



## Modelo para Análise Ambiental de Motores Bicombustíveis

**Marco Aurélio dos Santos Bernardes**

(marcobernardes@des.cefet.ng.br)

### Resumo

O presente trabalho propõe a utilização de um modelo abrangente baseado na Ecologia Industrial (EI) para a análise ambiental de motores bicombustíveis em uso no Brasil, a saber, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Primeiramente, os princípios básicos da EI são apresentados e os fundamentos da ACV são discutidos e avaliados considerando sua aplicação para a análise ambiental proposta. Finalmente, o modelo para a análise é definido e apresentado tendo como base a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida.

**Palavras-chave:** Biocombustíveis, Ecologia Industrial, Avaliação do Ciclo de Vida, Análise Ambiental.

**Área Temática:** Biocombustíveis.

### 1 Introdução

Atualmente, os combustíveis fósseis representam a matéria-prima mais importante para a sociedade. Por isso, a utilização dessa matéria-prima desperta o interesse geral quando a influência da relação do homem com o meio ambiente é discutida – e não somente devido às cargas ambientais através de seu uso, mas também porque os combustíveis fósseis são esgotáveis. Conseqüentemente, o potencial de introdução de fontes alternativas de energia é muito importante no que diz respeito à discussão de desenvolvimento sustentável e de economia de combustíveis convencionais. Nesse ponto, os combustíveis renováveis podem desempenhar um papel muito importante.

O veículo flex constitui um ponto crucial no uso dos biocombustíveis. O veículo flex (em língua inglesa: flexible-fuel vehicle – FFV) ou veículo de combustível duplo (em língua inglesa: dual-fuel vehicle) é um veículo equipado com um motor de combustão interna a quatro tempos (Ciclo Otto) que tem a capacidade de ser reabastecido com mais de um tipo diferente de combustível, misturados no mesmo tanque e queimados na câmara de combustão simultaneamente. O veículo de combustível flexível mais comum disponível no mercado mundial utiliza etanol como segundo combustível. Um sensor detecta a mistura do combustível e ajusta a injeção de acordo com a mistura. Assim pode-se usar tanto álcool quanto gasolina, ou uma mistura dos dois em qualquer proporção.

No Brasil, os veículos flex estão disponíveis no mercado desde 2003 e representam um sucesso comercial, LEMOS (2007). Segundo a FOLHA\_ONLINE (2008), em agosto de 2008, a frota de automóveis e veículos comerciais leves tipo flex tinha alcançado a marca de 6 milhões de veículos, representando 23% da frota de veículos leves do Brasil. O sucesso dos veículos flex, conjuntamente com a obrigatoriedade a nível nacional de usar de 20 a 25% do álcool misturado com gasolina convencional (E25), permitiu ao etanol combustível superar o consumo de gasolina em abril de 2008 (AGÊNCIA\_BRASIL (2008), GAZETA\_MERCANTIL (2008)). A tradição e cultura no uso do etanol como combustível, herança do programa Pró-álcool criado nos anos setenta, favoreceu a rápida aceitação dos veículos flex no Brasil e seu sucesso comercial. Quando os automóveis flex foram oferecidos no mercado brasileiro, o país já tinha 30.000 postos de gasolina prontos para vender etanol em todo o país, segundo BUDNY e SOTERO (2007).

Diante desse contexto, as seguintes questões (entre outras) podem ser levantadas:



# 1º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 29 a 31 de Outubro de 2008

- Considerando-se todo o ciclo de vida, quais são as vantagens e desvantagens ambientais relacionadas com a substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis?
- Do ponto de vista ecológico, existe uma relação ideal de adição de biocombustíveis aos combustíveis fósseis?
- Se a resposta à pergunta anterior for afirmativa, qual é essa relação?

Para se obter respostas a essas perguntas, torna-se necessário o emprego de uma metodologia abrangente e capaz de abordar a complexidade que envolve o ciclo de vida de combustíveis fósseis e de biocombustíveis. Basta lembrar que a extração e a produção de um e de outro está vinculada a processos bem díspares. O primeiro passo é, portanto, observar quais ferramentas a disciplina Ecologia Industrial pode oferecer.

## 2 A Ecologia Industrial e a Avaliação do Ciclo de Vida

Até meados da década de 50 não era comum considerar o sistema produtivo vinculado ao meio ambiente. Os problemas ambientais estavam fora das fronteiras do sistema industrial (externalidades). O foco das análises se encontrava no tratamento das consequências dos impactos ambientais e não no estudo de suas causas. Essa abordagem é denominada “tratamento de final de tubo” (em inglês, end-of-pipe). A Ecologia Ambiental é uma nova forma de abordar os problemas ambientais que vem ganhando espaço nos últimos anos. Ela insere os sistemas industriais na biosfera: “o sistema industrial como um todo, depende dos recursos e serviços provenientes da biosfera, dos quais não pode estar dissociado.” ERKMAN (2001).

