

## O impacto da utilização do etanol nas emissões de carbono: O caso de um motor aeronáutico

Adriano Pacheco Bürger Meurer (UFSM) [aburgermeurer@gmail.com](mailto:aburgermeurer@gmail.com)  
Vinicius Rückert Roso (UFSM) [vinicius.roso@mecanica.ufsm.br](mailto:vinicius.roso@mecanica.ufsm.br)  
Mario Eduardo Santos Martins (UFSM) [mario@mecanica.ufsm.br](mailto:mario@mecanica.ufsm.br)

### Resumo:

Este estudo teve como objetivo a avaliação das emissões de carbono em um motor aeronáutico, originalmente operando com gasolina de aviação e posteriormente utilizando o etanol como combustível. Desenvolveu-se o modelo computacional de um motor aeronáutico Lycoming I0540K de seis cilindros, através do software GT-Power, no qual se inseriram parâmetros encontrados na literatura, possibilitando a validação do modelo através de equivalência da potência simulada e da indicada pelo fabricante. Apesar da considerável redução na emissão de monóxido de carbono (CO) quando utilizado o etanol, um dos principais gases do efeito estufa, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) teve sua emissão potencializada devido ao incremento no consumo de combustível. Com isso, não pode-se considerar neste caso que a utilização do etanol tenha contribuição benéfica sobre a pegada de carbono, desconsiderando-se a cadeia produtiva.

**Palavras chave:** Etanol, motor aeronáutico, créditos de carbono, mobilidade, emissões, efeito estufa.

## The impact of ethanol use in carbon emissions: The case of an aircraft engine

### Abstract

This study had as objective the evaluation of carbon emissions in an aircraft engine, originally operating with aviation gasoline and later using ethanol as fuel. An aircraft engine Lycoming I0540-K six-cylinder were developed in a computational model, through software GT-Power, entering parameters found in the literature, making it possible to validate the template through the simulated power and the specified by the manufacturer. Despite the considerable reduction in the emission of carbon monoxide (CO) when used ethanol, one of the main greenhouse gases, carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) had its issue due to the increment increased fuel consumption. Therefore, cannot be considered in this case that the use of ethanol has beneficial contribution about the carbon footprint, disregarding the productive chain.

**Key-words:** Ethanol, aircraft engine, carbon credits, mobility, emissions, greenhouse effect.

### 1. Introdução

Em função das alterações climáticas observadas, em 1991, as Nações Unidas conduziram por precaução discussões a respeito do assunto no chamado Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, chegando a soluções e criando ferramentas para regulamentar a redução nas emissões de CO<sub>2</sub>, o principal gás de efeito estufa (CHANG, 2002).

É comprovado por estudos científicos que a ação humana é a principal razão do aquecimento

global e que, portanto, seus geradores deveriam também ser os responsáveis pelo seu controle. Como o meio ambiente é diretamente ligado à economia, a sua degradação representa dispêndios sociais, devendo o poluidor ser estimulado a reduzir estes custos (FERREIRA et al., 2009).

O tema ambientalismo foi discutido globalmente em Estocolmo, na Suécia, em 1972. Apesar das poucas contribuições, o documento formal com os resultados da convenção apresentou fatores que contribuíram negativamente para a proteção ambiental, como a declaração que o desenvolvimento econômico deveria ser priorizado sobre a proteção ambiental (SAID; DZIEDZIC, 2007).

Já em 1992, através da ECO92, estabeleceram-se medidas para combate ao aquecimento global na chamada Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças no Clima. Como objetivo principal estaria o alcance da estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático. Para atingir esta meta, as partes interessadas deveriam proteger o sistema climático em benefício das gerações presentes e futuras da humanidade com base na equidade e em conformidade com suas responsabilidades comuns, mas diferenciadas e respectivas capacidades (FILHO; SABBAG, 2009).

