



**ESTUDO DA GASEIFICAÇÃO DE UM BIO-COMBUSTÍVEL USANDO UM  
MODELO DE EQUILÍBRIO**

**Glauco D. T. de Barros**

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, CP 50 – CEP 37500-903 – Itajubá – MG – Brasil

[glhr@zipmail.com.br](mailto:glhr@zipmail.com.br)

**Álvaro A. A. de Queiroz**

Escola Federal de Engenharia de Itajubá

**Pio Caetano Lobo**

Escola Federal de Engenharia de Itajubá

[pclobo@iem.efei.br](mailto:pclobo@iem.efei.br)

**RESUMO**

*A utilização da biomassa apresenta muitas vantagens em relação aos combustíveis fósseis como geração distribuída, sustentabilidade e emissões de poluentes em baixos níveis. A gaseificação da biomassa permite uma combustão mais limpa porque ocorre na fase gasosa. É feita uma modelagem num gaseificador de leito fixo e fluxo descendente (downdraft). As constantes de equilíbrio e os coeficientes dos produtos de uma biomassa são encontrados a partir da análise da queima. A biomassa utilizada foi o sabugo de milho. Experimentalmente seu poder calorífico superior (PCS) foi avaliado em 18MJ/kg e o teor de cinzas de aproximadamente 1%, estando dentro das faixas encontradas na literatura. Para resoluções das equações simultâneas utilizou-se o MATHCAD 2000. Constata-se haver um melhor desempenho térmico desta biomassa em relação a casca do arroz para uma dada faixa de temperatura. Para um dado valor de umidade (15%) o valor máximo de CO e H<sub>2</sub> ocorre na faixa de 1100 C. O teor de umidade influencia consideravelmente a composição do CO e CO<sub>2</sub>. Efeitos do aumento da razão equivalente (quantidade de ar na queima pela quantidade de ar estequiométrico) em relação a temperatura de chama são discutidos a partir das identificação das zonas de pirólise, oxidação e combustão no gaseificador.*

*Palavras – chave: Biomassa, Gaseificação, Equilíbrio Químico, Sustentabilidade Energética.*

# 1-INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente tem motivado pesquisadores do mundo na procura de novas tecnologias de conversão energética que levem em consideração a sobrevivência do planeta. As fontes renováveis de energia têm se tornado alvo de estudos tendo como objetivo final a substituição dos combustíveis fósseis e a conseqüente redução do efeito estufa, além da diminuição de índices de poluição nas grandes cidades.

Existem várias fontes de energia disponíveis. No Brasil pode-se citar como fontes abundantes a hídrica, biomassa, solar e eólica. Enquanto os potenciais hidroelétricos mais atraentes no Centro-Oeste, Sudeste e Sul de Brasil já são explorados, a exploração apreciável do potencial hidroelétrico disponível no Norte é bastante prejudicada por restrições de viabilidade econômica e impacto ambiental. Ademais as fontes hídricas já estão sendo afetadas pela mudança climática que alteram o processo das chuvas causando freqüentes estiagens, comprometendo assim o abastecimento das centrais hidroelétricas. Portanto a utilização da biomassa se justifica como um combustível renovável que fornece a energia necessária a partir de uma fonte inesgotável. Além disso o uso desse combustível permite que se atinja o equilíbrio quanto a emissão de CO<sub>2</sub>. Estudos de Yamamoto et al. (2000) mostram que a quantidade lançada desse gás devida ao uso da biomassa reduzirá em 2.7 % a emissão cumulativa total. A grande vantagem para a natureza é a diminuição do efeito estufa pela diminuição da emissão do CO<sub>2</sub>.

É evidente que a importância da conversão da biomassa está vinculada a quantidade disponível desse combustível que pode ser convertido em gás. A biomassa está presente em vários locais sob várias formas. Pode-se encontrar biomassa em excedentes de madeira nas grandes florestas, resíduos agrícolas tais como casca de côco, sabugo de milho, casca de arroz, etc., além das frações orgânicas de restos sólidos municipais existentes nos lares ou no seu destino final, os lixões.

