

ESTUDO NUMÉRICO DA EFICIÊNCIA ECOLÓGICA NA COMBUSTÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS COM APLICAÇÃO DE EQUILÍBRIO QUÍMICO

Renato Wagner da Silva Barros, rwsbarros@yahoo.com.br¹
Ronaldo José Amorim Campos, ronaldo_campos@hotmail.com²
Jorge Recarte Henríquez Guerrero, rjorge@ufpe.br²
José Carlos Charamba Dutra, charamba@ufpe.br²

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira, Rodovia BR 232 km 214 – Prado, CEP: 55.200-000, Pesqueira – PE, Brasil.

²Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco. Av. Acadêmico Helio Ramos s/n, Cidade Universitária, CEP: 50740-530, Recife-PE, Brasil.

Resumo: *O uso de biocombustíveis em motores produz alguns benefícios ambientais, tais como a diminuição das emissões de poluentes gasosos à atmosfera, principalmente as emissões de materiais particulados e dióxido de carbono (CO₂), importante gás que contribui para o agravamento do efeito estufa. Entretanto, dependendo do tipo de biocombustível, pode ocorrer um aumento na emissão de óxidos de nitrogênio (NO_x), acentuando como consequência a acidificação de ecossistemas. O estudo das emissões da combustão de biocombustíveis, somado ao conceito de eficiência ecológica, forneceu o entendimento dos diferentes aspectos de eficiência termodinâmica nos ecossistemas sobre as vantagens e desvantagens da utilização de diferentes espécies de biocombustíveis. Este trabalho apresenta um estudo teórico envolvendo reações de combustão, incluindo condições de equilíbrio químico, para determinar a formação de compostos como NO_x, CO₂, entre outros, aplicando a definição de eficiência ecológica. O conceito de eficiência ecológica depende do impacto ambiental causado pelas emissões de CO₂, SO₂, NO_x e materiais particulados. Conhecendo a composição elementar destes biocombustíveis, tendo como parâmetro a razão de equivalência, foi possível determinar a composição final dos produtos da combustão através de um sistema de equações não-lineares resultantes da reação de combustão e das reações de dissociação durante o processo de combustão. Foi realizado o estudo com o biodiesel de algodão, pinhão-manso, soja, sebo de boi, residual (fritura), canola, girassol, dendê, milho, oliva, babaçu, amendoim, palma, linhaça, etanol anidro, metanol anidro e Biogás.*

Palavras-chave: *Biocombustíveis, Eficiência Ecológica, Combustão, Equilíbrio Químico*

1. INTRODUÇÃO

Diversos países têm buscado reduzir sua dependência energética aos combustíveis derivados do petróleo, diminuir suas emissões de carbono e melhorar a qualidade do ar de suas cidades. Políticas voltadas para a promoção dos biocombustíveis têm sido propostas e implementadas em diversos países. Uma análise dessas políticas mostra que elevar a segurança energética e mitigar mudanças climáticas estão entre os mais importantes fatores de motivação para programas bioenergéticos na maioria dos países.

No Brasil, encontra-se um significativo potencial diversificado de matérias-primas utilizadas na produção de energia, proveniente da biomassa, fonte de energia renovável. Uma simples abordagem revela a importância econômica-social dessas matérias-primas, transformadas em biocombustível utilizado na obtenção de energias térmica e elétrica, servindo como alternativas ao uso dos combustíveis de origem fóssil.

Nesse contexto, a produção de biodiesel no Brasil pode apresentar um caráter de desenvolvimento econômico, social e de potencialização do agronegócio em regiões como o semi-árido nordestino, e também uma solução para diminuição do isolamento energético. A possibilidade do emprego de combustíveis de origem agrícola em motores do ciclo diesel é bastante atrativa tendo em vista o aspecto ambiental, por ser uma fonte renovável de energia e pelo fato do seu desenvolvimento permitir a redução da dependência de importação do petróleo. Os impactos ambientais das emissões constituem uma característica básica importante, pois a fauna e a flora precisam ser preservadas. O teor de enxofre e de hidrocarbonetos aromáticos, além da combustibilidade, são características importantes inerentes aos impactos das emissões.