Em 1995, na 1ª Conferência das Partes da Convenção (COP-1), concluiu-se que grande parte dos países integrantes do Anexo I do Protocolo de Kyoto (Tabela 1) não conseguiria reduzir seus níveis de emissões aos níveis encontrados no ano de 1990. Para que isso se tornasse possível, estabeleceu-se uma nova resolução, chamado Mandato de Berlim, onde os compromissos destes países deveriam ser revistos a fim de definir metas quantitativas para redução dos níveis de emissões para os anos de 2005, 2010 e 2020, bem como políticas para que estas metas fossem atingidas (FILHO; SABBAG, 2009).

As metas e políticas foram aprovadas em 1997, tornando-se o Protocolo de Kyoto. No documento, os países participantes comprometem-se a reduzir as emissões dos gases de efeito estufa para que se tornem 5% inferiores com relação aos níveis encontrados em 1990, entre os anos de 2008 e 2012, sendo as quantidades expressas em carbono ou equivalentes (SISTER, 2007).

Sendo assim fica economicamente atrativo reduzir os níveis de emissões de poluentes, caso haja um valor transacional para estas reduções. Dentre outras, a maneira que se destaca para este fim é o Comércio Internacional de Emissões (CIE), onde ocorre a distribuição e comercialização de cotas. Neste mecanismo, o país que não conseguir reduzir suas emissões à sua cota pode comprar cotas de um país que emitir menos que suas cotas.

O Mercado de Carbono possibilita aos países em desenvolvimento vender créditos a um país desenvolvido, para que este possa atender as exigências de redução nas emissões de gases de efeito estufa impostas pelo Protocolo de Kyoto. Esta negociação é realizada através de mecanismos centralizados, com organizações de bolsas de mercadorias e de futuros, semelhante à negociação tradicional de commodities (BASSETTO et al., 2006), sendo realizada no Brasil através da Bolsa de Mercadorias e Futuros (BM&F). Outra iniciativa do governo brasileiro foi o lançamento de uma campanha para criação de um Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE), que iniciou suas atividades em 2004, desenvolvendo um sistema eficiente de negociação de certificados ambientais, atendendo assim os requisitos estabelecidos no Protocolo de Kyoto. Em conjunto, são incentivados os desenvolvimentos de metodologias que contemplem vantagens competitivas brasileiras, como os biocombustíveis, as florestas e o carvão vegetal (SILVA et al., 2012).

O Brasil é pioneiro em projetos que envolvem a redução nas emissões de CO<sub>2</sub> e outros gases

de efeito estufa, e apesar da boa evolução no mercado de créditos de carbono, está atrás de países também em desenvolvimento, como a China e a Índia. Grande parte dos países promove a captura destes gases, através do aumento da área verde e consequentemente dos processos de fotossíntese. (SAID; DZIEDZIC, 2007).

Em 2005 foram estabelecidos no Brasil alguns projetos prioritários, como a utilização de fontes renováveis de energia bem como a busca do aumento da eficiência. Os mais recentes desenvolvimentos no setor de biocombustíveis apontam como uma transformação na estrutura do país, atingindo não somente a economia, mas também questões políticas, culturais, sociais e ecológicas. Já em 2006, o Brasil apresentou como sendo 47,5% de sua energia primária oriunda de fontes renováveis, como a cana de açúcar, a energia hidráulica e a lenha, por exemplo. Com interesses em estabelecer o etanol como commodity no mercado mundial, em 2007 o Brasil associou-se ao Fórum Internacional de Biocombustíveis, onde são analisadas alternativas para solucionar questões referentes à logística, infraestrutura e garantias de fornecimento (SILVA, 2007).

No setor automotivo, a crescente utilização do etanol é visível. Em 2004, 16% da totalidade dos veículos novos vendidos no Brasil possuíam etanol como alternativa de combustível (XAVIER, 2007), já em 2008, este número saltou para mais de 86%.

