

## DETERMINAÇÃO DA EFICIENCIA ECOLOGICA DA QUEIMA DE GÁS DE SÍNTESE EM UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA: ASPECTOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS

Ronney Mancebo Boloy

Jose Luz Silveira

Lúcia Bollini Braga

Julio Santa Antunes

Celso Eduardo Tuna

Universidade Estadual Paulista, Brasil.

### Abstract

Nowadays, several technologies have been developed in order to generate energy and reduce pollutants emission. Among several technologies, should be highlight the gasification process. The gaseification is a process that converts a biomass into a poor gas (syngas) for feed an internal combustion engine (ICE) that produce 5 kWe of electrical energy. In this study, a downdraft biomass gasifier coupled an ICE is assessment technically, economically and ecologically. In the energetic point of view, the study allows know the energetic parameters involved in each control volume considered in the system (Gasifier, Heat Exchanger, Internal Combustion Engine). In the economical point of view it considers all the fixed and variable costs involved for the electricity generation in the ICE. The syngas cost, hot water cost and expected annual revenue are determined too. Finally in the ecological point of view neglecting the closed carbon cycle it determine the emission factor from the syngas combustion in ICE, this factor is compared with the emission factors of gasoline combustion, diesel combustion, and biodiesel combustion.

**Keywords:** *emissions; costs; efficiency; biomass; gasification; feasibility.*

### Resumo

Na atualidade estão sendo desenvolvidas diversas tecnologias que utilizam recursos renováveis para gerar energia e diminuir a emissão de poluentes ao meio ambiente. Dentre essas tecnologias, destaca-se o processo de gaseificação da biomassa. Este processo é composto de métodos de conversão da biomassa em um gás combustível pobre (syngas), que pode acionar um motor de combustão interna (MCI). O objetivo principal é avaliar tecnicamente, economicamente e ecologicamente um gaseificador de biomassa tipo downdraft integrado a um MCI. O estudo permite conhecer os parâmetros energéticos envolvidos em cada volume de controle considerado (Gaseificador, Trocador de Calor, MCI). A análise econômica considera todos os custos fixos e variáveis envolvidos para a geração de eletricidade no MCI de 5 kWe acionado por syngas e os investimentos capitais de cada equipamento do sistema (gaseificador, MCI e trocador de calor). Os cálculos permitem determinar os custos de geração de syngas, água quente e eletricidade, e receita anual esperada. A análise ecológica considera os fatores de emissões obtidos pela combustão do syngas no MCI desprezando o ciclo fechado do carbono, estes fatores foram comparados com a combustão da gasolina, do diesel, e do biodiesel.

**Palavras Chaves:** emissões; custos; eficiência; biomassa; gaseificação; viabilidade.

## NOMENCLATURA

$CO_{2e}$	Emissão de $CO_2$ equivalente por kilograma de gás de síntese	[kg/kg]
$E_P$	Potência elétrica	
HE	Trocador de calor	
$m_b$	Fluxo de biomassa	[kg/h]
MCI	Motor de combustão interna	
$m_{H_2O}$	Fluxo de água quente gerada no trocador de calor	kg/s
$m_{Syngas}$	Fluxo de syngas	[Nm <sup>3</sup> /h]
MP	Material particulado contido no gás de síntese	[kg/kg]
MPe	Material particulado equivalente por kilograma de gás de síntese	[kg/kg]
$N_2$	Nitrogênio	
$NO_{xe}$	Emissão equivalente de $NO_x$ por kilograma de gás de síntese	[kg/kg]
PCI	Poder calorífico inferior	[kJ/Nm <sup>3</sup> ]
syngas	Gás de síntese	
T	Temperatura	[°C]
w	Base de trabalho	kW
$\Pi_p$	Indicador de poluição	[kg CO <sub>2</sub> /MJ]
$\varepsilon$	Eficiência ecológica	
$\eta_{CG}$	Eficiência a frio do gaseificador	
$\eta_{System}$	Eficiência do sistema	
$\eta_{EP}$	Eficiência de geração de eletricidade	
$\eta_{HE}$	Eficiência do trocador de calor	
$\eta_{HW}$	Eficiência de geração de água quente	

