



## IX OKTOBERFÓRUM – PPGEQ

19, 20 E 21 DE OUTUBRO DE 2010

### ANÁLISE DA EFICIÊNCIA TERMODINÂMICA DA GASEIFICAÇÃO DE DIFERENTES BIOMASSAS

Rodolfo Rodrigues<sup>1,2</sup>, Nilson R. Marcilio<sup>1</sup>, Jorge O. Trierweiler<sup>2</sup>, Marcelo Godinho<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Laboratório de Processamento de Resíduos (LPR) e

<sup>2</sup> Grupo de Intensificação, Modelagem, Simulação, Controle e Otimização de Processos (GIMSCOP)

Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

R. Eng. Luis Englert, s/n. Campus Central. CEP: 90040-040 – Porto Alegre – RS – BRASIL

<sup>3</sup> Departamento de Engenharia Química, Universidade de Caxias do Sul (UCS)

R. Francisco Getúlio Vargas, 1130. CEP: 95070-560 – Caxias do Sul – RS – BRASIL

E-MAIL: {rodolfo, nilson, jorge}@enq.ufrgs.br, mgodinho@ucs.br

---

**Resumo:** A busca por recursos renováveis tem se tornado importante para um modo de produção/consumo sustentável. Neste contexto a biomassa passa a um recurso renovável importante. Uma tecnologia para o processamento térmico de biomassa é a gaseificação. Recentemente a gaseificação vem se mostrando bastante promissora ao possibilitar a conversão de recursos renováveis em produtos para aplicações em síntese e cogeração. Este trabalho analisa o potencial energético da gaseificação de biomassas disponíveis no Brasil. Para tanto se utiliza de uma abordagem termodinâmica. São avaliadas as principais biomassas e suas características de processamento agrupando-as em 3 grupos: resíduos agrícolas, florestais e industriais. As predições avaliam o desempenho do processo mediante variações das condições de operação: quantidade de ar e vapor d'água. O resultado é uma avaliação inicial das principais biomassas disponíveis e condições ideais de processamento.

**Palavras-chave:** recursos renováveis; gaseificação; cogaseificação; biomassa e carvão mineral; modelagem termodinâmica

---

#### 1. Introdução

Num âmbito cada vez maior a busca por recursos renováveis tem se tornado importante para um modo de produção e consumo sustentável. Neste contexto, a biomassa muitas vezes encarada apenas como resíduo de algum processo produtivo passa a um recurso renovável importante.

Entende-se como biomassa uma vasta extensão de materiais derivados recentes de organismos vivos que se oferecem como combustíveis ou matérias-primas, para fins diversos. Nesse ponto fundamental que biomassa se difere dos combustíveis fósseis. Embora esses últimos sejam também derivados de organismos vivos, são resultantes de milhões de anos de atividades até a conversão em sua forma corrente. A biomassa é uma das fontes para produção de energia com grande potencial de crescimento nos próximos anos devido às crescentes preocupações ambientais.

Há 2 maneiras de se converter a biomassa em combustíveis e energia (Kumar *et al.*, 2009). Uma é a conversão bioquímica e a outra é a conversão termoquímica.

A conversão bioquímica converte a biomassa em combustíveis líquidos ou gasosos através de fermentação ou digestão anaeróbica. Já tecnologias de conversão termoquímica incluem pirólise, gaseificação e combustão. Enquanto a combustão é o processo mais direto e mais

fácil tecnicamente, a eficiência global da geração térmica é baixa. A gaseificação tem muitas vantagens sob a combustão. Essa pode usar biomassa, um combustível de baixo poder calorífico, e convertê-la a não somente energia térmica e posteriormente em energia elétrica (cogeração), mas também em combustível para transporte (processos de síntese).

A conversão termoquímica modifica a estrutura química da biomassa por meio da alta temperatura. O agente de gaseificação permite a corrente de alimentação ser rapidamente convertida a gás por meio de diferentes reações heterogêneas.

Uma aplicação em gaseificação que está se tornando mais comum só recentemente é o coprocessamento, ou seja, cogaseificação. Essa tecnologia analisa o coprocessamento de uma mistura de combustíveis de maneira a compensar características desfavoráveis de alguns combustíveis com uma fração ou frações de outros.

Há uma diferença interessante entre a biomassa e o carvão mineral (combustível fóssil) na composição de sua matéria orgânica: biomassa (por exemplo, a lenhosa) contém normalmente em torno de 50% em massa de carbono e 45% de oxigênio, enquanto que o carvão mineral contém (dependendo do seu *rank*) 30-85% de carbono e 5-20% de oxigênio (Digman *et al.*, 2009). Nesse caso, pode-se pensar que, quando cogaseificados, o teor de oxigênio da biomassa é benéfico porque menos oxigênio precisa ser adicionado. Por outro lado, a biomassa tem um

poder calorífico relativamente baixo, o que é contrabalanceado pelo poder calorífico relativamente alto do carvão mineral.

Este trabalho realiza uma análise do potencial energético da gaseificação de biomassas disponíveis no Brasil. A partir de dados relatados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008) são avaliadas 6 biomassas com os maiores potenciais energéticos. Essas biomassas são constituídas de resíduos oriundos de diferentes setores de produção: agrícola, florestal e industrial. Para tanto, utiliza-se de uma abordagem termodinâmica que expõe uma avaliação global do processo quantificando os limites máximos atingíveis.

