos gases a uma temperatura superior a 450°C representa um ganho na eficiência em relação à utilização do gás frio e seco entre 11.3 e 23.6%, sendo que, para umidade de madeira elevada o efeito

torna-se mais importante.

7.5. O efeito da vazão de ar na composição média dos gases não é acentuado dentro de uma faixa relativamente larga de operação do gaseificador (9.04 a 30.02 Kg de ar por hora).

Portanto, a produção de gás e a taxa de gaseificação são praticamente proporcionais à vazão de ar. O maior poder calorífico do gás combustível foi obtido a uma taxa específica de gaseificação de 1453 Kg de madeira seca por m^2 de garganta por hora, correspondente no gaseificador experimental a 9.04 Kg de ar por hora.

7.6. Partindo do gaseificador frio, a temperatura no seu interior estabiliza-se em torno de 30 minutos. Quanto maior a umidade da madeira menor a temperatura no interior do gaseificador.

7.7. Durante um determinado teste as variações nas composições dos gases com o tempo de gaseificação foi, no máximo de 5% (valor absoluto) em volume. De onde se conclui que, apesar da alimentação do gaseificador ser por bateladas, o processo de gaseificação praticamente atingiu um regime permanente. Isto porque o tempo de retenção do sólido nas zonas de reação é muito menor que no gaseificador e dessa forma o depósito superior funciona quase como um alimentador contínuo da zona de reação.

7.8. Gases de poder calorífico inferior mais elevado são obtidos tanto pela pré-secagem da madeira como pelo pré-aquecimento do ar, sendo que, usando madeira com umidade de 30%, o efeito do pré-aquecimento do ar até $450^{\circ}C$ é mais pronunciado do

que a secagem até 20% ou mesmo até 10% em peso de umidade.

7.9. A composição dos gases na gaseificação co-corrente de madeira com o ar aproxima-se da composição de equilíbrio químico calculada. O modelo termodinâmico pode ser utilizado para prever, com boa segurança, o efeito da variação de parâmetros operacionais.

7.10. O gaseificador co-corrente produz um gás com teores muito baixos de alcatrão e fuligem. O erro médio de fechamento nos balanços de carbono foi de 7.41% ou cerca de 11.3g por Kg de gás produzido. Esse carbono provavelmente é relativo à fuligem e alcatrão não determinados no gás e ao acúmulo de carbono no leito.

8. SUGESTÕES

Levando-se em conta as conclusões do presente trabalho, bem como a experiência adquirida, apresentam-se como sugestões para futuros trabalhos:

8.1. Desenvolver um estudo experimental, semelhante ao utilizado no presente trabalho, em um reator mais longo para a mesma taxa específica, ou seja, que proporcione um maior tempo de residência, acoplado a um sistema provido de condensador para medir diretamente a água no gás, com o objetivo de comparar diversos parâmetros com os obtidos no presente trabalho e para verificar se há uma maior aproximação do equilíbrio.

8.2. O efeito do pré-aquecimento foi analisado através do modelo termodinâmico. Seria interessante a constatação experimental do referido efeito, e um estudo da viabilidade econômica nos processos de pré-secagem da madeira e/ou pré-aquecimento do ar.

8.3. Utilizar o gás quente obtido na gaseificação para secagem da madeira e/ou para aquecimento do ar e verificar o rendimento energético.

8.4. Desenvolver um modelo cinético das reações de gaseificação.

8.5. Estudar o efeito do tamanho da partícula do combustível.

8.6. Estudar a hidrodinâmica do processo, ou seja, a variação do ΔP no leito em função da taxa de gaseificação e do tamanho das partículas, e os perfis de velocidades internas relacionados à geometria da distribuição do ar no reator.

- 8.7. Levantar perfis de temperatura ao longo do gaseificador.
- 8.8. Utilizar outros agentes de gaseificação, tal como oxigênio, oxigênio mais vapor e outros.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS

1. Apoio Técnico, Pesquisa e Desenvolvimento para a Produção de Gás de Síntese a partir de Eucalyptus spp. - Fase 1A. Relatório nº 12723 do IPT para CESP, 1979.
2. Assumpção, Rosely M.V., "Gaseificação da Madeira e Carvão Vegetal", Energia - Fontes ALternativas, vol. III, nº 16, 23-42, 1981.
3. Assumpção, Rosely, M.V., "Gaseificação Direta de Madeiras", Revista Brasileira de Engenharia Química, vol. 4, nºs. 3/4, 41-47, 1980.
4. Balzhizer, R.E. et al., "Chemical Engineering Thermodynamics", Prentice Hall.
5. Bass, G.O. and Milner G., "Producer Gas", Reprinted from paper presented at Midland Section of Coke Oven Managers Association, April 1953.
6. Cousins, W.J., "A Theoretical Study of Wood Gasification Process"; New Zealand Journal of Science, vol. 21, 175-183, 1978.
7. Cruise, D.R., "Notes on the Rapid Computation of Chemical Equilibria", The Journal of Physical Chemistry, vol. 68 nº 12, 3797-3802, 1964.
8. Desrosiers, R., "Thermodynamics of Gas - Char Reactions", Survey of Biomass Gasification, vol. II - Principles of Gasification, Solar Energy Research Institute - SERI, 1979.
9. Goss, J.R. and Coppock, R.H., "Producing Gas from Crop Residues", California Agriculture, May 1980.

10. Graboski, M. and Bain, R., "Properties of Biomass Relevant to Gasification", SERI/TR - 33-239, A Survey of Biomass Gasification, vol. II - Principles of Gasification, July 1979.
11. Grabosky, M., "Kinetics of Char Gasification Reactions", SERI/TR - 33-239, A Survey of Biomass Gasification, vol. II - Principles of Gasification, July 1979.
12. Groeneveld, M.J., "The Co-Current Moving Bed Gasifier", Tese de Doutorado, Universidade de Twente, Holanda, 1980.
13. Gumz, W., "Gas Producers and Blast Furnaces", N. York, 1950, John Wiley.
14. Hilst, A.G.P. e Kosin, F., "Gaseificadores para Pequenos e Médios Consumidores", Energia-Fontes Alternativas, vol. III, nº 14, 19-28, 1981.
15. Himmelblau, D.M., "Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering", Prentice Hall.
16. Hos, J.J., et al., "Gasification of Organic Solid Wastes in Co-Current Moving Bed Reactors". Symposium papers, Energy from Biomass and Wastes, pp. 333-349, I.G.T., Netherlands, Jan. 1980.
17. Hougen, O.A. et al., "Chemical Processes Principles", New York, John Wiley.
18. Littlewood, K., "Gasification: Theory and Application", Prog. Energy Combust. Sci., vol. 3, pp. 35-71, 1977.
19. Makray, Z.T., et al., "Equilíbrio Termodinâmico na Gaseificação de Madeira". Relatório interno DEQ/UNICAMP, 1980.

20. Manual Prático de Cromatografia em Fase Gasosa, Instituto Brasileiro de Petróleo - I.B.P., 1981.
21. Mc Nair, H.M. and Boneli, E.J., "Basic Gas Chromatography" Varian.
22. Ower, E. and Pankhurst, R.C., "The Measurement of Air Flow", Pergamon Press.
23. Pereira, J.A.F.R., et al., "Gaseificação de Biomassa". Relatório final do convênio CESP-FUNCAMP, 1981.
24. Redding, G.J., and Goss, J.R., "The Effect of Fuel Moisture Content on the Quality of Producer Gas from the Gasification of Wood Chips", American Society of Agricultural Engineers - ASAE, paper nº PR 80-029, March 1980.
25. Rensfelt, E. et al., "Basic Gasification Studies for Development of Biomass Medium - Btu Gasification Process". Symposium papers Energy from Biomass and Wastes, pp. 465-494, Washington, D.C., Aug. 1978.
26. Sales Luís, A.C., "Psicrometria", UNICAMP, Janeiro 1977 Apostila.
27. Schläpfer, P. und Tobler, J., "Theoretische und praktische Untersuchungen über den Betrieb von Motorfahrzeugen mit Holzgas", Schweizerischen Gesellschaft für das Studium der Motorbrennstoffe, Bericht Nr. 3, Bern, 1937.
28. Silva, R.B., "Manual de Termodinâmica e Transmissão de Calor", Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, DEM, Junho 1972.

29. SERI/TR - 33-239, "A Survey of Biomass Gasification",
vol. I - Synopsis and Executive Summary, july 1979.
30. Smith, J.M. e Van Ness, H.C., "Introdução à Termodinâmica
da Engenharia Química", 3ª edição, Guanabara Dois.
31. Spink, L.K., "Principles and Practice of Flow Meter
Engineering", The Foxboro Company, 9th ed., 1973.
32. Williams, R.O. and Goss, J.R., "An Assessment of the
Gasification Characteristics of Some Agricultural and
Forest Industry Residues Using a Laboratory Gasifier",
Resource Recovery and Conservation, vol. 3, 317-329, 1979.
33. Yang, V., "Wood Gasification for Methanol Production",
Tese de Mestrado, Massachusetts Institute of Technology,
May 1980.
34. Zagatto, A.J.A.G., "Gaseificadores de médio e grande por-
te", Energia-Fontes Alternativas, vol. III, nº 16, 1981.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS E NÃO CITADAS

1. Batchelder, H.R. and Sternberg, J.C., "Thermodynamic Study of Coal Gasification", Industrial and Engineering Chemistry, vol. 42, nº 5, 1950.
2. Ciola, R., "Introdução à Cromatografia em Fase Gasosa", Ed. Edgard Blücher Ltda.
3. Goss, J.R., et al., "Transient and Steady - State Temperature Fluctuations in a Downdraft Gas Producer", ASAE, paper nº PR 80-037, March 1980.
4. Holman, J.P., "Experimental Methods for Engineers", McGraw Hill.
5. Lin, M.S. and Serenius, R., "Fluidized Bed Solids Waste Gasifier", Forest Products Journal, vol. 26, nº 9, 1976.
6. Marks, L.S., "Square-Edged Inlet and Discharge Orifices for Measuring Air Volumes in the Testing of Fans and Blowers", Transactions of the American Society of Mechanical Engineers - ASME, Aeronautical Engineering - AER - 58-7.
7. Mata, S.F., "Gaseificação de Carvão Vegetal em Gasogênio de Sucção Ascendente. Gás de Ar e de Água", Tese de Mestrado, UNICAMP, 1981.
8. Perry, R.H. and Chilton, C.H., "Chemical Engineers' Handbook", 5th ed., McGraw Hill.
9. Reid, R.C. et al., "The Properties of Gases and Liquids", 3th ed., McGraw Hill.

