

A cadeia de biogás e a sustentabilidade local: uma análise socioeconômica ambiental da energia de resíduos sólidos urbanos do aterro da Caximba em Curitiba

Christian Luiz da Silva*, Josélia Maria de Oliveira Rabelo**, Vlândia das Chagas Bezerra Ramazzotte***, Luciano Fernando dos Santos Rossi**** & Harry Alberto Bollmann*****

resumo

As fontes de energia a partir recursos renováveis, como o biogás gerado a partir de resíduos urbanos, são opções estratégicas em debate, mas ainda pouco representativa na matriz energética mundial e brasileira. Demandam-se estudos para avaliar a viabilidade do uso dessas fontes renováveis e o impacto socioeconômico e ambiental. O objetivo deste artigo é avaliar a viabilidade da geração de energia a partir da cadeia de biogás gerado no aterro sanitário da Caximba, em Curitiba, sob a ótica da sustentabilidade socioeconômica ambiental. A pesquisa tem caráter exploratório e é aplicada, a partir do método de análise de estudo de caso da cadeia de biogás do aterro sanitário da Caximba, em Curitiba, que tem cerca de 8 milhões de toneladas de lixo depositadas. Como resultado, verificou-se que baixas escalas de produção não tornam viáveis economicamente a produção de energia renovável nas condições tecnológicas definidas no caso estudado, mas o uso combinado com a venda de crédito de carbono torna a produção de biogás viável economicamente, ambientalmente e socialmente.

Palabras clave: cadeia de biogás; gestão de resíduos urbanos; sustentabilidade; Curitiba; energia

resumen

La cadena del biogás y la sustentabilidad local: Un análisis socioeconómico y ambiental de la energía de los residuos sólidos urbanos del relleno de Caximba en Curitiba

Las fuentes de energía que se derivan de los recursos renovables, como el biogás generado en los residuos urbanos, son opciones estratégicas en debate, pero aún poco representativas en la matriz energética mundial y brasileña. El objetivo de este artículo es evaluar la viabilidad de generación de energía a partir de la cadena del biogás que se produce en el relleno sanitario de Caximba en Curitiba, considerando su sostenibilidad socioeconómica y ambiental. La investigación tiene un carácter exploratorio y se aplica a partir del análisis de la cadena de biogás del relleno sanitario de Caximba, en Curitiba (Paraná, Brasil). Los resultados de la investigación muestran que la generación de energía renovable no es viable económicamente bajo las condiciones tecnológicas que definen el caso estudiado, debido a sus bajas escalas de producción. No obstante, si el esquema se combina con la venta de crédito de carbono, la producción de biogás se convierte en una opción económica, ambiental y socialmente sostenible.

Palabras clave: Cadena de Biogás; Gestión de Residuos Urbanos; Sostenibilidad; Curitiba; energía

abstract

The biogas chain and local sustainability: an environmental socioeconomic analysis of energy obtained from urban solid-waste from the Caximba land-fill in Curitiba, Paraná, Brazil

Urban solid waste-derived renewable energy sources are currently being discussed as strategic choices; however, they have not yet been significantly included in world and/or Brazilian energetic matrixes. Feasibility studies must be carried out on the use of renewable sources and on related socioeconomic and environmental impacts. The research method was exploratory and was aimed at assessing the feasibility of generating energy from the Caximba (Paraná, Brazil) sanitary landfill biogas chain, taking its socioeconomic and environmental sustainability into consideration; this landfill contains around 8 million tons of solid waste. The results showed that generating renewable energy was not economically feasible in the technological conditions defined by this case-study due to the plant's low-scale production. However, biogas production could become economically, environmentally and socially feasible if combined with carbon credit trading.

Key words: biogas chain, urban waste management, sustainability, Curitiba, energy.

résumé

La chaîne de biogaz et la soutenabilité locale : une analyse socioéconomique et environnementale de l'énergie des déchets solides urbains de la décharge de Caximba à Curitiba

Les sources d'énergie dérivant de ressources durables, comme le biogaz issu de déchets urbains, sont des options stratégiques en débat peu représentatives dans la production énergétique mondiale et brésilienne. Cet article a pour objectif d'évaluer la viabilité de la génération d'énergie à partir de la chaîne de biogaz produite dans la décharge sanitaire de Caximba à Curitiba, considérant sa soutenabilité socioéconomique et environnementale. La recherche a un caractère exploratoire et est appliquée à partir de l'analyse de la chaîne de biogaz de la décharge sanitaire de Caximba à Curitiba (Paraná, Brésil). Les résultats de la recherche indiquent que la génération d'énergie renouvelable n'est pas viable économiquement dans les conditions technologiques définies par le cas étudié en raison de son niveau peu élevé de production. Cependant, si le schéma se combine avec la vente de crédit de carbone, la production de biogaz devient une option économique, environnementale et sociale durable.

Mots-clés: Chaîne de Biogaz, Gestion de Déchets Urbains, Soutenabilité, Curitiba, Énergie

Clasificación JEL: Q56, Q42, Q27. Recibido: diciembre de 2008 Aprobado: abril de 2009

Correspondencia: Christian da Silva, Rua Pedro Wobeto, 14 Boqueirão, CEP 81670310, Curitiba, PR, Brasil.

* É doutor em engenharia de produção, pós-doutor em Agonegócios, professor do doutorado de Gestão Urbana da PU-CPR e professor da UTFPR, pesquisador do CNPq e da Fundação Araucária.
E-mail: christianlsilva@uol.com.br

** É mestre em Administração pela UFPR e professora da UTFPR.
E-mail: oliveira_joselia@hotmail.com.

*** É mestranda em Engenharia Mecânica pela UTFPR e Tecnóloga Mecânica pela UTFPR.
E-mail: Vramazotte@Yahoo.Com.Br

**** É doutor em engenharia mecânica pela Unicamp, professor da UTFPR.
E-mail: lfrossi@utfpr.edu.br

***** É doutor em engenharia sanitária, professor do doutorado de Gestão Urbana da PUCPR.
E-mail: harry.bollmann@pucpr.br



Silva, C.L., Rabelo, J.M., Ramazzotte, V., Rossi, L.F. & Bollmann, H.A. (2009). A cadeia de biogás e a sustentabilidade local: uma análise socioeconômica ambiental da energia de resíduos sólidos urbanos do aterro da Caximba em Curitiba. *Inovar*, 19(34), 83-98.

Introdução

A grande evolução tecnológica trouxe soluções e problemas, e para estes se busca incessantemente alternativas. Assim como possibilitou soluções que proporcionaram maior conforto, demandou mais fontes energéticas, que gerou problemas por não serem renováveis e por trazerem um impacto negativo para o meio-ambiente. As fontes atuais de energia já não são suficientes para sustentar o processo de crescimento da riqueza mundial. O relatório da *British Petroleum* (2007), intitulado Revisão Estatística de Energia Mundial de 2007, afirma que, considerando as reservas mundiais de petróleo comprovadas até final de 2006 e a manutenção do nível de produção mundial igual ao de 2006, haveria petróleo por mais 40,5 anos no mundo e as reservas brasileiras durariam em torno de 18,5 anos.

O Plano Nacional de Agroenergia sintetiza esses pontos mencionados como os principais fatores de incentivo ao desenvolvimento tecnológico a partir da biomassa energética, quais sejam: mudança climática e preocupação com a poluição; reconhecimento da biomassa como alternativa para alternativa ao petróleo; crescente demanda de energia e altas taxas recentes de uso da biomassa energética; altas taxas de poluição associada ao preço dos combustíveis fósseis, tornando-os progressivamente mais caros; disputas nacionais pela oferta e demanda do produto, em razão da concentração localizada das reservas.

apresenta No Plano Nacional de Agroenergia de 2006 a 2011, Roberto Rodrigues (2005) afirma ser a agricultura efetivamente uma alternativa socioeconômica ambiental para geração de energia. O autor complementa dizendo que

A produção de agroenergia, em larga escala, além da redução de custos em relação ao petróleo, apresenta vantagens ambientais, e gera renda e emprego no setor rural. Em outras palavras, promove o desenvolvimento sustentável do interior do Brasil, em especial nas regiões remotas (2005).