## 2. Materiais e Métodos

Primeiramente são avaliadas as principais biomassas dentro do âmbito nacional a partir das estimativas da Agência Nacional de Energia Elétrica em relatório técnico no ano de 2008 (ANEEL, 2008). Por conveniência, as biomassas foram agrupadas em 3 grupos de acordo com suas origens:

- Resíduos agrícolas;
- Resíduos florestais e
- Resíduos industriais.

Resíduos agrícolas incluem casca de arroz e casca de coco-da-baía. Resíduos florestais são resíduos gerados da atividade madeireira. Resíduos industriais são resíduos oriundos do beneficiamento de algum produto, nesse caso, apra de couro do setor calçadista e bagaço e palha de cana-de-açúcar do setor sucroalcooleiro. Reagrupando quanto às regiões geoeconômicas do Brasil teriam-se como opções de biomassa para região Sul a casca de arroz e apra de couro, para região Sudeste o bagaço e a palha de cana-de-açúcar, para região Nordeste a casa de coco-da-baía, e o resíduo madeireiro como uma biomassa comum a todos as regiões. O carvão mineral torna-se uma opção para a região Sul em processos de cogaseificação.

As análises imediatas e elementares para as 6 biomassas e mais o carvão mineral são apresentadas na Tab. 1.

**Tabela 1.** Caracterização das biomassas consideradas nesse estudo.

|                                      | Resíduo agrícola            |                                    | Resíduo florestal             | Resíduo industrial          |                            | Combustível fóssil         |                             |
|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|                                      | Casca de arroz <sup>1</sup> | Casca de coco-da-baía <sup>2</sup> | Madeira em geral <sup>3</sup> | Bagaço de cana <sup>4</sup> | Palha de cana <sup>4</sup> | Apra de couro <sup>5</sup> | Carvão mineral <sup>6</sup> |
| <b>Análise imediata (% p)</b>        |                             |                                    |                               |                             |                            |                            |                             |
| Umidade (b.u.)                       | 12,00                       | 83,74                              | 12,93                         | 50,20                       | 29,40                      | 14,10                      | 11,70                       |
| Matéria volátil (b.s.)               | 67,80                       | 70,61                              | 86,48                         | 79,90                       | 83,30                      | 77,30                      | 18,70                       |
| Carbono fixo (b.s.)                  | 13,60                       | 19,14                              | 12,93                         | 18,00                       | 12,80                      | 16,90                      | 25,10                       |
| Cinzas (b.s.)                        | 18,60                       | 10,25                              | 0,59                          | 2,20                        | 3,90                       | 5,80                       | 56,20                       |
| <b>Análise elementar (% p, b.s.)</b> |                             |                                    |                               |                             |                            |                            |                             |
| C                                    | 38,30                       | 48,23                              | 50,91                         | 44,60                       | 46,20                      | 50,72                      | 31,60                       |
| H                                    | 4,00                        | 5,23                               | 6,13                          | 5,80                        | 6,20                       | 8,76                       | 2,10                        |
| N                                    | 0,50                        | 2,98                               | 0,23                          | 0,60                        | 0,50                       | 12,78                      | 0,70                        |
| O                                    | 38,60                       | 33,19                              | 42,14                         | 44,50                       | 43,00                      | 25,40                      | 8,30                        |
| S                                    | –                           | 0,12                               | –                             | 0,10                        | 0,10                       | 1,88                       | 1,10                        |
| Cl                                   | –                           | –                                  | –                             | 0,02                        | 0,10                       | 0,46                       | <0,007                      |
| <b>PCS (kJ/kg, b.s.)</b>             | 15.491                      | 22.807                             | 20.100                        | 18.100                      | 17.400                     | 18.448                     | 11.900                      |

<sup>1</sup>Hoffmann (1999), <sup>2</sup>Andrade *et al.* (2004), <sup>3</sup>Wander (2001), <sup>4</sup>Seabra (2008), <sup>5</sup>Godinho (2006), <sup>6</sup>Kalkreuth *et al.* (2006)

Este estudo aplica um modelo termodinâmico de equilíbrio para múltiplas fases para avaliar a gaseificação de biomassa. Modelos de equilíbrio são valiosos porque predizem os limites termodinâmicos do sistema de reações de gaseificação. Contudo, é importante dizer que os principais pressupostos por trás dessa abordagem podem não ser sempre válidos para gaseificadores na prática (Prins *et al.*, 2007).

Na literatura podem-se distinguir duas abordagens de equilíbrio distintas (Li *et al.*, 2001). A primeira abordagem aplica constantes de equilíbrios para relacionar reações químicas (Melgar *et al.*, 2007), enquanto a segunda abordagem minimiza a energia livre de Gibbs sujeita a balanços de massa e restrições não-negativas (Baratieri *et al.*, 2008).

Assumiu-se um modelo de equilíbrio utilizando a minimização da energia livre de Gibbs para este estudo. Em geral, a principal hipótese para esta aproximação considera que as taxas de reação de gaseificação são suficientemente rápidas e o tempo de residência suficientemente longo para que o equilíbrio seja atingido. Além disso, o modelo também assume:

- As cargas gaseificadas são combinações de átomos de C, H, O, N, S e Cl;
- Uma formulação de múltiplas fases consistindo de uma mistura de 2 fases: uma fase gasosa e uma fase sólida;
- A fração de carbono sólido produzido (carbono residual) é representada por carbono grafitico;
- Não há uma fração de alcatrão de modo que essa é assimilada pelo carbono sólido;
- A fração de cinza é considerada como quimicamente inerte e não participa dos cálculos;
- O reator de gaseificação é assumido como perfeitamente isolado, isto é, adiabático;
- O processo ocorre em um ambiente perfeitamente misturado e com temperatura uniforme.

