As Possíveis Desvantagens de Biocombustíveis

TenCel Mark N. Goltz, PhD, *USAF*, Reformado
Charles A. Bleckmann, *PhD*
Douglas M. Mackay, *PhD*
Maj Khai Vuong, *USAF*
Cap Jerrod P. McComb, *USAF**

O DESEJO DE reduzir a dependência norteamericana em energia estrangeira, problemas ambientais contínuos e o custo cada vez mais alto do petróleo deram origem a notáveis desenvolvimentos de fontes de energia alternativa renovável, a "verde", tais como os biocombustíveis à base de álcool. O Departamento de Defesa *(DoD)*, a fim de dirigir-se a essas questões, tenta diminuir a dependência em petróleo para abastecer as aeronaves e o equipamento terrestre. A Força Aérea, alinhada aos objetivos do *DoD*, deu início a vários projetos para reduzir o uso de energia: (1) redução anual de 2 por cento em combustível à base de petróleo para a frota de veículos; (2) aumento anual de10 por cento em combustível alternativo para veículos motorizados; (3) certificação de que todas as aeronaves e sistemas de armas utilizam mescla 50/50 de combustível alternativo até 2011; (4) garantia de que as aeronaves da Força Aérea utilizarão mescla de 50 por cento de combustível alternativo até 2016.[1] Essa escala agressiva movimenta o maior consumidor de energia do planeta, o *DoD*, em direção ao mercado de energia alternativa. Provavelmente esse departamento estará à frente dos segmentos mundiais no que concerne a mercados de aviação e combustível para motores, a fim de fazer face à demanda para novos combustíveis alternativos, convertendo os sistemas que dispensam os mesmos, em apoio ao novo mercado. Embora a conversão a combustíveis alternativos possa muito bem reduzir a produção de dióxido de carbono, somente agora torna-se claro o risco de que possíveis vazamentos de combustível afetem o solo e o lençol freático.

Este artigo alega que não nos dirigimos de forma adequada aos possíveis impactos desses combustíveis ao ambiente. Atualmente, a pesquisa indica que os riscos causados pela contaminação do subsolo podem na verdade aumentar com a introdução de combustíveis alternativos em grande escala. Além do mais, os futuros sistemas de suprimento e armazenagem podem sofrer danos inquietantes, devido a natureza biologicamente mais reativa desse tipo de combustível. Assim, a prudência exige que a Força Aérea utilize a pesquisa mais atualizada, apoiando de forma dinâmica, novos estudos, a fim de compreender as inferências de sua utilização acelerada, inclusive o risco ambiental e outros associados a vazamentos e avaria aos sistemas que transportam, armazenam e consomem os mesmos. Dessa forma, este artigo sugere o caminho a seguir, a fim de assegurar que a incorporação em grande escala desse tipo de combustível ao vasto suprimento do *DoD* não resulte, inadvertidamente, em água contaminada, geração de gás explosivo próximo à milhares de dependências de distribuição e armazenagem ou consequências adversas de operação, devido a degradação micróbica do mesmo.

---

*O Dr. Goltz e o Dr. Bleckmann são membros do corpo docente do programa de engenharia e ciências ambientais para o Instituto de Tecnologia da Força Aérea *[Air Force Institute of Technology – AFIT]*, Base Aérea Wright-Patterson, Ohio. O Dr. Mackay, da *University of California–Davis, Department of Land, Air, and Water Resources*, levou a cabo muitos estudos de campo referentes às consequências de contaminantes no subsolo, inclusive pesquisa recente acerca do impacto do etanol. O Major Vuong, que recebeu o Mestrado do *AFIT*, atualmente serve de assessor para a Escola de Medicina Aeroespacial da Base Aérea Wright-Patterson *[Air Force School of Aerospace Medicine]*. O Capitão McComb, que também possui um Mestrado do *AFIT*, é chefe de apoio à operações para o 92º Esquadrão de Engenharia *[92nd Engineering Squadron]*da Base Aérea Fairchild, Washington.