10. Souza Santos, M.L. e Lin, C.J., "Modelagem e Simulação de Gaseificador de Leito Fixo para Carvão" , Trabalho apresentado no V Congresso Brasileiro de Engenharia Química , Julho 1982.
11. Thompson, B., "Fundamentals of Gas Analysis by Gas Chromatography", Varian, 1977.
12. Williams, R.O. et al., "Development of Pilot Plant Gasification Systems for the Conversion of Crop and Wood Residues to Thermal and Electrical Energy", ACS Symposium series, nº 76, Solid Wastes and Residues, 1978.

APÊNDICE A

Cálculos de calibração da placa de orifício de entrada

A.1 - Instalação da placa de orifício de entrada (31)

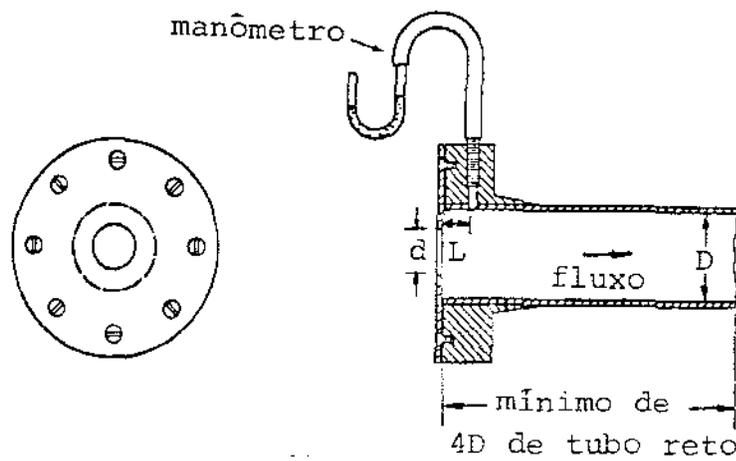


FIGURA A.1

O medidor de vazão consiste de uma placa de orifício de 13.5mm de diâmetro fixada em um tubo de 45mm de diâmetro. A 19cm de distância da placa de orifício está instalado o soprador, e a 1.80cm um manômetro diferencial.

A.2 - Cálculos

Para calibração da placa de orifício de entrada utilizou-se o método "log-linear" (22). O tubo foi dividido em 3 zonas de áreas anulares e uma zona circular, todas de áreas iguais, como mostra a Figura A.2.

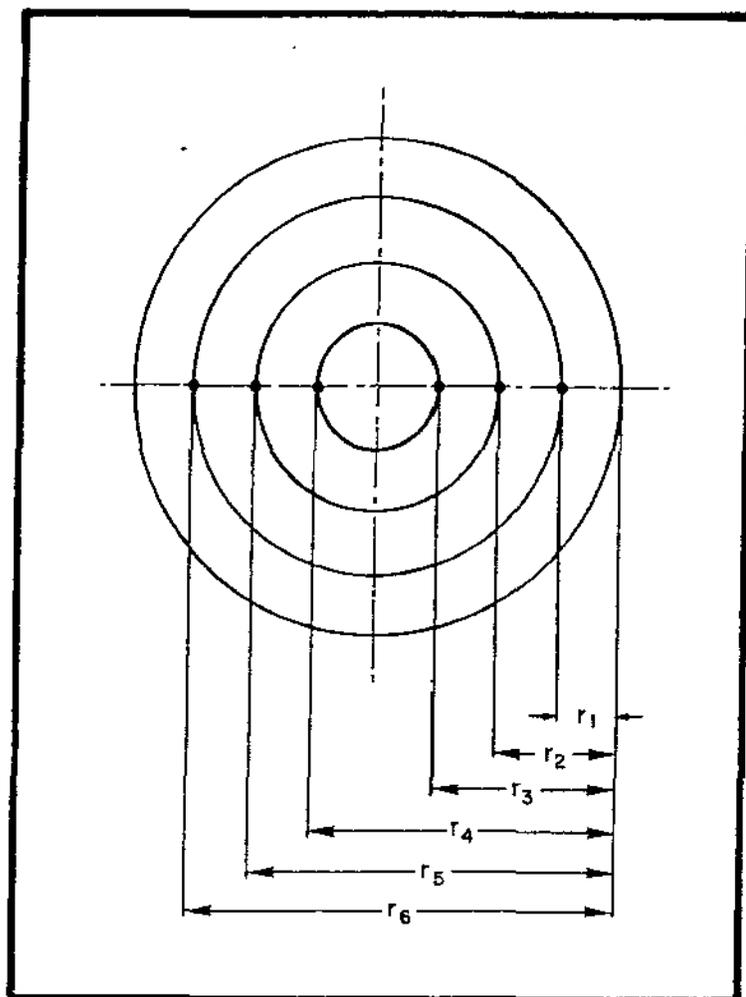


FIGURA A.2

Os pontos nos quais são feitas as medidas da velocidade estão localizados em posições nas quais ocorre a velocidade média exata da zona. Para seis pontos de medida as distâncias da parede em diâmetro do tubo são: 0.032, 0.135, 0.321, 0.679, 0.865 e 0.968 (22).

A.2.1 - Tubo de Pitot

Utilizou-se um tubo de Pitot para medir a velocidade do ar em cada um dos pontos, cuja equação é:

$$v = c \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho_{ar}}} \quad (A.1)$$

onde: V é a velocidade na ponta do tubo de Pitot, m/s.

C é o coeficiente adimensional.

Para tubo de Pitot ideal $C = 1.0$.

$$\Delta P = \rho_{H_2O} g \Delta h \quad (A.2)$$

onde: ρ_{H_2O} é a densidade da água, Kg/m^3

g é a aceleração da gravidade, m/s^2

Δh é a diferença de pressão do fluido, $m H_2O$.

$$\rho_{ar} = \frac{0.464 P}{273 + t} \quad (A.3)$$

onde: ρ_{ar} é a densidade do ar, Kg/m^3

t é a temperatura do ar, $^{\circ}C$

P é a pressão no local da medida, $mm Hg$

Para $t = 25^{\circ}C$ e $P = 710mm Hg$, $\rho_{ar} = 1.11 Kg/m^3$.

A equação (A.1) reduz para:

$$V = 13.3 \sqrt{\Delta h} \quad (A.4)$$

onde: Δh é dada em $cm H_2O$.

Da equação (A.4) foram traçadas as curvas $V \times r$, sendo r as distâncias a partir da parede do tubo.

A.2.2 - Placa de orifício de entrada

A equação da taxa de fluxo para placa de orifício é:

$$Q = K \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \Delta P \frac{1}{v}} \quad (\text{A.5})$$

onde: Q é a taxa de fluxo de massa, Kg/s

d é o diâmetro do orifício, m

ΔP é dada pela equação (A.2)

v é o volume específico do ar, m^3/Kg

Para a instalação da Figura A.1 o coeficiente de descarga é $K = 0.601$. Introduzindo um fator de correção para o volume específico a equação (A.5) fica:

$$Q = 0.601 \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{2 \rho_{\text{H}_2\text{O}} g \Delta h} \sqrt{\frac{0.927}{v}} \quad (\text{A.6})$$

A partir da equação (A.6) foi traçada a curva de calibração da placa de orifício de entrada Q x Δh .

Da curva chega-se finalmente na equação da taxa de fluxo de massa:

$$Q = 7.814 \times 10^{-3} d^2 \sqrt{\Delta h} \sqrt{\frac{0.927}{v}} \quad (\text{A.7})$$

onde: Q é dada em Kg/h

d é dado em mm

Δh é dada em mm de coluna de água.

O volume específico foi calculado em cada corrida através de equações retiradas da referência (26) e de dados da referência (28) baseados na carta psicrométrica.

Todo o procedimento foi realizado também com a placa de orifício de 6.3mm de diâmetro.

APÊNDICE BCálculo de calibração do cromatógrafo

B.1 - Procedimento

Para o cálculo dos fatores de condutividade térmica usou-se o método da normalização (20) (21). Este método consiste em determinar os fatores primários de cada componente do gás padrão e, a partir do fator tomado como referência, determinar os fatores relativos (ou resposta relativa). Para aplicá-los às amostras, multiplica-se a área de cada pico pela resposta relativa da substância e somam-se as áreas corrigidas. Estes valores são normalizados e os resultados são dados na mesma unidade de concentração em que foi preparado o padrão (massa ou volume).

B.2 - Análise

O gás padrão usado na calibração do cromatógrafo era formado pelos gases H_2 , N_2 , CH_4 , CO e CO_2 com composição apresentada na Tabela B.1.

A análise do gás fornecida pela Oxigênio do Brasil foi confirmada na REPLAN a partir de uma amostra do gás padrão e de uma outra mistura conhecida de gases contendo C_2H_2 , C_2H_4 e N_2 . O componente de referência escolhido foi o nitrogênio.

B.2.1 - Cálculo do fator primário

$$f_i = \frac{g_i}{A_i} \quad (B.1)$$

onde: A é a área do pico

i é o componente

B.2.2 - Cálculo da resposta relativa.

Fator de referência escolhido: f_{N_2}

$$RR_i = \frac{f_i}{f_{N_2}} \quad (B.2)$$

A partir das definições (B.1) e (B.2) obtém-se a Tabela B.1.

Tabela B.1 - Composição e resposta relativa de cada componente.