A biomassa é mais fácil de gaseificar do que os combustíveis fósseis, porque a quantidade de voláteis contidos na mesma é muita elevada, variando de 70 a 90%. Além disso, a biomassa contém seu próprio oxigênio e água, elementos estes importantes no processo de gaseificação. A quantidade de cinzas, salvo algumas exceções é baixa variando de 1 a 5%, enquanto para o carvão fóssil este valor fica na faixa de 5 a 20%. Uma das grandes vantagens da biomassa é o seu baixo conteúdo de enxofre. Estima-se que em média quantidade de enxofre está na faixa de 1%, sendo este valor para o carvão mineral de 2 a 4%. Dessa forma a gaseificação possibilita a conversão deste material sólido em gases combustíveis, gerando energia para transformação em energia mecânica, elétrica e além de combustíveis sintéticos e químicos. A pirólise da biomassa resulta em carvão, gases e alcatrão, sendo os produtos volatilizados na faixa de 60 a 90%, ficando 30 a 10% de carvão(char) para ser parcialmente consumido na zona de combustão e o restante necessário para a geração do gás combustível.

Têm-se dado bastante ênfase a questão do controle dos gases produzidos no processo, pois estes são tóxicos. No caso, por exemplo, de instalações em pequena escala, segundo Caio et al. (1997), as falhas freqüentes ocorrem pela falta de controle no manuseio do combustível e limpeza dos gases. Os autores apontam como principal razão para o problema a falta de visão integrada do sistema de gaseificação. Dessa forma vários estudos sobre têm sido desenvolvidos na perspectiva de otimizar o controle desde os aspectos de segurança, além de emissão de poluentes além diminuir a concentração de produtos indesejáveis nos gases gerados. Blasi (2000), estudou o comportamento dinâmico em um gaseificador de leito fixo com fluxo descendente (downdraft) Ele avaliou os efeitos da partícula na descrição da pirólise primária e evaporação da umidade e conclui que estes são importantes para correta predição da evolução do alcatrão e conseqüente qualidade do gás produzido. Ele conclui também a partir da simulação numérica em gaseificadores downdraft que a temperatura da zona de reação é altamente afetada pelo conteúdo de umidade e taxa de evaporação da umidade. Warren et al. (1995) mostrou a viabilidade da conversão da biomassa para eletricidade usando um gaseificador downdraft e um motor de ignição por centelha num sistema que produz 30

kWe e 60 kW de calor. Fagbemi et al. (2001), estudou a composição do gás a partir do processo de pirólise de três biomassas: madeira, casca de côco e palha, sugerindo uma equação para craqueamento térmico do alcatrão nas temperaturas compreendidas entre 500 e 900 C. Um modelo para pirólise e combustão de sabugo de milho em leito fluidizado foi desenvolvido por Lin et al (1995) onde foi avaliado o comportamento da reação a partir de dados medidos de massa, volume e densidade com o tempo. Zainal et al. (2000) avaliou a performance de um gaseificador de leito fixo e fluxo descendente (downdraft), usando o modelo de equilíbrio para várias Biomassas inclusive restos sólidos municipais. Para uma temperatura de 800 C ele determinou a composição do gás produzido bem como a variação da composição do gás com a umidade. Também observou que a percentagem de metano no gás é da ordem de 1%. Ruggiero e Manfrida (1999), investigaram um modelo de equilíbrio para processos de gaseificação considerando 19 gases. Também é feita uma análise exergética do processo para estimar as irreversibilidades globais no processo de transformação da biomassa em gás combustível, além de fornecer detalhes internos da distribuição de perdas procurando minimizar as perdas locais.