Os Impactos Ambientais ao Subsolo

Os sistemas de combustível do *DoD* transportam, com segurança, milhões de galões de combustível de, e a tanques de armazenagem enormes na superfície terrestre e em seu subsolo. Mesmo assim, vazamentos e derrames em todo o sistema continuam a ocorrer, apesar de 100 anos de desenvolvimento tecnológico em armazenagem e distribuição. Cada conexão ao longo de milhares de quilômetros de dutos, cada válvula de controle e cada soldagem em cada um dos tanques são possíveis pontos de vazamento. Esses vazamentos e derrames em tanques de armazenagem, dutos, veículos-tanque e equipamento associado contaminaram o solo e o lençol freático com certa classe de compostos perigosos ao ambiente, denominados hidrocarbonetos aromáticos. Vários, inclusive a benzina, são notórios carcinogênicos.[2] No solo e lençóis freáticos, os níveis de hidrocarbonetos aromáticos, tais como benzeno e outros contaminantes solúveis, bem como contaminantes em forma de vapor são reduzidos, de forma típica, através de processos naturais. A bactéria que ocorre normalmente no subsolo é capaz de transformar os hidrocarbonetos, tais como benzeno, tolueno, etil-benzeno e isômeros de xileno *(BTEX)* e produtos derivados que causam contaminação, tais como o metano, em substâncias não nocivas. Algumas bactérias utilizam esses contaminantes orgânicos – às vezes como agente oxidante em combinação com outros – tais como carbono e fontes de energia (i.e, "nutrientes" essenciais a sua sobrevivência e crescimento).

Como demonstram os dados obtidos em campo, a introdução de combustíveis alternativos à mescla de combustível em vazamento modifica notavelmente a relação ecológica complexa entre a bactéria, *BTEX* e outros contaminantes e oxidantes – aumentando a possibilidade de contaminação do lençol freático. As pesquisas anteriores acerca de tais contaminações com a utilização de técnicas de modelos computadorizados enfocaram-se na habilidade da bactéria em processar os contaminantes *BTEX* na presença de etanol, o combustível alternativo amplamente preferido. Contudo, tais modelos geralmente assumem a presença de oxidantes (oxigênio), em geral não predominante em locais de vazamento de combustível, resultando em um ponto de vista por demais positivo de que existe adequabilidade ambiental para combustíveis alternativos.[3] A pesquisa recente revela um quadro muito mais inquietante.

Um experimento em campo da Força Aérea Vandenberg, Califórnia, produziu resultado surpreendente quando os pesquisadores verificaram a contaminação da superfície que pode ocorrer da lenta liberação da mescla de gasolina e etanol no lençol freático, como a que resulta devido a vazamento de mescla de etanol/gasolina de tanque de armazenagem, difícil de detectar.[4] O estudo em campo foi projetado para comparar a consequência de compostos *BTEX* com ou sem a liberação conjunta com o etanol. Os pesquisadores levaram a cabo dois experimentos simultâneos em um dos lençois freáticos na Vandenberg, onde o sulfato serviu de agente oxidante predominante, como é o caso em muitos locais de vazamento no país.[5] Durante um dos experimentos injetou-se água, de forma contínua, que continha pequenas quantidades (de um a três miligramas por litro [mg/L]) da classe *BTEX* com compostos de benzeno, tolueno e ortoxileno durante nove meses. O segundo desses experimentos simultâneos em local adjacente incluía 500 mg/L de etanol com os compostos *BTEX*. Monitoraram-se os níveis de contaminantes *BTEX*, em particular o de benzeno carcinogênico, juntamente com os níveis de agentes oxidantes (especialmente oxigênio e sulfato), produtos de degradação (inclusive o metano) e no caso do segundo estudo, o etanol. Os resultados do primeiro experimento eram esperados, com a coluna de gás contaminante subterrânea alastrando-se por cerca de quatro meses, após o que a contaminação de benzeno retrocedeu quase por completo, devido a biodegradação causada pela bactéria normal.