Ecossistemas naturais são processos muito eficientes no que diz respeito ao uso de energia e ao aproveitamento de todos os rejeitos gerados. A natureza faz isso através da habilidade de diferentes organismos trabalhando em conjunto, de forma que o rejeito de um é a matéria-prima de outro. O estudo das entradas (*inputs*) e saídas (*outputs*) de ecossistemas – fluxo de material – rapidamente revela a eficiência de processos. A Ecologia Industrial é a disciplina que busca assimilar e aplicar esses conceitos de sistemas naturais na indústria e em outras atividades do homem. Uma das aplicações mais visíveis dos conceitos da Ecologia Industrial incluem: o uso da avaliação de fluxo de material na tomada de decisões, parques eco-industriais, e intercâmbio de rejeitos.

Os estudos de fluxo de materiais fornecem um inventário sistemático dos *inputs* e *outputs* de um determinado sistema. Esta informação é muito útil na determinação de opções e na tomada de decisões ao passo que poupa tempo ao considerar um registro ambiental de uma atividade ou processo. Sistemas Eco-industriais são conjuntos onde indústrias são agrupadas de tal forma que possam permitir matéria-prima, rejeitos e energia entre si, reduzindo, portanto, os *inputs* e *outputs* líquidos do sistema. Na essência, o sistema eco-industrial funciona como um ecossistema artificial.

A Ecologia Industrial considera que:

- todas as operações industriais são sistemas naturais que devem funcionar como tal, dentro das restrições dos seus ecossistemas locais e da biosfera
- a dinâmica e princípios dos ecossistemas oferecem uma fonte poderosa de inspiração no desenho e gestão dos sistemas industriais
- a obtenção de elevadas eficiências energéticas e de utilização de materiais na produção, utilização e reciclagem gera vantagens competitivas e benefícios econômicos
- a fonte de valor econômico em última análise é a viabilidade a longo prazo do planeta e dos ecossistemas locais.

Esses princípios sintetizam o *life cycle thinking*, que busca contabilizar e analisar os



# 1º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 29 a 31 de Outubro de 2008

recursos utilizados e as emissões oriundas durante a vida de um produto ou serviço. Nesse contexto, estão incluídas as seguintes etapas:

- a extração de matéria-prima
- o processamento do material
- a manufatura
- o uso
- a manutenção
- e a disposição final.

A utilização de transporte entre cada etapa é também contabilizado.

É importante ressaltar um princípio importante relacionado com a Ecologia Industrial, a saber, a abordagem integrada ou multidisciplinaridade. A EI considera três disciplinas diferentes: ciências sociais (incluindo a economia), ciências técnicas e as ciências ambientais. As principais ferramentas empregadas na EI são:

- Environmental impact assessment (EIA)
- Input-output analysis (IOA)
- Life cycle analysis (LCA)
- Material flow analysis (MFA)
- Substance flow analysis (SFA)
- MET Matrix

A Avaliação do Ciclo de Vida – ACV (em inglês: *Life Cycle Assessment – LCA*) é a abordagem científica que tem por fim identificar e avaliar os impactos ambientais através do ciclo de vida de um processo ou produto. As informações de uma ACV podem ser usadas na tomada de decisão onde modificações nos processos podem trazer benefícios relativamente importantes. A ACV pode, também, ser integrada à Análise de Custo de Ciclo de Vida – ACCV (em inglês: *Life Cycle Costing – LCC*) para coletar informações que fornecem *inputs* tanto para decisões tanto econômicas como ambientais. A ACCV utiliza a mesma abordagem mas identifica e avalia custos ao invés de impactos ambientais.

Ao se comparar a ACV com as outras ferramentas da EI, as seguintes vantagens podem ser destacadas:

- permite a identificação e avaliação das fases críticas do processo industrial ou do produto ou serviço
- permite a estimativa dos impactos potenciais cumulativos resultantes de todos os estágios do processo produtivo, freqüentemente incluindo impactos não considerados nos outros processos tradicionais de análise
- ajuda na seleção de produtos e processos que causam menor impacto ao meio ambiente. Para isso, as informações obtidas pela ACV são agregadas a outros fatores, tais como custos e dados de performance
- facilita o gerenciamento ambiental, uma vez que sistematiza as questões associadas ao sistema de produção, melhora a compreensão do processo de produção e permite a identificação de prioridades para tomadas de decisão

Portanto, para o desenvolvimento modelo para análise ambiental de motores bicompostíveis, optou-se pela metodologia ACV.