Vários processos de gaseificação que usam leito fixo utilizam o processo de fluxo ascendente (updraft). Segundo Blasi (2000), aproximadamente 90% do carvão gaseificado no mundo utiliza esta tecnologia. Gaseificadores downdraft, caracterizados por fluxo concorrente do combustível sólido e o gás gerado, apresenta pouca flexibilidade com respeito ao conteúdo de umidade de combustível e tamanho da partícula. Segundo Mukunda(2000) estas unidades já atendem potencias de 1 MWe e produzem um gás limpo com teor de alcatrão na faixa de 10 a 30 ppm. Existem também diferenças entre os gaseificadores downdraft e updraft quanto a composição do gás gerado. No downdraft a qualidade do gás é altamente dependente da presença de voláteis enquanto no updraft o poder calorífico é determinado pela quantidade de monóxido de carbono e hidrogênio formado pelo craqueamento do alcatrão e gaseificação heterogênea lenta do carvão no leito (char). Devido ao baixo teor de enxofre da biomassa aliado a perspectiva de redução de emissão de CO<sub>2</sub>, o gaseificador downdraft se mostra como uma importante alternativa de geração de energia limpa.

Nesta publicação é feita uma investigação da composição de equilíbrio de um bio combustível em condições correspondentes a zona de redução de um gaseificador de leito fixo com fluxo descendente (downdraft) em função de vários parâmetros de interesse.

## 2 –HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS

Neste modelo as seguintes hipóteses foram consideradas:

- O gás se comporta como gás perfeito
- Os únicos componentes formados são: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>. No caso dos hidrocarbonetos observa-se que o metano é o único estável em temperaturas altas Reed (1985).
- Reagentes e produtos estão em equilíbrio termodinâmico
- O sistema é adiabático

## 3-TERMODINÂMICA DO EQUILÍBRIO

Com a hipótese do estado de equilíbrio atingido na zona de redução, serão consideradas as seguintes reações:





Combinando as Eqs. (1) e (2) teremos:



As Eqs. (3) e (4) serão as equações independentes para as reações simultâneas ocorrendo no processo. Com isso as constantes de equilíbrio para estas reações (Morán e Shapiro (2000); Van Ness e Smith (1975)) serão dadas por:

$$K_1 = \frac{y_{CO_2} y_{H_2}}{y_{CO} y_{H_2O}} \quad (5)$$

$$K_2 = \frac{y_{CH_4}}{y_{H_2}^2} \quad (6)$$

Onde  $y_{CO_2}, y_{H_2}, y_{CO}, y_{H_2O}, y_{CH_4}$  são as frações molares dos respectivos componentes na condição de equilíbrio

### 3.1. Avaliação das Propriedades Termodinâmicas

O calor específico foi modelado de Willey (2000) com um modelo polinomial validado na faixa de 300 a 3000K:

A entalpia de cada componente foi modelada pela equação:

$$\Delta h_i = \int_{T_0}^T C_{p_i} dT \quad (7)$$

Onde  $T_0, C_{p_i}$ , representam a temperatura ambiente, considerada 25 C e o calor específico de cada componente, respectivamente.

A entalpia livre de Gibbs para as reações é dada por:

$$\Delta G_i = \Delta h_i + T \Delta S_i \quad (8)$$

Onde  $\Delta S_i$  é a variação de entropia do componente i considerado cuja fórmula é:

$$\Delta S_i = \int_{T_i}^T \frac{Cp_i}{T} dT \quad (9)$$

O valor da constante de equilíbrio pode ser avaliado, portanto pela fórmula dada por e Morán e Shapiro (2000) como:

$$K_i = e^{\frac{-\Delta G_i}{RT}} \quad (10)$$

#### 4. ANÁLISE PARA O PROCESSO DE EQUILÍBRIO

Tabela (1) fornece os dados referentes a análise última do combustível

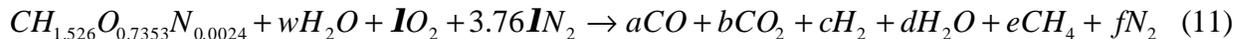
Tabela 1. Propriedades do sabugo de milho:

Análise aproximada(% EM PESO)	
Carbono (C)	47
Hidrogênio (H)	5,97
Oxigênio (O)	45,89
Nitrogênio (N)	0,1316

Ensaio na bomba calorimétrica forneceram um poder calorífico superior (PCS) de 18 MJ/kg. Este valor é corroborado pelos dados fornecidos por Lin (1985), PCS = 18 MJ/kg ± 218 kJ/kg. Foi considerado também que o teor de umidade da biomassa é de 15%.