O resultado do segundo experimento, em comparação, foi mais impressionante. No segundo local, onde o etanol foi introduzido juntamente com o contaminante benzeno, a

área de contaminação expandiu, como observado durante o primeiro experimento. Contudo, a contaminação de benzeno não retrocedeu tanto. Durante o segundo experimento os níveis de benzeno passaram por degradação mais lenta, gerando enorme quantidade de metano, uma vez que a bactéria nativa mudou de atividade em presença do etanol, cuja degradação é mais fácil. Esse fenômeno também ocorreu em tipos de bactéria que utilizam o sulfato como oxidante, o que é mais comum, bem como os tipos de micróbios que podem biodegradar os contaminantes sem um oxidante (alguns produzem metano). Esse resultado comprovou a hipótese de que as suposições do modelo de computador original não se aplicam a todos os casos e que os resultados dos experimentos de campo reais oferecem perspectiva mais útil à capacidade de processos naturais de desintoxicação de compostos em presença do combustível etanol, o mais preferido. O experimento em campo também demonstrou que o etanol pode entrar em degradação, criando quantidades notáveis de metano. Em vazamentos reais com quantidades muito maiores de etanol do que as liberadas durante o experimento, a geração de metano ao redor do combustível derramado criaria enorme infiltração deste gás inflamável no solo. Se o metano em si não for oxidado pelos micróbios nativos já existente no solo, em certas circunstâncias, os derrames de biocombustíveis podem levar à mesclas de gás explosivo que alcançarão o subsolo de edifícios, infraestruturas subterrâneas ou a superfície.

A adição de etanol ao petróleo parece reduzir o índice de biodegradação de compostos *BTEX* nocivos. Além do mais, os contaminantes persistem durante maior período de tempo, movimentando-se por grandes distâncias daquelas antecipadas em modelos anteriores. Em suma, essa descoberta foi irrefutável, dada a prova clara e detalhada de local bastante típico de vazamento. Podemos agora utilizar modelos computadorizados mais eficazes, para extrapolar, projetando os resultados em campo a outros cenários fora dos examinados durante os experimentos. Os pesquisadores do Instituto Tecnológico da Força Aérea *[Air Force Institute of Technology-AFIT]* desenvolveram um desses modelos que incorporava os processos importantes revelados durante os estudos da Vandenberg. As simulações demonstraram o efeito a longo prazo ao se adicionar etanol a combustível. Os pesquisadores utilizaram o modelo para simular dois vazamentos que duraram 30 anos. Um deles somente para o benzeno e o outro para uma mescla de benzeno e etanol. O modelo confirmou os dados do experimento em campo: após simular 30 anos, a coluna de benzeno com etanol é notavelmente mais longa do que a daquela sem o etanol.

O butanol, um tipo de álcool que é um dos candidatos alternativos a ser adicionado a bicombustível, oferece certas vantagens quando comparado ao etanol. A densidade de energia do butanol é quase equivalente à da gasolina, enquanto a densidade da energia do etanol é 34 por cento mais baixa.[6] Comparado ao etanol, o butanol é menos volátil e corrosivo, possui menor afinidade à água e é compatível às infraestruturas de oleodutos e armazenagem de combustível.[7] O butanol é similar à gasolina, o suficiente, para poder ser "utilizado diretamente em qualquer motor à gasolina sem necessitar de modificações ou substituições".[8] Baseado em tal fato e levando em consideração o estudo anterior da Vandenberg que examinou os efeitos do etanol no lençol freático, os pesquisadores da *AFIT* levaram a efeito simulações, a fim de investigar o que sucederia se o butanol fosse utilizado como biocombustível. Infelizmente, o uso de suposições que pareciam razoáveis quando os pesquisadores baseavam-se em pesquisa de laboratório e antiga execução de modelo, chegaram à previsão de que o butanol teria impacto ainda mais negativo do que o etanol na consequência do benzeno, o composto em gasolina mais nocivo.[9] Entretanto, os pesquisadores deviam investigar muitas suposições, a fim de levar a cabo as simulações. Dada a importância do problema, cremos que merece pesquisa em campo em meios geológicos reais para oferecer perspectivas e confirmar ou refinar as suposições do modelo, antes que possamos formular uma previsão mais confiá-

vel dos efeitos ao ambiente causados por combustíveis que contém butanol.