Dentre as prioridades do programa ressalta-se a diretriz de desenvolvimento de equipamentos para geração de energia elétrica movidos a biogás e desenvolver tecnologias para o aproveitamento energético de resíduos da produção agrícola, pecuária, florestal e agroindustrial. (MAP, 2005).

A questão é justamente como promover esse desenvolvimento sustentável sem lograr produzir em larga escala. Apesar do apelo socioambiental, a produção de energia é viável a partir fontes renováveis? Estas questões práticas demandam respostas para que se possa efetivamente transformar promessas futuras em reali-

zações no presente, ou migrar para tecnologias alternativas que possibilitem enfrentar os problemas que limitarão o processo de crescimento econômico.

Procura-se, com este artigo, avaliar justamente uma dessas alternativas, incluída na proposta do Plano Nacional de Agroenergia: o biogás. A presença dessa fonte de energia em aterros pode constituir-se em um aproveitamento e desenvolvimento tecnológico pela transformação de parte dos resíduos em energia renovável. O objetivo deste artigo é avaliar a viabilidade da geração de energia a partir da cadeia de biogás produzido no aterro sanitário da Caximba em Curitiba sob a ótica da sustentabilidade socioeconômica ambiental.

Este estudo limita-se a este caso por considerar importante a avaliação de uma prática socioeconômica e ambiental sustentável a partir da proposta de nova matriz energética, identificando os gargalos e potencialidades.

A pesquisa tem caráter exploratório e é aplicada (Gil, 1999), a partir do método de análise de estudo de caso (Yin, 1994), por fazer a avaliação da viabilidade de uma única alternativa, com coleta de dados secundários sobre energia e gestão de resíduos. Coletaram-se também informações por meio de uma entrevista não estruturada com o responsável pelo aterro sanitário da Caximba para obter detalhes sobre a cadeia de recebimento e destino dos resíduos. A metodologia será detalhada na terceira seção.

Além desta introdução, o artigo está organizado em outras cinco seções. A próxima seção conceitua sustentabilidade com enfoque para relação socioeconômica ambiental e a importância relativa da energia e dos resíduos neste processo, e a alternativa do biogás. A metodologia da pesquisa é detalhada na terceira seção. A quarta seção descreve a cadeia de produção do biogás e define a tecnologia que será utilizada neste estudo. A quinta trata do estudo de caso, com detalhamento dos cálculos, resultados e análise. Na sexta seção apresentam-se as conclusões e propõem-se novos trabalhos.

Sustentabilidade: energia e resíduos na dialética relação entre econômico, social e ambiental

A busca por alternativas energéticas e a melhor utilização dos recursos existentes são bases para o alcance de um processo de desenvolvimento sustentável. A fundamentação tratará primeiro do conceito de sustentabilidade e a importância da energia neste processo, bem como a alternativa da gestão de resíduos municipais como nova fonte renovável de energia (Hinrichs

e Kleinbach, 2003; Braga et al., 2003; Mercado e Córdova, 2005; Silva, 2005; Vivien, 2005; Norton, 2005; Blakely, 2004; Soto Torres e Fernandez Lechón, 2006; Furtado, 2003; Guillén, 2004). A segunda parte definirá e caracterizará os resíduos sólidos urbanos, que serão a fonte primária básica utilizada para o estudo de caso realizado.

Energia e a busca pela sustentabilidade socioeconômica e ambiental

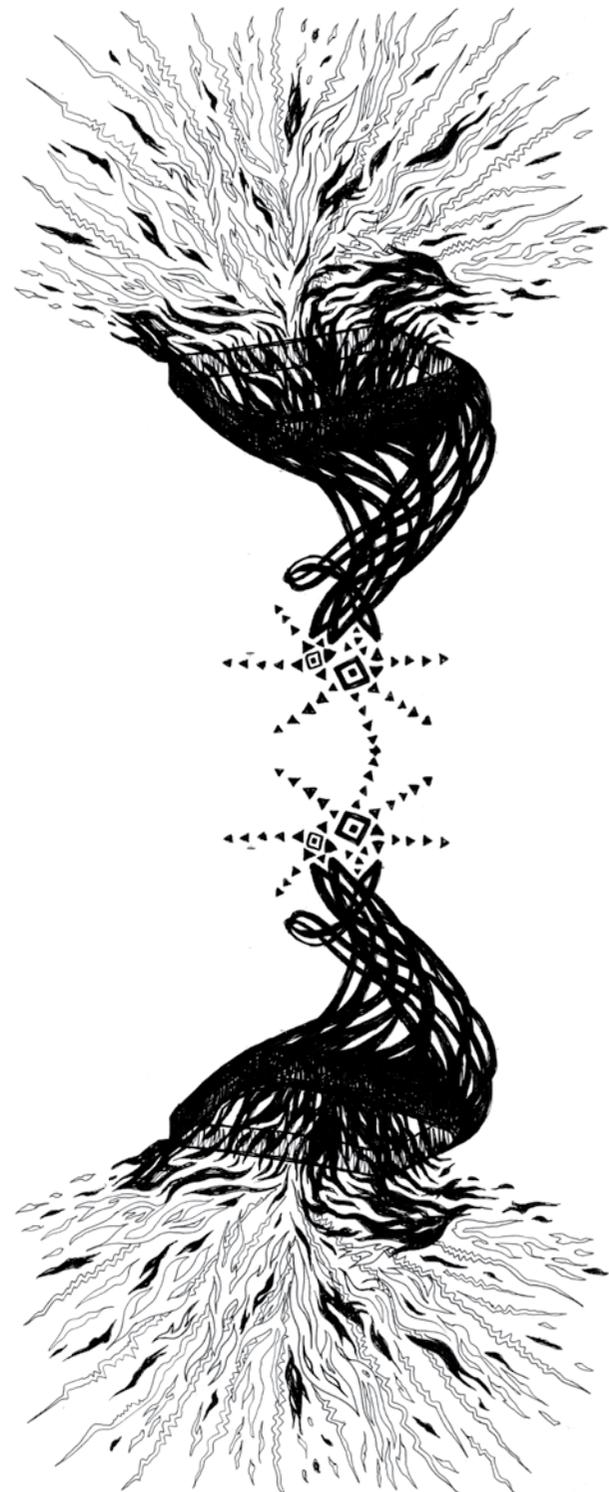
O crescimento econômico e os altos padrões de vida são processos complexos que compartilham da necessidade de um abastecimento adequado e confiável de energia, que se origina do meio-ambiente. A instabilidade socioeconômica e ambiental freqüentemente tem sua origem na busca ou disputa por novas fontes energéticas, por ser considerado item relevante para a soberania nacional.

Hinrichs e Kleinbach (2003, p. 3) tratam da complexa relação entre energia e a sustentabilidade socioeconômica e ambiental:

o uso adequado da energia requer que se leve em consideração tanto as questões sociais como as tecnológicas. De fato, o crescimento econômico sustentável neste século (...) apenas pode ser possível com o uso planejado e eficiente dos limitados recursos energéticos e o desenvolvimento de novas tecnologias de energia.

A crise do processo de crescimento sustentável nas condições energéticas põe em questão a continuidade desse modo de produção e reprodução do sistema capitalista. Braga et al. (2005, p. 216) reforça que “o desenvolvimento de nossa sociedade urbana e industrial, por não conhecer limites, ocorreu de forma desordenada, sem planejamento, á custa de níveis crescentes de poluição e degradação ambiental”. Estes limites começaram a serem considerados no Clube de Roma e na reunião de Estocolmo em 1972, quando se estabeleceu um ambiente de discussão entre a controversa relação entre a dimensão econômica e a ambiental. Após 35 anos de discussão sobre o conceito, o crescimento médio do PIB mundial foi aproximadamente 3% ao ano, e a desigualdade de renda aumentou na maioria dos países (FMI, 2007). Em contrapartida, os problemas ambientais continuaram aumentando, resultando nos alertas do IPCC em 2007 com relação ao aquecimento global e aos limites próximos do processo atual de desenvolvimento (IPCC, 2007).