No Brasil, a utilização de etanol em aeronaves começou em 2005 com o modelo Ipanema 202, utilizando motor Lycoming IO-540-K1J5 com pequenas alterações como injetores de combustível redimensionados para um maior fluxo, adição de sistema para partidas a baixas temperaturas, substituição do filtro de combustível e adição de proteção anti corrosão no tanque (DAMIANI, 2008). Tais modificações permitiram que o motor operasse com etanol, porém, sem o total aproveitamento do potencial do combustível. Assim, a utilização do etanol tornava-se pouco atraente em função do alto consumo específico se comparado à gasolina de aviação, fato que influenciaria diretamente no custo da hora de voo, na autonomia, e na capacidade de carga do avião. Entretanto, como mencionado, outras modificações podem ser realizadas no motor afim de melhor aproveitar o potencial do etanol. Casos como este serão analisados neste trabalho, e expressos na quantidade de carbono resultante da queima de combustíveis como gasolina de aviação (AvGas) e etanol.

## 2. Materiais e Métodos

O objeto de estudo foi um motor Lycoming I0540 de seis cilindros, cujas características estão na Tabela 01.

Tipo do Motor	6 Cilindros Oposto
Volume Deslocado	8,849 cm <sup>3</sup>
Curso	111.1 mm
Diâmetro	131.2 mm
Comprimento da Biela	165.09 mm
Relação de Compressão	8.7: 1
Formação da Mistura	Mechanical port-fuel injection
Potencia	223.7 kW (300 HP)
Numero de Válvulas	12 (OHV)
Diâmetro da Válvula de Admissão	56.2 mm
Diâmetro da Válvula de Exaustão	46.7 mm
Abertura da Válvula de Admissão	22° BTDC

Fechamento da Válvula de Admissão	78° ABDC
Abertura da Válvula de Exaustão	43° BBDC
Fechamento da Válvula de Exaustão	2° ATDC
Refrigeração	Ar

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 01 – Características do Motor

Os combustíveis utilizados na simulação basearam-se na gasolina de aviação 100LL (AvGas) e no etanol de cana-de-açúcar, e tem suas características apresentadas na Tabela 02. Quando simulado com gasolina de aviação mantiveram-se os parâmetros originais do motor, porém quando simulado com etanol foram alteradas características funcionais a fim de reduzir o consumo de combustível e aumentar a eficiência do motor.

	AvGas	Etanol
Composição Química	C <sub>n</sub> H <sub>1.87n</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6.16</sub> O <sub>1.08</sub>
Densidade a 15°C(kg/l)	0,72	0,82
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	43,5	25
Calor de vaporização (kJ/kg)	339	992
Numero de Octanos	100	106
Porcentagem de Chumbo	0,60%	0%
Temperatura de Auto Ignição	360°C	420°C
Ponto de Ebulição (°C)	30-170	78,5
Velocidade de Chama Laminar(m/s)	n/a	0,42

Fonte: Elaborado pelos autores

Tabela 02 – Característica dos combustíveis<sup>2</sup>

De acordo com Blair et al (1996), a simulação computacional é uma das ferramentas mais eficientes na área de projeto de motores, colaborando na otimização de variáveis e reduzindo a necessidade de ensaios experimentais extensos, contribuindo assim para um menor tempo total de projeto e redução nos custos de desenvolvimento. Neste trabalho foi utilizado um software de simulação unidimensional para motores de combustão interna (GT Power ®), onde modelos foram construídos a fim de se obterem resultados para diferentes situações. Para validação dos modelos são utilizados dados obtidos de publicações sobre o assunto, manuais de serviço e medições diretas no motor.