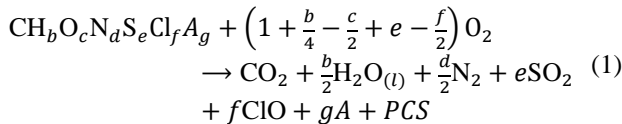
O modelo considera 71 espécies químicas, sendo 70 espécies em fase gasosa e 1 espécie em fase sólida (Tab. 2). Todos os dados termodinâmicos utilizados neste estudo são de Burcat e Ruscic (2005). A base de dados termodinâmicos de Burcat inclui dados termodinâmicos de gases ideais para mais de 1.300 espécies químicas

usualmente relacionadas a problemas de combustão e poluição do ar. Para esta análise 61 espécies químicas do estudo de Baratieri *et al.* (2008) foram consideradas além de 10 espécies químicas envolvendo Cl para melhorar a capacidade preditiva acerca das biomassas.

**Tabela 2.** Lista de espécies químicas consideradas no modelo de equilíbrio.

| Fase | Grupo                           | Espécies químicas  |      |
|------|---------------------------------|--|------|
| Gás  | Compostos de carbono inorgânico | C(g), CO, CO <sub>2</sub>  |      |
|      | Hidrocarbonetos                 | CH, CH <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>12</sub> H <sub>10</sub> |      |
|      | Outros compostos orgânicos      | CH <sub>2</sub> O, CH <sub>2</sub> OH, CH <sub>3</sub> O, CH <sub>3</sub> OH, HCCO, CH <sub>2</sub> CO, HCCOH, CH <sub>2</sub> CHO, CH <sub>3</sub> CHO  |      |
|      | Compostos de oxigênio           | O, O <sub>2</sub>  |      |
|      | Compostos de hidrogênio         | H, H <sub>2</sub> , OH, H <sub>2</sub> O, HO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , HCO  |      |
|      | Compostos de nitrogênio         | N, N <sub>2</sub> , NH, NH <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , NNH, NO, NO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, HNO, CN, HCN, H <sub>2</sub> CN, HCNN, HCNO, HOCN, HNCO, NCO  |      |
|      | Compostos de enxofre            | S, SO <sub>2</sub> , SO <sub>3</sub> , H <sub>2</sub> S, COS, CS <sub>2</sub>  |      |
|      | Compostos de cloro              | Cl, Cl <sub>2</sub> , HCl, ClONO <sub>2</sub> , ClO, ClO <sub>2</sub> , ClO <sub>3</sub> , Cl <sub>2</sub> O, Cl <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> O <sub>7</sub>  |      |
|      | Sólida                          | Carbono  | C(s) |

As cargas a serem gaseificadas são assumidas como um combustível com fórmula química C<sub>a</sub>H<sub>b</sub>O<sub>c</sub>N<sub>d</sub>S<sub>e</sub>Cl<sub>f</sub> a partir da análise imediata e análise aproximada (Tab. 1). Como um componente não-convencional, os combustíveis devem ter suas entalpias padrões de formação estimadas a partir dos seus poderes caloríficos superiores (PCS). Assim, uma reação estequiométrica de combustão (normalizada em C) é considerada:



onde A representa a fração de cinza do combustível e as letras b a g, os números de mols respectivamente de H, O, N, S, Cl e A.

E de Souza-Santos (2004) pode-se definir a entalpia padrão de formação ( $\Delta H_f^\circ$ ) como:

$$\Delta H_{f,F}^\circ = \Delta H_{f,\text{CO}_2}^\circ + \frac{b}{2}\Delta H_{f,\text{H}_2\text{O}_{(l)}}^\circ + e\Delta H_{f,\text{SO}_2}^\circ + f\Delta H_{f,\text{ClO}}^\circ + g\Delta H_{f,A}^\circ + \text{PCS} \cdot M_{wF} \quad (2)$$

onde F representa o combustível e M<sub>w</sub>, o peso molecular do mesmo para PCS dado em J/kg.

As simulações foram feitas através de códigos em python usando bibliotecas do software Cantera (Goodwin, 2009). Cantera é uma biblioteca de funções orientadas a objetos para problemas envolvendo cinética química, termodinâmica e processos de transporte.

O modelo aplicado usa um algoritmo VCS (método multifásico) implementado no pacote Cantera que calcula a distribuição de espécies minimizando a energia de Gibbs total de uma mistura ideal (Smith e Missen, 1982). Esse algoritmo busca entre um conjunto de estados aqueles que

satisfaçam as restrições de elementos para um estado que satisfaça as condições de equilíbrio químico. A temperatura de equilíbrio para condição de operação é estimada pelo balanço de energia em um cálculo iterativo externo como em Caton *et al.* (2010).

### 3. Resultados e Discussões

Análises de sensibilidade da gaseificação das biomassas selecionadas e do cavão mineral são feitas para parâmetros de operação do processo. Os parâmetros de operação do processo considerados são as quantidades de agentes gaseificantes por quantidade de combustível alimentado: ar (25°C e 1 atm) e vapor d'água (200°C e 1 atm).

A corrente de ar é relacionada com a carga alimentada por um parâmetro chamado razão de equivalência ( $\phi$ , Eq. (3)), o qual indica a razão entre a quantidade de oxigênio usada com a quantidade de oxigênio requerida para a combustão completa (oxigênio estequiométrico). De maneira similar, a corrente de vapor d'água é quantificada com a razão vapor-carbono (*stm*, Eq. (4)):

$$\phi = \frac{n_{\text{O}_2}}{\left(1 + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + e - \frac{f}{2}\right)n_F} \quad (3)$$

$$stm = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}_{(vap)}}}{n_C} \quad (4)$$

onde n representa a quantidade de mols.