##### 4.1. Balanço de Massa

A equação de reação para representar o processo de gaseificação é:



O balanço de massa fornece:

$$1 - b - a - e = 0 \quad (12)$$

$$2c + 2d + 4e = 2w + 1.526 \quad (13)$$

$$0.7353 + 2\mathbf{1} + w = a + 2b + d \quad (14)$$

Considerando as Eqs. (5) e (6) aplicadas à reação temos :

$$K_1 = \frac{bc}{ad} \quad (15)$$

$$K_2 = \frac{e}{c^2} \quad (16)$$

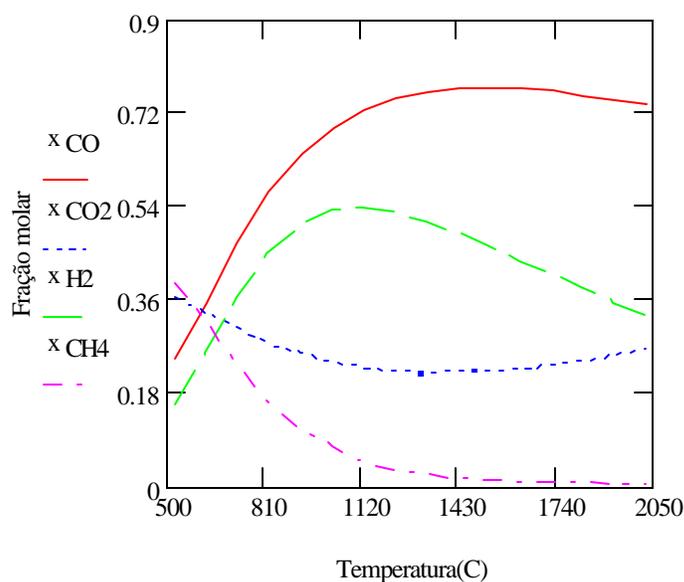
Considerando o sistema adiabático temos:

$$\Delta H_{\text{produtos}} = \Delta H_{\text{reagentes}} \quad (17)$$

As Equações (12) a (17) foram resolvidas usando o programa MATCHAD 2001

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura (1) mostra a composição de equilíbrio dos gases variando com a temperatura. Os valores para a fração molar foram obtidos a partir da resolução das equações (12) a (17), partindo da composição inicial da biomassa (fração molar) representado na equação (1). A relação ar/combustível variou com a temperatura, ou seja, a quantidade de ar necessária para cada composição de equilíbrio em função da temperatura varia no modelo proposto. Observa-se que a o metano possui baixa concentração o que já era previsto por Reed (1985) e Zainal et al.(2000). A composição do monóxido evolui até uma faixa de 1500C. Neste ponto o equilíbrio favorece o aumento de dióxido de carbono. A curva referente ao hidrogênio evolui praticamente com mesmo padrão da curva do monóxido. A declividade na curva do hidrogênio se deve a presença de umidade na biomassa.



Figura(1).Variação da composição dos gases com a temperatura

As variáveis que controlam a formação do char são umidade e temperatura. A composição do gás é enormemente afetada pela presença da umidade no processo de gaseificação. Na Figura (2) pode-se observar a influência da quantidade de ar subestequiométrico no processo de gaseificação. Nas temperaturas próximas a 600C ocorre a pirólise ou extração de alcatrão e óleos e a conseqüente formação do char. Quando a temperatura é aproximadamente 1200K a razão equivalente (razão entre os moles da reação e os moles estequiométricos, do oxidante) é próxima aos valores experimentais obtidos em Reed (1985) e Mukunda(2000) que é de 0.225. Aumento de ar acima

deste valor leva a uma mudança significativa de declividade traduzido em um rápido aumento da temperatura até atingir a condição de combustão completa.