Componente	Quantidade % vol.	Resposta Relativa (RR)
H ₂	12.16	0.0996
N ₂	57.22	1.0000
CH ₄	4.97	0.4060
CO	16.50	1.0600
CO ₂	19.15	0.7840
C ₂ H ₄		0.4690

Para cada amostra foram realizados os seguintes cálculos:

$$A_i \times RR_i = A'_i \quad (B.3)$$

onde: A' é a área corrigida

$$A_T = \sum_i A'_i \quad (\text{B.4})$$

$$\% i = \frac{A'_i}{A_T} \times 100 \quad (\text{B.5})$$

APÊNDICE CResultados dos testes de gaseificação

As Tabelas C.1, C.2, C.3 e C.4 apresentam os resultados obtidos nos testes onde procurou-se manter a vazão de ar em torno de 12 Kg/h para analisar a influência do teor de umidade da madeira, na faixa de 10 a 40%, na composição média do gás.

As demais Tabelas apresentam os resultados dos testes preliminares.

TABELA C.1

DATA: 10.01.83

 P_b : 708.8 mm Hg

TESTE: Nº 26

 T_{bs} : 35°C

AGENTE GASEIFICAÇÃO: AR

 T_{bu} : 25°C

UMIDADE MÉDIA: 9.23%

 ΔP_{Placa} : 74 mm CA

AMOSTRAS

- 1: 9.14
- 2: 9.35
- 3: 9.12
- 4: 9.23
- 5: 9.29

 ϕ_{Placa} : 13.5 mm

VAZÃO AR SECO: 12.09 Kg/h

UMIDADE ABSOLUTA: 0.0172 Kg/Kg

CONSUMO MADEIRA: 8.02 Kg/h

COEF. CORRELAÇÃO: $R^2 = 0.9998$

HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA	HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA
12:15	173.1	796	13:07	166.2	942
20	172.5	842	10	165.8	934
24	172.0	874	15	165.1	934
30	171.1	941	20	164.5	982
35	170.4	924	25	163.7	927
40	169.9	940	30	163.1	917
45	169.2	982	35	162.4	952
47	168.9	942	40	161.8	963
50	168.3	945	45	161.1	950
56	167.6	970	50	160.4	947
13:00	167.2	960	55	159.9	951

ANÁLISES DE GÁS

Nº	HORA	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	CO	CO ₂
2	12.25	15.35	47.58	2.75	0.50	26.17	7.65
4	50	15.05	45.46	1.62	0.26	27.72	9.89
5	13.00	15.99	45.54	1.51	0.38	26.59	9.99
6	11	17.48	45.31	1.56	0.31	24.94	10.41
7	22	15.90	43.92	1.46	0.34	28.27	10.12
8	32	15.31	43.14	1.27	0.29	30.95	9.04
9	42	17.13	45.16	1.38	0.22	26.42	9.68
MÉDIA		16.03	45.16	1.65	0.33	27.29	9.54

TABELA C.2

DATA: 22.09.82

 P_b : 716.3 mm Hg

TESTE: Nº 11

 T_{bs} : 21°C

AGENTE GASEIFICAÇÃO: AR

 T_{bu} : 17°C

UMIDADE MÉDIA: 20.47%

 ΔP_{Placa} : 77 mm CA ϕ_{Placa} : 13.5 mm

AMOSTRAS {

1: 20.02

2: 20.15

3: 20.85

4: 20.85

5: -

VAZÃO AR SECO: 12.74 Kg/h

UMIDADE ABSOLUTA: 0.0112 Kg/Kg

CONSUMO MADEIRA: 8.48 Kg/h

COEF. CORRELAÇÃO: $R^2 = 0.9998$

HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA	HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA
9:50	168.6	789	10:40	161.4	864
55	167.8	825	45	160.8	844
10:00	167.1	853	50	160.1	848
05	166.4	825	55	159.5	821
12	165.5	848	11:01	158.6	810
16	164.9	814	05	158.0	777
20	164.3	856	10	157.3	782
25	163.7	825	15	156.5	804
30	163.0	841	19	155.9	832
36	162.1	804	22	155.5	807

ANÁLISES DE GÁS

Nº	HORA	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	CO	CO ₂
2	10:10	16.36	49.47	1.73	0.27	18.96	13.21
3	24	16.50	47.46	1.74	0.23	21.56	12.51
4	37	17.65	47.41	1.73	0.26	19.68	13.28
5	50	17.68	47.20	1.70	0.25	20.68	12.50
6	11:02	18.00	47.33	1.74	0.25	19.52	13.17
7	15	18.07	47.52	1.74	0.26	19.14	13.27
MÉDIA		17.38	47.73	1.73	0.25	19.92	12.99

TABELA C.3

DATA: 20.09.82 P_b : 715.7 mm Hg
 TESTE: Nº 9 T_{bs} : 24°C
 AGENTE GASEIFICAÇÃO: AR T_{bu} : 17°C
 UMIDADE MÉDIA: 28.42% ΔP_{Placa} : 68 mm CA
AMOSTRAS 1: 29.89 ϕ_{Placa} : 13.5 mm
 2: 27.10 VAZÃO AR SECO: 11.92 Kg/h
 3: 28.53 UMIDADE ABSOLUTA: 0.0099 Kg/Kg
 4: 27.55
 5: 29.02

 CONSUMO MADEIRA: 7.51 Kg/h COEF. CORRELAÇÃO: $R^2 = 0.9991$

HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPERATURA	HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPERATURA
12:15	168.6	-	13:10	161.4	837
20	168.0	807	15	160.8	848
27	166.9	835	22	160.0	853
30	166.6	950	25	159.8	853
35	165.9	-	30	159.0	853
41	165.2	-	38	158.0	860
45	164.6	875	43	157.5	844
50	163.9	860	46	157.2	841
58	162.9	856	50	156.6	814
13:00	162.6	844	53	156.2	844
05	162.0	856	56	155.8	853

ANÁLISES DE GÁS

Nº	HORA	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	CO	CO ₂
3	12:30	16.24	49.95	1.76	0.28	17.93	13.85
4	44	17.18	49.31	1.57	0.26	17.65	14.03
5	56	17.45	50.18	1.64	0.26	15.60	14.85
6	13:08	17.80	49.12	1.53	0.30	17.20	14.06
7	21	18.21	49.58	1.49	0.25	16.08	14.39
8	38	18.42	48.74	1.59	0.26	16.74	14.25
9	47	18.55	48.80	1.59	0.21	15.95	14.90
MÉDIA		17.69	49.38	1.60	0.26	16.74	14.33

TABELA C.4

DATA: 20.09.82

 P_b : 715.7 mm Hg

TESTE: Nº 10

 T_{bs} : 26°C

AGENTE GASEIFICAÇÃO: AR

 T_{bu} : 18°C

UMIDADE MÉDIA: 38.11%

 ΔP_{Placa} : 75 mm CA

AMOSTRAS

- 1: 38.57
- 2: 37.68
- 3: 36.40
- 4: 39.58
- 5: 38.32

 ϕ_{Placa} : 13.5 mm

VAZÃO AR SECO: 12.47 Kg/h

UMIDADE ABSOLUTA: 0.0103 Kg/Kg

CONSUMO MADEIRA: 7.61 Kg/h

COEF. CORRELAÇÃO: $R^2 = 0.9998$

HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA	HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA
16:00	170.0	1053	16:45	164.4	-
06	169.2	1049	50	163.7	1561
10	168.7	1070	56	162.9	-
15	168.1	1179	17:01	162.3	1479
20	167.5	-	05	161.7	1558
25	166.8	1224	11	161.0	1583
30	166.2	1339	16	160.4	-
36	165.4	-	22	159.6	1379
40	165.0	-	26	159.0	1231

ANÁLISES DE GÁS

Nº	HORA	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	CO	CO ₂
2	16:06	14.71	55.54	1.49	0.24	11.22	16.81
3	17	14.53	55.48	1.49	0.26	11.12	17.12
4	29	14.44	56.57	1.32	0.23	10.68	16.77
5	43	14.65	55.32	1.45	0.25	11.73	16.60
6	56	14.35	55.95	1.41	0.25	11.47	16.58
7	17:10	13.82	56.97	1.44	0.26	10.74	16.77
8	20	15.55	54.98	1.26	0.20	11.24	16.78
MÉDIA		14.58	55.83	1.41	0.24	11.17	16.77

TABELA C.5

DATA: 01.07.82

 P_b : 719.7 mm Hg

TESTE: Nº 01

 T_{bs} : 22.5°C

AGENTE GASEIFICAÇÃO: AR

 T_{bu} : 19°C

UMIDADE: 12.41%

 ΔP_{Placa} : 74 mm CA ϕ_{Placa} : 13.5 mm

VAZÃO AR SECO: 12.46 Kg/h

UMIDADE ABSOLUTA: 0.013 Kg/Kg

CONSUMO MADEIRA: 8.38 Kg/h

COEF. CORRELAÇÃO: $R^2 = 0.9986$

HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA	HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA
15:30	160.2	1094	16:00	155.8	1066
35	159.6	1081	05	155.2	1008
40	158.6	1046	10	154.5	-
45	158.1	1152	15	153.8	1120
50	157.2	1113	20	153.1	1095
55	156.5	1018	25	152.5	1071
			27	152.3	-

ANÁLISES DE GÁS

Nº	HORA	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	CO	CO ₂
2	14:56	12.80	49.03	3.78	0.49	21.92	11.98
4	15:53	15.71	49.01	2.27	0.28	22.08	10.65
5	16:05	16.33	46.53	3.08	0.40	23.20	10.46
6	15	14.84	47.71	2.50	0.33	24.87	9.75
7	25	16.83	47.03	2.20	0.28	23.52	10.13
MÉDIA		15.30	47.86	2.77	0.36	23.12	10.59

TABELA C.6

DATA: 14.07.82

 P_b : -

TESTE: Nº 02

 T_{bs} : 19°C

AGENTE GASEIFICAÇÃO: AR

 T_{bu} : 16°C

UMIDADE MÉDIA: 26.96%

 ΔP_{Placa} : 74 mm CA

AMOSTRAS

- 1: 39.84
- 2: 38.46
- 3: 38.50
- 4: 11.44
- 5: 12:36
- 6: 21.17

 ϕ_{Placa} : 13.5 mm

VAZÃO AR SECO: -

UMIDADE ABSOLUTA: -

CONSUMO MADEIRA: 7.33 Kg/h

COEF. CORRELAÇÃO: $R^2 = 0.9986$

HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA	HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA
15:45	169.5	1069	16:55	161.4	957
50	168.9	1071	17:00	160.7	937
55	168.5	985	05	160.2	948
16:05	167.3	1127	10	159.6	985
10	166.8	1143	15	158.5	1014
15	166.1	1029	20	158.3	937
20	165.6	969	25	157.6	894
26	164.9	969	30	157.0	941
30	164.4	950	35	156.3	975
35	163.7	966	42	155.5	978
40	163.1	966	49	154.1	953
45	162.4	932	55	153.8	869
50	162.0	853			