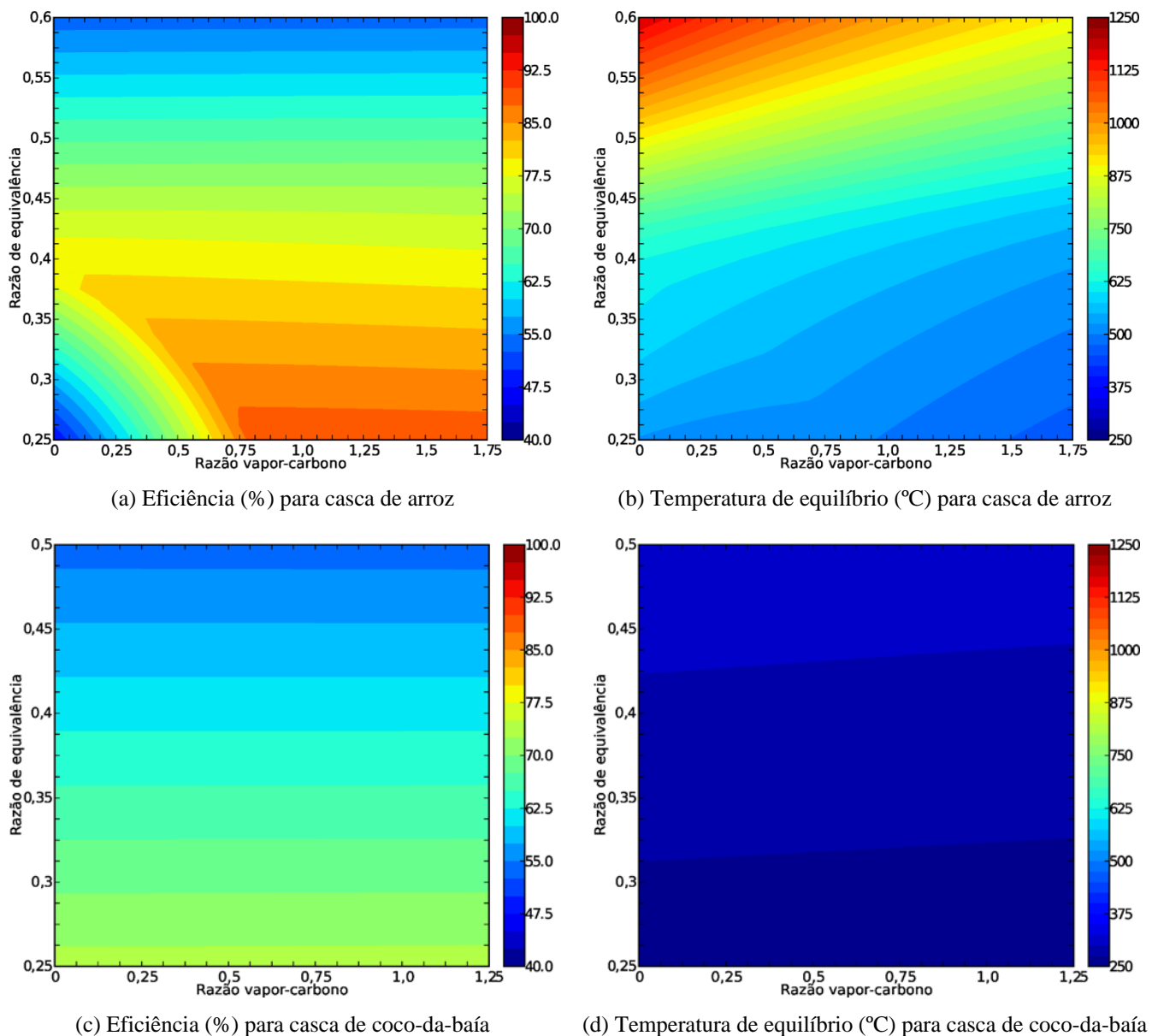
As respostas a mudanças de parâmetros de operação foram observadas na eficiência de gás frio e temperatura de equilíbrio do processo. A eficiência de gás frio ( $\eta_{gf}$ , Eq. (5)) é a razão entre o poder calorífico do gás útil gerado quantificado a temperatura de referência ( $PCS_{gás}$ , Eq. (6)) pelo poder calorífico do combustível. Esses parâmetros de saída são importantes para quantificar o desempenho do processo.

$$\eta_{gf} = \frac{PCS_{gás}}{PCS_B \cdot M_{wB}} \quad (5)$$

$$PCS_{gás} = n_{\text{CO}}(\Delta H_{f,\text{CO}}^\circ - \Delta H_{f,\text{CO}_2}^\circ) + n_{\text{CH}_4}(\Delta H_{f,\text{CH}_4}^\circ - \Delta H_{f,\text{CO}_2}^\circ) - 2\Delta H_{f,\text{H}_2\text{O}_{(l)}}^\circ - n_{\text{H}_2}\Delta H_{f,\text{H}_2\text{O}_{(l)}}^\circ \quad (6)$$

As próximas figuras apresentam os resultados das análises para as 6 biomassas e mais o carvão mineral separadamente. Ao se avaliar a eficiência de gás frio para várias condições de operação está se identificando as faixas de operação para formação de um gás combustível com um poder calorífico máximo para cada combustível. A temperatura de equilíbrio é a temperatura atingível para cada ponto de operação em condições adiabáticas.