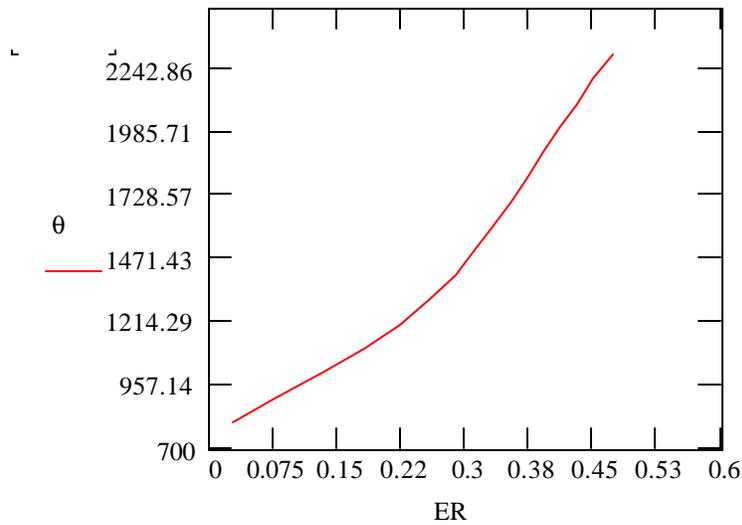


Figura (2). Percentual subestequimétrico x Temperatura do gás

A Figura (3) avalia o comportamento da composição do gás com a umidade, para uma temperatura de 900 C. Pode ser observado na figura que o metano (8.8-9.9%) -e o hidrogênio (34-35%) mantiveram-se estáveis durante a variação da umidade. O monóxido tem um decréscimo acentuado no percentual no gás combustível caindo de 36% para 24%, enquanto o dióxido de carbono aumenta de maneira menos acentuada variando de 21% para 30%. Em todos os casos pode-se observar um comportamento quase linear.

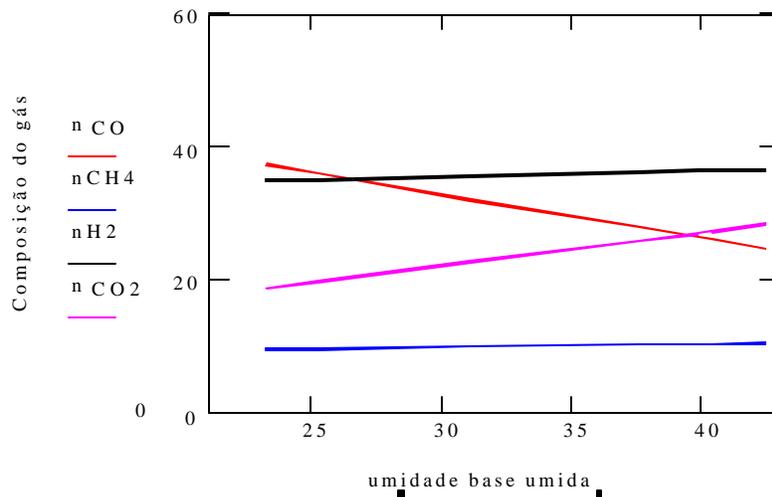


Figura (3). Variação da composição com a umidade

De posse dos valores para a composição molar do gás (fig.1) pode-se fazer um análise comparativa com a casca de arroz a partir da composição encontrada em Robert (1984) e mostrada na tabela abaixo.

Tabela 2. Propriedades da casca de arroz:

Análise aproximada(% EM PESO)	
Carbono (C)	38,5
Hidrogênio (H)	5,7
Oxigênio (O)	39,8
Nitrogênio (N)	0,5

As Figura (4) e (5) apresentam, respectivamente, a variação da composição do CO e H<sub>2</sub> do gás com a umidade para casca de arroz e sabugo de milho. A composição do CO para o sabugo se manteve superior a da casca de arroz. Isso se deve ao baixo conteúdo de carbono na estrutura da casca de arroz em relação ao sabugo de milho permitindo assim uma menor conversão do mesmo em CO na zona de redução.