ANÁLISES DE GÁS

Nº	HORA	N ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂
1	16:10	16.50	49.01	1.38	22.61	10.49
2	30	18.76	48.66	1.62	17.10	13.86
3	42	18.63	48.07	1.80	17.06	14.44
4	55	19.11	47.71	1.80	16.85	14.58
5	17:08	18.13	47.59	2.10	17.04	14.74
6	26	18.80	47.84	1.84	16.56	14.96
7	37	18.53	48.45	1.63	16.86	14.53
8	48	18.14	49.03	1.49	17.16	14.17
MÉDIA		18.33	48.30	1.71	17.66	13.97

TABELA C.7

DATA: 23.07.82

 P_b : -

TESTE: Nº 03

 T_{bs} : 25°C

AGENTE GASEIFICAÇÃO: AR

 T_{bu} : 17°C

UMIDADE MÉDIA: 32.84%

 ΔP_{Placa} : 74 mm CA

AMOSTRAS $\left\{ \begin{array}{l} 1: 35.36 \\ 2: 29.95 \\ 3: 33.21 \end{array} \right.$

 ϕ_{Placa} : 13.5 mm

VAZÃO AR SECO: -

UMIDADE ABSOLUTA: -

CONSUMO MADEIRA: 7.22 Kg/h

CORF. CORRELAÇÃO: $R^2 = 0.9987$

HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA	HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA
11:40	166.3	950	12:20	161.5	900
45	165.8	-	25	161.0	900
50	165.2	-	31	160.2	900
55	164.6	962	35	159.8	935
12:01	164.0	925	40	159.2	935
05	163.4	869	46	158.5	-
10	162.8	869	50	157.9	956
15	162.2	878			

ANÁLISES DE GASES

Nº	HORA	H ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂
2	11:50	13.94	54.49	1.66	14.36	15.56
3	12:04	16.42	52.31	1.55	14.07	15.65
4	15	17.54	50.50	1.64	14.22	16.10
5	27	17.74	50.90	1.51	13.62	16.23
6	38	18.39	50.71	1.53	13.86	15.50
7	52	15.81	54.92	1.90	12.41	14.96
8	13:00	13.83	58.85	1.84	11.77	13.71
MÉDIA		16.24	53.24	1.66	13.47	15.39

TABELA C.8

DATA: 09.09.82 P_b : -
 TESTE: Nº 06 T_{bs} : 23.5°C
 AGENTE GASEIFICAÇÃO: AR T_{bu} : 16°C
 UMIDADE MÉDIA: 20.84% ΔP_{Placa} : 49 mm CA
 AMOSTRAS ϕ_{Placa} : 13.5 mm
 1: 21.28 VAZÃO AR SECO: -
 2: 21.44 UMIDADE ABSOLUTA: -
 3: 19.80

CONSUMO MADEIRA: -

COEF. CORRELAÇÃO: -

HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA	HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA
10:30	166.6	710	11:30	159.8	649
35	166.1	741	35	159.3	594
40	165.5	748	40	158.6	658
45	164.9	708	45	158.0	594
50	164.3	686	50	157.3	594
55	163.7	656	55	156.6	560
11:00	163.1	729	12:00	156.0	571
05	162.5	724	05	155.3	569
15	161.5	658	11	154.8	562
20	160.9	642	14	154.5	556
25	160.3	603			

ANÁLISES DE GÁS

Nº	HORA	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	CO	CO ₂
3	10:59	11.40	48.60	3.32	0.35	27.36	8.97
4	12:12	11.29	51.55	1.98	0.34	24.79	10.05
5	26	12.47	49.88	2.15	0.34	24.94	10.21
6	39	11.64	50.55	2.05	0.30	24.95	10.51
7	50	12.72	50.01	2.09	0.36	24.04	10.77
MÉDIA		11.90	50.12	2.32	0.34	25.22	10.09

APÊNDICE DResultados dos testes de gaseificação

Nas Tabelas D.1, D.2 e D.3 são apresentados os dados obtidos nos testes onde variou-se a vazão de ar, na faixa de 10 a 30 Kg/h, e manteve-se a umidade da madeira constante em 22.94% a fim de se verificar o efeito da vazão de ar na composição média do gás.

TABELA D.1

DATA: 30.09.82

 P_b : 715.7 mm Hg

TESTE: Nº 16

 T_{bs} : 23°C

AGENTE GASEIFICAÇÃO: AR

 T_{bu} : 16.8°C

UMIDADE MÉDIA: 22.94%

 ΔP_{Placa} : 90 mm CA

AMOSTRAS

- 1: 23.14
- 2: 24.25
- 3: 21.80
- 4: 24.25
- 5: 21.28
- 6: -

 ϕ_{Placa} : 6.3 mm

VAZÃO AR SECO: 30.02 Kg/h

UMIDADE ABSOLUTA: 0.0101 Kg/Kg

CONSUMO MADEIRA: 19.31 Kg/h

COEF. CORRELAÇÃO: $R^2 = 0.9994$

HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA	HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA
10:50	171.8	860	11:18	162.6	313
55	170.0	807	21	161.8	453
11:00	168.5	428	24	160.7	564
03	167.3	-	26	160.0	560
06	166.4	137	28	159.6	548
10	165.3	128	30	158.8	640
13	164.4	182	31	158.4	-
16	163.2	296			

ANÁLISES DE GÁS

Nº	HORA	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	CO	CO ₂
1	10:56	14.31	51.63	1.95	0.36	20.48	11.27
2	11:07	15.77	50.05	1.55	0.27	19.48	12.90
3	17	18.04	47.22	1.60	0.26	19.54	13.35
4	28	16.85	48.42	1.55	0.26	20.42	12.51
MÉDIA		16.24	49.33	1.66	0.29	19.98	12.50

TABELA D.2

DATA: 30.09.82 P_b : 715.7 mm Hg
 TESTE: Nº 17 T_{bs} : 23°C
 AGENTE GASEIFICAÇÃO: AR T_{bu} : 16.8°C
 UMIDADE MÉDIA: 22.94% ΔP_{Placa} : 31 mm CA
AMOSTRAS 1: 23.14 ϕ_{Placa} : 6.3 mm
2: 24.25 VAZÃO AR SECO: 17.62 Kg/h
3: 21.80 UMIDADE ABSOLUTA: 0.0101 Kg/Kg
4: 24.25
5: 21.28
6: -

CONSUMO MADEIRA: 19.65 Kg/h COEF. CORRELAÇÃO $R^2 = 0.9997$

HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA	HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA
13:02	168.4	-	01:36	162.3	898
05	167.8	573	40	161.5	-
09	167.0	628	44	160.8	860
15	166.1	795	47	160.3	878
20	165.2	798	51	159.7	889
23	164.6	683	54	159.1	873
26	164.0	903	58	158.4	878
30	163.4	807	14:03	157.6	873
33	162.8	882			

ANÁLISES DE GÁS

Nº	HORA	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	CO	CO ₂
2	13:22	18.10	48.44	1.48	0.21	19.33	12.44
3	34	18.68	46.69	1.59	0.23	19.87	12.95
4	45	18.91	47.79	1.59	0.21	18.70	12.80
5	55	19.36	46.89	1.61	0.23	18.80	13.12
6	14:00	19.07	47.82	1.44	0.22	18.74	12.71
MÉDIA		18.82	47.53	1.54	0.22	19.09	12.80

TEBELA D.3

DATA: 30.09.82

 P_b : 715.7 mm Hg

TESTE: Nº 18

 T_{bs} : 23°C

AGENTE GASEIFICAÇÃO: AR

 T_{bu} : 16.8°C

UMIDADE MÉDIA: 22.94%

 ΔP_{Placa} : 39 mm CA

AMOSTRAS

- 1: 23.14
- 2: 24.25
- 3: 21.80
- 4: 24.25
- 5: 21.28
- 6: -

 ϕ_{Placa} : 13.5 mm

VAZÃO AR SECO: 9.04 Kg/h

UMIDADE ABSOLUTA: 0.0101 Kg/Kg

CONSUMO MADEIRA: 5.88 Kg/h

COEF. CORRELAÇÃO: $R^2 = 0,9995$

HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA	HORA	PESO DO GASEIFICADOR	TEMPE-RATURA
14:32	164.6	1002	15:21	159.8	839
36	164.2	1143	25	159.4	841
40	163.7	1528	28	159.1	816
45	163.25	1329	32	158.7	800
50	162.7	764	36	158.2	782
55	162.3	-	40	157.8	773
15:00	161.75	835	43	157.6	800
16	160.2	795			

ANÁLISES DE GÁS

Nº	HORA	H ₂	N ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	CO	CO ₂
1	14:36	15.48	49.89	1.80	0.25	21.28	12.31
2	47	15.57	49.33	1.53	0.23	21.75	11.59
3	57	17.78	47.84	1.84	0.27	20.29	11.99
4	15:09	17.99	47.34	1.67	0.23	20.68	12.09
5	20	18.44	46.43	1.72	0.25	20.20	12.97
6	32	18.26	48.16	1.74	0.30	17.72	13.82
MÉDIA		17.25	48.00	1.72	0.25	20.32	12.46

APÊNDICE E

Resultados dos balanços de massa e de energia.

Programa para realização dos cálculos.

Os balanços de massa e de energia obtidos através de computador são apresentados, assim como a listagem do programa utilizado.