A Fig. 1 mostra os parâmetros de avaliação para uma mesma faixa de razão de equivalência e de vapor-carbono e uma mesma escala. A casca de arroz (Fig. 1a-b) já atinge uma eficiência maior de 70% somente com ar como agente gaseificante para  $0,35 < \phi < 0,45$  até um máximo de 78% em  $\phi \cong 0,4$ . O uso conjunto de vapor d'água e ar pode elevar a eficiência para 90% para *stm* > 0,75 e uma menor quantidade de ar ( $\phi < 0,3$ ). Já a casca de coco-da-



**Figura 1.** Análise de sensibilidade da eficiência de gás frio (%) e temperatura de equilíbrio (°C) para **resíduos agrícolas** frente a variações nas condições de operação (quantidade de ar e vapor d'água).

baía (Fig. 1c-d) atinge eficiências baixas e temperaturas baixas devido a sua grande quantidade de água (83,74%) sendo necessário um estudo adicional para avaliação de uma pré-secagem.

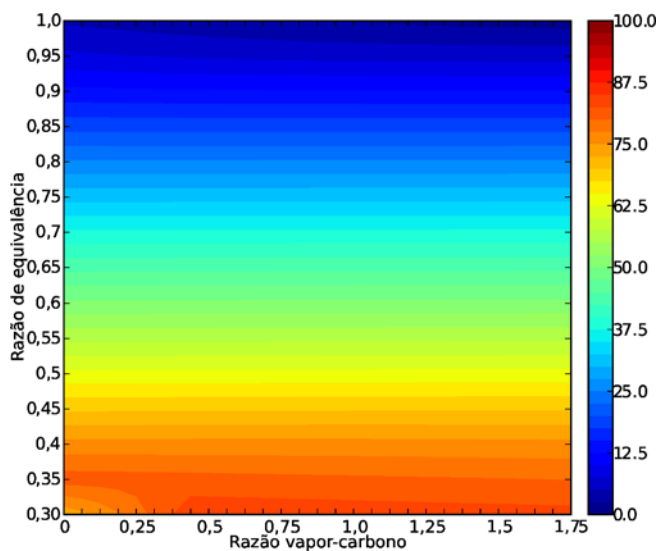
O resíduo madeireiro (Fig. 2) tem a particularidade de o uso adicional de vapor d'água como agente gaseificante não ter grande influência na eficiência. Assim, eficiências de 75% já podem ser atingidas apenas com ar como agente gaseificante, com razões de equivalência próximas de 0,4.

Pela Fig. 3, pode-se observar que o carvão mineral apresenta faixas de operação com temperaturas fisicamente irreais, mas justificáveis do ponto de vista termodinâmico (Fig. 3b). Para uma faixa de  $0,625 < \phi < 0,7$  pode-se atingir uma eficiência de no máximo 60% somente usando ar como agente gaseificante. De modo que, a adição progressiva de vapor d'água pode elevar a eficiência para próximo de 100% com  $stm > 1,0$ .

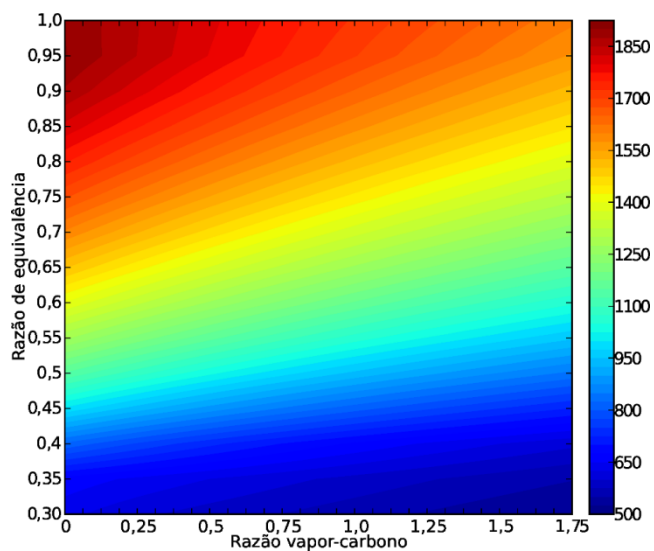
A Fig. 4 mostra os parâmetros de avaliação para os resíduos industriais. Assim como a casca de coco-da-baía, o bagaço de cana-de-açúcar possui um alto teor de umidade (50,2%) o que dificulta se alcançar melhores eficiências

com a adição de vapor d'água (Fig. 4a-b). A palha de cana-de-açúcar (Fig. 4c-d) atinge uma eficiência em torno de 80% para uma estreita faixa de razão de equivalência:  $0,35 < \phi < 0,40$ , e podendo atingir uma eficiência de 85% com uma razão de vapor-carbono de 0,375. A apar de couro (Fig. 4e-f) pode atingir uma eficiência máxima de aproximadamente 70% somente com ar como agente gaseificante em uma estreita faixa de  $0,5 < \phi < 0,55$ . Já o uso de vapor d'água pode aumentar a eficiência a 90% para uma razão de vapor-carbono de 0,94.

Para todos os casos analisados, as respectivas figuras mostrando as temperaturas de equilíbrio para cada combustível têm suas temperaturas máximas atingíveis para  $\phi = 1$  e  $stm = 0$ . Essa temperatura é conhecida como temperatura adiabática de chama. A adição de vapor d'água provoca um aumento da eficiência pela formação de uma maior quantidade  $H_2$ . Essa adição de vapor d'água também diminui a temperatura adiabática de chama se se olhar na faixa de  $\phi = 1$ . A região de  $\phi = 1$  também ilustra a conversão de todo o gás útil (gás combustível) o que corresponde a uma eficiência de gás frio igual a zero.