## 1. INTRODUÇÃO

No mundo os problemas ambientais estão agravando-se, os elevados índices de emissões de poluentes estão incidindo de forma negativa no meio ambiente. Procurando respostas alternativas a estes problemas, o presente trabalho irá apresentar idéias e dados para uma possível aplicação dos sistemas de gaseificação de biomassa em comunidades isoladas. Os sistemas de gaseificação vem sendo utilizados há algum tempo e tem demonstrado ser uma boa alternativa como solução aos problemas energéticos e ambientais. A gaseificação da biomassa se apresenta como uma alternativa sustentável de produção de energia, com baixa emissão de poluentes, permitindo um equilíbrio entre consumo e produção de dióxido de carbono no ciclo global da biomassa. A gaseificação é um processo conversão termoquímica na qual, a biomassa é transformada em gás combustível (*syngas* ou gás pobre), através da oxidação parcial com ar, oxigênio ou vapor de água a altas temperaturas. Para o estudo desenvolvido considerou-se que, o sistema de gaseificação de biomassa operasse acoplado a um MCI de 5 kW, de modo determinação da viabilidade técnica e econômica. Desta forma, de acordo com a quantidade de eletricidade produzida, foi possível garantir a demanda elétrica de uma residência localizada em uma comunidade isolada. Todos os componentes do sistema estudado foram modelados através da Primeira Lei da Termodinâmica e os resultados obtidos foram comparados com a literatura.

Um dos aspectos que influi na análise de viabilidade para aplicação de tecnologias que usam combustíveis alternativos é o impacto ambiental. Muitos pesquisadores têm-se dedicado a analisar a emissão de poluentes proporcionadas por estas tecnologias, visando reverter ou reduzir os efeitos da poluição no planeta. No sistema de gaseificação da biomassa, durante a queima do gás de síntese deve-se ter o controle das emissões dos

seguintes poluentes: material particulado (MP), CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>. Para um tratamento quantitativo e qualitativo desses poluentes faz-se a análise de eficiência ecológica.

A eficiência ecológica avalia o quanto poluidor é um determinado sistema, considerando a combustão de 1 kg de combustível (SILVEIRA et Al. 2007). No caso do sistema de gaseificação é avaliado o quanto poluidor é a combustão do gás de síntese em um motor de combustão interna. Esta eficiência encontra-se na faixa de 0 até 1; uma eficiência ecológica com valor igual a 0 significa 100% de impacto ambiental (por exemplo processo de queima de enxofre); para o caso de uma eficiência igual a 1, significa 0% de impacto ambiental ou processo não poluidor (por exemplo processo de queima de hidrogênio).

A eficiência ecológica, segundo CARDU e BAICA (1999), pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon = \left[ \frac{0,204 \times \eta_{system} \times \ln(135 - \Pi_p)}{\eta_{system} + \Pi_p} \right]^{0.5} \quad (1)$$

O conceito de eficiência ecológica tem sido adaptado e utilizado em diferentes sistemas de geração de energia, entre os quais tem-se:

- Plantas termelétricas a diesel e a gás natural utilizando ciclos combinados de potência (SILVEIRA et Al. 2007);
- Motores de combustão interna queimando gás natural, diesel, biodiesel (CORONADO et Al., 2009);
- Motores de combustão interna para aviação queimando etanol e gasolina de aviação (COSTA et Al., 2009).

### 3. METODOLOGIA

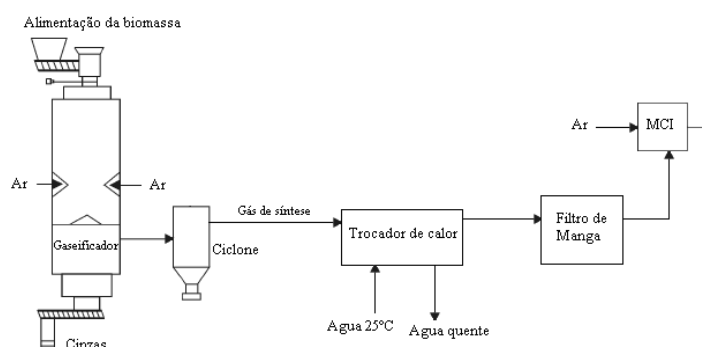
#### 3.1 Descrição Do Sistema

A Figura 1 mostra o esquema do sistema de geração de energia considerado. O eucalipto, cuja composição química é mostrada na Tabela 1, entra pelo topo do gaseificador com 20% de umidade, passando posteriormente por um processo de secagem, que acontece a uma temperatura aproximada de 200 °C. Quando a temperatura supera os 400 °C inicia-se o processo de pirólise. Quando a temperatura alcança 700 °C, começam ocorrer as reações de gaseificação, que se dividem em reações heterogêneas (gás – sólido) e homogêneas (gás – gás), iniciando à formação do gás de síntese. O gás de síntese tem como constituintes principais CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, vapor de água, hidrocarbonatos e alcatrão; sua composição varia com as características da biomassa, o tipo de agente gaseificante e as condições do processo. Um fator determinante na composição química do gás é o conteúdo de umidade. Se a biomassa apresenta um conteúdo de umidade elevado, necessita-se de uma maior quantidade de agente gaseificante no processo, pois a água tem que se aquecer e evaporar-se.