***** ONICULU DE GALINXOU DE MASSIS E DE EXERCIOI *****

TESTE NUMERO 26
 CONSUMO DE MIDEIRA 8.02 KG/H
 OXIGENE DE MIDEIRA 9.23 %
 VAZAO DE RX SECO 12.09 KG/H
 OXIGENE RESOLUTO DO RX 0.0272 KG/KG
 COMPOSICAO DE MIDEIRA: O50.10 H6.10 O43.70 K0.10

COMPOSICAO VOL.%	BASE SECO (EXPERIMENTAL)	BASE UMIDA (CALCULADA)
N2	16.03	14.14
X2	43.16	39.84
OH4	1.66	1.46
O2N4	0.93	0.29
CO	27.29	24.08
CO2	9.54	8.42
H2O		11.30
HR		0.48

	C	H	O	N	TOTAL
MIDEIRA SECO	0.647	0.444	0.491	0.007	7.280
ROUR NA MIDEIRA	0.000	0.003	0.657	0.000	0.740
RR SECO	0.000	0.000	2.805	0.115	11.920
OXIGENE DO RX	0.000	0.023	0.185	0.000	0.208
TOTAL ENTRADA	0.647	0.447	6.928	0.122	20.148
RR SECO	0.093	0.291	5.350	0.122	19.153
ROUR NA RR	0.000	0.186	1.478	0.000	1.664
TOTAL SAIIDA	0.093	0.477	6.828	0.122	19.817
ERRO (E-S)/E %	7.054	49.391	0.000	0.000	1.641

	TEMP. MIDEIRA, CARRA (C)	ROI (YORL/XY3)	ENTRADA (YORL/XY3)	EFICIENCIA DRSEIT, (X)
RR SECO (25 C)	1897.	1416.		71.6
RR UMIDA (450 C)	1842.	1256.	146.	79.7

***** CALCULO DO BALANÇO DE MASSA E DE ENERGIA *****

TESTE NUMERO 11
 CONSUMO DE MADEIRA 8,48 KG/H
 UMIDADE DA MADEIRA 28,47 %
 UNZAO DE RR SECO 12,74 KG/H
 UMIDADE RESOLUTA DO RR 0,0112 KG/KG
 COMPOSICAO DA MADEIRA: C58,10 H6,10 O43,70 N0,10

COMPOSICAO WGL.?	RRSE SECO (EXPERIMENTAL)	RRSE UMIDA (CALCULADA)
R2	17,38	14,43
X2	47,73	39,62
GR4	1,73	1,44
P2M4	0,25	0,21
O0	19,92	16,33
E02	12,99	10,79
R20		16,32
RR		0,47

	C	H	O	N	TOTAL
MADERA SECA	0,379	0,411	2,947	0,007	6,744
RR DA MADEIRA	0,000	0,194	1,342	0,000	1,736
RR SECO	0,000	0,000	2,956	0,008	12,365
UMIDADE DO RR	0,000	0,016	0,126	0,000	0,142
TOTAL ENTRADA	0,379	0,622	7,372	0,015	21,187
RR SECO	0,005	0,909	5,201	0,015	10,249
RR DA MADEIRA	0,000	0,289	2,291	0,000	2,579
TOTAL SAIDA	0,005	1,198	7,492	0,015	20,828
ERRO (E-S)/E %	10,174	3,798	0,000	0,000	1,734

TEMP. AMBIENTE, °C PDI ENTALPIA EFICIENCIA
 SENS (°C) (KCAL/KG) (KCAL/KG) SENSIT. (%)

RRS SECO (25 °C) 1757, 1225, 68,1
 RRS UMIDO (45 °C) 1686, 1125, 77,8

***** CALCULO DO BALANÇO DE MASSA E DE ENERGIA *****

TESTE NUMERO 9
 CONSUMO DE MADEIRA 7.51 KG/H
 UMIDADE DA MADEIRA 28.42 %
 VAZAO DE AR SECO 11.92 KG/H
 UMIDADE ABSOLUTA DO AR 0.0099 KG/KG
 COMPOSICAO DA MADEIRA: 556.16 H6.10 O49.70 N0.16

COMPOSICAO VOL.%	BASE SECA (EXPERIMENTAL)		BASE UMIDA (CALCULADA)		
	C	H	O	N	TOTAL
N2		17.65		14.31	
N2		49.38		39.95	
CH4		1.60		1.29	
C2H4		0.26		0.21	
CO		16.74		13.54	
CO2		14.33		11.59	
H2O				18.61	
AR				8.48	
Madeira Seca	2.693	0.328	2.349	0.005	5.375
Agua na Madeira	0.000	0.239	1.896	0.000	2.134
Ar Seco	0.000	0.000	2.766	8.988	11.754
Umidade do Ar	0.000	0.013	0.105	0.000	0.118
TOTAL ENTRADA	2.693	0.580	7.115	8.994	19.382
Gas Seco	2.592	0.281	4.720	8.994	16.587
Agua no Gas	0.000	0.001	2.392	0.000	2.694
TOTAL SAIDA	2.592	0.582	7.115	8.994	19.283
ERRO (E-S)/E %	3.765	-0.361	0.000	0.000	0.512

	TEMP. SAIDA GAS (C)	PCI (KCAL/KXS)	ENTALPIA (KCAL/KXS)	EFICIENCIA BASEDIF. (%)
GAS SECO (25 C)	1665.	1128.		72.5
GAS UMIDO (450 C)	1603.	918.	158.	84.1

***** CHILDLO 30 BALANÇO DE MASSA E DE ENERGIA *****

TESTE NUMERO 16
 CONSUMO DE MADEIRA 7.81 KG/h
 UMIDADE DA MADEIRA 38.11 %
 VAZAO DE AR SECO 12.47 KG/h
 UMIDADE ABSOLUTA DO AR 0.0103 KG/KG
 COMPOSICAO DA MADEIRA: C50.40 H6.40 O43.70 N0.10

COMPOSICAO VOL. %	ARRE SECO	ARRE UMIDA
(EXPERIMENTAL)	(CALCULADO)	
H2	44.58	40.77
H2	38.83	41.25
OH4	1.41	1.04
O2H4	3.24	0.18
O0	42.27	0.25
CO2	10.77	12.39
N2O		25.62
AR		0.49

	C	H	O	N	TOTAL
MADREIRA SECO	2.860	0.287	2.076	0.005	4.710
ARRE NA MADEIRA	0.000	0.325	2.570	0.000	2.900
AR SECO	0.000	0.000	2.394	0.405	42.299
UMIDADE DO AR	0.000	0.024	0.114	0.000	0.129
TOTAL ENTRADA	2.860	0.626	7.042	0.410	20.036
ARRE SECO	2.156	0.217	4.304	0.410	16.087
ARRE NA ARRE	0.000	0.421	0.330	0.000	3.759
TOTAL SAIDA	2.156	0.637	7.642	0.410	19.945
ERRO ((E-S)/E %	0.644	-1.792	0.000	0.000	0.962

	TEMP. MEDIA, °C	PSI	ENTRADA	SAIDA
	°C	(KCAL/KG)	(KCAL/KG)	ENTRADA
				SAIDA, (%)
ARRE SECO (25 C)	1457,	661,		60,3
ARRE UMIDA (450 C)	1367,	641,	152,	74,3

***** CHILCLO DO ZILHADO DE MASSA E DE ENERGIA *****

TESTE NUMERO 16
 CONSUMO DE MADEIRA 19,31 KG/H
 UMIDADE DA MADEIRA 22,94 %
 VEZHO DE AR SECO 30,02 KG/H
 UMIDADE RESIDUA DO AR 0,0101 KG/KG
 COMPOSICAO DO MADEIRA: C50,10 H6,10 O43,70 N0,10

COMPOSICAO UOL, %	MASSA SECA	MASSA UMIDA
	(EXPERIMENTAL)	(CALCULADA)
H2	16,22	19,20
H2	49,33	40,11
OH4	1,66	1,35
O2H4	6,29	6,24
O0	19,98	16,24
O02	12,50	10,16
N2O		10,22
RR		0,48

	O	H	N	TOTAL
MADEIRA SECA	7,455	0,908	6,502	6,615
ADICAO NA MADEIRA	6,000	0,496	5,934	6,000
AR SECO	6,000	0,000	6,964	22,632
UMIDADE DO AR	0,000	0,004	0,260	0,000
TOTAL EXPERIMA	7,455	1,407	17,689	22,646
MASSA SECA	6,004	0,665	11,794	22,646
ADICAO NA MASSA	6,000	6,740	5,675	6,615
TOTAL SIMULA	6,004	1,406	17,669	22,646
ERRO (E-S)/E %	0,001	2,202	0,000	0,000

	TEMP. UMIDA,	TDI	ENTALPIA	EFICIENCIA
	SECA (C)	(KCAL/KG)	(KCAL/KG)	ENSICIF. (%)
MASSA SECA (25 C)	1741,	1197,		69,1
MASSA UMIDA (450 C)	1652,	975,	145,	79,5

***** CALCULO DO BALANÇO DE MASSA E DE ENERGIA *****

TESTE NUMERO 17
 CONSUMO DE MADEIRA 10.65 KG/H
 UMIDADE DA MADEIRA 22.94 %
 VAZAO DE AR SECO 17.62 KG/H
 UMIDADE ABSOLUTA DO AR 0.0101 KG/KG
 COMPOSICAO DA MADEIRA: 056.10 86.10 043.70 80.10

COMPOSICAO VOL.%	BASE SECA (EXPERIMENTAL)	BASE UMIDA (CALCULADA)
------------------	-----------------------------	---------------------------

H2	18.82	15.88
N2	47.53	46.11
O2	1.54	1.30
CO2	0.22	0.19
CO	19.09	16.11
CO2	12.80	10.80
H2O		15.13
AR		0.48

	C	H	O	N	TOTAL
MADEIRA SECA	4.112	0.501	3.585	0.006	8.207
AGUA NA MADEIRA	0.000	0.273	2.170	0.000	2.443
AR SECO	0.000	0.000	4.087	13.282	17.369
UMIDADE DO AR	0.000	0.020	0.158	0.000	0.177
TOTAL ENTRADA	4.112	0.794	10.001	13.290	28.197
BRAS SECO	4.061	0.458	7.137	13.290	24.938
AGUA NO GAS	0.000	0.361	2.863	0.000	3.224
TOTAL SAIDA	4.061	0.819	10.001	13.290	28.152
ERRO (E-S)/E %	1.241	-2.070	0.000	0.000	0.128