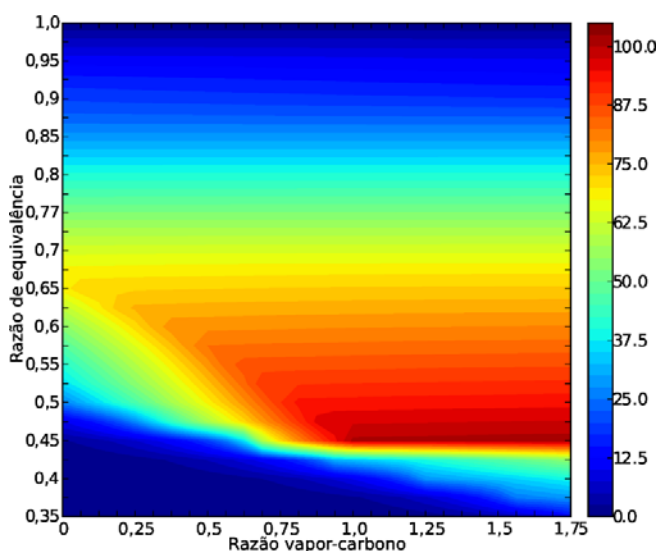


(a) Eficiência (%) para resíduo madeireiro

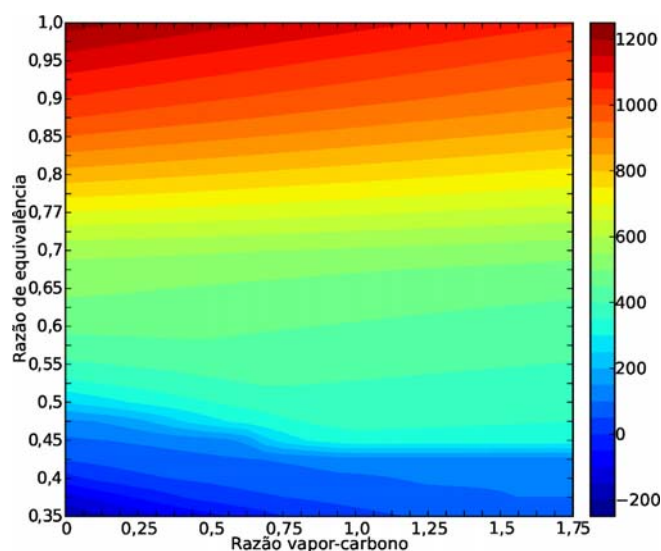


(b) Temperatura de equilíbrio (°C) para resíduo madeireiro

**Figura 2.** Análise de sensibilidade da eficiência de gás frio (%) e temperatura de equilíbrio (°C) para **resíduo florestal** frente a variações nas condições de operação (quantidade de ar e vapor d'água).



(a) Eficiência (%) para carvão mineral



(b) Temperatura de equilíbrio (°C) para carvão mineral

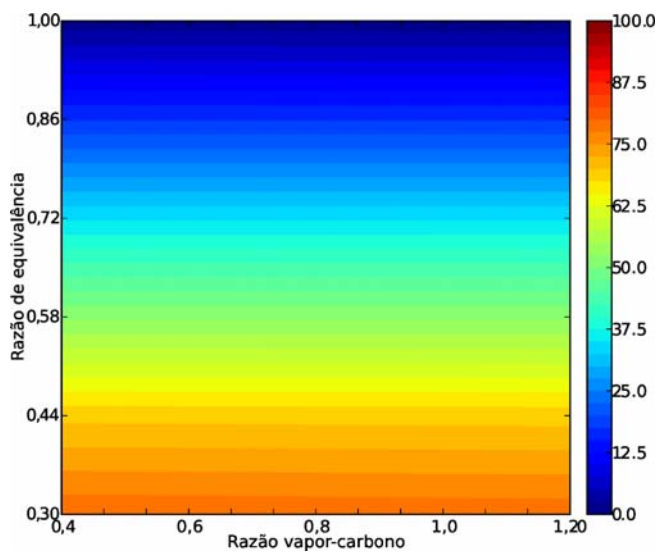
**Figura 3.** Análise de sensibilidade da eficiência de gás frio (%) e temperatura de equilíbrio (°C) para carvão mineral frente a variações nas condições de operação (quantidade de ar e vapor d'água).

A não consideração de uma fração de cinza no modelo pode ter uma grande influência no valor das predições, sobretudo do carvão mineral que possui um altíssimo teor de cinzas (56,2%). Isso permitiria avaliar os efeitos da cogaseificação de combustíveis com maior teor de cinzas (carvão mineral) com outros de menor teor de cinzas (biomassa).

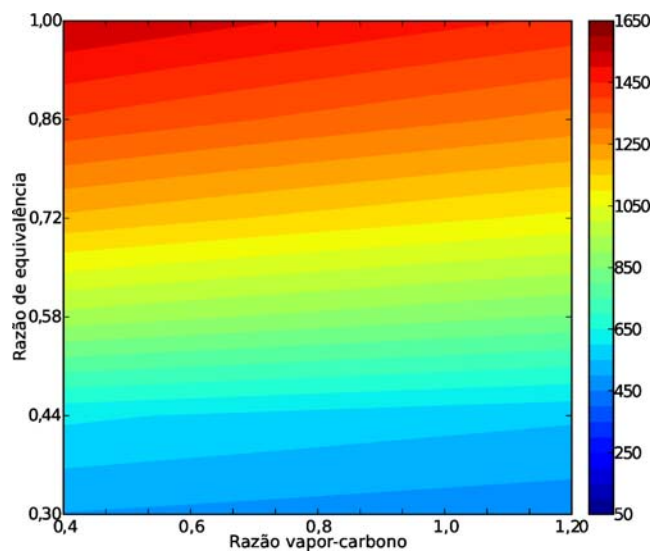
Cabe se ressaltar ainda que se avaliar parâmetros de saída a partir de parâmetros relativos ao combustível (e não parâmetros absolutos), não torna possível se fazer comparações entre combustíveis. Isto é, por exemplo, para um mesmo valor de  $\phi$  para diferentes combustíveis teremos diferentes valores de quantidade de ar por massa de combustível alimentado.