A ISO (International Organization of Standardization) desenvolveu um conjunto de normas (a série ISO 14040) que trata da ACV. As normas incluem: Princípios e Estrutura – ISO14040 (1997a), Objetivos, Definições de Escopo e Análise de Inventário – ISO14041 (1998b), Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida – ISO14042 (2000c), Interpretação do Ciclo de Vida – ISO14043 (2000d). As etapas da ACV apresentam as seguintes subdivisões:



# 1º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 29 a 31 de Outubro de 2008

1. Definição de Meta e Escopo – ISO14040 (1997a)
  - a. Sistema de produto
  - b. Função do produto
  - c. Unidade funcional
  - d. Fluxo de referência
  - e. Fronteiras do sistema de produto
  - f. Requisitos de qualidade de dados
2. Análise de Inventário – ISO14041 (1998b)
  - a. Coleta de dados
  - b. Procedimento de cálculos
  - c. Alocação
3. Análise de Impacto
4. Interpretação

## 3 Avaliação do Ciclo de Vida de Motores Flex

Propõe-se, no presente trabalho, o seguinte modelo para Análise Ambiental de Motores Flex, através da Avaliação do Ciclo e fundamentado nas normas ISO 14000.

### 3.1 Definição de Meta e Escopo

O objetivo do estudo será a avaliação do ciclo de vida do motor flex, considerando-se a sua utilização, avaliando-se a relação de mistura etanol (biocombustível) e gasolina (combustível fóssil), combustíveis disponíveis comercialmente em praticamente todo Brasil.

Basicamente, o uso de biocombustíveis e combustíveis fósseis em um motor flex serão avaliados em todo o seu ciclo de vida, levando-se em conta o sistema econômico nacional como referência. Isso inclui a obtenção das matérias-primas, o transporte, o processamento, a distribuição, o armazenamento, etc., até o uso e disposição final, tendo como base a mesma energia útil. Para isso, estabelece-se, como função de produto, a geração de energia para motores de combustão interna. A unidade funcional a ser adotada para todos os aspectos ambientais normalizados será, portanto, 1000 MJ.

A partir dos resultados das autonomias por volume de combustível (km/l ou km/m<sup>3</sup> para GNV), é calculado o consumo de energia de cada ensaio do veículo em MJ/km, utilizando-se os valores de densidade energética correspondentes para cada combustível, conforme a tabela Tabela 1.

Tabela 1 – Poder calorífico, densidade e densidade energética para cada combustível - INMETRO (2008).

	Unidade	E00	E22	50 / 50	E100	GNV
Poder calorífico	MJ/kg	42,7	39,20	32,33	25,46	46,4
Densidade	kg/l	0,75	0,76	0,78	0,80	0,83
Densidade energética	MJ/l	32,03	29,75	25,06	20,38	38,5

Portanto, para atender à unidade funcional, os fluxos de referências foram calculados e  
são apresentados na



# 1º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 29 a 31 de Outubro de 2008

Tabela 2.



# 1º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 29 a 31 de Outubro de 2008

Tabela 2 – Fluxos de Referência para cada combustível.

Fluxo de referência	Unidade	E00	E22	50 / 50	E100	GNV
L		31,22	33,61	39,90	49,07	25,97

## Sistema de produto do etanol

O álcool etílico ou etanol ( $C_2H_5OH$ ) pode ser obtido a partir de vegetais ricos em açúcar, como a cana-de-açúcar, a beterraba e as frutas do amido, extrato da mandioca, do arroz e do milho, e da celulose extraída da matéria principalmente dos eucaliptos. A maior parte do álcool produzido é obtida através da cana-de-açúcar. A mandioca também é utilizada, porém em menor escala. A obtenção do álcool envolve várias etapas: cultivo, transporte, extração do caldo, tratamento (filtragem, etc.), fermentação, destilação, armazenamento, distribuição. Um esquema simplificado deste processo é apresentado na Figura 1.

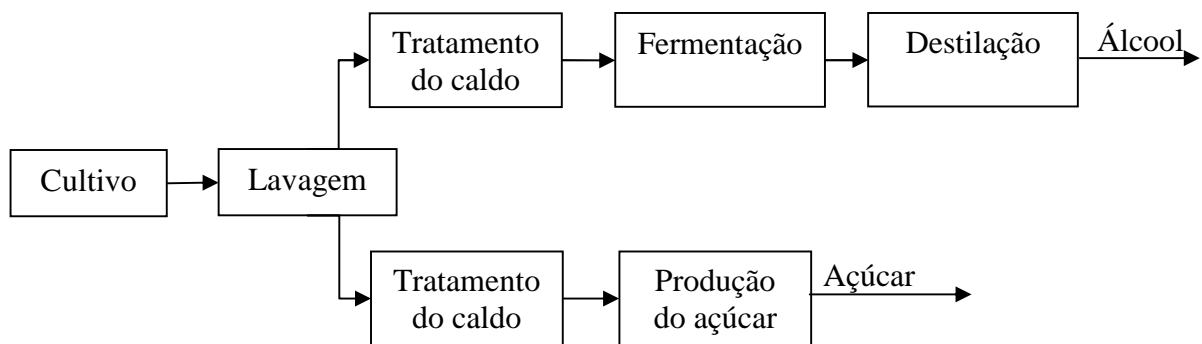


Figura 1 – Esquema simplificado da produção de álcool - MACEDO (1995).