A Probabilidade de Acúmulo de Detrito Biológico *[Biofouling]*

Além de efeitos subterrâneos, aparentemente o aumento em uso de biocombustíveis resultaria em problemas curiosos mas extremamente importantes em acúmulo de detrito biológico: a deterioração micróbica do combustível. As características de combustão dos biocombustíveis assemelham-se de perto às de combustíveis à base de petróleo. Entretanto, são bem distintas em sua composição química.[10] Os biocombustíveis (tais como bio*diesel*) incluem componentes que possuem ambas as características: mais solúveis em água e maior degradação microrgânica. Atualmente, os operadores de dependências de combustível em oleodutos, tanques de armazenagem e caminhões-tanque prestam atenção para evitar o menor contacto possível entre a água e o combustível, devido a possível acúmulo micróbico onde existe a mescla de água e combustível. Contudo, é impossível excluir completamente a água de tais sistemas. A simples ventilação atmosférica e a condensação relacionada de fontes de ar úmido são focos de umidade que podem terminar como água em forma líquida nos sistemas de combustível. Baixos níveis de deterioração de combustível e acúmulo micróbico, que agora ocorrem, são problemas persistentes, às vezes críticos para os que lidam com combustível. Provavelmente, não existe sistema de combustível que esteja completamente livre de micróbios e da possibilidade de deterioração.

Embora seja possível que provas práticas típicas não consigam detectar organismos em combustível, durante muitos anos o *AFIT* leva a cabo pesquisa de laboratório e em campo para investigar a qualidade de micróbios em combustível. Os pesquisadores do *AFIT* e do Laboratório de Pesquisa da Força Aérea *[Air Force Research Laboratory]* determinaram que não existe um organismo predominante na população coletada de tanques de combustível de aviões e que existe, relativamente, pouca sobreposição na composição de populações de micróbios de diferentes regiões geográficas ou tipos de combustível aéreo.[11] Muitas espécies distintas de bactéria e fungo podem metabolizar os componentes do combustível, resultando em notável degradação em qualidade e possível avaria aos componentes do sistema de combustível, devido a entupimento e corrosão. Esse fato indica que o problema de possível deterioração possui facetas múltiplas, mas a pesquisa elucidou que os agentes micróbicos culpáveis mais comuns permitem melhor percepção em como reduzir o dano à qualidade.

A maior solubilidade de água e degradação de componentes em biocombustíveis magnificam o potencial de acúmulo já documentado em combustíveis convencionais. Os problemas ridículos atuais podem piorar, com o uso cada vez maior de biocombustíveis. A deterioração de dependências de armazenagem e transporte resultariam em dilema importante e caro. A deterioração de aeronaves teria consequências trágicas. Na verdade, no final da década de 50, no mínimo um acidente foi parcialmente atribuído a sistema de combustível entupido por micróbios.[12] Felizmente, após o acidente, foi descoberto que o líquido utilizado para descongelar o combustível possuía grande capacidade anti-micróbica, eliminando, assim, o problema durante muitos anos. As mudanças em composição de combustível *(JP-4 v. JP-8)* e os descongelantes, devido a inquietude decorrente de toxicidade, ocasionaram a volta da contaminação micróbica. O maior uso de biocombustível aumentaria ainda mais a possibilidade de contaminação micróbica e deterioração. Sem dúvida, devemos identificar os tipos de micróbios que possuem maior probabilidade de apresentar grandes problemas aos novos combustíveis antes que se torne em situação crítica. Além do mais, a pesquisa deve ser capaz de identificar os melhores meios de minimizar a deterioração de novos combustíveis para as diferentes dependências pertinentes. Por exemplo, pode ser que os sistemas de alto fluxo sejam relativamente fáceis de manter limpos, simplesmente porque são dinâmicos. O combus-

tível já passou pelos mesmos antes que os problemas tenham tempo de aparecer. Os tanques de armazenagem estática a longo prazo, contudo, como aqueles associados aos sistemas de geradores de energia de emergência, apresentariam sérias dificuldades com contaminação e deterioração.

No mínimo, o uso de biocombustível vai requerer monitoramento mais intensivo e gerenciamento interno mais rigoroso de parte do pessoal pertinente. A prevenção de catástrofe exige empreendimentos que vão além do nível requerido para os de base a petróleo, bem como nova pesquisa, a fim de suprir o conhecimento fundamental para apoiar tais tentativas.