A seleção da matéria prima é a decisão mais importante a ser tomada já que o custo da mesma representa entre 60 e 80% do custo total de produção do biodiesel (Teixeira e Teixeira, 2007). As matérias-primas para a produção de biodiesel são: óleos vegetais, gordura animal, óleos e gorduras residuais. Óleos vegetais e gorduras são basicamente compostos de triglicerídeos, ésteres de glicerol e ácidos graxos. Algumas fontes para extração de óleo vegetal, com

potencial para ser utilizado na produção de biodiesel, são: algodão, pinhão-mansão, soja, sebo de boi, residual (fritura), canola, girassol, dendê, milho, oliva, babaçu, amendoim, palma, linhaça, etc.

Os óleos e gorduras residuais, resultantes de processamento doméstico, comercial e industrial também podem ser utilizados como matéria-prima. Os óleos de frituras representam grande potencial de oferta. Algumas possíveis fontes dos óleos e gorduras residuais são: lanchonetes e cozinhas industriais, indústrias onde ocorre a fritura de produtos alimentícios e os esgotos municipais, onde a nata sobrenadante é rica em matéria graxa, águas residuais de processos de indústrias alimentícias. Hoje, no Brasil, parte do óleo vegetal residual oriundo do consumo humano é destinado à fabricação de sabão e, em menor volume, à produção de biodiesel. Entretanto, a maior parte deste resíduo é descartada na rede de esgotos, sendo considerado um crime ambiental inadmissível. Nesse contexto, a utilização de resíduos gordurosos para a obtenção de biodiesel representa uma alternativa ambiental adequada, uma vez que é dada a destinação final dos mesmos.

O Brasil possui grande disponibilidade de biogás oriundo da digestão anaeróbia de resíduos no meio rural, do lixo urbano nos aterros sanitários e sistemas de tratamento de esgotos nos centros urbanos. O biogás pode ser usado como combustível em substituição do Gás Natural (GN) ou do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), ambos extraídos de reservas minerais. O biogás gerado nos aterros sanitários é composto basicamente pelos seguintes gases: metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2), hidrogênio (H_2), oxigênio (O_2) e gás sulfídrico, onde o metano representa aproximadamente 50% de sua composição. Do ponto de vista ambiental sabe-se que cada tonelada de metano lançada na atmosfera tem um impacto, no aquecimento global do planeta, equivalente a 21 toneladas de dióxido de carbono e, por um período de cem anos. Sabe-se ainda que o metano circula na atmosfera vinte vezes mais rápido que o dióxido de carbono, o que significa que é necessário reduzir a emissão de metano para a atmosfera (Faria e Rodrigues, 2001).

O Brasil é um dos países mais avançados em tecnologia e produtividade em todas as etapas da cadeia de produção de etanol de cana-de-açúcar. A experiência brasileira demonstra que o bioetanol da cana tornou-se a resposta mais adequada para a crescente necessidade de ampliar, de modo sustentável, o uso de fontes renováveis de energia e de proporcionar mais segurança ao suprimento energético, reduzindo impactos ambientais.

Um combustível quando é oxidado numa reação de combustão gera uma série de compostos químicos cuja composição final obedece a condições termodinâmicas do processo. O conhecimento da composição dos produtos da combustão possibilita avaliar aspectos de eficiência da combustão, disponibilidade energética na câmara de combustão e eficiência ecológica (Coronado et al, 2009).

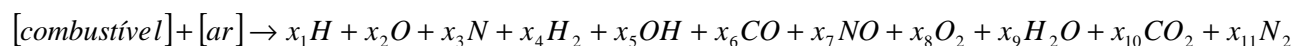
Em termos ambientais, uma das mais expressivas vantagens trazidas pela utilização de biocombustível refere-se à redução da emissão de gases poluentes. Sabe-se que a queima de biocombustíveis em motores de combustão interna, pode ser realizada produzindo menor impacto ambiental se comparado aos combustíveis derivados do petróleo, eliminando as emissões de enxofre, reduzindo consideravelmente as emissões de fumaça e também causando um menor impacto de emissões de dióxido de carbono.

Os aspectos relativos à eficiência ecológica, (ϵ), calculados para os biocombustíveis analisados, considerando sua utilização em uma turbina a gás ou motores de combustão interna, ciclo Otto ou ciclo Diesel, foram abordados em função do rendimento hipotético (η) desses equipamentos. Foram realizadas comparações entre os valores de eficiência ecológica dos biodieseis, da mesma forma que entre os valores observados para o etanol e o metanol, biogás e o biodiesel de óleo residual.