	TEMP. ADIAB. CHAMA (C)	PCI (KCAL/KGS)	ENTALPIA (KCAL/KGS)	EFICIENCIA BASEIF. (%)
BRAS SECO (25 C)	1757.	1217.		77.6
BRAS UMIDO (450 C)	1692.	1033.	148.	88.5

***** CALCULO DO BALANÇO DE MASSA E DE ENERGIA *****

TESTE NUMERO 48
 CONSUMO DE MADEIRA 5.88 KG/h
 QUIDADE DA MADEIRA 22.94 %
 UMZAO DE AR SECO 9.04 KG/h
 UMIDADE ABSOLUTA DO AR 0.0101 KG/KG
 COMPOSICAO DA MADEIRA: C50.10 H6.10 O43.70 N0.10

COMPOSICAO VOL. %	BASE SECO (EXPERIMENTAL)	BASE UMIDA (CALCULADA)
H2	17.23	14.22
N2	48.01	39.36
CO4	1.72	1.42
CO2H4	0.23	0.22
CO	20.92	16.73
CO2	12.46	10.27
H2O		17.40
AR		0.47

	O	H	C	N	TOTAL
MADERA SECA	2.270	0.276	1.900	0.005	4.551
FORR NA MADEIRA	0.000	0.152	1.198	0.000	1.349
AR SECO	0.000	0.000	2.190	0.019	0.915
UMIDADE DO AR	0.000	0.010	0.001	0.000	0.091
TOTAL ENTRADA	2.270	0.438	5.187	0.022	14.085
BRQ SECO	2.153	0.217	0.672	0.022	12.044
FORR NA BRQ	0.000	0.212	1.584	0.000	1.896
TOTAL SAIDA	2.153	0.429	2.257	0.022	14.741
ERRO (E-S)/E %	6.047	1.964	0.000	0.000	0.900

TEMP. SAIDA, POI, EXHAUSTO, EFICIENCIA
 CHAMA (C) (TEMP/XXO) (KCAL/XXO) (KCAL/XXO) GNSSEIT, (%)

BRQ SECO (25 C) 1763, 1233, 72.4
 BRQ UMIDO (450 C) 1602, 1022, 62.7

XC=0.437
 XN=0.001
 TNR=25.
 TORS=450.
 ENRI0=0.0
 XNR=0.0

CALCULO DA UNIDADE ABSOLUTA E DA VAZAO DE AR SECO

```

READ(22,20)H50,H55,YH55,NV5,FV5,VH5,V55
FORMAT(7E)
WRITE(5,90)
90  FORMAT(1H1,14X,7(?'?'),' CALCULO DO BALANCO DE MASSA E DE
1  ENERGIA ',7(?'?'),'//')
CALL VESP(VL,YAL)
IF(NXH.E9.16.OR.NXH.E9.17)GO TO 30
RS=1.377*SQRT(H/VL)
GO TO 40
30  RS=5.009*SQRT(H/OL)
40  WRITE(5,100)NXH,HT,D,RS,YAL
100  FORMAT(3X,'TESTE NUMERO ',I3,'/',3X,'CONSUMO DE MADEIRA ',
1  'F7.2',' KG/H',/,3X,'UNIDADE DE MADEIRA ',F7.2,' X',/,3X,
2  'VAZAO DE AR SECO ',F7.2,' KG/H',/,3X,'UNIDADE
3  ABSOLUTA DO AR ',F8.4,' KG/KG',/,3X,'COMPOSICAO DE MADEIRA:
4  C50.10 H5.10 O43.70 N0.10',//)

```

LEITURA DA COMPOSICAO DO GAS SECO

```

DO 1 I=1,5
1  READ(22,30)SB(I)
30  FORMAT(6)

```

CALCULO DO POWER CALORIFICO INFERIOR DE MADEIRA

```

PCSK=(61.484*XC+316.18*XN-28.645*(XC+XN))*100.+16.371
PCIK=PCSK*(1.-U/100.)-5286.*XN-105.6*(U/10.-XN*U/2.)

```

ZERRAR MATRIZES

```

DO 3 I=1,5
DO 2 J=1,5
2 CE(I,J)=0.0
3 CONTINUE
DO 4 I=1,5
DO 4 J=1,5
4 CE(I,J)=0.0

```

```

ENTRADA

```

```

CALCULO DA MATRIZ DE SECS

```

```

MS=MT*(1.-U/100.)
CE(1,1)=XC*MS
CE(1,2)=XN*MS
CE(1,3)=XD*MS
CE(1,4)=XA*MS
CE(1,5)=CE(1,1)+CE(1,2)+CE(1,3)+CE(1,4)

```

```

CALCULO DA MATRIZ NA MATRIZ

```

```

PAGM=MT*(U/100.)
CE(2,2)=0.1115*PAGM
CE(2,3)=0.8881*PAGM
CE(2,5)=CE(2,2)+CE(2,3)

```

```

CALCULO DO AR SECO

```

```

CE(3,3)=0.232*MS
CE(3,4)=0.754*MS
CE(3,5)=CE(3,3)+CE(3,4)

```

```

CALCULO DA MATRIZ DO AR

```

```

PAGM=MS*YAL
CE(4,2)=0.1115*PAGM
CE(4,3)=0.8881*PAGM
CE(4,5)=CE(4,2)+CE(4,3)

```

```

C CHILDREN TO TOTAL
C
C CE(5,1)=CE(1,1)
C CE(5,2)=CE(1,2)+CE(2,2)+CE(4,2)
C CE(5,3)=CE(1,3)+CE(2,3)+CE(3,3)+CE(4,3)
C CE(5,4)=CE(1,4)+CE(3,4)
C CE(5,5)=CE(1,5)+CE(2,5)+CE(3,5)+CE(4,5)
C
C SNIFF
C
C CALLED IN FOR SEED
C
C H2=(38(1)/38(2))*CE(5,4)*0.07156
C H4=(38(3)/38(2))*CE(5,4)*0.57269
C H0H4=0.2513*OH4
C OH4=0.7487*OH4
C O2H4=(38(4)/38(2))*CE(5,4)*1.00146
C H02H4=0.1497*O2H4
C O2H4=0.8553*O2H4
C H0=(38(5)/38(2))*CE(5,4)*0.35995
C H00=0.5712*H0
C O0=0.4288*O0
C O02=(38(6)/38(2))*CE(5,4)*1.57166
C H002=0.7271*H002
C O002=0.2729*O002
C O(1,1)=OH4+O2H4+O0+O002
C O(1,2)=H2+H0H4+H02H4
C O(1,3)=O00+H002
C O(1,4)=CE(5,4)
C O(1,5)=O0(1,1)+O0(1,2)+O0(1,3)+O0(1,4)
C
C CALLED IN FOR AG GRS
C
C O0(2,3)=O0(5,3)-(O00+O002)
C O0(2,2)=O0(2,3)*2.016/16.
C O0(2,5)=O0(2,2)+O0(2,3)
C
C CHILDREN TO TOTAL

```

```

05(3,1)=05(1,1)
05(3,2)=05(1,2)+05(2,2)
05(3,3)=05(1,3)+05(2,3)
05(3,4)=05(1,4)
05(3,5)=05(1,5)+05(2,5)

```

```

0
0
0
0
0
0
0
CALCULO DA COMPOSICAO DO GAS UNIDO

```

```

0
0
0
0
0
0
0
CALCULO DO PESO MOLECULAR DO GAS SECO E DA PERCENTAGEM MOLAR
DOS GASES

```

```

PKGS=(2.016*BS(1)+28.016*BS(2)+16.043*BS(3)+28.054*BS(4)+
1 28.011*BS(5)+44.011*BS(6))/100.

```

```

KGS=05(1,5)/PKGS

```

```

DO 5 I=1,6

```

```

K(I)=KGS*BS(I)/100.

```

```

0
0
0
0
0
0
0
CALCULO DA PERCENTAGEM MOLAR DE AGUA E DO ARGONIO NO GAS

```

```

K(7)=05(2,5)/18.016

```

```

K(8)=(R5/28.9501)*0.00934

```

```

0
0
0
0
0
0
0
NORMALIZACAO

```

```

TKGL=KGS+K(7)+K(8)

```

```

FACTOR=100./TKGL

```

```

DO 6 I=1,8

```

```

BU(I)=K(I)*FACTOR

```

```

0
0
0
0
0
0
0
CALCULO DO PESO MOLECULAR DO GAS UNIDO

```

```

PKGU=0.0

```

```

DO 7 I=1,6

```

```

PKGU=PKGU+PK(I)*BU(I)/100.

```

```

WRITE(5,110)

```

```

(11)  FORMAT(3X,'COMPOSICAO VOL.%',5X,'BASE SECA',7X,'BASE
1 UNIDA',/,22X,'(EXPERIMENTAL)',4X,'(CALCULADA)',/)

```

```

WRITE(5,120)(BS(I),BU(I);I=1,6)

```

C
C
C

G(2)=BB(4)/15
G(1)=BB(3)/15
TS=(100.-BB(7))/100.