Após sair do gaseificador, o gás de síntese passa por uma etapa de limpeza, que consta de ciclone, trocador de calor (água – gás) e um filtro de manga. O ciclone pode chegar a eliminar grande parte do material particulado contido no gás de síntese, dependendo de sua eficiência. No trocador de calor, o gás de síntese entra com temperatura de cerca de 600 °C, resfria-se até uma temperatura de 30 °C (BARATIERI et al., 2009). No trocador de calor há, também, a produção de água quente em diversas condições de temperaturas (40°C, 45°C, 50°C, 55°C e 60°C). Destaca-se ainda que, no trocador de calor, há um purgador que tem como objetivo, eliminar o condensado do gás de síntese (o alcatrão). Finalmente, o gás de síntese passa por um filtro de manga, onde é eliminado o resto do material particulado, para garantir as condições mínimas necessárias (vide Tabela 2) que permitam seu posterior

uso no conjunto motor/gerador.

**Figura 1: Sistema de geração integrando um gaseificador de biomassa a um conjunto motor/gerador de 5 kWe.**



**Tabela 1: Composição do Eucalipto.**

Percentagem em peso base seca						
Biomassa	C	H	N	S	O	Cinzas
Eucalipto	49	5,87	0,3	0,01	43,97	0,72
Percentagem em peso base úmida						
	39,2	4,696	0,240	0,008	35,176	0,576

**Tabela 2: Qualidade do syngas para seu uso em sistemas de geração de energia. [2]**

Parâmetros	MCI
Particulado(mg/Nm <sup>3</sup> )	50 (Máximo)
Tamanho de particular (µm)	10 (Máximo)
Alcatrão (mg/Nm <sup>3</sup> )	100 (Máximo)
Metais alcalinos (mg/Nm <sup>3</sup> )	

### 3.2 Simplificações e suposições

Para o conjunto motor/gerador selecionado (Tabela 3), foi determinado o consumo de gás de síntese para gerar 5 kWe de potência nominal. De acordo com RAJVANSHI (1986) a eficiência térmica de um MCI (ignição por centelha) operando com gasolina varia de 15% a 20%. No caso, a eficiência foi estimada em 17%, quando operando a plena carga e considerando um PCI da gasolina de 47103,78 kJ/m<sup>3</sup>. O MCI operando com gás de síntese, geralmente alcança valores de eficiência menores quando comparado com gasolina, isso deve-se ao fato de que, o gás de síntese apresenta um PCI menor que o PCI da gasolina. Assume-se um valor de eficiência do MCI operando com gás de síntese entre 10% e 15%, e uma eficiência do gerador elétrico de 95%. A relação, entre o gás de síntese produzido pelo gaseificador e o consumo de biomassa foi estimado, de acordo com RAJVANSHI (1986), ou seja, 1 kg de biomassa produz 2,50 m<sup>3</sup> de gás de síntese.

**Tabela 3: Características do conjunto motor/gerador.**

Marca	Modelo	Capacidade de combustível (l)	Ep (kW)	Temperatura do gás de saída (°C)	Combustível	Consumo de combustível (g/kWh)
Honda EP 5500	GX 340	17	5	450	Gasolina	474

Para o cálculo da vazão de ar que entra no gaseificador, é necessário estimar a relação equivalente ar/biomassa no processo de gaseificação. Sabe-se que esta relação encontra-se na faixa de 0,19 a 0,43 (ZAINAL et al., 2002), para o presente estudo adotou-se uma relação equivalente de 0,25, típico para um processo de gaseificação (REED; DASS, 1989). Para o cálculo da vazão de ar que entra ao MCI e a vazão dos gases de exaustão no MCI, é preciso estimar a relação ar/combustível que varia entre 10 e 13, para o estudo considera-se 12.

No volume de controle do gaseificador de biomassa devem-se ser determinados os seguintes parâmetros: entalpia do gás de síntese, entalpia da biomassa, entalpia das cinzas, perda de calor para o meio ambiente, a eficiência a frio do gaseificador, calor específico do gás de síntese e a energia térmica fornecida pelo gás de síntese.

No volume de controle do trocador de calor, devem-se ser determinados os parâmetros: fluxo de água quente gerada e energia térmica da água, considerando várias eficiências do trocador de calor (80%, 75%, 70% e 65%) e várias temperaturas da água quente (40°C, 45°C, 50°C, 55°C e 60°C).