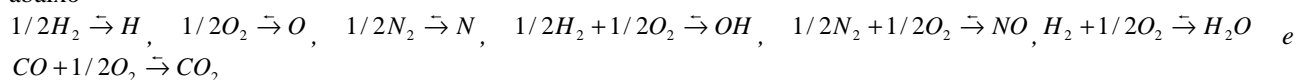
2. METODOLOGIA DE ANÁLISE

O processo de combustão pode ser analisado teoricamente através do modelamento da reação de oxidação dos componentes do combustível sob condições de equilíbrio químico. As equações de equilíbrio são relacionadas às dissociações dos compostos químicos encontrados nos produtos da combustão.

Considerando que os produtos da combustão são formados por 11 tipos diferentes de compostos químicos (H , O , N , H_2 , OH , CO , NO , O_2 , H_2O , CO_2 , N_2) e que a reação de combustão ocorre numa câmara adiabática, a equação da reação pode ser escrita conforme a equação a seguir:



Os coeficientes x_i da equação de reação deverão ser determinados do balanço das espécies químicas envolvidas na reação e de equações de constante de equilíbrio químico obtidas de reações de dissociação representadas pelas equações abaixo



De acordo com a definição da constante de equilíbrio químico, que fica escrita em termos das frações molares da equação da reação e é dependente da temperatura e da pressão, será formado um sistema de equações não lineares que uma vez resolvido deve fornecer a composição da misturas de gases dos produtos da combustão para uma dada condição de equilíbrio, determinado justamente pelas condições termodinâmicas de pressão e temperatura da reação. No presente estudo foi considerado que a reação é realizada a pressão atmosférica em condições adiabática da câmara de combustão, portanto o valor da temperatura, a qual afeta as constantes de equilíbrio, é também uma incógnita do

problema e pede mais uma equação. Assim, a equação adicional que completa o problema é obtida aplicando a primeira lei da termodinâmica à reação de combustão.

$$\sum_{Prod} x_i (h_f^o + \Delta h)_{Prod,i} = \sum_{Reag} y_i (h_f^o + \Delta h)_{Reag,i} \quad (1)$$

A resolução desse sistema foi obtida através de um código computacional aberto desenvolvido por Olikara e Borman (1975) e disponibilizado por Turns (2000). Com o modelo foram determinadas as concentrações dos produtos da combustão sob condições de equilíbrio químico.

Geralmente as entalpias de formação dos produtos e dos reagentes são encontradas tabeladas na literatura especializada. Caso a entalpia de formação de alguns dos combustíveis não esteja disponível e conhecendo o Poder Calorífico, o que é mais usual e mais fácil de obter experimentalmente podemos, obter a entalpia de formação aplicando novamente a primeira lei à reação de combustão considerando que os produtos no final do processo de reação se encontram na mesma condição termodinâmica (mesma pressão e temperatura) que os reagentes. Este é o procedimento teórico de obtenção de poder calorífico e será utilizado aqui para obter a entalpia de formação de aqueles combustíveis para os quais este parâmetro não se encontra disponível na literatura.

As composições elementares dos biocombustíveis foram calculadas a partir de composições encontradas na literatura. A tabela 1 mostra a composição em ésteres metílicos dos biodieseis encontrados na literatura (Agência Nacional de Vigilância Sanitária, ANVISA - Resolução nº 482, de 23 de setembro de 1999, e republicada no dia 20/06/2000; Peres et al, 2009).

Tabela 1 – Composição em ésteres dos biodieseis, e suas respectivas entalpias de formação.

	Algodão	Soja	Sebo de boi	Residual	Canola	Girassol	P. manso	Dendê	Milho	Oliva	Babaçu	Amendoim	Palma	Linhaça
c4:0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
c6:0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0
c8:0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	0,0	0,0	0,0
c10:0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	8,0	0,0	0,0	0,0
c12:0	0,0	0,0	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	45,0	0,0	0,4	0,0
c14:0	1,5	1,9	27,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,5	0,0	17,5	0,0	1,0	0,0
c16:0	21,6	8,0	2,6	14,8	5,1	14,8	16,4	16,7	9,0	16,7	10,5	14,5	40,0	7,0
c16:1	2,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	0,0	1,5	0,0	0,8	0,0	0,6	0,0
c18:0	1,5	3,3	26,3	3,0	2,0	3,0	5,4	3,7	3,5	3,7	3,0	7,0	5,5	5,5
c18:1	27,4	25,0	30,6	26,9	64,5	26,9	40,3	31,2	30,0	31,2	7,5	46,5	40,0	17,0
c18:2	46,0	54,0	5,5	50,8	20,2	50,8	37,0	43,1	54,5	43,1	0,8	32,0	12,0	16,5
c18:3	0,0	7,8	3,4	4,5	8,2	4,5	0,0	5,3	0,0	5,3	0,0	0,0	0,5	54,0

Conhecendo a composição em éster do biodiesel, foi possível calcular a entalpia de formação de cada biodiesel através do cálculo da entalpia de formação de cada éster metílico multiplicada pelo seu respectivo valor percentual na composição do biodiesel.