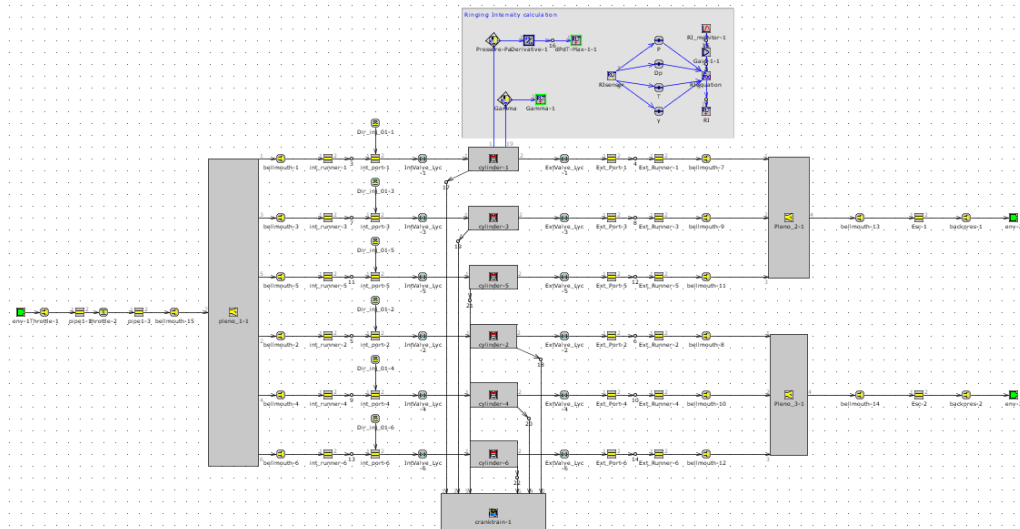


Figura 1 – Modelo computacional do motor Lycoming

As condições iniciais de temperatura e pressão utilizadas na simulação foram 20°C e 103,1kPa respectivamente. Devido a inexistência de um ciclo padrão de voo, considerou-se neste trabalho apenas as condições de decolagem de uma aeronave agrícola, ou seja, situação em que o motor está com carga máxima, e borboleta totalmente aberta (WOT – wide open throttle).

Para poder analisar se é vantajosa a utilização do etanol na aviação agrícola, no que tange as emissões de gases do efeito estufa, serão utilizados como dados de entrada dados emissões de carbono retirados da literatura.

### 3. Resultados

Como já esperado a substituição da gasolina de aviação pelo etanol gerou aumento de potência do motor, bem como aumento do consumo específico de combustível, pois o etanol possui poder calorífico inferior (PCI) menor que o da gasolina.