Mercado e Córdova (2005) recontam a história controversa entre o desenvolvimento sustentável e a indústria, e mostram diversos dilemas e diferenças entre o discurso e a prática do desenvolvimento sustentável. Os autores exemplificam com a ampliação da preocu-



pação ambiental pela sociedade, inclusive com objetivo de propor novas formas de produção e consumo. Em contrapartida, houve uma perda de oportunidades fundamentadas por pressões do mercado e diminuição do respaldo do Estado.

Silva (2005, p. 15) avança sobre essa controvérsia e argumenta que “a diferença entre o discurso e a prática ainda continua gerando conflito porque, em ambas

óticas (capitalista e ambientalistas), ao refletir sobre o longo prazo, a zona de negociação é menos árida do que no curto prazo”. Essa diferença entre o discurso e a prática do desenvolvimento sustentável é minimizada no âmbito da discussão, segundo Vivien (2005, p. 4), pela sua retórica dominante, tendo em vista que o desenvolvimento sustentável é apresentado como a solução dos problemas das sociedades contemporâneas, mas há um sentido de alinhar os argumentos contraditórios e diminuir os conflitos.

Para lidar com esse distanciamento entre a teoria e a prática, Norton (2005, p. 356) afirma que se deve ressaltar a interdependência entre os diversos campos das ciências, de forma multidisciplinar, e ter uma orientação para a questão local na discussão sobre a sustentabilidade. Afirma o autor que a orientação local e a ênfase sobre os problemas atuais encorajam um pensamento sintético e prático. Blakely (1994, p. 49) menciona que o desenvolvimento local representa não apenas uma nova retórica, mas uma importante alternativa que associa as atividades econômicas com o local.

Soto Torres e Fernandez Lechón (2006) contribuem com a importância da questão local no processo de discussão do desenvolvimento ao ressaltar que este é um processo dependente dos recursos pertencentes, das decisões tomadas e dos acontecimentos passados. As ações presentes pertencem à história e implicam o futuro, ao considerar o processo de desenvolvimento local somente resultado dos recursos disponíveis e da sua perfeita combinação.

A mudança dos objetivos e do padrão de vida do homem a partir do século XX é expresso pelo aumento do seu consumo de energia. Esse aumento é expresso por Guillén (2004, p. 71) ao fazer uma equivalência energética entre o que o ser humano precisa consumir e o que efetivamente consome, e mostra que “no século XVIII, um cidadão médio consumia 2500 watts, de modo que um norte-americano no século XX equivale, em termos de consumo, a 10 cidadãos do século XVIII”. Esse processo de desenvolvimento necessita, portanto, de energia. A crença que o crescimento econômico significaria aumento da quantidade de energia usada – o primeiro é sustentado indefinidamente pelo segundo – era fortemente defendida até década de 1990 (Hinrichs e Kleinbach, 2003; Furtado, 2003).

Os países desenvolvidos, que alimentavam a crença do crescimento energético infindável, principalmente após o ciclo positivo pós-segunda guerra mundial, foram responsáveis pelas mudanças e inovações para desmistificar o paradigma energético. Isso resultou na queda da relação entre consumo energético e crescimento do PIB, seja pelo aumento da eficiência energética dos equipamentos pelas mudanças na estrutura

produtiva (Furtado, 2003, p. 7). Como cita Furtado, as mudanças e inovações ocorreram na demanda (eficiência energética e estrutura produtiva), não na oferta de energia.

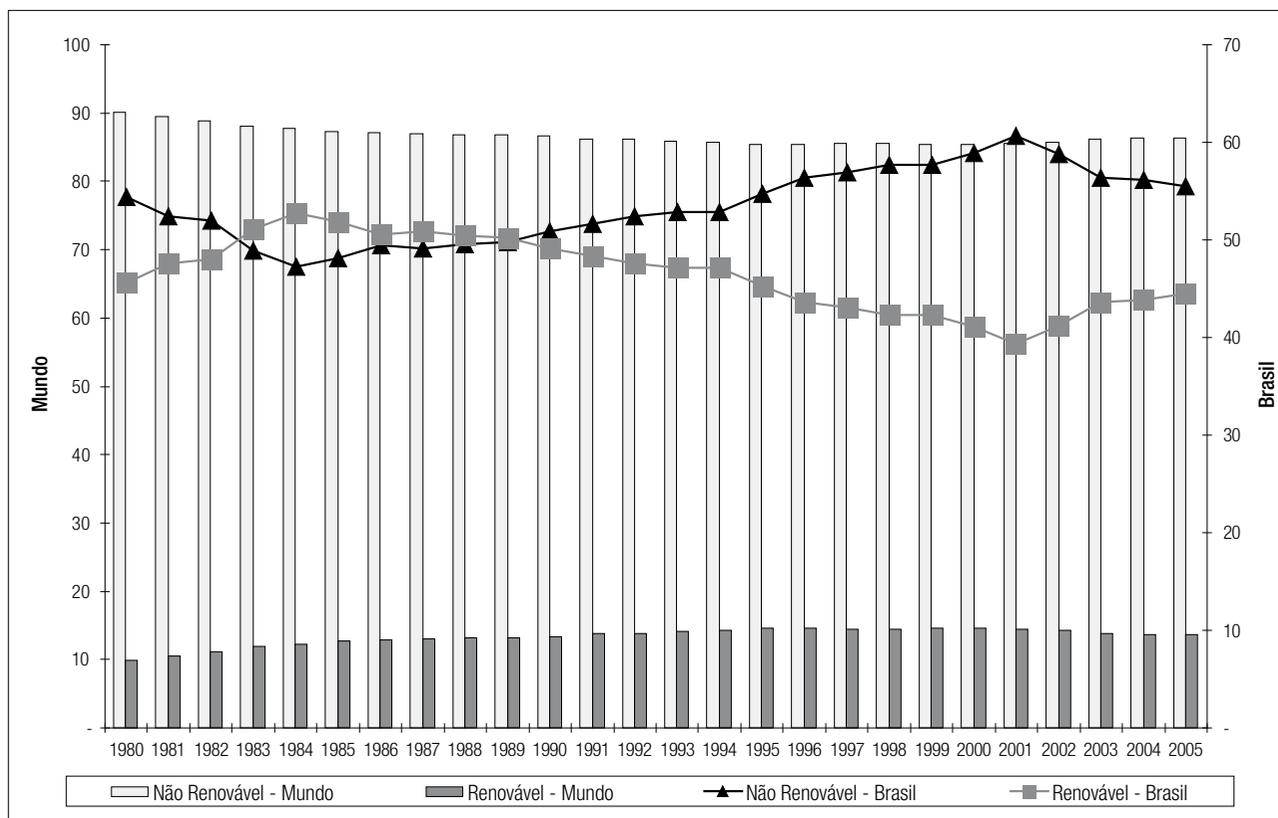
As fontes de energia para esse processo de desenvolvimento ainda são as não renováveis. De acordo com a Administração de Informações de Energia –EIA (2007), responsável pelas estatísticas americanas oficiais relativas à energia, apenas 14% do consumo global de energia é de fontes renováveis, principalmente energia hidroelétrica e nuclear (aproximadamente 90% das fontes renováveis). O crescimento foi sustentado praticamente pelo petróleo e o gás natural, que compuseram aproximadamente 60% da energia primária consumida entre 1980 e 2005. Contudo, há pequena mudança na participação relativa destas duas fontes. Enquanto o petróleo reduziu sua participação de 40% em 1985 para 36% em 2005, o gás natural aumentou de 20 para 24% neste período.

As fontes renováveis são aquelas que não podem ser esgotadas, como a hídrica, eólica, a solar e a biomassa. No Brasil, a fonte renovável (hidráulica, cana de açúcar e outros) é um pouco mais representativa, mas menor que a não renovável (petróleo e derivados, carvão, urânio, lenha e gás). Enquanto na década de 1970 a fonte renovável era muito superior, principalmente pelo uso da lenha (64% da produção de energia primária), em 2005 representava 47,3%. O petróleo, contudo, aumentou de 16% da produção de energia primária em 1970 para 42% em 2005. Isso mostra uma mudança na matriz energética, intensificando a dependência de combustível fóssil, que tem maior impacto ao meio ambiente (gráfico 1).