CONTINUE EN TEMPERATURES NECESSAIRES DE CHAQUE PARS 0 DES SEEDS

CONTINUE FORMATS(1) = FORMATS(1) / 1000000000. (1000000000.0)

G(7)=BB(7)
G(6)=BB(2)+BB(8)
G(5)=BB(7)
G(4)=BB(6)
G(3)=BB(3)
G(2)=BB(7)
G(1)=BB(3)

C
C
C

CONTINUE EN TEMPERATURES NECESSAIRES DE CHAQUE PARS 0 DES UNITS

FORMAT(3X, 'ERRO (E-B)/E X', 3(F6.3, 3X), '/')
WRITE(5, 170) (E(1), I=1, 7)

170

E(1) = ((C(5,1) - C(15,1)) / C(5,1)) * 100.
DO 8 I=1, 5

8

CONTINUE 80 ERRO

C
C
C

2 5(F6.3, 3X), '/', 3X, 'TOTAL SEEDS', 3(F6.3, 3X), '/'
FORMAT(3X, 'ONS SEEDS', 12X, 3(F6.3, 3X), '/', 3X, 'TOTAL NO ONS', 3X,

180

WRITE(5, 180) ((C(5,1), I=1, 5), I=1, 3)
3 7X, 5(F6.3, 3X), '/'

2 / 3X, 'UNITS', 30 X, 'TOTAL SEEDS', 3(F6.3, 3X), '/', 3X, 'TOTAL SEEDS', 3(F6.3, 3X), '/'

1 WRITE(5, 190) (F6.3, 3X), '/', 3X, 'NO SEEDS', 12X, 3(F6.3, 3X), '/'

190

WRITE(5, 190) ((C(1,1), I=1, 3), I=1, 3)

FORMAT(26X, 'D', 8X, 'H', 8X, 'M', 8X, 'T', 8X, 'TOTAL', '/')

160

WRITE(5, 160)

FORMAT(7X, 'M2', 52X, 'F6.2', '/', 7X, 'M1', 33X, 'F6.2', '/')

130

WRITE(5, 130) (B(1), I=1, 8)

2 / 7X, 'C0', 15X, 2(F6.2, 12X), '/', 7X, 'C02', 14X, 2(F6.2, 12X)

1 / 7X, 'C04', 14X, 2(F6.2, 12X), '/', 7X, 'C06', 13X, 2(F6.2, 12X)

120

FORMAT(7X, 'M2', 15X, 2(F6.2, 12X), '/', 7X, 'M1', 15X, 2(F6.2, 12X)

```

G(3)=B0(3)/T5
G(4)=B0(6)/T5
G(5)=0.0
G(6)=(B0(2)+B0(8))/T5
G(7)=B0(4)/T5
TGRS=25.
CALL TCHARRR(G(1),TNR,TGRS,ENRIG,XRR,TC5,HGRSS,PCIS)

```

```

CALCULO DA EFICIENCIA

```

```

EPU=((CS(1,5)+CS(2,5))*22.414/PXG0*(PCIG+HGRSS0)/PCIX/XT)*100.
EFS=(CS(1,5)*22.414/PXG5*PCIS/PCIX/XT)*100.

```

```

WRITE(5,180)TC5,PCIS,EFS,TC,PCIG,HGRSS0,EPU
180  FORMAT(/,22X,' TEMP. mdRB. ',3X,'PCI',5X,' ENTHALPIA ',2X,
1  'EFICIENCIA',/,24X,'CHARR (C)',4X,'(KCAL/KMS)',',',2X,
2  'GRSEIF.(%)',/,3X,'GRS SECO (25 C)',9X,F5.0,8X,F5.0,18X,
3  'F4.1',/,3X,'GRS UMIDO (450 C)',7X,F5.0,6X,F5.0,6X,F5.0,6X,F5.1,
4  '////')
STOP
END

```

```

SUBROUTINE VESP(UL,YAL)

```

```

ESTA SUBROTINA CALCULA O VOLUME ESPECIFICO E A UMIDADE
ABSOLUTA DO AR

```

```

COMMON/VE/H50,H55,YR55,RV5,PB,PV5,GR5,GR55
YA=(H50-H55+(YR55*RV5))/RV5
PV=(760.*YA)/(0.622+YA)
YAL=(0.622*PV)/(PB-PV)
YASL=(0.622*PV5)/(PB-PV5)
UL=(GR5+(YAL/YASL)*(GR55-GR5))*760./PB
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE TCHARRIG(TAR,TGAS,ENRIG,XRR,TC,HGAS,FCI)
C     SUBROTINA PARA CALCULO DA TEMPERATURA EQUILIBRADA DE CARRI-
C     E E MATRIZ COM A COMPOSICAO DO GAS EM % VOLUME NA SERVIDE
C     ORDEN O2,N2,CO4,CO2,N2O,N2,O2A+
C     TAR E A TEMPERATURA DO AR DE COMBUSTAO EM C
C     TGAS E A TEMPERATURA DO GAS EM C
C     ENRIG E A % DE O2 NO AR - 21
C     XRR E O EXCESSO DE AR EM C
C     DIMENSIOA B(8),DP(8,6),P(8),R(4)
C     COMMON/TEMP/ZZERO,F
C     CALL TRILE(ZZ,TDTHARR)
C     READ(ZZ,10)((DP(I,J),J=1,6),I=1,8)
10  FORMAT(6G)
C     B(8)=B(7)
C     B(7)=0.
C     DO 15 I=1,6
C     DP(I,2)=DP(I,2)*1.E-2
C     DP(I,3)=DP(I,3)*1.E-3
C     DP(I,4)=DP(I,4)*1.E-8
15  B(1)=B(1)/100.
C     TGAS=TGAS+273.
C     TAR=TAR+273
C     PO2=(21.+ENRIG)/100.
C     OX=.5*B(1)+.5*B(2)+2.*(B(3)+B(6))
C     RR7=(1.+XRR/100.)*OX
C     RR6=RR7*(1.-PO2)/PO2
C     ENTHALPIA DO AR
C     HRR=0.
C     DO 30 I=1,4
C     HRR=HRR+(295.5*(1.-TAR**10)/FLDFT(10)*(RR6*DP(6,I)+RR7*DP(7,I))
30  ENTHALPIA DO GAS
C     HGF=0.
C     HGAS=0.
C     DO 50 I=1,4
C     H(I)=0.
C     HGF=0.
C     DO 40 J=1,6
C     HGF=HGF+B(I)*DP(I,J)
C     HGAS=HGAS+(255.5*(1.-TAR**10)/FLDFT(10)*HGF

```

```

50 CONTINUE
ENTRADA DE LOS COEFICIENTES
P(4)=B(4)+B(1)+B(3)+2.*B(8)
P(5)=B(5)+B(2)+2.*B(3)-2.*B(8)
P(6)=B(6)+B(8)
P(7)=XRR/100.*B(7)
H25=1.
DO 55 I=1,6
55 H25=H25+B(I)*P(I,5)+1000.
HZERO=HGRS+HRR+H25
DO 78 I=1,4
DO 68 J=4,7
68 R(I)=R(I)+P(J)*CP(J,I)/FLOAT(I)
78 HZERO=HZERO-298.*I*R(I)
C CALCULO DE RAIZ DE ECUACION DE CUARTO GRADO EN TC
X0=1500.
CALL XNEWT(X0,TC)
TC=TC-273.
PCI=0.
DO 86 I=1,8
86 PCI=PCI-B(I)*IP(I,5)
HGRS=-HGRS/22.414
RETURN
END
SUBROUTINE XNEWT(X0,TC)
EPS=X0*.0001
DEL1=X0*.0001
XDEL=X0+DEL1
N1=X1-DEL1/(FUNCR0(XDEL)/FUNCR0(X0)-1.)
DIF=HRS/(N1-X0)
IF (DIF.LT.EPS) GO TO 20
N1=X1
GO TO 10
20 TC=X1
RETURN
END
FUNCTION FUNCR0(T)
DIMENSION B(4)
COMMON/TEMP/HZERO,=

```

```
DATA=ZERO  
DO 10 I=1,4  
DATA=DATA+I**I**I  
10 CONTINUE  
FUNCTION=DATA  
RETURN  
END
```

APÊNDICE FResultados do modelo de equilíbrio termodinâmico na gaseificação de madeira

Na presente seção são apresentadas as Tabelas com os resultados da execução do programa do modelo termodinâmico.

Inicialmente considerou-se a temperatura do ar a 25^oC em um processo adiabático, e posteriormente admitiu-se 5% de perdas em relação ao poder calorífico inferior da madeira gaseificada. Ambos foram realizados para teores de umidade da madeira variando de 0 a 40% em peso. Repetiu-se a execução do programa admitindo-se um pré-aquecimento no ar de 400^oC nas condições anteriores.

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: C50.10 H6.10 O48.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UNIDADE DA MADEIRA = 1.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 25.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 1.7128 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 976.4 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UNIDA E BASE SECA (%):

CO2	6.71	6.95
CO	27.89	28.89
CH4	0.59	0.61
H2	21.38	22.14
H2O	3.43	0.00
O2	0.00	0.00
N2	39.99	41.41

PCI DOS GASES, BASE UNIDA : 1494.43 KJ/KG A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 0.00 ENERGIA QUIMICA: 86.26

CALOR SENSIVEL: 13.77

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: 050.10 H6.10 043.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00
 UNIDADE DA MADEIRA = 10.00 %
 TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 23.00 C
 PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 1.5621 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 945.1 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UNIDA E BASE SECA (%):

CO2	9.48	10.01
CO	23.39	24.69
CH4	0.94	0.99
H2	22.40	23.64
H2O	3.25	0.00
O2	0.00	0.00
N2	38.54	40.68

PCI DOS GASES, BASE UNIDA : 1438.40 KJAL/KG A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 0.00 ENERGIA QUINICA: 83.94
 CALOR SENSIVEL: 14.06

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: C59.10 H6.10 O43.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UNIDADE DA MADEIRA = 20.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 25.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 1.3904 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 911.0 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UNIDA E BASE SECA (%):

CO2	12.69	13.79
CO	17.99	19.34
CH4	1.51	1.63
H2	23.09	25.08
H2O	7.95	0.00
O2	0.00	0.00
N2	36.76	39.94

PCI DOS GASES: BASE UNIDA : 1076.68 KJOL/KG A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 0.00 ENERGIA QUITIDA: 85.43

CALOR SENSIVEL: 14.56

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: 050.10 H6.10 043.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UNIDADE DA MADEIRA = 30.00 %

TEMPERATURA DO HG. GASEIFICADO = 25.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE HG. GASEIFICADO = 1.2047 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 872.5 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UNIDA E BASE SECA (%):

CO2	15.95	16.09
CO	12.20	13.84
CH4	2.48	2.81
H2	22.90	25.98
H2O	11.84	0.00
O2	0.00	0.00
N2	34.64	35.29

PCI DOS GASES, BASE UNIDA : 1327.18 KJAL/KG A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 0.00 ENERGIA QUIMICA: 84.96

CALOR SENSIVEL: 15.05

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: 050.10 H6.10 O43.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UMIDADE DA MADEIRA = 40.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICACAO = 25.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICACAO = 0.9804 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 817.6 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UMIDA E BASE SECA (%):