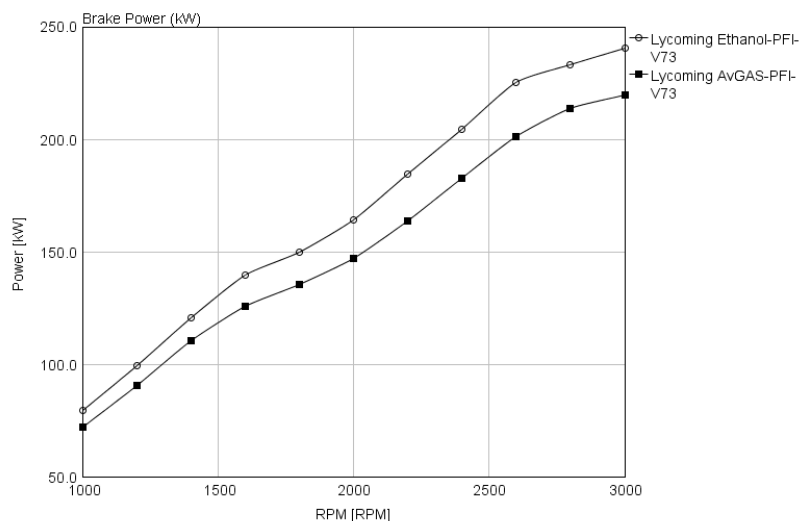


Figura 2 – Grafico potência x rotação

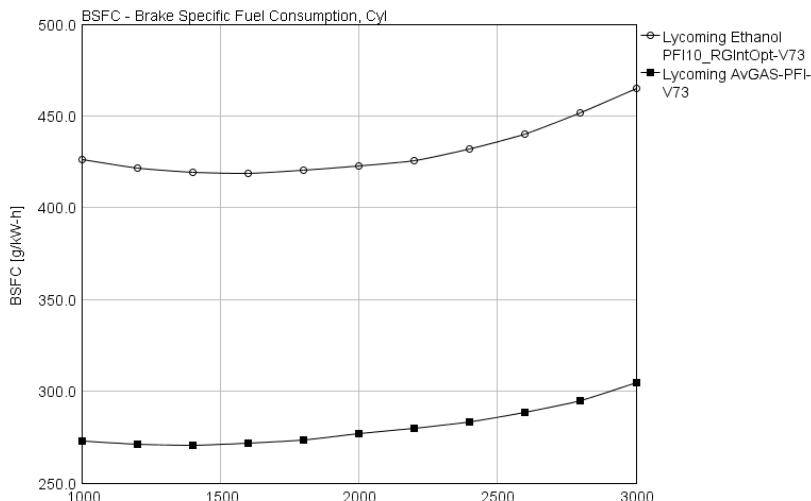


Figura 3 – Gráfico Consumo específico x rotação

Devido ao fato do motor ter seu consumo aumentado quando utilizando etanol este apresenta um nível maior de emissões de CO<sub>2</sub>, uma vez que a formação de CO<sub>2</sub> está diretamente ligada a reação de combustão.

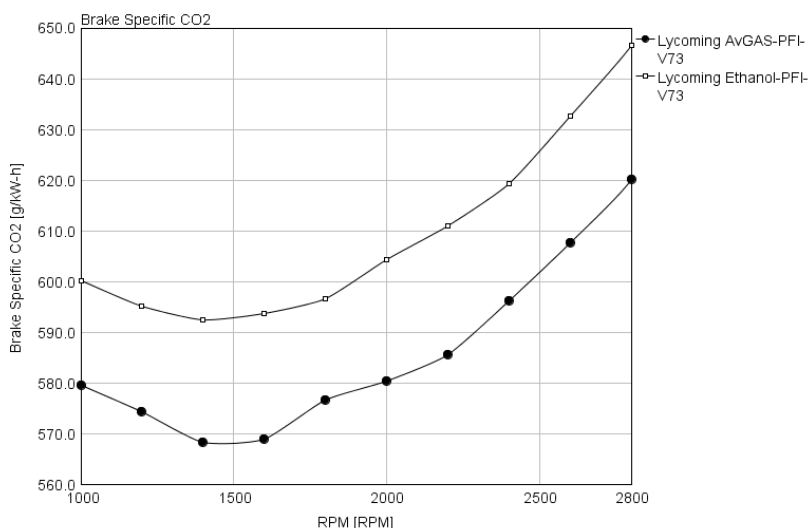


Figura 4 – Gráfico emissão de CO<sub>2</sub> x rotação

A formação de CO ocorre principalmente pela combustão incompleta dos hidrocarbonetos na fase intermediária, causada por dois motivos: falta de oxidantes que reduz a razão de equivalência e baixas temperaturas de chama (JACOBS et al., 2003).



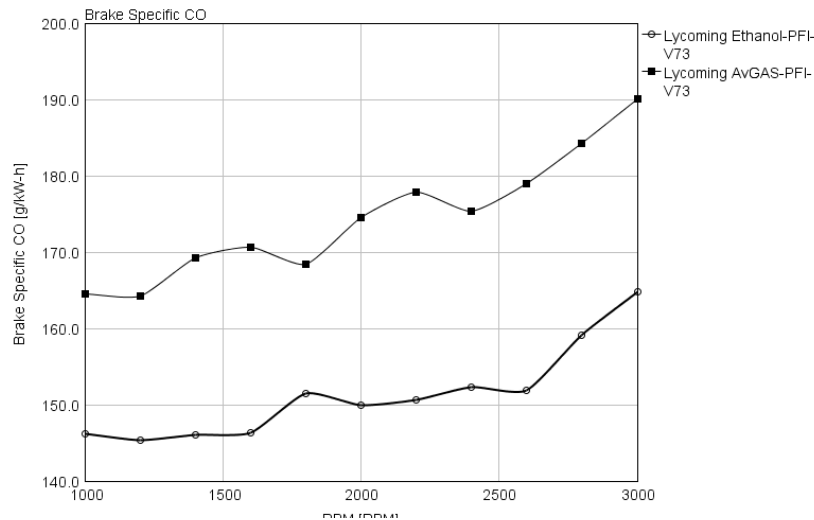


Figura 5 – Gráfico emissão de CO x rotação

Neste aspecto o etanol leva grande vantagem em relação a gasolina de aviação pois contém cerca de 35% em peso de oxigênio, o que conduz a uma combustão mais completa e reprime a criação de produtos de combustão incompleta na câmara de combustão. Além disso, o etanol tem uma necessidade estequiométrica de ar para baixo, o que permite que o combustível a queimar mais rapidamente durante o processo de combustão (YOON *et al*, 2009).