A partir de dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2007), pode-se exemplificar mostrando que enquanto o consumo de energia cresceu a 3,7% ao ano entre 1970 e 2000, as emissões de CO₂, associadas ao uso de fontes energéticas, cresceram 3,3% ao ano.

Esses impactos e o contexto dialético entre os impactos socioeconômico e os ambientais aumentaram a importância pela busca de novas fontes energéticas, reaproveitando os recursos disponíveis. Lidar apenas com inovações na demanda por energia não seria suficiente para criar mecanismo de sustentação de um processo de desenvolvimento. Neste aspecto, a busca pelo desenvolvimento de novas fontes renováveis abre espaço para novas experiências e inovações que demandam uma avaliação econômica, social e ambiental. Uma destas fontes é a biomassa, alternativa de solução de dois problemas urbanos atuais: energia e resíduos sólidos.

A energia de biomassa é derivada de matéria viva, como os grãos, as árvores e as plantas aquáticas, além

GRÁFICO 1. Consumo de energia primária por tipo de fonte no Brasil e no mundo, 1980–2005.


FORNTE: EIA, 2007; Ministério de Minas e Energia (MME), 2007

de ser encontrada nos resíduos agrícolas, florestais e de sólidos municipais. A energia de biomassa representou apenas 3,2% do consumo total de energia nos Estados Unidos em 2005 (EIA, 2007); no Brasil representa menos de 2,2% (MME, 2007).

Apesar de pouco representativo, o uso dos resíduos sólidos municipais incrementou-se significativamente na década de 1990 devido a um incentivo legal para produção de energia desta fonte nos Estados Unidos. Em 1960, quase 94% do resíduo sólido era descartado, seja para incineração ou para outra alocação, como aterros. Neste período, não havia produção de energia a partir dos resíduos. Este cenário se alterou a partir da década de 1990 quando a reciclagem, bem como a produção de energia, passou a ter importância na disposição dos resíduos sólidos municipais americanos. Do total dos resíduos, em torno de 15% era utilizado para produção de energia e 15% era reciclado. Em 2005, 34% dos resíduos era material recuperado (reciclados e orgânicos que retornavam como adubos e fertilizantes) e 14% continuava gerando energia. Ou seja, em torno de 48% dos resíduos sólidos municipais americanos eram reaproveitados como novos recursos (energia ou insumo) –EIA, 2007.

Esse reaproveitamento teve início na década de 1990, sobretudo por força de lei. O Ato Público Regulatório de Utilidade Pública (PURPA) foi mandatário nesse

processo de produção de energia a partir da combustão de resíduos sólidos municipais. Esta legislação demandava a co-geração ou produção em pequenas escalas, mas padrão de eficiência estabelecido pela Comissão Federal de Regulação de Energia. Esta lei incentivou a melhora da eficiência de muitas plantas transformadoras de resíduos em energia e minimizou o desperdício destes resíduos.

No Brasil, ainda tramita o projeto lei que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Os instrumentos desta política nacional abrangem planos de gestão integrada de resíduos sólidos: a logística reversa, co-opseração técnica e financiamentos. Todos estes instrumentos, se bem aplicados, permitirão melhorar a qualidade de disposição e reaproveitamento dos resíduos existentes em prol do desenvolvimento sustentável. Cabe, contudo, avaliar alternativas econômicas, sociais e ambientais que viabilizem isso, além da consolidação e amadurecimento desta legislação em discussão.

Resíduos sólidos

De acordo com (IPT/CEMPRE, 2000), lixos são

restos de atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis. Nor-

malmente apresentam-se sob estado sólido, semi-sólido ou semi-líquido (com conteúdo líquido insuficiente para que este líquido possa fluir livremente).

Hinrichs e Kleinbach (2003, p. 439) tratam a questão da utilização e disposição dos resíduos sólidos municipais como uma das questões mais importantes da atualidade. Braga et al. (2005, p. 147) consideram resíduos sólidos de uma área urbana

desde aquilo que vulgarmente se denomina 'lixo' (mistura de resíduos produzidos nas residências, comércio e serviços e nas atividades públicas, na preparação de alimentos, no desempenho de funções profissionais e na varrição de logradouros) até resíduos especiais, e quase sempre mais problemáticos e perigosos, provenientes de processos industriais e de atividades médico-hospitais.

Neste artigo será tratado o primeiro caso.

Segundo a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), resíduos sólidos são aqueles

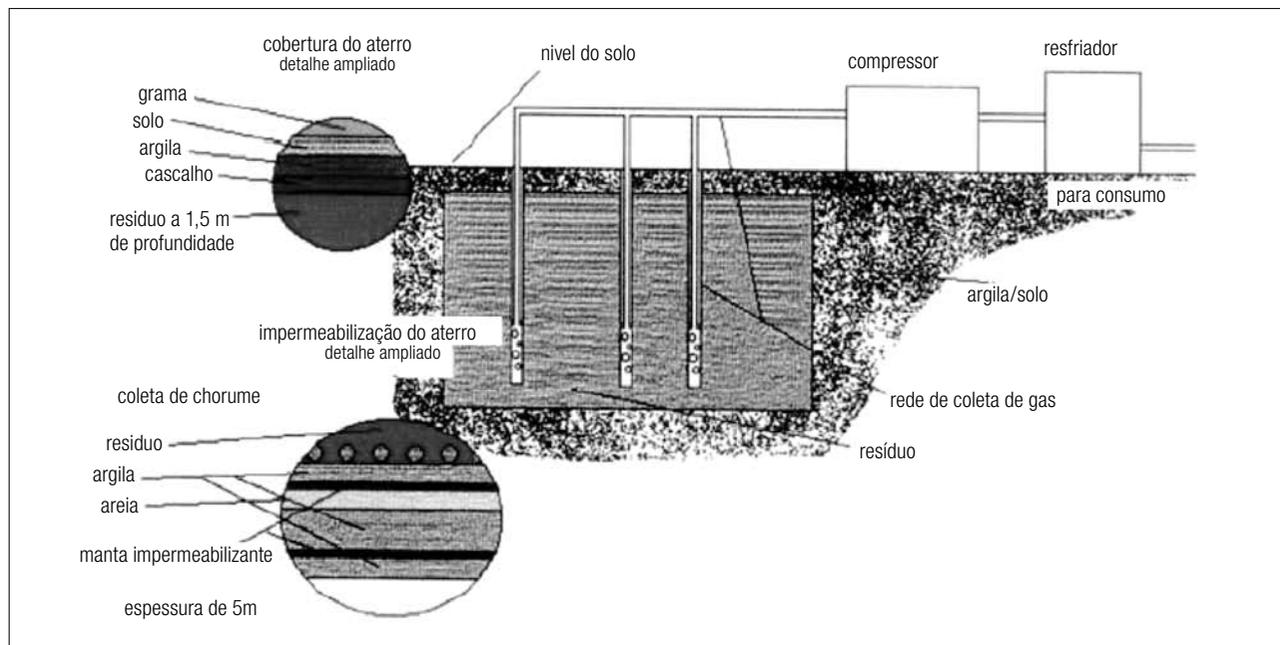
(...) resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se também, resíduo sólido os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamen-

te inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 1987).

Segundo o Inventário Nacional de Emissões de Metano pelo Manejo de Resíduos da (CETESB, 1998), a correta disposição dos resíduos urbanos pode ocorrer de cinco formas: lixões, aterros controlados, aterros sanitários, usinagem de compostagem e usinas de incineração. Os lixões são vazadouros a céu aberto onde o lixo é lançado sobre o terreno, sem qualquer cuidado de, após a fornada de trabalho, cobri-lo com uma camada de terra. Já os aterros controlados são locais utilizados para despejo de lixo coletado, com o simples cuidado de, após a jornada de trabalho cobri-lo com uma camada de terra. As usinas de compostagem e de incineração são locais de processamento. O primeiro processa o lixo em composto orgânico para uso agrícola e o segundo são fornos para queima controlada do lixo, reduzindo o seu peso e volume e com a finalidade de transformá-lo em matéria estável e inofensiva à saúde pública.