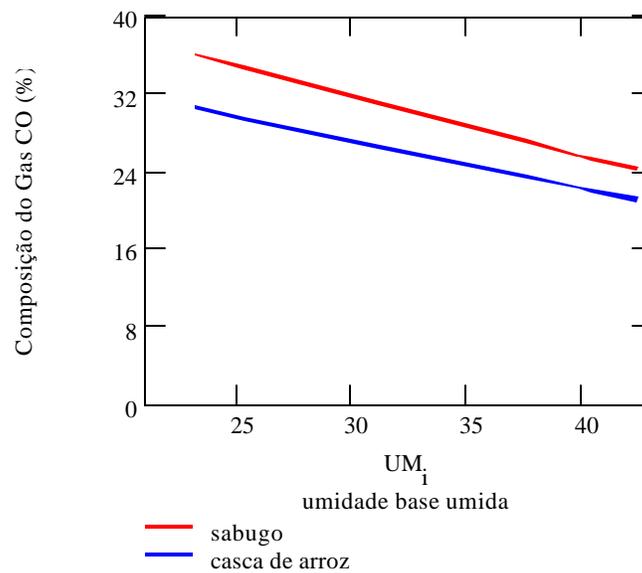


Figura 4. Composição do CO com a umidade para duas biomassas diferentes

Pode ser constatado que o decréscimo na composição foi um pouco mais acentuado para o sabugo de milho do que para casca de arroz. Todavia nos dois casos ocorreu um comportamento linear com o aumento da umidade, corroborando com os valores estabelecido em Zainal et al. (2000).

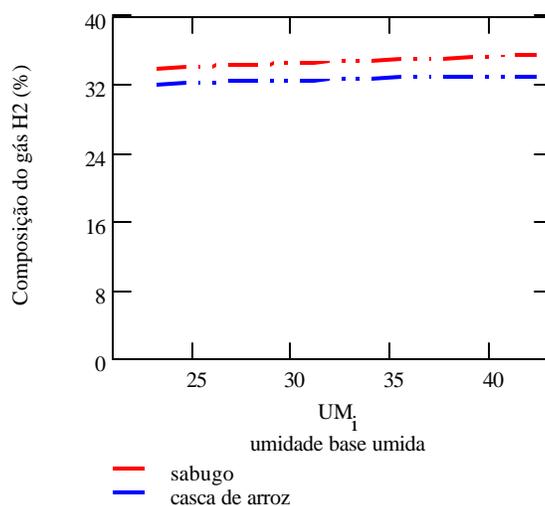


Figura 5. Composição do H<sub>2</sub> com a umidade para duas biomassas diferentes.

Na Figura (5) o comportamento estável nos dois casos foi observado sendo, entretanto, a composição do H<sub>2</sub> para o sabugo de milho pouco superior a da casca de arroz para todos os valores de umidade observados.

## 6. CONCLUSÕES

Com o modelo de equilíbrio proposto para a gaseificação do sabugo de milho em Gaseificador Downdraft pode-se concluir que:

- Partindo da modelagem com um valor de umidade especificado neste artigo de 15%, o máximo valor de CO e H<sub>2</sub> ocorre na faixa de 1100 C, conforme fig.1
- A formação do alcatrão e óleos (Pirólise) ocorre na faixa de aproximadamente a 700 K.
- A razão equivalente para operação em condições termodinâmicas ideais de gaseificação para esse combustível ficou próxima a 0.2. Este valor corrobora com o valor estabelecido em Reed (1981) que é 0.225
- A composição do gás se comporta linearmente com a variação do conteúdo de umidade. Um decréscimo acentuado foi observado para o CO. H<sub>2</sub> se mantém estável com a variação da umidade
- A casca de arroz apresenta um padrão de comportamento análogo ao observado para o sabugo de milho para a variação com a umidade. Seu baixo teor de carbono limita a quantidade de CO formado, ficando este valor inferior ao do sabugo de milho.