Segundo a literatura para o balanço de CO<sub>2</sub> devem ser considerados os seguintes aspectos:

- As emissões da queima de combustível em veículos a motor
- As emissões de fabricação, transporte e aplicação de herbicidas, fertilizantes e inseticidas
- As emissões de conversão e transporte de etanol
- As emissões da produção, combustão e distribuição de gasolina
- Aumento de carbono orgânico do solo

Segundo Oliveira *et al* (2005), os insumos agrícolas necessários para a produção de cana são responsáveis pela liberação de cerca de 2,27 mg de CO<sub>2</sub> por hectare, e de 26,90 kg por ha e 1,33 kg por há de metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) respectivamente. A distribuição de etanol emite cerca de 35,4 quilogramas (kg) de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> transportado.

Rosa e Ribeiro (1998), concluíram que o carbono emitido através da combustão de etanol no motor do veículo é reabsorvido pela cana, tornando o equilíbrio praticamente zero, e, conseqüentemente, não é contabilizada no balanço de CO<sub>2</sub>. Outras fontes de emissões de CO<sub>2</sub> de resultado a produção de etanol a partir da queima de pré-colheita da cana e da decomposição da vinhaça, um subproduto da produção de etanol aplicado como fertilizante nos canaviais. Como estas emissões CO<sub>2</sub> também são reabsorvidos pela cana, eles também não são contabilizados no balanço de CO<sub>2</sub>. A imagem 6 demonstra o balanço de CO<sub>2</sub> no plantio e transporte de etanol no Brasil.

Crop (broken down by constituent)	Quantity of constituent per ha	CO <sub>2</sub> released (kg) per unit of constituent	CO <sub>2</sub> released (kg) per ha
<b>Sugarcane (Brazil)</b>			
Nitrogen	65.0 kg	3.14 per kg <sup>a</sup>	204.10
Phosphorus pentoxide (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	52.0 kg	0.61 per kg <sup>a</sup>	31.72
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	100.0 kg	0.44 per kg <sup>a</sup>	44.00
Lime	616.0 kg	0.13 per kg <sup>a</sup>	80.08
Herbicides	3.0 kg	17.24 per kg <sup>a</sup>	51.72
Insecticides	0.5 kg	18.08 per kg <sup>a</sup>	9.04
Diesel fuel	600 L	3.08 per L <sup>b</sup>	1848.00

Fonte: Oliveira et al. 2005.

Figura 6 – Distribuição de CO<sub>2</sub> por fase no plantio e transporte do etanol no Brasil

Ainda segundo Oliveira *et al* (2005), em termos de pegada ecológica, a área de floresta necessária como um sumidouro de emissão de CO<sub>2</sub> de um automóvel é de 0,38 ha menor se este automóvel usa etanol em vez de gasolina com álcool como combustível. Por conseguinte, se toda a frota automobilística brasileira usasse etanol, a área necessária para absorver o CO<sub>2</sub> seria 6.080.000 ha menor do que se a mesma frota utilizasse gasolina com álcool.

#### 4. Conclusão

Se comparada somente a emissão de CO<sub>2</sub> do motor aeronáutico operando com etanol ou gasolina de aviação, tem-se a falsa impressão que a gasolina de aviação é menos prejudicial ao aquecimento global. Porém quando se analisa todo o processo desde o início da cadeia produtiva dos dois combustíveis, pode-se observar que o etanol é mais vantajoso por ser produzido a partir da cana de açúcar, que ao longo de seu crescimento consome carbono da atmosfera.