Os aterros sanitários são formas mais econômica de disposição de resíduos sólidos e mais seguras ambientalmente. Consiste na disposição na terra de lixo coletado e se utiliza método de engenharia para confinar os dejetos na área menor possível, reduzindo a um menor volume possível e cobri-lo com uma camada de terra diariamente ao final da jornada ou em períodos mais freqüentes. Este tipo de disposição é a mais adequada para reaproveitamento e produção de biogás. A figura 1 mostra a disposição dos resíduos num aterro

FIGURA 1. Esquema básico de um aterro sanitário com recuperação de biogás



sanitário e a coleta dos gases feita por tubos que o conduzirão a uma unidade de beneficiamento.

Os aterros sanitários são empreendimentos totalmente direcionados para as empresas especializadas nos serviços de saneamento urbano, as quais possuem toda a estrutura de coleta, manuseio e disposição dos resíduos sólidos urbanos em locais previamente licenciados para esta atividade.

Devido às condições de trabalho inerentes ao gerenciamento de resíduos, há um conhecimento técnico profundo sobre os fatores envolvidos: conhecimento das proporções orgânicas e inorgânicas dos resíduos; disposição nas células, com vistas à acomodação de compactação pretendida; projeção das linhas de exaustão dos gases e drenagens das águas pluviais e chorume; contenção e impermeabilização do conjunto; e melhoria do processo biológico, com reciclagem dos líquidos.

A geração de energia a partir do biogás difere de outros empreendimentos termelétricos devido às características peculiares de sua exploração, advindas de atividade de saneamento básico, com constantes cuidados e atividades produtivas extras para sua complementação técnica. De acordo com o relatório do Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos aterros sanitários nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil, o biogás é formado pela decomposição de resíduos orgânicos depositados nos aterros e lixões e tem como um dos seus principais componentes o gás metano (CH₄). O metano é um dos principais gases causadores do efeito estufa, fenômeno que tem sido foco de grandes discussões e tratados internacionais devido ao elevado potencial de alterar o sistema climático do planeta (CEPEA, 2004).

Esse mesmo estudo aponta que os melhores locais para implantação de projetos de geração de energia renovável são aqueles onde existem programas de coleta seletiva e destinação alternativa de resíduos sólidos e uma população acima de 1 milhão de habitantes. Do ponto de vista econômico é melhor porque há um depósito maior de material inorgânico, fonte do metano, e operacional porque os conflitos relativos à questão dos resíduos sólidos estarão mais bem encaminhados. Curitiba preenche estes três quesitos; por isso o estudo de caso foi realizado no aterro da Caximba, principal local de disposição dos resíduos de Curitiba.

Metodologia de pesquisa

A pesquisa tem caráter exploratório e é aplicada (Gil, 1999), a partir do método de análise de estudo de caso (Yin, 1994), por fazer a avaliação da viabilidade de uma única alternativa: o aterro da Caximba de Curit

tiba. A hipótese deste artigo é que a geração de energia a partir do aproveitamento do biogás produzido nos aterros sanitários é uma prática viável de sustentabilidade econômica e socioambiental.

Utilizaram-se os métodos qualitativo e quantitativo de tratamento dos dados. No primeiro caso, este método permitiu referenciar a importância do biogás em termos teóricos e a sua representativa na década atual. Com isso, introduziu-se a discussão sobre a importância de lidar com dois problemas urbanos modernos: energia e resíduos.

A coleta de dados secundários ocorreu na Secretária Municipal do Meio Ambiente de Curitiba (SMMA), Instituto de Planejamento Público de Curitiba (IPPUC), Instituto Paranaense de Desenvolvimento Socioeconômico (IPARDES) e Instituto Brasileiro de Geografia e Economia (IBGE) e do Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO). Coletaram-se informações também com entrevista não estruturada com o responsável pelo Aterro Sanitário da Caximba da Secretária Municipal do Meio Ambiente de Curitiba, para obter detalhes sobre a cadeia de recebimento e destino dos resíduos.

O uso do método quantitativo ocorreu no cálculo da viabilidade econômica e socioambiental, como será exposto na quinta seção. A pesquisa quantitativa tomou como base informação coletada em 2005. Coloca-se isso como uma limitação do trabalho, por sua defasagem; porém não se considera grave em razão da manutenção dos termos estabelecidos na pesquisa após dois anos. Já discussão teórica é atual e é contextualizada com dados de 2007 – Cervo (1996); Kôche (1982); Lakatos e Marconi (1985).

A avaliação de retorno de investimento na geração de energia elétrica a partir do biogás seguiu a rotina básica de qualquer projeto dessa natureza, ou seja, busca-se comparar o custo da energia produzida indicado pelo coeficiente moeda/MWh com o preço da energia vendida, também fornecida por tal coeficiente.

O método de cálculo econômico é desenvolvido a partir da disponibilidade de gás metano e do desempenho térmico do equipamento utilizado, ou seja: projeta-se o volume de biogás disponível ao ano, transformando-o em volume horário; define-se o valor calórico do metano contido no biogás, por unidade de volume; multiplica-se o volume horário de biogás pelo valor calórico do metano nele contido; divide-se o valor anterior pelo trabalho equivalente à unidade de potência elétrica do equipamento de geração; multiplica-se o valor anterior pelo preço da energia, obtendo-se receitas futuras. A definição do tipo de gerador que será utilizado ocorre na quarta seção e o cálculo da energia gerada na seção seguinte.

A seção cinco também determina os valores apropriados para o tamanho da usina definida. As fontes destes valores e os cálculos realizados serão mostrados nessa seção. Além disso, utilizou-se o método do IPCC (2006) e do CEPEA (2004) para estimar o volume de crédito de carbono gerado. Com isso avaliaram-se duas alternativas econômicas: sem e com a venda de crédito de carbono (alternativa 1 e 2, respectivamente).

As conclusões foram orientadas para a análise econômica e socioambiental comparativa, em um quadro síntese, com e sem a geração de energia a partir do biogás, contextualizada pela discussão teórica realizada.

Cadeia de produção do biogás

A energia oriunda do biogás foi inicialmente denominada de gás dos pântanos; posteriormente, assumiu outros nomes, como gás de aterro. Para Ferling (2003), atualmente, biogás refere-se ao gás formado a partir da degradação anaeróbica da matéria orgânica.

Como combustível, o principal componente do biogás é o metano. A presença de substâncias não combustíveis no biogás, como a água e o gás carbônico, prejudicam o processo de queima, tornando-o menos eficiente porque absorvem parte da energia gerada.

Durante a digestão anaeróbica, a energia química presente na composição orgânica é largamente conservada como metano. Do ponto de vista tecnológico, uma conversão metanogênica completa ocorre pela mistu-

ra de comunidades microbianas, produzindo metano como único produto orgânico reduzido.

As bactérias envolvidas na formação do biogás atuam de modo simbiótico. As bactérias que produzem ácidos geram os produtos que serão consumidos pelas bactérias metanogênicas. Sem esse consumo, o acúmulo excessivo de substâncias tóxicas afetaria as bactérias produtoras de ácidos. O processo de produção de biogás pode ser dividido em três etapas básicas, descritas na figura 2.