Recomendações

A pesquisa mais recente indica, de forma clara, que os biocombustíveis apresentam possível ameaça ao solo e lençóis freáticos e os derrames levariam à grande geração de metano, aumentando a persistência de compostos cancerosos no suprimento de água, tais como o benzeno. Além do mais, uma vez que o benzeno e outros contaminantes passam por degradação mais lenta na área de vazamento em presença de biocombustíveis, a coluna de contaminação pode percorrer vastas distâncias antes que os processos biológicos consigam reduzir os níveis de contaminantes. Finalmente, devido ao fato dos biocombustíveis serem mais higroscópicos e biodegradáveis do que os atuais, pode ser que os consumidores e os sistemas de armazenagem e distribuição venham experimentar maior degradação durante as missões, devido a acúmulo de microrganismos.[13] Reconhecemos a urgência em passarmos a utilizar biocombustíveis, mas sugerimos que ao fazê-lo, criamos a necessidade, também urgente, de pesquisa, a fim de obtermos o conhecimento necessário para adaptar as práticas de gerenciamento de combustível e os protocolos de segurança, mantendo os altos padrões de proteção às dependências, equipamento, pessoal e ao ambiente. Assim, recomendamos as seguintes ações para mitigar possível contaminação de água e solo, bem como acúmulo de microrganismos em sistemas de gerenciamento:

1. Desenvolver tecnologia, a fim de reduzir, monitorar e mitigar vazamentos e derrames, projetando-os especificamente para sistemas de distribuição e armazenagem. Esse processo inclui o aperfeiçoamento de peças e conexões essenciais às dependências de processamento, distribuição, armazenagem e consumo, a fim de assegurar que as fontes de vazamento mais prováveis sejam modificadas para assegurar compatibilidade com a nova mescla.

2. Expandir a pesquisa que fomenta a compreensão fundamental dos efeitos ao ambiente e o potencial de acúmulo de microrganismos.

Conclusão

Os empreendimentos da Força Aérea em pesquisa e desenvolvimento de plataformas compatíveis, a fim de fazer face às metas do *DoD* em redução de uso de energia, são razoáveis, dada as óbvias vantagens oferecidas pelos biocombustíveis. Contudo, ainda não compreendemos bem as desvantagens. Somente quando os pesquisadores investigaram as suposições dos modelos computerizados com estudos em campo, em local de experimentos que representavam a situação real na Base Aérea Vandenberg foi que surgiu o potencial de contaminação ambiental. O estudo claramente demonstra que a contaminação por carcinogênicos, tais como o benzeno persistiriam e expandiriam na presença de etanol, desaparecendo em sua ausência.[14] Do mesmo modo, a pesquisa em laboratório da *AFIT* foi elemento crucial para compreendermos o acúmulo de microrganismos em combustíveis à base de petróleo, sugerindo que isso virá a ser ainda mais sério no caso de biocombustíveis. Devido ao fato de que o *DoD* não apoiou outras pesquisas referentes a esses tópicos críticos é imperativo que a Força Aérea investigue o assunto mais a fundo.

No futuro, a liderança irá confrontar uma série de decisões acerca do tipo e mescla de

biocombustíveis que as frotas aéreas e terrestres devem utilizar. Atualmente, a Força Aérea leva a cabo pesquisa para facilitar as decisões em certas áreas, tais como a compatibilidade de mesclas de combustíveis alternativos com sistemas para usuários finais de motores e turbinas. Contudo, os pesquisadores ainda não exploraram suficientemente outras questões importantes, tais como as que dizem respeito à inferências ambientais e acúmulo de microrganismos "não óbvias". No mínimo, a Força Aérea deve apoiar demais pesquisas em campo, a fim de aperfeiçoar a maneira como compreendemos os prováveis efeitos de biocombustíveis no subsolo, a fim de criar oportunidades para o desenvolvimento de novos métodos para monitorar e remediar tais efeitos. A Força também deve continuar a investigar a deterioração micróbica e a desenvolver métodos para mitigar a situação. Se o *DoD* e a Força Aérea forem obrigados a utilizar biocombustíveis antes da conclusão de novas pesquisas, recomendamos a monitoria de certos locais de armazenagem e utilização em muitíssimos maiores detalhes do que o normal, talvez como projeto de "pesquisa aplicada", a fim de identificar e isolar o significado das questões que acabamos de levantar. Somente após pesquisa em laboratório e em campo bem controlada o *DoD* e a Força Aérea ficarão cientes da situação, desenvolvendo nova tecnologia que permitiria aos líderes superiores uma tomada de decisão bem mais informada, evitando, assim, surpresas desagradáveis.