Para a análise econômica devem ser considerados: o custo do pessoal de operação do gaseificador, o custo de manutenção, o custo de geração de eletricidade, o custo de geração de água quente, o custo de produção de gás de síntese, o ganho de produção de eletricidade e energia térmica, e a receita anual esperada visando conhecer a viabilidade econômica do sistema. No caso do gaseificador de biomassa são considerados os seguintes custos:

Custo de manutenção do gaseificador, considerando que a manutenção irá realizar-se a cada 1250 h/ano (3,47 h/d) e um custo do eucalipto de 0,0038 US\$/kWh, baseado em um preço de 20 US\$/ton (BOLOY et al., 2008).

Custo de produção do gás de síntese, considerando o investimento do gaseificador, horas de operação, a potência suprida pela biomassa e o fator de anuidade.

No caso do trocador de calor, o custo de geração de água quente é determinado considerando o investimento do trocador de calor, a energia térmica gerada, as horas de operação, fator de anuidade e o fator de ponderação de água quente para custo de combustível.

Finalmente, no conjunto motor/gerador, pode ser determinado o custo de geração de eletricidade considerando o investimento inicial, a potência elétrica gerada, as horas de operação, o fator de anuidade e o fator de ponderação de eletricidade para custo de combustível.

A receita anual esperada é determinada a partir dos ganhos de produção de energia térmica (água quente) e de eletricidade, neste ultimo caso estima-se que não existe um excedente de geração de energia elétrica. Na análise também é considerada uma tarifa de venda de eletricidade de 0,10 US\$/kWh (TARIFA DE VENDA DE ELETRICIDADE, 2008) para comunidades isoladas do Brasil, baseada em uma taxa de conversão do dólar para real de 1US\$/R\$1,74; por último, a tarifa de geração de água quente considerada é 0,0022 US\$/kWh de acordo com KONG et al. (2004).

Na Tabela 4, apresentam-se os valores assumidos para a análise energética e econômica realizada no sistema.

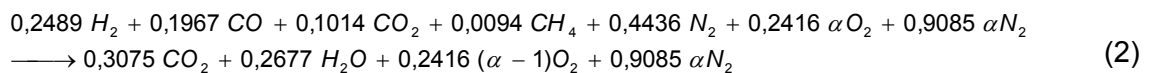
**Tabela 4: Valores assumidos para o sistema.**

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Condições normais de pressão (Pa) e temperatura (°C)	P=101325, T=25	Horas de operação (h/ano)	2000, 3000, 4000, 5000, 6000
Temperatura de água quente (°C)	40, 45, 50, 55, 60	Investimento capital do trocador de calor (US\$)	700
Eficiência do trocador de calor (%)	80, 75, 70, 65	Investimento capital do gaseificador de biomassa (US\$) (PROJETO CTNERG, 2006)	10.000,00
Calor específico da água (kJ/kgK)	4,19	Custo de manutenção do conjunto motor/gerador (US\$/kWh) (WU; WANG, 2006)	0,011
Investimento capital do conjunto motor/gerador (US\$) de acordo com (PROJETO CTNERG, 2006)	1437,02	Custo de manutenção do trocador de calor (US\$/kWh)	0,003
Taxa anual de juros (%)	12	PCI da Biomassa (kJ/kg)	19457

### 3.3 Análise ecológica do sistema.

#### 3.3.1 Cálculo das Emissões Produzidas pela Combustão do Gás de Síntese em um Motor de Combustão Interna.

O gás de síntese, analisado apresenta a seguinte composição molar em base seca:  $H_2=0,2489$ ,  $CO=0,1967$ ,  $CO_2=0,1014$ ,  $CH_4=0,0094$ ,  $N_2=0,4436$ . A massa molecular é de 23,04 kg/kmol com uma massa específica de 1,03 kg/Nm<sup>3</sup>. A eq. 2 para um excesso de ar normalizado ( $\alpha$ ), permite efetuar análise estequiométrica:



A combustão de combustível gasoso em um motor de combustão interna precisa de um excesso de ar igual a 40% (CORONADO et al., 2009). Considerando este valor de excesso e as condições de entrada do gás de síntese e do ar (vide Tabela 6) pode-se determinar a composição química do gás de exaustão no MCI através do uso do programa computacional GASEQ ver 0.54 (Chemical equilibria for perfect gases) (MORLEY, 2005).

**Tabela 6: Reagentes no processo de combustão em um MCI nas CNTP.**

Composição do gás de síntese em base seca	
H <sub>2</sub> (mol)	0,2489
CO (mol)	0,1967
CO <sub>2</sub> (mol)	0,1014
CH <sub>4</sub> (mol)	0,0094
N <sub>2</sub> (mol)	0,4436
MP (g/Nm <sup>3</sup> )	10; 20; 30; 40
PCI (MJ/kg)	5,50
Ar	
O <sub>2</sub> (mol)	0,2416
N <sub>2</sub> (mol)	0,9085
Temp. gás de síntese entrada no MCI (K)	308
Temp. da chama de combustão (K)	1960
Temp. do ar entrada no MCI (K)	298

### 3.3.2 Determinação dos fatores de emissão de CO<sub>2e</sub>, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e MP.