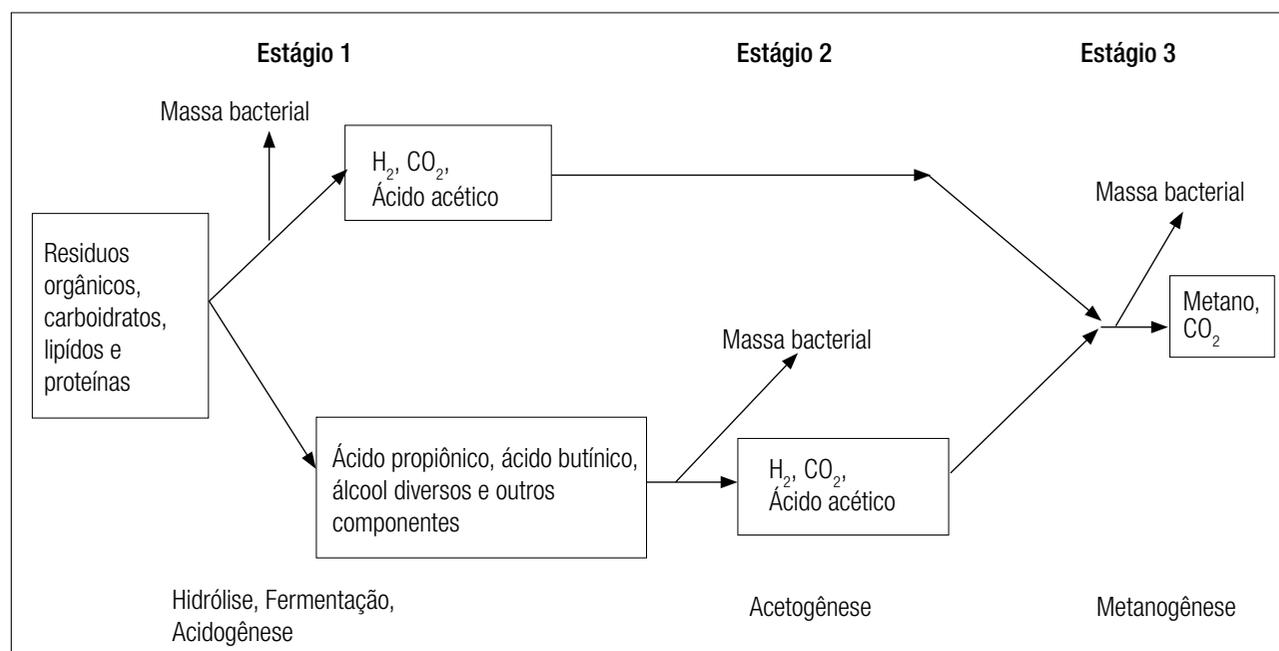
O biogás é um gás combustível, devido à presença do metano. O seu poder calorífico é inferior (PCI) de 5.100 kcal/m³, quando a proporção em metano é aproximadamente de 60%. Em comparação, cita-se o metano (PCI=8.500 kcal/m³), Propano (PCI=22.000 kcal/m³) e gás natural (PCI=7.600 kcal/m³). A sua composição é mostrada no quadro 1.

QUADRO 1. Composição do biogás.

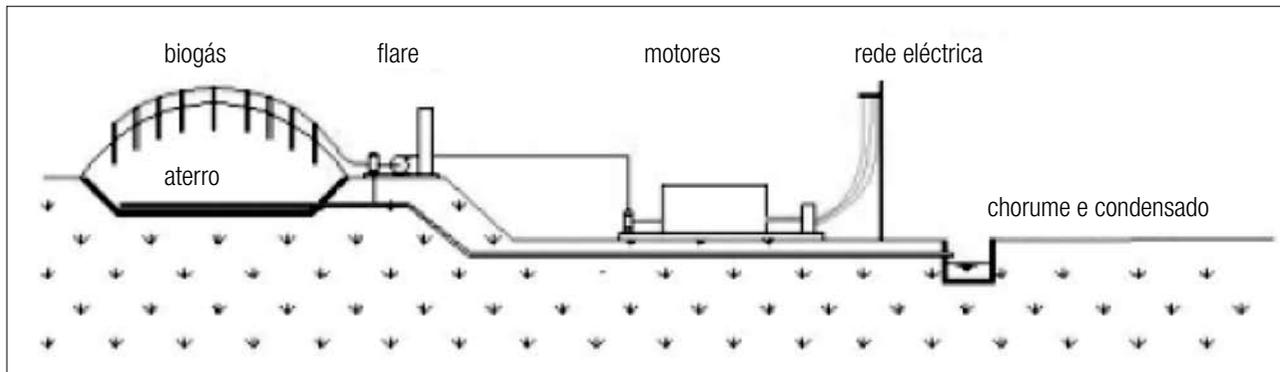
| GASES | QUANTIDADE (%) |
|-----------------------|----------------|
| Metano | 50 a 75 |
| Dióxido de carbono | 25 a 40 |
| Nitrogênio | 0,5 a 2,5 |
| Oxigênio | 0,1 a 1 |
| Sulfeto de hidrogênio | 0,1 a 0,5 |
| Amoníaco | 0,1 a 0,5 |
| Monóxido de carbono | 0 a 0,1 |
| Hidrogênio | 1 a 3 |

Fonte: Castanón (2005).

FIGURA 2. ETAPAS do processo de produção do biogás.



Fonte: Ferling (2003).

FIGURA 3. Esquema ilustrativo da produção de biogás de aterro.

FONTE: Cepea (2004).

O GBQ (gás bioquímico) no aterro é levado até um coletor central, na planta de gás, sendo separado do chorume e sugado por compressores. Segundo dados do Proinfra (2005), um aterro com capacidade de geração de 20 MW produz 12.000 Nm³ de biogás/hora. Como esse valor pode variar de 45 a 65%, o volume disponível de GBQ não é o mesmo em todos os drenos. Medidores monitorarão semanalmente a vazão de pressão de metano em oxigênio em cada um, definindo em quais deles será feita a captação. A pressão de sucção exercida pelos compressores, em função da demanda da planta de energia, determina a calibração das válvulas de vazão dos drenos selecionados, destinando para o coletor central apenas o volume de gás necessário. A figura 3 mostra esquematicamente a composição estrutural de um aterro com drenos para a captação do biogás.

O biogás é conduzido para o queimador ou para o sistema de geração de energia. No queimador o metano é destruído, mas a energia térmica gerada pela queima não é aproveitada para se obter energia. O aproveitamento do biogás pode ser feito de várias formas. Usualmente, nos países desenvolvidos, onde essa prática é muito utilizada, gera-se energia elétrica com motores de combustão interna (ciclo Otto) ou turbinas a vapor. No âmbito deste estudo, serão avaliadas as alternativas baseadas em motores existentes para o mercado.

Tecnologias de conversão energética

Existem diversas tecnologias para efetuar a conversão energética do biogás. Entende-se por conversão energética o processo que transforma um tipo de energia em outro. No caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica. O ciclo Rankine (caldeira com turbina a vapor) e os motores de combustão interna do tipo

“ciclo-Otto” são as tecnologias mais utilizadas para esse tipo de conversão energética.

Ciclo Rankine

O ciclo Rankine é composto por caldeira para gerar vapor de alta pressão e temperatura, turbina a vapor, condensador e bombas. É o mais antigo sistema de geração de energia e está muito presente com equipamentos e fornecedores no Brasil, devido ao setor sucroalcooleiro, que utiliza esses equipamentos, inclusive para autoprodução de energia elétrica.

O Ciclo Rankine ou Ciclo Ambiental, como tem sido denominado, tem as características técnicas termodinâmicas, baseadas na geração de vapor com a seqüente condensação na produção de energia mecânica ou térmica em circuito fechado de vapor.

Este processo é largamente empregado no Brasil, principalmente nas usinas de açúcar e álcool. As indústrias de equipamentos locais têm todo o conhecimento de desenvolvimento de equipamentos e processos. Sua implantação é edificada normalmente, como requer os projetos industriais, para trabalho fixo na área. É constituído pelos seguintes elementos principais: caldeiras geradoras de vapor, turbinas a vapor de simples ou múltiplos estágios, condensadores de linha e de resfriamento principal, geradores de eletricidade.

Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna se aproximam do ciclo de combustão interna de ignição por centelha. Seu rendimento é função apenas da relação de compressão (Wyllen et al., 1999). Aplicam-se tanto para geração de energia elétrica, pelo acoplamento de um gerador ao motor, quanto à geração de energia mecânica, que pode empregar-se no acionamento de bomba hidráulica, compressor ou veículo.