Mas, apesar destas vantagens o etanol poderia ser ainda mais eficiente e emitir menos gases do efeito estufa se fosse produzido em pequenas usinas locais, o que causaria a diminuição das emissões no transporte.

#### Referências

- BASSETTO, L. I.; GUELBERT, T. F.; KOVALESKI, J. L.; LESZCZYNSKI, S. A. C; LIMA, I. A.** *Crédito de carbono: uma moeda ambiental como fator de motivação econômica.* XXVI ENEGEP - Fortaleza, CE, Brasil, 9 a 11 de Outubro de 2006.
- BLAIR, G.P.** *Design and Simulation of Four-Stroke Engines,* Society of Automotive Engineers Int., 1999.
- CHANG, M.** *Seqüestro de Carbono Florestal: oportunidades e riscos para o Brasil.* Revista Pparaná. Desenv., Curitiba, n. 102, p. 85-101, jan./jun. 2002
- DAMIANI, J. H. S.** *The technological innovation process and the main institutions and actors involved in the development of an ethanol-fueled airplane: The Case of Ipanema.* In Management of Engineering & Technology, 2008. PICMET 2008. Portland International Conference on, pp.2483-2488. IEEE, 2008.
- FILHO, H. M.; SABBAG, B. K.** *Classificação da Natureza Jurídica do Crédito de Carbono e Defesa da Isenção da Tributária Total às Receitas Decorrentes da Cessão de Créditos de Carbono Como Forma de Aprimorar o Combate ao Aquecimento Global.* Setembro/2009. Disponível em: <[http://www2.oabsp.org.br/asp/comissoes/mercado\\_carbono/artigos/natureza\\_juridica.pdf](http://www2.oabsp.org.br/asp/comissoes/mercado_carbono/artigos/natureza_juridica.pdf)>
- JACOBS, T.; ASSANIS, D., FILIPI, Z.,** *The Impact of Exhaust Gas Recirculation on Performance and Emissions of a Heavy-Duty Diesel Engine,* Automotive Research Center, The University of Michigan, SAE Paper 2003-01-1068, 2003.
- OLIVEIRA, MARCELO E. D.; VAUGHAN, BURTON E.; JUNIOR, EDWARD J. RYKIEL.** *Ethanol as Fuel: Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint.* American Institute of Biological Sciences, 55(7):593-602. 2005.
- ROSA LP, RIBEIRO SK.** *Avoiding emissions of carbon dioxide through the use of fuels derived from sugarcane.* Ambio 27: 465-470. 1998.



**SAID, A. A.; DZIEDZIC, M.** *A Importância da Utilização de Créditos de Carbono no Brasil.* IX ENGEMA – Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. Curitiba, 19 a 21/11/2007.

**SILVA, L. I. L. da.** *Globales Regieren: Die Herausforderung der nachhaltigen Entwicklung und die Rolle der Biotreibstoffe.* In: WÜRTELE, G. (Ed.) *Macht Worte.* Wirtschaftslenker und Staatsmänner stellen sich den Fragen der Zukunft. Frankfurt am Main:s. n.,. p.59-70. 2007.

**SILVA, L. A. M.; BACARJI, A. G.; MOURA, J. M.; HALL, R. J.** *Crédito de carbono: Reflexões teóricas acerca do mercado brasileiro.* XIX SIMPEP – Bauru, SP, Brasil, 5 a 7 de Novembro de 2012.

**SISTER, G.** *Mercado de Carbono e Protocolo de Quioto – Aspectos Negociais e Tributação.* Elsevier Editora Ltda, Rio de Janeiro. 2007.

**XAVIER, M.** *The Brazilian sugarcane ethanol experience.* Issue analysis 3, Washington, DC, 2007.

**YOON, S. H.; HA, S.Y.; HOG, G.H.; LEE, C.S.** *Effect of bioethanol as an alternative fuel on the emissions reduction characteristics and combustion stability in a spark ignition engine.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering 2009 223: 941-951.