Para avaliação do impacto ambiental causado pela queima de um combustível foi utilizado uma metodologia apresentada por Costa et al. (2009) que converte o efeito de poluentes como NO_x, SO₂ e CO₂ e particulados num fator hipotético de concentrações de poluentes denominado Dióxido de Carbono Equivalente, (CO₂)_e, calculado através da equação 2,

$$(CO_2)_e = (CO_2) + 80 \cdot (SO_2) + 50 \cdot (NO_x) + 67 \cdot (MP) \quad (2)$$

Onde, 80·(SO₂) é o dióxido de enxofre equivalente em CO₂, (SO₂)_e, 50·(NO_x) é o óxido de nitrogênio equivalente em CO₂, (NO_x)_e, e 67·(MP) é o equivalente de material particulado em CO₂. O melhor combustível do ponto de vista ecológico será aquele que apresentar uma quantidade mínima de Dióxido de Carbono Equivalente obtido da queima do mesmo.

Normalizando o fator Dióxido de Carbono Equivalente pelo conteúdo de energia do combustível (PCI) podemos obter um indicador de poluição (Π_g) mais efetivo para comparar o efeito dos poluentes de diferentes tipos de combustíveis.

$$\Pi_g = (CO_2)_e / PCI_{COMBUSTÍVEL} \quad (3)$$

Onde, (CO₂)_e é expressado em kg/kg_C (kg por kg de combustível), e PCI é expressado em MJ/kg. Assim, Π_g é expressado em kg/MJ.

Por outro lado, a eficiência ecológica é um indicador adimensional que permite avaliar o impacto ambiental das emissões gasosas, mediante uma comparação entre emissões poluentes, em emissões equivalentes de CO₂, com os padrões existentes de qualidade do ar. A eficiência ecológica é determinada através da equação dada por Costa et al (2009).

$$\varepsilon = \left[\frac{0,204\eta}{\eta + \Pi_g} \ln(135 - \Pi_g) \right]^{0,5} \quad (4)$$

O valor de ε é função da eficiência (η) do equipamento ou processo responsável pela emissão e do indicador de poluição (Π_g). Do ponto de vista ecológico, um valor mínimo admissível para a eficiência ecológica seria igual a 0,5 que seria chamado “Valor Crítico de Eficiência Ecológica” sendo que quando $\varepsilon = 0$, considera-se situação insatisfatória, mas $\varepsilon = 1$ indica uma situação ideal (Costa et al, 2009).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela 2 mostra os valores calculados das composições elementares, dos poderes caloríficos e das entalpias de formação do etanol anidro, metanol anidro e biogás.

Tabela 2 – Comp. Elementar, PCI, PCS, entalpia de formação e peso molecular do etanol, metanol e biogás.

Biocombustível	C,%	H,%	O,%	S,%	N,%	PCI, MJ/kg	PCS, MJ/kg	h_f , kJ/kmol	PM, kg/kmol
Etanol anidro	52,00	13,00	35,00	-	-	27,00	29,86	-265211	46,00
Metanol anidro	37,50	12,50	50,00	-	-	19,23	21,59	-261878	32,00
Biogás	38,46	7,54	43,44	-	10,56	14,77	16,44	-175157	26,52

A tabela 3 mostra os valores das entalpias de formação de cada éster metílico da composição do biodiesel, e a tabela 4 mostra os valores calculados das entalpias de formação para cada biodiesel estudado.

Tabela 3 – Composição elementar, peso molecular, poder calorífico e entalpia de formação dos ésteres metílicos.

	PM, kg/kmol	%C	%H	%O	PCS, MJ/kg	PCI, MJ/kg	h_f , kJ/kmol
C4:0	102	58,82	9,80	31,37	28,28	26,13	-511540
C6:0	130	64,62	10,77	24,62	32,81	30,45	-489277
C8:0	158	68,35	11,39	20,25	35,74	33,23	-467011
C10:0	186	70,97	11,83	17,20	37,78	35,18	-444747
C12:0	214	72,90	12,15	14,95	39,29	36,62	-422484
C14:0	242	74,38	12,40	13,22	40,45	37,73	-400221
C16:0	270	75,56	12,59	11,85	41,37	38,60	-377955
C16:1	268	76,12	11,94	11,94	40,62	38,00	-375811
C18:0	298	76,51	12,75	10,74	42,12	39,32	-355691
C18:1	296	77,03	12,16	10,81	41,44	38,77	-353546
C18:2	294	77,55	11,56	10,88	40,76	38,22	-351401
C18:3	292	78,08	10,96	10,96	40,07	37,66	-349253

Tabela 4 – Peso molecular, poder calorífico e entalpia de formação dos biodieseis.