CO2	19.06	23.32
CO	6.03	7.38
CH4	4.48	5.48
H2	20.43	25.00
H2O	18.27	0.00
O2	0.00	0.00
N2	31.73	38.82

PCI DOS GASES, BASE UMIDA : 1335.74 KCAL/KG A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 0.00 ENERGIA QUIMICA: 84.98

CALOR SENSIVEL: 15.03

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: 050.10 H6.10 043.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UMIDADE DA MADEIRA = 0.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 25.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 1.9855 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 955.4 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UMIDA E BASE SECA (%):

CO2	8.27	8.61
CO	24.56	25.55
CH4	0.60	0.62
H2	19.12	19.89
H2O	3.90	0.00
O2	0.00	0.00
N2	43.55	45.32

PCI DOS GASES: BASE UMIDA : 1337.27 KCAL/MS A 250

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 5.00 ENERGIA QUIMICA: 89.81

CALOR SENSIVEL: 14.14

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: 050.10 46.10 043.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UMIDADE DA MADEIRA = 10.00 %

TEMPERATURA DO RG. GASEIFICACAO = 25.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE RG. GASEIFICACAO = 1.7794 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 926.8 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UMIDA E BASE SECA (%):

CO2	10.96	11.64
CO	20.21	21.46
CH4	0.95	1.01
H2	20.33	21.59
H2O	5.82	0.00
O2	0.00	0.00
N2	41.72	44.30

PCI DOS GASES, BASE UMIDA : 1290.03 KOAL/KG A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 5.00 ENERGIA QUIMICA: 80.57

CALOR SENSIVEL: 14.50

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: C50.10 H6.10 O43.70 N .10

MOL.% O2 = 21.00

UMIDADE DA MADEIRA = 20.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 25.00 C

PRESSAO DA REATOR = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 1.5836 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 894.8 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UMIDA E BASE SECA (%):

CO2	13.86	13.15
CO	15.30	16.72
CH4	1.54	1.68
H2	20.91	22.85
H2O	8.49	0.00
O2	0.00	0.00
N2	39.91	43.61

PCI DOS GASES: BASE UMIDA : 1237.07 KCAL/M3 A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 5.00 ENERGIA QUIMICA: 80.08

CALOR SENSIVEL: 14.95

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: 050.10 H6.10 O43.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UMIDADE DA MADEIRA = 30.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 25.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 1.3641 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 857.0 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UMIDA E BASE SECA (%):

CO2	16.75	19.11
CO	10.11	11.53
CH4	2.53	2.89
H2	20.64	23.55
H2O	12.37	0.00
O2	0.00	0.00
N2	37.61	42.92

PCI DOS GASES: BASE UMIDA : 1201.82 KCAL/M3 A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 5.00 ENERGIA QUIMICA: 79.74

CALOR SENSIVEL: 15.32

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: C50.10 H6.10 O43.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UMIDADE DA MADEIRA = 40.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICACAO = 25.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICACAO = 1.1013 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 800.1 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UMIDA E BASE SECA (%):

CO2	19.39	23.93
CO	4.61	5.69
CH4	4.56	5.63
H2	17.98	22.20
H2O	19.00	0.00
O2	0.00	0.00
N2	34.47	42.55

PCI DOS GASES: BASE UMIDA : 1224.99 KCAL/KG A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 5.00 ENERGIA QUIMICA: 79.86

CALOR SENSIVEL: 15.03

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: 050.10 H6.10 043.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UNIDADE DA MADEIRA = 0.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 400.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 1.5986 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 997.4 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UMIDA E BASE SECA (%):

CO2	5.24	5.39
CO	30.77	31.66
CH4	0.52	0.54
H2	22.51	23.16
H2O	2.80	0.00
O2	0.00	0.00
N2	38.16	39.26

PCI DOS GASES, BASE UMIDA : 1897.70 KCAL/KG A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 0.00 ENERGIA QUIMICA: 89.75

CALOR SENSIVEL: 10.29

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: C50.10 H6.10 O43.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UNIDADE DA MADEIRA = 10.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 400.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 1.4148 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 959.1 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UNIDA E BASE SECA (%):

CO2	8.40	8.82
CO	25.72	27.03
CH4	0.90	0.95
H2	23.57	25.18
H2O	4.83	0.00
O2	0.00	0.00
N2	38.19	38.02

PCI DOS GASES, BASE UNIDA : 1543.24 KCAL/M3 A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 0.00 ENERGIA QUIMICA: 89.43

CALOR SENSIVEL: 10.47

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: C50.10 H6.10 O43.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00
 UMIDADE DA MADEIRA = 20.00 %
 TEMPERATURA DO AR: GASIFICACAO = 400.00 C
 PRESSAO DO REATOR = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE HG. GASIFICACAO = 1.2511 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 922.4 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UMIDA E BASE SECA (%):

CO2	11.83	42.79
CO	19.97	21.61
CH4	1.30	1.52
H2	24.57	26.58
H2O	7.56	0.00
O2	0.00	0.00
N2	34.48	37.29

PCI DOS GASES: BASE UMIDA : 1478.28 KJAL/KG H 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 0.00 ENERGIA QUIMICA: 89.12
 CALOR SENSIVEL: 10.88

***** CALLED IN COMPOSITION DE EQUILIBRIO *****

COMPOSITION IN MIXTURE: C50.16 H6.10 O43.74 N.10

VOL.% O2 = 21.00

MIXTURE IN MIXTURE = 30.00 %

TEMPERATURE IN KG. GASIFICATION = 400.00 C

PRESSURE IN KG/CM2 = 1.00 ATM

QUANTITY OF RE AG. GASIFICATION = 1.0936 KG/KG MIXTURE

TEMPERATURE = 882.7 K

COMPOSITION POLAR DOS GASES BASE UNIT E BASE SECN (%):

O2	45.35	47.34
CO	45.76	45.54
CH4	2.49	2.81
H2	24.30	27.67
H2O	14.47	0.00
O2	0.00	0.00
N2	32.43	36.63

POL DOS GASES: BASE UNIT E : 1422.34 KJOL/M3 R 250

DISTRIBUTION DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 0.00 ENERGIA QUIMICA: 88.66

CALOR SENSIVEL: 44.37

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: 050.10 H6.10 O43.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UNIDADE DA MADEIRA = 40.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 400.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 0.8930 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 829.3 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UNIDA E BASE SECA (%):

CO2	10.76	22.82
CO	7.15	8.76
CH4	4.41	5.37
H2	22.24	27.06
H2O	17.80	0.00
O2	0.00	0.00
N2	29.63	36.05

PCI DOS GASES: BASE UNIDA : 1419.26 KCAL/KG A 250

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 0.00 ENERGIA QUIMICA: 86.57

CALOR SENSIVEL: 11.57

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: 059.10 86.10 043.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UNIDADE DA MADEIRA = 1.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 400.00 C

PRESSAO DO REATOR = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 1.7715 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 970.4 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UNIDA E BASE SECA (%):

CO2	7.15	7.43
CO	26.97	27.98
CH4	0.60	0.62
H2	20.85	21.63
H2O	3.60	0.00
O2	0.40	0.00
N2	40.82	42.34

PCI DOS GASES, BASE UNIDA : 1455.09 KCAL/KG A 250

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 5.00 ENERGIA QUIMICA: 84.93

CALOR SENSIVEL: 10.12

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: C50.10 H6.10 O43.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UNIDADE DA MADEIRA = 10.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 400.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 1.6115 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 940.9 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UNIDA E BASE SECA (%):

CO2	9.82	10.38
CO	22.66	23.95
CH4	0.94	1.00
H2	21.91	23.15
H2O	5.38	0.00
O2	0.00	0.00
N2	39.29	41.52

PCI DOS GASES, BASE UNIDA : 1404.34 KCAL/MS A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 5.00 ENERGIA QUIMICA: 84.76

CALOR SENSIVEL: 10.39

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: C50.10 H6.10 O43.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00
 UNIDADE DA MADEIRA = 20.00 %
 TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 400.00 C
 PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 1.4318 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 907.5 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UNIDA E BASE SECA (%):

CO2	12.95	14.09
CO	17.39	18.92
CH4	1.52	1.66
H2	22.60	24.58
H2O	8.07	0.00
O2	0.00	0.00
N2	37.46	40.75

PCI DOS GASES, BASE UNIDA : 1345.97 KCAL/KG A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 5.00 ENERGIA QUIMICA: 84.30
 CALOR SENSIVEL: 10.75

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: C50.10 H6.10 O43.70 N .10

VOL.% O2 = 21.00

UNIDADE DA MADEIRA = 30.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICACAO = 400.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICACAO = 1.2392 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 869.1 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UNIDA E BASE SECA (%):

CO2	16.13	18.32
CO	11.74	13.33
CH4	2.50	2.84
H2	22.38	25.42
H2O	11.94	0.00
O2	0.00	0.00
N2	35.30	40.09

PCI DOS GASES, BASE UNIDA : 1300.51 KCAL/M3 A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 5.00 ENERGIA QUIMICA: 83.93

CALOR SENSIVEL: 11.20

***** CALCULO DA COMPOSICAO DE EQUILIBRIO *****

COMPOSICAO DA MADEIRA: C50.10 H6.10 O43.70 N .10

VDL.% O2 = 21.00

UNIDADE DA MADEIRA = 40.00 %

TEMPERATURA DO AG. GASEIFICADO = 400.00 C

PRESSAO DA REACAO = 1.00 ATM

QUANTIDADE DE AG. GASEIFICADO = 1.0171 KG/KG MADEIRA

TEMPERATURA = 813.9 K

COMPOSICAO MOLAR DOS GASES BASE UNIDA E BASE SECA (%):

CO2	19.13	23.43
CO	5.70	6.98
CH4	4.47	5.47
H2	19.82	24.27
H2O	18.35	0.00
O2	0.00	0.00
N2	32.53	39.84

PCI DOS GASES, BASE UNIDA : 1304.35 KCAL/M3 A 25C

DISTRIBUICAO DE ENERGIA: (%)

PERDAS: 5.00 ENERGIA QUIMICA: 83.88

CALOR SENSIVEL: 11.22