#### 4. Conclusão

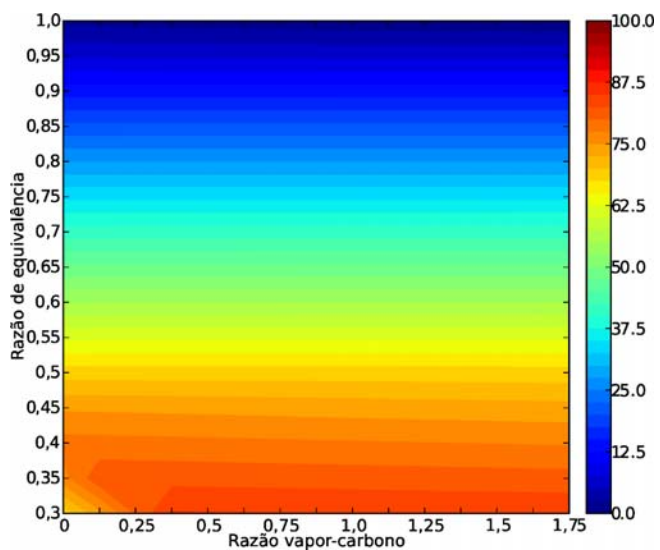
Este trabalho apresentou uma análise geral da gaseificação de diferentes biomassas brasileiras usando um modelo termodinâmico de equilíbrio. As predições avaliaram o desempenho do processo através da estimativa da eficiência frente a variações nas condições de operação, no que diz respeito à quantidade e tipo de agente gaseificante utilizado. As avaliações mostraram as máximas eficiências atingíveis para cada combustível. Esses valores são 78% para casca de arroz, 75% para madeira em geral, 80% para palha de cana, 70% para apra de couro e 60% para carvão mineral, ao se utilizar apenas ar como agente gaseificante. Ao se usar em conjunto ar e vapor d'água, pode-se chegar a 90% para casca de arroz, 85% para palha de cana e 90% para apra



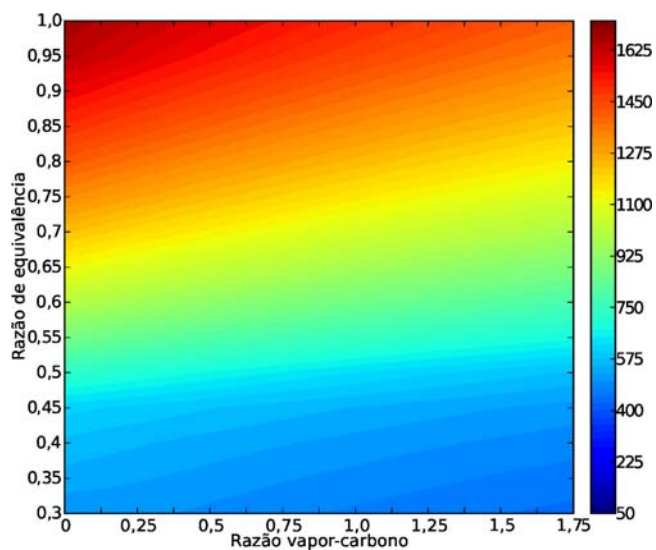
(a) Eficiência (%) para bagaço de cana



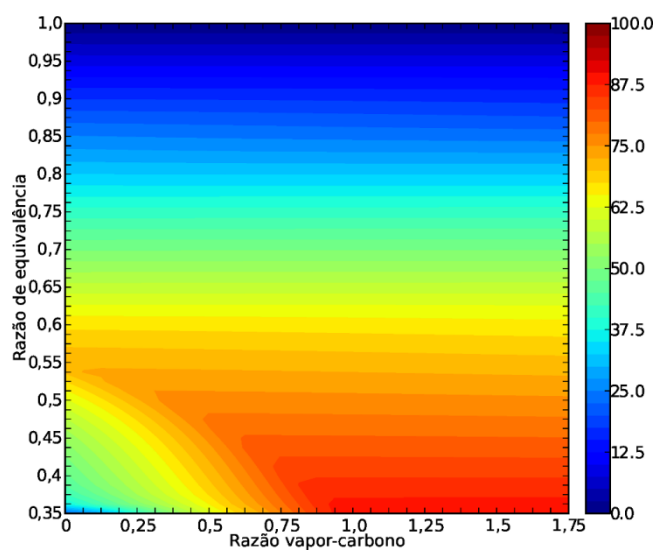
(b) Temperatura de equilíbrio (°C) para bagaço de cana