Esta última tem pouca viabilidade no Brasil, por se tratar de um equipamento importado e de baixa eficiência. Existem ainda as tecnologias de ciclo combinado (para grandes potências, acima de 15 MW) e micro-turbina (para pequenos aterros, com 100 kW de potencial), mas que não têm larga escala de utilização na área de lixo.

Os motores de combustão interna de queima pobre (conhecidos como *Lean Burn Engine*) utilizam o biogás diretamente, sem um tratamento sofisticado do combustível, pois secagem e filtragem são suficientes. Esses motores são importados, e os seus custos de investimento e manutenção são mais elevados para o Brasil; porém são largamente utilizados nos EUA e na Europa.

A geração de energia elétrica é realizada pelo gerador acoplado diretamente ao motor. Para motores grandes (importados), de ciclo Otto. Apesar do alto custo, o motogerador *Lean Burn Engine* será utilizado neste estudo por ser mais adequado tecnicamente.

Mercado de carbono

O incremento das emissões de gases e os respectivos impactos sobre as tendências no clima mundial estimularam a realização da Conferência das Partes, em dezembro de 1997 na cidade de Quioto, no Japão, e ficou conhecido como Protocolo de Quioto. Este Protocolo tinha como principal objetivo reverter a tendência histórica de crescimento das emissões, com vistas a reduzir as emissões totais dos gases em pelo menos 5% abaixo dos níveis de 1990 no período de compromisso de 2008 a 2012, pelos países signatários, que eram 106 países e blocos econômicos, incluindo o Brasil, até 28 de setembro de 2006.

O Protocolo previu três mecanismos de flexibilização: implementação conjunta, comércio internacional de emissões e mecanismo de desenvolvimento limpo. O intuito destes mecanismos era proporcionar que houvesse uma transição economicamente viável entre os países, permitindo a troca e comercialização de crédito de carbono. Os projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo retratam alternativas tecnológicas que cumprem seus objetivos específicos e atendem a geração de excesso de créditos de carbono, que podem, inclusive serem negociados. Dentre as alternativas de mecanismo de desenvolvimento limpo são as que tratam de resíduos e geram gás metano (CH_4), por meio da disposição de resíduos sólidos, do tratamento de esgotos sanitários, do tratamento de efluentes líquidos e pela incineração de resíduos.

Singer (2007) mostra, a partir de informações consolidadas pelo Ministério de Ciências e Tecnologia, que

a China, Índia e Brasil são os que mais contribuíram para redução de CO_2 . Os projetos aprovados e validados na respectiva comissão do Ministério de Ciências e Tecnologia foram mais representativos em geração elétrica e co-geração com biomassa (55% dos projetos), apesar de totalizarem somente 23% da participação da redução anual de emissão. Em contrapartida, os aterros sanitários representam 12% dos projetos, mas possuem a maior contribuição para redução de CO_2 (37%). Assim, ressalta-se a importância estratégica do uso do biogás, gerado nos aterros sanitários, para redução de CO_2 , o que reforça o estudo de caso discutido na próxima seção.

Estudo de caso: geração de energia a partir do biogás do aterro da caximba

O aterro sanitário da Caximba opera desde 20 de novembro de 1989, quando Curitiba passou a ter um local adequado para depositar o lixo da cidade. Antes foram utilizados depósitos de lixo (lixões) de municípios vizinhos (Lamenha Pequena e São José dos Pinhais), que tiveram uma vida útil de apenas seis meses. Esses locais foram recuperados e estão em condições de aterros controlados.

O aterro da Caximba, localizado ao sul do município de Curitiba, tem uma área total de 410.000 m². A área destinada à disposição de lixo, propriamente dita, é de 237.000 m². Esse aterro tem por finalidade receber resíduos de características domiciliares e industriais. A disposição de resíduos neste aterro é oriunda dos municípios da região metropolitana de Curitiba, especialmente Curitiba, Almirante Tamandaré, Colombo, São José dos Pinhais, Piraquara, Campina Grande do Sul, Mandirituba, Pinhais, Quatro Barras, e Fazenda Rio Grande.

O aterro da Caximba, ainda em 2007, continua sendo a alternativa para região metropolitana de Curitiba. Existem cerca de 8 milhões de toneladas de lixo depositadas no aterro desde sua fundação. Segundo dados da Secretaria Municipal do Meio Ambiente, o aterro sanitário da Caximba recebe diariamente 1,2 mil toneladas de lixo (quadro 2): 55% de lixo orgânico, 30% de resíduo reciclável e 15% de rejeitos.

Cálculo do potencial de metano

A quantificação do metano depende, além dos parâmetros mencionados na digestão anaeróbia, do tempo que o resíduo permanece aterrado. Parâmetros como temperatura, pH e concentração de substâncias tóxicas estão presentes em fatores cinéticos de decomposição da matéria orgânica, quando a equação apresentar

QUADRO 2. Resíduo municipal de Curitiba. Coleta domiciliar com disposição no aterro da Caximba (em toneladas), janeiro 1997 a dezembro 2004.

| Mês/Ano | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 |
|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Janeiro | 29955,74 | 30967,17 | 30942,52 | 30921,47 | 33132,72 | 32853,43 | 31183,70 |
| Fevereiro | 26119,67 | 27557,37 | 29772,54 | 30981,87 | 30772,18 | 29042,52 | 29772,13 |
| Março | 27492,94 | 31242,38 | 33432,95 | 31253,08 | 33875,58 | 32257,52 | 29655,73 |
| Abril | 26809,47 | 26938,57 | 29078,42 | 27481,59 | 28945,84 | 32107,81 | 27965,07 |
| Mai | 26975,98 | 28012,18 | 29057,05 | 29661,55 | 30866,01 | 30337,98 | 28244,74 |
| Junho | 26486,24 | 28576,01 | 29385,35 | 29101,30 | 30750,46 | 29896,73 | 28220,38 |
| Julho | 29278,64 | 30061,33 | 30280,55 | 27920,05 | 31433,98 | 31332,99 | 30669,56 |
| Agosto | 27800,34 | 31053,54 | 29424,20 | 30532,83 | 31353,54 | 32394,96 | 26999,60 |
| Setembro | 29140,18 | 29232,36 | 28250,52 | 29697,41 | 29220,71 | 29805,28 | 28042,67 |
| Outubro | 31909,35 | 32052,93 | 28925,38 | 32462,73 | 33405,61 | 33157,58 | 29569,21 |
| Novembro | 31215,50 | 29473,28 | 30722,55 | 30878,96 | 31548,93 | 31192,00 | 29408,15 |
| Dezembro | 33879,92 | 33129,74 | 32827,69 | 34170,89 | 33675,75 | 34409,23 | 32693,94 |
| TOTAL | 347.153,97 | 360.296,86 | 362.083,22 | 365.183,40 | 378.981,31 | 378.619,91 | 352.454,91 |
| TON/ MES | 28.929,50 | 30.024,74 | 30.173,60 | 30.431,96 | 31.581,76 | 31551,66 | 29.372,08 |
| TON/ DIA | 1.157,18 | 1.200,93 | 1.206,94 | 1.217,28 | 1.263,27 | 1.252,07 | 1.174,98 |

Fonte: SMMA - Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Curitiba.

algum, e a concentração de matéria orgânica entram em outro fator cinético (Alves, 2000).

Existem diversos tipos de métodos para calcular a geração de biogás e metano em aterros sanitários. Como apontado em Cepea (2004), há dois conjuntos de parâmetros que a legislação dos Estados Unidos recomendam para o cálculo da geração de metano em aterros sanitários: AP42 e CAA.

- AP42 utiliza os parâmetros de potencial de geração de biogás (L_0) = 100 m³/ton ou 0,1m³/kg de lixo e da constante de geração de metano (k) = 0,04 1/ano. É considerado uma condição conservadora quanto à produção de metano.
- CCA utiliza os parâmetros de L_0 = 170 m³/ton ou 0,17m³/kg de lixo e de k = 0,091/ano. É considerado uma condição realista quanto à produção de metano (no caso de ausência de material degradável) até 300 m³/ton. Como no Brasil a matéria orgânica é cerca de metade dos RSUs, o L_0 varia de 140 até 190 m³/ton.