O fator de emissão de CO<sub>2</sub> equivalente depende das emissões de SO<sub>2</sub>=80SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>=50NO<sub>x</sub> e MP=67MP, e pode ser em kilogramas de CO<sub>2e</sub> por kilogramas de gás de síntese queimado no em MCI. A equação 3 permite a determinação CO<sub>2e</sub>:

$$CO_{2e} = CO_2 + SO_2 + NO_x + MP \quad (3)$$

### 3.3.3 Determinação do Indicador de Poluição.

O indicador de poluição ( $\Pi_p$ ), expresso em kilogramas de CO<sub>2</sub> emitidas pelo MCI por unidade de potência suprida pelo gás de síntese, pode ser determinado pela seguinte expressão:

$$\Pi_p = \frac{CO_{2e}}{PCI_{syngass}} \quad (4)$$

## 4. Resultados e discussão

Do balanço de energia nos volumes de controles considerados gaseificador, conjunto motor/gerador e trocador de calor, obtêm-se os seguintes resultados:

Na Tabela 7, apresentam-se os valores referidos a potência suprida pela biomassa, eficiência a frio do gaseificador, potência suprida pelo gás de síntese, energia e entalpia do gás de síntese, capacidade calorífica do gás de síntese, a vazão de ar no MCI, a vazão do gás de exaustão no MCI, entalpia de formação de biomassa, entalpia da biomassa, entalpia das cinzas geradas pelo gaseificador e as perdas de calor ao meio ambiente. A eficiência do sistema varia de 15,03% a 13,88%, considerando as diferentes eficiências do trocador de calor (80% - 65%) (vide Tabela 8), sendo a eficiência do sistema gaseificador/MCI de 8%, valor que se encontra próximo do calculado na literatura 7% (STASSEN; KNOEF, 1995).

**Tabela 7: Resultados obtidos da análise energética no sistema.**

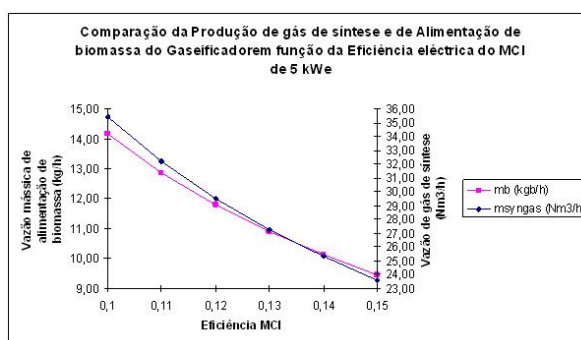
Parâmetros	Valor	Parâmetros	Valor
Potência suprida pela biomassa	59,45 kW	Entalpia de formação da biomassa	5593,09kJ/kg
Eficiência a frio do gaseificador	69%	Entalpia da biomassa	2461,84 kJ/kg
Potência suprida pelo gás de síntese	38,99 kW	Entalpia das cinzas	538,28 kJ/kg
Energia térmica do gás de síntese	5,39 kW	Entalpia do gás de síntese	1543,63 kJ/kg
Perdas de calor ao meio ambiente gerada pelo gaseificador	23,13 kW	Calor específico do gás de síntese	1,33 kJ/kgK
Vazão de ar no MCI	314,75 Nm <sup>3</sup> /h	Vazão do gás de exaustão do MCI	340,98 Nm <sup>3</sup> /h
Calor específico do gás de exaustão do MCI	1,41 kJ/kgK	Entalpia do gás de exaustão do MCI	4533,71 kJ/kgK

Tabela 8: Balanço de energia em função da eficiência do trocador de calor

Parâmetros	Eficiência do trocador de calor (%)			
	80	75	70	65
Eficiência do sistema (%)	15,03	14,65	14,26	13,88
Eficiência de geração de água quente (%)	6,18	5,80	5,41	5,02
Eficiência térmica do motor (%)	13,50			
Eficiência de geração de eletricidade (%)	12,82			
Energia térmica da água (kW)	3,68	3,45	3,22	2,99