Biodiesel (B100)	%C	%H	%O	h_f , kJ/kmol	PCI, MJ/kg	PCS, MJ/kg	PM, kg/kmol
Algodão	76,920	11,980	11,110	-359537,43	38,460	41,090	864,450
Soja	77,210	11,810	10,980	-355307,17	39,670	39,840	874,096
Sebo de boi	76,140	12,320	11,540	-372711,31	39,710	39,910	832,100
Residual	77,130	11,880	11,000	-356235,28	38,430	38,670	873,036
Canola	77,140	11,980	10,880	-354144,50	39,460	39,710	881,990
Girassol	77,190	11,880	10,930	-356235,28	37,220	37,430	878,243
Pinhão manso	76,960	12,030	11,000	-357399,11	38,080	40,620	872,556
Dendê	77,060	11,930	11,010	-356865,56	39,180	39,380	871,969
Milho	76,980	11,930	11,090	-356034,73	39,570	39,770	865,928
Oliva	77,060	11,930	11,010	-356865,56	39,450	39,660	871,969
Babaçu	74,200	12,210	13,590	-415756,23	37,377	40,059	710,070
Amendoim	77,380	11,630	10,990	-356832,70	38,221	40,775	764,590
Palma	76,480	12,290	11,230	-364701,50	38,665	41,363	854,869
Linhaça	77,920	11,070	11,010	-352840,54	37,730	40,161	924,080

A partir das tabelas 2 e 4 observamos que o biogás possui menor poder calorífico inferior e superior, enquanto que o biodiesel de sebo de boi possui o maior valor. Observamos também que nenhum dos biocombustíveis possui enxofre em sua composição. E o biogás, entre os biocombustíveis estudados, é o único que possui nitrogênio em sua composição.

A tabela 5 apresenta a composição dos produtos da combustão dos biocombustíveis em estudo. Através da tabela 5 podemos fazer uma comparação entre a quantidade dos gases de emissão da combustão dos biocombustíveis expressado em kg/kg_C (kg por kg de combustível).

Tabela 5 – Comparação dos resultados entre os combustíveis da emissão de poluentes expressado em kg/kg_C.

Biocombustível	H	H ₂	NO	CO ₂	O	OH	O ₂	N ₂	N	CO	H ₂ O
B100 algodão	0,0003	0,0032	0,0476	2,4367	0,0041	0,0326	0,1243	9,5186	0,0000	0,2442	1,0293
B100 soja	0,0003	0,0031	0,0475	2,4468	0,0041	0,0323	0,1242	9,5037	0,0000	0,2445	1,0146
B100 sebo de boi	0,0003	0,0033	0,0477	2,4098	0,0042	0,0332	0,1242	9,5255	0,0000	0,2431	1,0585
B100 residual	0,0003	0,0032	0,0476	2,4439	0,0041	0,0324	0,1243	9,5143	0,0000	0,2445	1,0207
B100 canola	0,0003	0,0032	0,0477	2,4440	0,0041	0,0326	0,1245	9,5454	0,0000	0,2447	1,0293
B100 girassol	0,0003	0,0032	0,0476	2,4460	0,0041	0,0324	0,1243	9,5219	0,0000	0,2445	1,0207
B100 pinhão manso	0,0003	0,0032	0,0483	2,4826	0,0042	0,0328	0,1260	9,6593	0,0000	0,2480	1,0336
B100 dendê	0,0003	0,0032	0,0476	2,4415	0,0041	0,0325	0,1243	9,5211	0,0000	0,2444	1,0250
B100 milho	0,0003	0,0032	0,0476	2,4387	0,0041	0,0325	0,1243	9,5113	0,0000	0,2443	1,0249
B100 oliva	0,0003	0,0032	0,0476	2,4415	0,0041	0,0325	0,1243	9,5211	0,0000	0,2444	1,0250
B100 babaçu	0,0003	0,0033	0,0468	2,3461	0,0041	0,0329	0,1221	9,2592	0,0000	0,2383	1,0489
B100 amendoim	0,0003	0,0031	0,0471	2,4557	0,0040	0,0317	0,1232	9,4710	0,0000	0,2428	0,9995
B100 palma	0,0003	0,0033	0,0478	2,4212	0,0042	0,0331	0,1245	9,5576	0,0000	0,2438	1,0559
B100 linhaça	0,0003	0,0029	0,0471	2,4718	0,0041	0,0311	0,1236	9,3703	0,0000	0,2452	0,9508
Etanol anidro	0,0001	0,0022	0,0207	1,7503	0,0011	0,0161	0,0562	6,8255	0,0000	0,0993	1,1410
Metanol anidro	0,0000	0,0013	0,0097	1,3059	0,0003	0,0080	0,0276	4,9329	0,0000	0,0440	1,1084
Biogás	0,0000	0,0007	0,0076	1,3483	0,0002	0,0052	0,0223	4,0344	0,0000	0,0395	0,6694