Base Aérea Wright-Patterson, Ohio
University of California–Davis
Base Aérea Fairchild, Washington

Notas

1. Air Force Policy Memorandum 10-1.1, *Air Force Energy Program Policy Memorandum*, 16 June 2009, 6–7, acessado em 13 Janeiro 2010, http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA502661.

2. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, *2003 TLVs and BEIs: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices* (Cincinnati: ACGIH, 2003), 15.

3. Diego E. Gomez e Pedro J. J. Alvarez, "Modeling the Natural Attenuation of Benzene in Groundwater Impacted by Ethanol-Blended Fuels: Effect of Ethanol Content on the Lifespan and Maximum Length of Benzene Plumes," *Water Resources Research* 45 (2009): W03409, doi:10.1029/2008WR007159.

4. Douglas M. Mackay et al., "Impact of Ethanol on the Natural Attenuation of Benzene, Toluene, and O-xylene in a Normally Sulfate-Reducing Aquifer," *Environmental Science and Technology* 40, no. 19 (2006): 6123–30.

5. Todd H. Wiedemeier et al., *Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface* (New York: John Wiley and Sons, 1999), 213–18.

6. A densidade é igual à energia por volume de unidade.

7. Lawrence P. Wackett, "Microbial-Based Motor Fuels: Science and Technology," *Microbial Biotechnology* 1, no. 3 (2008): 211–25; e Adriano P. Mariano et al., "Aerobic Biodegradation of Butanol and Gasoline Blends," *Biomass and Bioenergy* 33, no. 9 (September 2009): 1175–81.

8. Sang Yup Lee et al., "Fermentative Butanol Production by Clostridia," *Biotechnology and Bioengineering* 101, no. 2 (2008): 210.

9. Capt Khai H. Vuong, "Modeling the Fate of Groundwater Contaminants Resulting from Leakage of Butanol-Blended Fuel," AFIT/GES/ENV/10-M06 (tese, Department of Systems and Engineering Management, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, OH, March 2010), acessado em 13 Janeiro 2011, https://www.afresearch.org/skins/rims/q_mod_be0e99f3-fc56-4ccb-8dfe-670c0822a153/q_act_downloadpaper/q_obj_2262ab9b-e4ad-49da-ba4a-43c31778618f/display.aspx?rs=publishedsearch.

10. Jared A. DeMello et al., "Biodegradation and Environmental Behavior of Biodiesel Mixtures in the Sea: An Initial Study," *Marine Pollution Bulletin* 54, no. 7 (2007): 894–904.

11. Michelle E. Rauch et al., "Characterization of Microbial Contamination in United States Air Force Aviation Fuel Tanks," *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology* 33, no. 1 (2006): 29–36; e Lisa M. Brown et al., "Community Dynamics and Phylogenetics of Bacteria Fouling Jet A and JP-8 Aviation Fuel," *International Biodeterioration and Biodegradation* 64, no. 3 (June 2010): 253–61.

12. Viola H. Finefrock e Sheldon A. London, *Microbial Contamination of USAF JP-4 Fuels*, Technical Report AFAPL-TR-66-91 (Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Aero Propulsion Laboratory, 1966), 1, acessado em 13 Janeiro 2011, http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=AD809366&Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf.

13. *Hygroscópico* refere-se à habilidade de absorver água do ambiente à sua volta.

14. Mackay et al. "Impact of Ethanol," 6123–3

As opiniões expressas ou insinuadas nesta revista pertencem aos seus respectivos autores e não representam, necessariamente, as do Departamento de Defesa, da Força Aérea, da Universidade da Força Aérea ou de quaisquer outros órgãos ou departamentos do governo norte-americano.