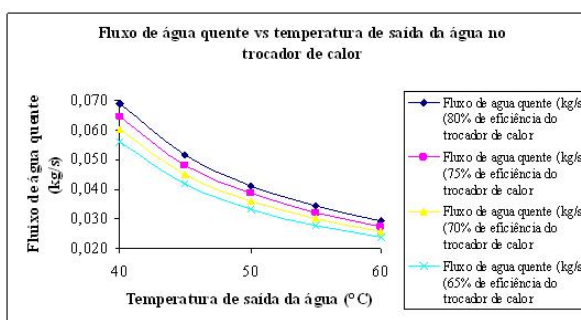
A Figura 2 mostra a vazão mássica de alimentação de biomassa necessária para alimentar um gaseificador que possui uma capacidade de geração de 2,50 m<sup>3</sup> de gás de síntese; estes valores são obtidos a partir da variação da eficiência do MCI. Na figura pode-se observar que para o intervalo de eficiência do MCI de 13% a 14% obtêm-se os valores ótimos de alimentação de biomassa e de produção de gás de síntese, por tanto para uma eficiência térmica do MCI de 13,50%, o valor de alimentação de biomassa no gaseificador é de aproximadamente 10,5 kg/h, obtendo-se um consumo específico de 2,10 kg/kWh para produzir aproximadamente 26 m<sup>3</sup>/h de gás de síntese. A eficiência a frio do gaseificador é de 69%, valor que se encontra dentro da faixa de 60% a 70% (RAJVANSI, 1986).

Figura 2: Valores obtidos para a produção de gás de síntese e de biomassa necessária em função da eficiência do MCI.



A Figura 3 mostra o fluxo de água quente produzida no trocador de calor em função da temperatura de saída. Pode-se observar que para altos valores de temperatura de saída da água quente diminui-se com menores valores de eficiência do trocador de calor.

Figura 3: Fluxo de água quente em função da temperatura de saída da água no trocador de calor.





Do ponto de vista econômico, na Tabela 9, pode-se observar que o custo total de manutenção e operação do gaseificador variou de 0,012 US\$/kWh a 0,005 US\$/kWh durante as horas de operação do gaseificador, este valor encontra-se dentro de faixa do valor calculado na literatura 0,00125 US\$/kWh – 0,005 US\$/kWh (REED; DASS, 1989). A Tabela 10 apresenta a variação dos custos produzidos no gaseificador em função das horas de operação. No caso do custo de eletricidade, considerando o preço do eucalipto 0,0038 US\$/kWh, uma taxa de juros de 12%. Pode-se observar que o custo de geração de eletricidade para 2000 h/ano e um período de amortização de 4 anos é inferior ao valor da tarifa de eletricidade estimada. No caso do custo de produção de água quente, pode-se observar que o custo calculado decresce gradualmente com o incremento do período de amortização. De acordo com a tarifa de 0,0022 US\$/kWh (KONG et Al., 2004) para o custo de geração de água quente não há valores inferiores, conclui-se que o sistema não produz água quente a preços competitivos no mercado. No caso do custo de produção de gás de síntese, observa-se que decresce com o incremento do período de amortização. A partir de 4000 h/ano e um período de amortização igual a 4 anos o custo do gás de síntese apresenta pouca variação.

**Tabela 9: Custos de manutenção e operação do gaseificador.**

Custos	2000 h/ano	3000 h/ano	4000 h/ano	5000 h/ano	6000 h/ano
Manutenção	0,01377- 0,00909	0,01074- 0,00606	0,00923- 0,00455	0,00832- 0,00364	0,00771- 0,00303
Operação	0,000619	0,000275	0,000155	0,000099	0,000069
Total	0,012	0,009	0,007	0,006	0,005

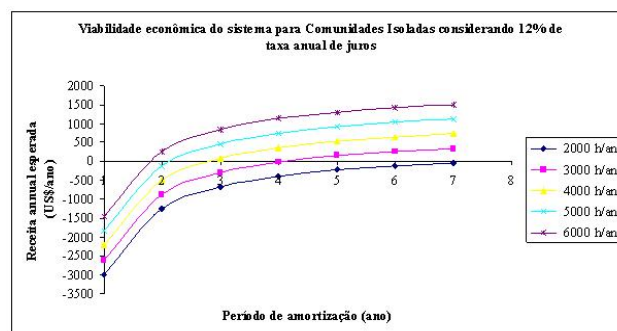
**Tabela 10: Custo de produção de eletricidade, água quente e gás de síntese em função das horas de operação.**