## Sistema de produto da gasolina

Basicamente, a gasolina é um combustível obtido do refino do petróleo e composto por uma mistura de hidrocarbonetos (compostos orgânicos que contêm átomos de carbono e hidrogênio). Os processos de refino utilizados na produção da gasolina compreendem várias etapas. De um modo geral, o processo começa com uma simples separação física, denominada destilação. Da destilação aproveita-se a nafta para a produção da gasolina. Dessa mesma destilação obtém-se várias parcelas, uma delas denominada gasóleo. O gasóleo passa por processo complexo, que modifica a estrutura das moléculas, chamado craqueamento catalítico. Deste processo é obtida uma outra nafta chamada nafta de craqueamento que pode ser adicionada à nafta de destilação para a produção de gasolina.

## Sistema de produto do Motor Flex

O modelo proposto inclui a avaliação do desempenho ecológico dos motores flex utilizando diferentes relações de mistura combustíveis fósseis e biocombustíveis. Portanto, as modificações inseridas no motor também serão incluídas nesta análise.

## 4 Conclusão

No presente artigo, o modelo proposto para a análise ambiental de motores bi-combustíveis em uso no Brasil foi apresentado. A metodologia selecionada, a Avaliação do Ciclo de Vida, se mostra adequada e eficaz ao lidar com todas questões ecológicas que envolvem a utilização dos motores flex, incluindo todas as etapas da vida do produto, tais como, a extração das matérias-primas, o uso de energia, o transporte, a utilização do combustível, as emissões associadas, etc. Portanto, o modelo apresentado representa o primeiro e importante passo para o desenvolvimento de uma avaliação ambiental ampla dos motores flex.



# 1º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente

Bento Gonçalves – RS, Brasil, 29 a 31 de Outubro de 2008

## Referências

- AGÊNCIA\_BRASIL. ANP: consumo de álcool combustível é 50% maior em 2007. Página visitada em 18/09/2008, [http://br.invertia.com/noticias/noticia.aspx?idNoticia=200807152306 ABR\\_77211977](http://br.invertia.com/noticias/noticia.aspx?idNoticia=200807152306), 2008.
- BUDNY, D., eP. SOTERO. The Global Dynamics of Biofuels. Página visitada em [http://www.wilsoncenter.org/topics/pubs/Brazil\\_SR\\_e3.pdf](http://www.wilsoncenter.org/topics/pubs/Brazil_SR_e3.pdf), 2007.
- ERKMAN, S. Industrial ecology: a new perspective on the future of the industrial system. **Swiss Medical Weekly** 131: p. 531–538, 2001.
- FOLHA\_ONLINE. Veículos flex somam 6 milhões e alcançam 23% da frota. Página visitada em 19/08/2008, <http://www1.folha.uol.com.br/folha/dinheiro/ult91u428265.shtml>, 2008.
- GAZETA\_MERCANTIL. ANP estima que consumo de álcool supere gasolina. Página visitada em 18/09/2008, <http://www.agropecuariabrasil.com.br/anp-estima-que-consumo-de-alcool-supere-gasolina/>, 2008.
- INMETRO. Regulamento de Avaliação da Conformidade de Veículos Leves de Passageiros e Comerciais Leves com Motores do Ciclo Otto. In INMETRO, (ed.). INMETRO. 2008.
- ISO14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. **ISO EN 14040**: p., 1997a.
- ISO14041. Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis. **ISO 14041**: p., 1998b.
- ISO14042. Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle impact assessment. **ISO 14042**: p., 2000c.
- ISO14043. Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle interpretation. **ISO 14043**: p., 2000d.
- LEMOS, W. Brazil's flex-fuel car production rises, boosting ethanol consumption to record highs. **ICIS Chemical Business**: Página visitada em 18/09/2008, <http://www.icis.com/Articles/2007/11/12/9077311/brazils-flex-fuel-car-production-rises-boosting-ethanolconsumption-to-record-highs.html>, 2007.
- MACEDO, I. C. A tecnologia para o setor sucroalcooleiro: situação atual e perspectivas. In **SEMINÁRIO PERSPECTIVAS DO ÁLCOOL COMBUSTÍVEL NO BRASIL**, I. D. E. E. ENERGIA, (ed.). USP, São Paulo. 1995, p. 63