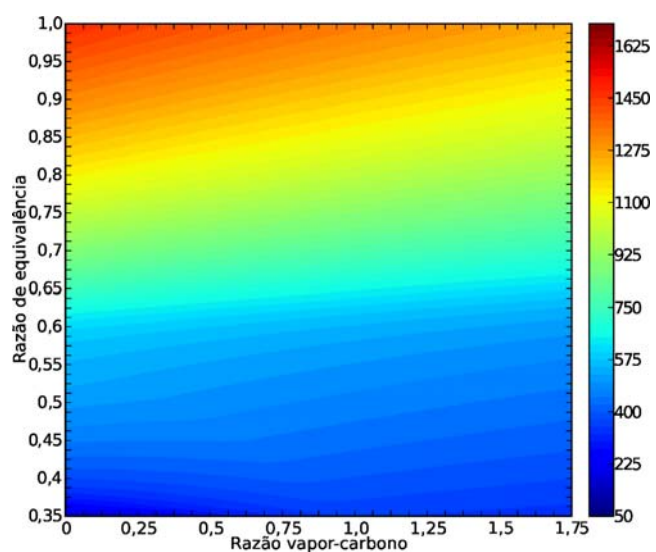
(c) Eficiência (%) para palha de cana



(d) Temperatura de equilíbrio (°C) para palha de cana



(e) Eficiência (%) para apara de couro



(f) Temperatura de equilíbrio (°C) para apara de couro

**Figura 4.** Análise de sensibilidade da eficiência de gás frio (%) e temperatura de equilíbrio (°C) para **resíduos industriais** frente a variações nas condições de processamento (quantidade de ar e vapor d'água).

de couro. A casca de coco-da-baía e o bagaço de cana mostraram a necessidade de uma pré-secagem devido ao alto teor de umidade. Já a adição de vapor d'água para resíduos florestais mostrou-se indiferente nos resultados finais. Ao não se considerar os efeitos térmicos das cinzas a análise do carvão mineral pode ter ficado comprometida ao mostrar valores irrealistas do ponto de vista prático.

## 5. Referências

ANDRADE, A. M.; PASSOS, P. R. A.; MARQUES, L. G. C.; OLIVEIRA, L. B.; VIDAURRE, G. B.; ROCHA, J. D. S. Pirólise de resíduos do coco-da-baía (*Cocos nucifera* Linn) e análise do carvão vegetal. *R. Árvore*, v. 28, 707–714, 2004.

ANEEL. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Relatório técnico, Brasília, 2008.

BARATIERI, M.; BAGGIO, P.; FIORI, L.; GRIGIANTE, M. Biomass as an energy source: Thermodynamic constraints on the performance of the conversion process. *Bioresour. Technol.*, v. 99, 7063–7073, 2008.

BURCAT, A.; RUSCIC, B. *Third millennium ideal gas and condensed phase thermochemical database for combustion with updates from active thermochemical tables*. Argonne National Laboratory, Illinois, Relatório TAE 960 Tabela 4, 2005. Disponível online em: <ftp://ftp.technion.ac.il/pub/supported/aetdd/thermodynamics>

CATON, P. A.; CARR, M. A.; KIM, S. S.; BEAUTYMAN, M. J. Energy recovery from waste food by combustion or gasification with the potential for regenerative dehydration: A case study. *Energ. Convers. Manage.*, v. 51, n. 6, 1157–1169, 2010.

DIGMAN, B.; JOO, H. S.; KIM, D. S. Recent progress in gasification/pyrolysis technologies for biomass conversion to energy. *Environ. Prog. Sustainable Energy*, v. 28, n. 1, 47–51, 2009.

GODINHO, M. *Gaseificação e combustão combinadas de resíduos sólidos da indústria coureiro-calçadista*. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS, Porto Alegre, 2006.

GOODWIN, D. G. *Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes*. Caltech, Pasadena, 2009. Disponível online em: <http://code.google.com/p/cantera>

HOFFMANN, R. *Método avaliativo da geração regionalizada de energia, em potências inferiores a 1 MWe, a partir da gestão dos resíduos de biomassa — O caso da casca de arroz*. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica. UFRGS, Porto Alegre, 1999.

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; KERN, M.; MACHADO, G.; MEXIAS, A.; SILVA, M.; WILLETT, J.; FINKELMAN, R.; BURGER, H. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná basin: 1. Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. *Int. J. Coal. Geol.*, v. 68, n. 1–2, 79–116, 2006.

KUMAR, A.; JONES, D. D.; HANNA, M. A. Thermochemical biomass gasification: A review of the

current status of the technology. *Energies*, v. 2, 556–581, 2009.

LI, X.; GRACE, J. R.; WATKINSON, A. P.; LIM, C. J.; ERGÜDENLER, A. Equilibrium modeling of gasification: A free energy minimization approach and its application to a circulating fluidized bed coal gasifier. *Fuel*, v. 80, n.2, p.195–207, 2001.

MELGAR, A.; PÉREZ, J. F.; LAGET, H.; HORILLO, A. Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process. *Energ. Convers. Manage.*, v. 48, n. 1, p. 59–6, 2007.

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, J. F. J. G. From coal to biomass gasification: Comparison of thermodynamic efficiency. *Energy*, v. 32, n. 7, 1248–1259, 2007.

SEABRA, J. E. A. *Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil*. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica. UNICAMP, Campinas, 2008.

SMITH, W. R.; MISEN, R. W. *Chemical reaction equilibrium analysis: Theory and algorithm*. John Wiley & Sons, 1982.

SOUZA-SANTOS, M. L. *Solid fuels combustion and gasification: Modeling, simulation, and equipment operation*. Nova York: Marcel Dekker, 2004.

WANDER, P. R. *Utilização de resíduos de madeira e lenha como alternativas de energias renováveis para o desenvolvimento sustentável da região Nordeste do estado do Rio Grande do Sul*. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Mecânica. UFRGS, Porto Alegre, 2001.