Custo de eletricidade (US\$/kWh)					
Payback	2000 h/ano	3000 h/ano	4000 h/ano	5000 h/ano	6000 h/ano
1	0,100068	0,183178	0,141613	0,116684	0,100068
2	0,061745	0,106533	0,084129	0,070697	0,061745
3	0,049026	0,081093	0,065050	0,055433	0,049026
4	0,042706	0,068455	0,055571	0,047850	0,042706
5	0,038947	0,060936	0,049932	0,043339	0,038947
6	0,036467	0,055977	0,046212	0,040363	0,036467
7	0,034719	0,052479	0,043589	0,038264	0,034719
Custo de água quente (US\$/kWh)					
Payback	2000 h/ano	3000 h/ano	4000 h/ano	5000 h/ano	6000 h/ano
1	0,06559	0,12280	0,09418	0,07702	0,065588
2	0,03925	0,07012	0,05468	0,04542	0,039250
3	0,03051	0,05264	0,04156	0,03493	0,030508
4	0,02616	0,04395	0,03505	0,02972	0,026165
5	0,02358	0,03878	0,03117	0,02662	0,023581
6	0,02188	0,03537	0,02862	0,02457	0,021877
7	0,02068	0,03297	0,02682	0,02313	0,020675
Custo de gás de síntese (US\$/kWh)					
Payback	2000 h/ano	3000 h/ano	4000 h/ano	5000 h/ano	6000 h/ano
1	0,06144	0,11252	0,08697	0,07165	0,061438
2	0,03886	0,06735	0,05309	0,04455	0,038853
3	0,03136	0,05236	0,04185	0,03555	0,031357

4	0,02764	0,04491	0,03626	0,03108	0,027633
5	0,02542	0,04048	0,03294	0,02842	0,025417
6	0,02396	0,03756	0,03075	0,02667	0,023956
7	0,02293	0,03550	0,02920	0,02543	0,022925

A Figura 4 mostra a variação da receita anual esperada em função do período de amortização, a qual aumenta gradualmente com o aumento do período de amortização. A viabilidade econômica calculada do sistema inicia-se a partir de um período de amortização de 1,5 anos, considerando 6000 h/ano de horas de operação.

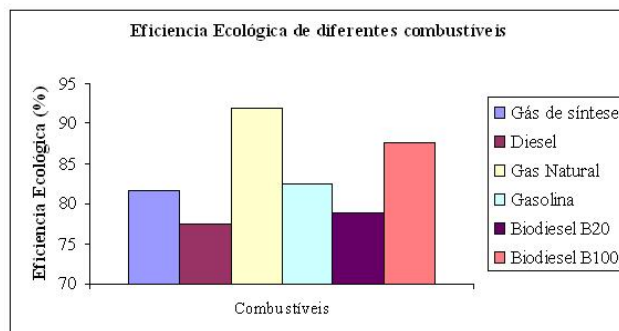
**Figura 4: Viabilidade econômica do sistema para comunidade isolada.**



No ponto de vista ecológico, a combustão de 1 kg de gás de síntese com ar em um MCI produz 29,43 gramas de gases de exaustão, sua composição em fração molar segue:  $\text{CO}(\text{g})= 0,00418$ ;  $\text{CO}_2(\text{g})= 0,20251$ ;  $\text{H}(\text{g})= 3,55\text{E-}05$ ;  $\text{H}_2(\text{g})= 0,17872$ ;  $\text{H}_2\text{O}(\text{g})= 0,17872$ ;  $\text{N}_2(\text{g})= 0,61034$ ;  $\text{NO}_x(\text{g})= 0,00063$ ;  $\text{O}(\text{g})= 2,17\text{E-}05$ ;  $\text{O}_2(\text{g})= 2,01\text{E-}03$ ;  $\text{OH}(\text{g})= 7,15\text{E-}04$ .

Finalmente, pode-se efetuar uma comparação entre a eficiência ecológica obtida pela queima do gás de síntese no MCI e as eficiências ecológicas obtidas pela queima de outros combustíveis (diesel, gás natural, gasolina, biodiesel B20, biodiesel B100) no MCI (CORONADO et al., 2009). Os resultados são mostrados na Figura 5. Observa-se que a queima do gás de síntese apresenta uma melhor viabilidade ecológica que a queima de combustíveis como o diesel e o biodiesel B20; isto se deve ao fato de que a queima do diesel, e do biodiesel B20 em um MCI apresentam maiores emissões de dióxido de carbono e material particulado em comparação com a queima do gás de síntese no MCI. No caso da eficiência ecológica do motor operando com gasolina, seu valor é ligeiramente maior comparado com a eficiência ecológica do motor operando com gás de síntese, visto que, não foi considerado o ciclo de carbono fechado, o qual permite que a emissão de  $\text{CO}_2$  obtida da combustão do gás de síntese, pode ser absorvida pela floresta devido a processo de fotossíntese.

Figura 5. Comparação da eficiência ecológica para MCI operando com gás de síntese e outros combustíveis.