Pela tabela 5, podemos observar que, entre os biocombustíveis estudados, o biogás é biocombustível que libera menos massa de poluente por massa de combustível. O biodiesel de babaçu é o biodiesel que libera menos massa de poluentes por massa de combustível.

A tabela 6 mostra os valores calculados através das equações 2 e 3, referentes aos conceitos de dióxido de carbono equivalente e indicador de poluição.

Tabela 6 – Comparação dos resultados entre os combustíveis da emissão de poluentes expressado em kg/kg_C.

Biocombustível	(NO _x), kg/kg _C	(CO ₂), kg/kg _C	(CO ₂) _e , kg/kg _C	Π _g , kg/MJ
B100 algodão	0,0476	2,4367	4,81820	0,12528
B100 soja	0,0475	2,4468	4,82403	0,12160
B100 sebo de boi	0,0477	2,4098	4,79596	0,12077
B100 residual	0,0476	2,4439	4,82370	0,12552
B100 canola	0,0477	2,4440	4,82968	0,12239
B100 girassol	0,0476	2,4460	4,82642	0,12967
B100 pinhão manso	0,0483	2,4826	4,89569	0,12856
B100 dendê	0,0476	2,4415	4,82276	0,12309
B100 milho	0,0476	2,4387	4,81923	0,12179
B100 oliva	0,0476	2,4415	4,82276	0,12225
B100 babaçu	0,0468	2,3461	4,68628	0,12538
B100 amendoim	0,0471	2,4557	4,80916	0,12582
B100 palma	0,0478	2,4212	4,81206	0,12446
B100 linhaça	0,0471	2,4718	4,82532	0,12789
Etanol anidro	0,0207	1,7503	2,78667	0,10320
Metanol anidro	0,0097	1,3059	1,79055	0,09312
Biogás	0,0076	1,3483	1,72621	0,11688

A partir da tabela 6 observa-se que o biodiesel de girassol possui o maior valor de indicador de poluição, seguidos do biodiesel de pinhão-manso, enquanto que, entre os biodieseis, o biodiesel de sebo de boi possui o menor valor. O metanol e o etanol anidro possuem os menores valores de indicador de poluição entre os biocombustíveis estudados.

Observamos, também, que o metanol anidro e o biogás possuem os menores valores de dióxido de carbono equivalente, enquanto que o biodiesel de pinhão-manso possui o maior valor de dióxido de carbono equivalente.

Os valores mais elevados de indicador poluição entre os biocombustíveis são reflexos dos baixos poderes caloríficos. Ou seja, os biocombustíveis com menor poder calorífico precisam de maiores quantidades em massa para gerar a mesma energia que os biocombustíveis com maiores poderes caloríficos.

Os valores das eficiências ecológicas calculados para os biocombustíveis analisados, considerando a utilização desse combustível em uma turbina a gás ou motores de combustão interna, ciclo Otto ou ciclo Diesel, foi plotado o gráfico da eficiência ecológica (ϵ) em função do rendimento hipotético (η) desses equipamentos, como pode ser visto na figura 1.