## 7. REFERÊNCIAS

- Blasi, Colomba Di, 2000, "Dynamic behaviour of stratified downdraft gasifiers", Chemical Engineering Science, Vol. 55. pp 2931-2944
- Caio, Glaucio Sanchez; Lora, Electo Silva and Gomez, Edgardo Oiveira; 1997, "Sistemas energéticos II- Tecnologias de Conversão Energética de Biomassa". Coord. Cortez, Luiz Augusto; Lora, Electo Silva, p.257.
- Fagbemi, L.; Khezami, L.; Capart, R., 2001, "Pyrolysis Products from Different Biomasses: Application to the Thermal Cracking of Tar", Vol 69. pp 293-306.
- Keating, Eugene L., 1993,"Applied Combustion", MARCEL DEKKER,INC. New York. pp 105-238.
- Lin, Jeng-Liang; Keener, Harold M. Essenhigh, Robert H., 1995, "Pyrolysis and Combustion of Corncobs in Fluidized Bed: Measurement and analysis of Behavior", Combustion and Flame, Vol 100: 271-282.
- Mukunda, H.S., 2000; "Technologies For Biomass Utilization", Lab. Depart of Aerospace Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore.
- Moran, Michael J., Shapiro Howard N., 2000, "Fundamentals of Engineering Thermodynamics", 4<sup>TH</sup> edition, John Wiley & Sons, Inc., pp 629-723.
- Ness, Van H.C.; Smith, J.M., 1975, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics", 3<sup>TH</sup> Edition, Ed. McGraw Hill, 621 p.
- Reed, T. B, 1981, "Principles and Technology of Biomass Gasification. Advanced in solar Energy: New Jersey U.S.A, pp.401
- Robert HP, Don WG; 1984, "Perry's chemical engineers' handbook. Sixth edition. New York. McGraw Hill
- Ruggiero, M.; Manfrida, G., 1999, "An Equilibrium Model for Biomass Gasification Processes", Vol 16. pp 1106-1109.
- Warren, T.J.B; Poulter, R.; Parfitt, R.I., 1995, "Converting Biomass to electricity on a Farm-sized Scale Using Downdraft Gasification and Spark-ignition Engine", Bioresource Technology, Vol. 52, pp-95-98.
- Wylen, Gordon J.Van; Sonntag, Richard E.;Borgnakke Claus 1998, "Fundamentos da Termodinâmica",Tradução da 5ª edição,Ed. EDGARD BLUCHER Ltda., p .535
- Yamamoto, Hiromi; Yamaji, Kenji; Junich Fujino 2000, "Scenario Análisis of Bioenergy Resources and CO2 emissions with a Global Land Use and energy Model", Applied Energy, Vol. 66, pp 325-337
- Z. A. Zainal, R. Ali, C. H. Lean, K.N. Seetharamu, 2000, "Prediction of Performance of a Downdraft Gasifier Using Equilibrium Modeling for Deferent Biomass Materials". Energy Conversion & Management, Vol.42, pp 1499-1515

# STUDY OF A BIO -FUEL GASIFICATION THROUGH THE USE OF AN EQUILIBRIUM MODEL

**Glauco D. T. de Barros**

Escola Federal de Engenharia de Itajubá, CP 50 – CEP 37500-903 – Itajubá – MG – Brasil

[glhr@zipmail.com.br](mailto:glhr@zipmail.com.br)

**Álvaro A. A .de Queiroz**

Escola Federal de Engenharia de Itajubá

**Pio Caetano Lobo**

Escola Federal de Engenharia de Itajubá

[pclobo@iem.efei.br](mailto:pclobo@iem.efei.br)

## ABSTRACT

*The use of the biomass presents many advantages in comparison to fossil fuels, such as distributed generation, sustainability and emissions of pollutant in low levels. The gasification of the biomass allows cleaner combustion because it occurs in the gaseous phase. The equilibrium constants and the molecular coefficients for gasification of a given biomass are derived from the analysis of the combustion products. The biomass used was corncobs. Experimentally the higher calorific value (HCV) was evaluated as 18MJ/kg and the ash content as approximately 1%, within the range quoted in the literature. MATHCAD 2001 was used for solution of the simultaneous equations. It is verified there to be a better thermal acting of this biomass in relation to peel of the rice for a given temperature strip. For a moisture content of 15% the maximum value of CO and H<sub>2</sub> occurs around 1200 C. The moisture content greatly influences the composition of CO and CO<sub>2</sub>. Effects of the change in the equivalence ratio (air supplied to the stoichiometric air) on flame temperature are discussed starting from the identification of the pyrolysis zones, oxidation and combustion in the gasifier.*

*keyword: Biomass, Gasification, Chemical Balance, Energy sustainability.*