## 5. Conclusões

Do ponto de vista energético, a eficiência do sistema varia de 13,88% a 15,03%, sendo a eficiência do sistema Gaseificador/MCI igual a 8,41%, conforme encontrado na literatura (aproximadamente 7%) (STASSEN; KNOEF, 1995). A eficiência de geração de eletricidade calculada é de 12,82% e o rendimento térmico do MCI é de 13,50%. A energia térmica da geração de água quente varia na faixa de 2,99 kW a 3,68 kW. A eficiência a frio do gaseificador é de 69%. Estes resultados transformam o sistema de gaseificação de biomassa integrado a um motor/gerador em uma tecnologia viável tecnicamente para ser aplicada em comunidades isoladas. Além disso, esta tecnologia apresenta emissões baixas de poluentes em comparação com outras tecnologias de combustão como as que utilizam óleo diesel mineral. Isto deve-se ao fato que a eficiência ecológica do sistema alcança um valor médio de aproximadamente 81%. A eficiência ecológica do sistema gaseificador/MCI é maior que a eficiência ecológica obtida da queima do diesel, o que permite que esta tecnologia seja viável ecologicamente para ser aplicada em comunidades isoladas. Do ponto de vista econômico o estudo mostra que o sistema é totalmente viável para um período de amortização igual a 4 anos, valor este de acordo ao obtido por CORONADO (2006) operando 3000 h/ano, considerando uma taxa anual de 12% de juros (vide Figura 4) e um custo total de capital investido de US\$ 16.991,83. Com estes resultados pode-se concluir que a aplicação desta tecnologia em comunidades isoladas é viável economicamente.

## 6. Referencias

- BARATIERI M., BAGGIO P., BOSIO B., GRIGIANTE M., LONGO G.A. The use of biomass syngas in IC engines and CCGT plants: A comparative analysis. *Applied Thermal Engineering* 2009; 29:3309–3318
- BOLOY R. A. M., SILVEIRA J.L., TUNA C.E. “Technical and Economical Analysis of Biomass Integrated Gasifier/ Combined Cycle Power”. In *proc. 2008 ENCIT 2008 – 12th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2008 Cong.* p. 121-131.
- Cardu M., Baica M. Regarding a global methodology to estimate the energy ecological efficiency of thermopower plants. *Energy Convers Manage* 40; (1999): 71–87.
- CORONADO C. J., “Análise Técnica-Econômica de um Gaseificador de Biomassa de 100 kg/h para acionamento de um motor de combustão interna”. Guaratinguetá, 2006. 195p. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista de Guaratinguetá-FEG-UNESP.
- CORONADO C.R., Carvalho JR, Yoshioka J.T, Silveira J.L. Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The use of biodiesel. *Applied Thermal Engineering* 29 (2009) 1887–1892.
- COSTA A. A. S., MARTINS C. A., EWALD P. S., VASCONCELLOS E C. A. S., SILVEIRA, J. L. Determination of Ecological Efficiency in Internal Combustion Aeronautical Engines Using Ethanol and Aviation Gasoline as Fuels. In *proc. 2009 CLAGTEE 2009 – VIII Latin American Congress, 2009 Cong.*
- KONG X.Q., WANG R.Z., HUANG X.H. “Energy efficiency and economic feasibility of CCHP driven by stirling engine”. *Energy Conversion and Management*, vol 45, pp. 1433–1442, 2004.
- LAMAS W. Q, SILVEIRA J.L., GIACALIA G.E.O., REIS L.O.M. Development of a methodology for cost determination of wastewater treatment based on functional diagram. *Applied Thermal Engineering* 2009; 29: 2061 – 2071
- LORA E. E. S, NOGUEIRA L. A. H. “Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações”, 2th Edition. Rio de Janeiro, 2003
- MORLEY C., *Gaseq, Chemical equilibria in perfect gases*, v.0.79, 2005, <http://www.gaseq.co.uk>.
- PROJETO CTNERG, processo 555072/2006-1
- RAJVANSHI A.K. *Alternative Energy in Agriculture*, Vol. II, Ed. D. Yogi Goswami, CRC Press, 1986, pgs. 83-102.
- ZAINAL Z.A., RIFAU A, QUADIR G.A., SEETHARAMU K.N. Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier. *Biomass and Bioenergy* 2002; 23: 283 – 289

## Agradecimentos

Os autores agradecem a CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico pelo suporte financeiro.

## Dados de contato (Para mais informações contate com):

José Luz Silveira  
Phone: +5512312232836  
Fax: +551231232835  
E-mail : [joselzu@feg.unesp.br](mailto:joselzu@feg.unesp.br)  
URL : [www.feg.unesp.br/gose](http://www.feg.unesp.br/gose)  
Celso Eduardo Tuna  
Phone: +5512312232836  
Fax: +551231232835  
E-mail : [joselzu@feg.unesp.br](mailto:joselzu@feg.unesp.br)  
URL : [www.feg.unesp.br/gose](http://www.feg.unesp.br/gose)