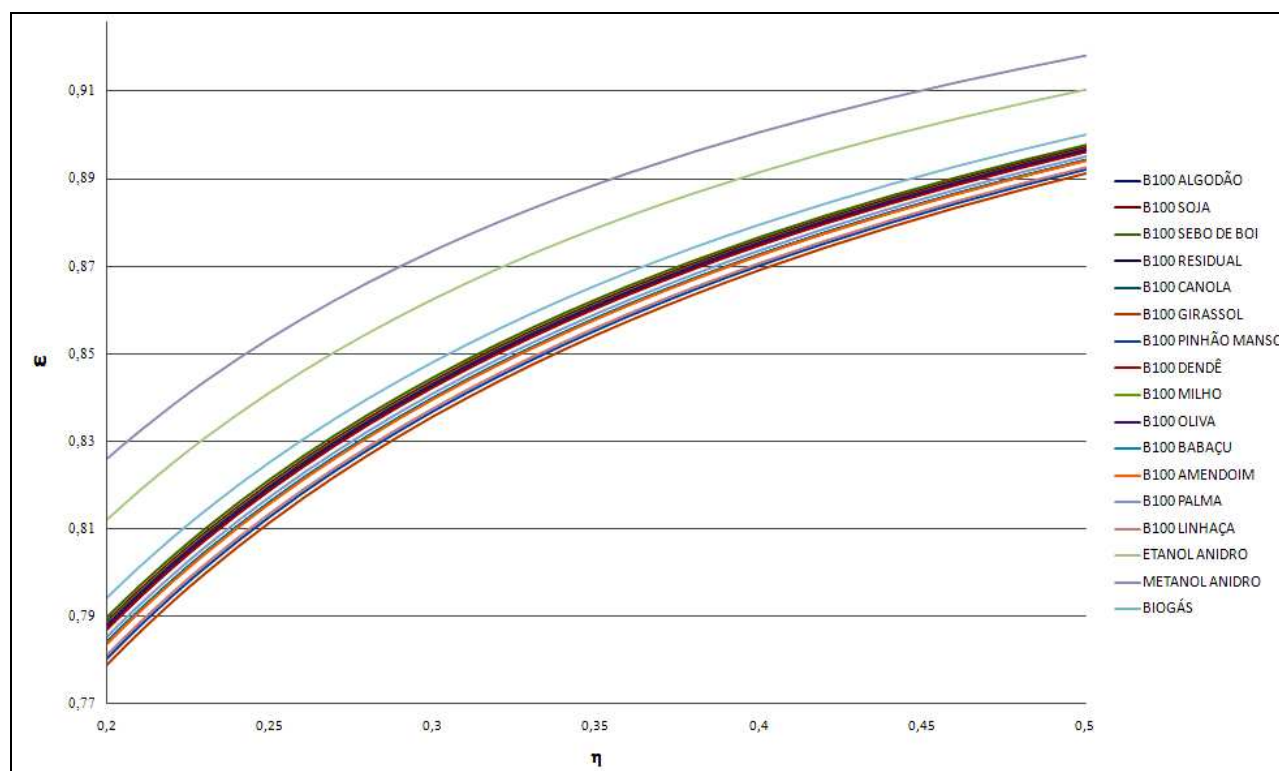


Figura 1 - Relação entre ϵ e η para os biocombustíveis.

A partir da figura 1 observamos que os valores das eficiências ecológicas para os biodieseis foram bem próximos. Observamos, também, que o etanol anidro, metanol anidro e biogás possuem valores de eficiência ecológica bem maior que os valores dos biodieseis.

A partir da figura 1, observamos que, entre os biodieseis estudados, o biodiesel de sebo de boi possui o maior valor de eficiência ecológica em função do rendimento hipotético do equipamento.

4. CONCLUSÕES

Entre os biodieseis estudados, o biodiesel de sebo de boi possui o maior valor de eficiência ecológica, e o biodiesel de óleo de fritura possui um valor bem próximo com relação aos biodieseis de outras matérias-primas. Neste contexto, existe outro forte argumento para a utilização destas matérias-primas que poderiam estar contaminando rios e esgotos.

Entre os biocombustíveis estudados, o biogás possui o terceiro maior valor de eficiência ecológica, mostrando a viabilidade na utilização do biogás como combustível alternativo para redução de metano na atmosfera, e, também, para redução na emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa.

A eficiência ecológica do metanol anidro pode chegar a valores de eficiência ecológica maiores que 90%, assim, se faz válido o aumento de pesquisas na área de produção de metanol a partir de biomassa. O metanol foi o biocombustível estudado com os valores mais satisfatórios no que diz respeito ao impacto ambiental.

Todos os biocombustíveis estudados obtiveram satisfatórios valores de eficiência ecológica.

O uso de equilíbrio químico se mostrou adequado para a determinação da composição final dos produtos da combustão. Esta metodologia, junto com uma quantificação da eficiência ecológica pode ser uma ferramenta de análise comparativa entre diferentes tipos de biocombustíveis e misturas, por exemplo, diesel/biodiesel. A próxima etapa deste trabalho é uma abordagem deste tipo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à FACEPE pelo suporte financeiro dos projetos de pesquisa CTEnerg/MCT/CNPq Proc. 550967/2005-2 e Proc. APQ-1080-3.05/08, respectivamente. Além disso, o primeiro e o segundo autor agradecem à FACEPE pelas bolsas de Doutorado e Mestrado respectivamente.

6. REFERÊNCIAS

Barros, R.W.S., Campos, R.J.A., Henríquez, J.R., Dutra, J.C.C. Estudo numérico da aplicação de equilíbrio químico na combustão de Biodiesel de Algodão e Pinhão-Manso. In: III congresso da rede Brasileira de Tecnologia de biodiesel, 2009, Brasília. III RBTB. Brasília, p.967-968, v.3, 2009.

Coronado, C.R., Carvalho JR, J.A., 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, C.A.S.; Silveira, J.L. Determinação da Eficiência Ecológica em um Motor de Combustão Interna Aeronáutico Usando Etanol e Gasolina de Aviação Como Combustível In: The 8th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, CLAGTEE, 2009.

Faria, J., Rodrigues, R. Aproveitamento de biogás como fonte de energia alternativa para produção de energia eléctrica. IST. Lisboa. 2001.

Olikara, C., Borman, G.L. A Computer program for calculating properties of equilibrium combustion products with some applications to I. Engines, SAE Paper 750468, 1975.

Peres, S., Campos, T.A.M, Schuler, A. Análises cromatográficas e calorimétricas de sete biodieseis de origem vegetal e do sebo de boi. in: iii congresso da rede brasileira de tecnologia de biodiesel, 2009, brasil. Artigos técnico-científicos do iii congresso da rbtb. brasil : mct/mbc-2009, 2009. v. iii. p. 109-110.

Teixeira, C.M.L.L., Teixeira, P.C.N. Microalga como matéria-prima para a produção de biodiesel. Aspectos tecnológicos e econômicos. *Inovação Energética*, Brasília, Brasília, 24 out. 2007.

Turns, S.R. *An introduction to Combustion Concepts and Applications*, 2nd ed., 2000.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

NUMERICAL STUDY OF ECO-EFFICIENCY IN COMBUSTION OF BIOFUELS WITH APPLICATION OF CHEMICAL EQUILIBRIUM

Renato Wagner da Silva Barros, rwsbarros@yahoo.com.br¹
Ronaldo José Amorim Campos, ronaldo_campos@hotmail.com²
Jorge Recarte Henríquez Guerrero, rjorge@ufpe.br²
José Carlos Charamba Dutra, charamba@ufpe.br²

¹Federal institute of Education, Science and Technology of Pernambuco, Campus Pesqueira, Highway BR 232 km 214 – Prado, CEP: 52200-000, Pesqueira – PE, Brazil.

²Department of Mechanical Engineering, Federal University of Pernambuco. Academic Helio Ramos Avenue, University City, CEP: 50740-530, Recife – PE, Brazil.

Abstract. *The use of biofuels in mechanical motors may bring some ambiental benefits, like the reduction of emission of poluents, when compared with other mineral fuels. At the other hand, depending on the type of the biofuel, it may increase the emissions of nitrogen oxide that may cause the acidification of ecosystems. The study of these emissions from the biofuels and the concept of the ecologic efficiency had provided better understanding of different aspects of thermodynamic efficiency in ecosystems and the advantages and disadvantages of using different types of biofuels. This paper presents a theoretical study involving combustion reactions, including chemical equilibrium conditions and applying the definition of eco-efficiency to determine the formation of products such as NO_x, CO₂, etc. The concept of eco-efficiency depends on the environmental impact caused by emissions of CO₂, SO₂, NO_x and some particulate matter. As it is known the elemental composition of these biofuels and using equivalence ratio as parameter, it was determined the final composition of combustion products through a nonlinear system of equations resulting from the combustion reaction and dissociation reactions during the combustion process. This study was conducted with biodiesels from the cotton, jatropha, soy, animal fat, residual oil (kitchen oil), canola, sunflower, palm oil, corn oil, babaçu oil, peanut, palm, linseed, anhydrous ethanol, anhydrous methanol and Biogas*

Keywords: *Biofuels, Eco-Efficiency, Combustion, Chemical Equilibrium*