Os parâmetros L_0 e k são os mais importantes da equação, pois refletem variações de acordo com o local, clima, tipo de lixo, etc. Teoricamente, o fator k (velocidade de degradação da matéria orgânica) varia de 0,003 a 0,21 (1/ano); porém, nas condições brasileiras o fator pode ser aplicado com magnitudes de 0,04 até 0,15 de acordo com dados do Cepea (2004).

Para L_0 , as boas práticas do IPCC¹ de 1996 indicam a variação de menos de 100 para mais de 200 m³ de CH₄ por tonelada de resíduo. O L_0 normalmente ado-

tado para resíduos europeus, com aproximadamente 30% de conteúdo orgânico, é 100 m³ de CH₄/ton de resíduos segundo Cepea (2004). Além disso, o resíduo brasileiro tem normalmente um conteúdo de matéria orgânica próximo de 60%; o de Curitiba tem cerca de 55%. Por essa razão, este estudo adotou 170 m³ de CH₄/ton de resíduos.

Considerando-se a composição do resíduo do aterro da Caximba determinado em dezembro de 2004, segundo dados da Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Curitiba, estimou-se o valor de k igual a 0,091/ano para a equação do guia do IPCC de 1996. O k (coeficiente de degradação) foi adaptado de acordo com a região sul em relação ao índice pluviométrico e clima. Para esta região, onde a velocidade de degradação (geração de biogás) não é tão grande, o k utilizado foi em torno de 0,09 por ano, segundo dados da Cepea, (2004). A *Environmental Protection Agency* (EPA) recomenda valores entre 0,04 e 0,15 por ano.

Uma das metodologias recomendadas pelo IPCC¹ (1996), também citada por Alves (2000), leva em consideração que “a degradação anaeróbia do resíduo gera grandes quantidades de metano logo após seu aterramento e esta geração se estende por anos, tornando-se

¹ IPCC = Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas- Órgão que assessoria as Nações Unidas no estudo sobre as mudanças de temperatura e clima, suas causas e seus efeitos, inclusive propondo metodologias para elaboração de inventários e medidas mitigadoras

cada vez mais reduzida”. A Equação 1 representa este comportamento:

$$\text{Emissão} = 2 \cdot L_0 \cdot R \cdot k \cdot e^{-k \cdot \text{idade}} \quad (1)$$

Onde:

Emissão = metano gerado (m^3/ano);

L_0 = Potencial de geração de biogás (m^3/kg de resíduo) ($L_0 = 0,17\text{m}^3/\text{kg}$);

R = Resíduo depositado no ano (kg) $\text{RSD} = 193.850.200 \text{ kg}$;

k = constante de geração de metano (ano^{-1}) ($k = 0,09$);

Idade = idade média do resíduo (anos) (2 anos)

Aplicando a equação 1 para o aterro da Caximba, com dados de 2005, tem-se uma estimativa de emissão de $4.954.669,3 \text{ m}^3/\text{ano}$ de biogás em 2005 ou $565,6 \text{ m}^3/\text{h}$.

Dimensionamento da capacidade da usina

Conforme a metodologia adotada para o estudo, primeiramente foram levantados os dados relevantes para dimensionamento da capacidade da usina. A lógica de definição dessa capacidade foi:

- Partiu-se do dado de entrada da emissão de metano por ano: aproximadamente $4.954.669 \text{ m}^3 / \text{ano}$
- O poder calorífico de biogás considerado é de $5100 \text{ Wh}/\text{m}^3$. Ao multiplicar-se a emissão $4.954.669 \text{ m}^3/\text{ano}$ pelo poder calorífico $5100 \text{ Wh}/\text{m}^3$ tem-se a produção de $25.268.813.453,5 \text{ Wh}/\text{ano}$
- Esse valor ainda deve ser corrigido pelo valor da eficiência dos equipamentos de conversão em energia elétrica ciclo Otto, a qual consideramos de 34% segundo Ferling (2003), ou seja: $W = 25.268.813.453,5 \text{ Wh}/\text{ano} \times 0,34 = 8.591.396.574,19 \text{ Wh}/\text{ano}$ ou $8591\text{MWh}/\text{ano}$
- Considerando uma possibilidade de expansão de até 50%, caso haja um aumento na produção de resíduos: $W = 8.591.396.574,19 \text{ Wh}/\text{ano} \times 1,5 = 12.887.094.861,3 \text{ Wh}/\text{ano}$
- Com isso, a capacidade da usina deve ser de $1,47 \text{ MW}$, dado que $12.887.094.861,3 \text{ Wh}/\text{ano} / (365 \text{ dias} \times 24 \text{ horas}) = 1,47\text{MW}$

De acordo com os cálculos realizados e o estado da arte das tecnologias disponíveis para usina de biogás, bem como a redução do impacto ambiental, foi escolhida a tecnologia do ciclo Otto para a usina termelétrica da Caximba. Como a emissão no ano de 2005

está em torno de $4.954.669 \text{ m}^3/\text{ano}$, ter-se-á uma emissão diária de $565.6 \text{ m}^3/\text{h}$. A usina terá capacidade de 1MW de potência e utilizará um sistema de captação de gás produzido pela fração orgânica do lixo.

A planta de energia será constituída de 1 motogerador de 1000 kW e 3 painéis de média tensão: um para alimentar a central de gás e outro para sistemas auxiliares (ventilação e iluminação) da planta de energia e outro para ser conectado à subestação de chaveamento da Companhia Paranaense de Energia Elétrica (Copel).

Dimensionamento do valor investido

O investimento calcula em 15 anos o período de vida útil do principal ativo (gerador), apesar depreciação legal ocorrer em 10 anos, e considera: máquinas e equipamentos, operações e manutenção.

O custo de operação do sistema inclui captação, sucção, tratamento e queima de biogás e geração de energia; é composto por mão-de-obra (estimativa de 4 pessoas em 3 turnos e 1 supervisor), considerando impostos de contratação e custos trabalhistas, gerenciamento administrativo, dentre elas, despesas de escritório, água e telefone, recursos humanos e contábeis.

A manutenção engloba os serviços na rede de captação, na estação de sucção e queima, no sistema de tratamento de biogás e na geração de energia. A manutenção dos motores é a de maior peso nesse item, pois as peças de reposição e o óleo são importados (custos atrelados ao dólar e dependendo da composição do biogás). Os motores têm basicamente dois tipos de manutenção: a de equipamentos periféricos e auxiliares, que devem ser mais freqüentes (é o caso das velas, filtros, acessórios elétricos, etc) e a manutenção interna, de alto custo; mesmo que esta é realizada depois períodos longos (cerca de cada 20 mil horas).

Os serviços no aterro são constantes, pois o maciço está sempre em movimentação e, nos períodos de chuvas, as drenagens e concertos de erosões passam a ser constantes. A estação de sucção e queima necessita de manutenção nos instrumentos de monitoramento e controle, nos sopradores e no *flare* (troca de isolantes e pinturas, por exemplo).

Os valores levantados para este estudo foram pesquisados na Internet no primeiro semestre de 2005, e tomaram como base estudos similares realizados (Cenbio, 2005; Cepea, 2004; Costa, 2003; Ferling, 2003; Oliveira, 2004; Ushida et al. 2004; Alves, 2000). O valor calculado dos custos de operação e manutenção para este estudo é $100.000,00$ reais anuais, segundo pesquisa de mercado realizada pelo autor do presente trabalho. O valor estimado para os custos operacionais é 400 mil

reais por ano: 348 mil reais com pessoal e 52 mil com serviços de administração e operação. Desta forma, o custo total de custos de operação e manutenção é 500.000 reais anuais. Os principais equipamentos são motogerador e os painéis de controle, que adicionados a outros equipamentos complementares totaliza um investimento de 1.060.500,00 reais (quadro 3).

QUADRO 3. Investimentos em máquinas e equipamentos, valores de 2004.

| EQUIPAMENTO | VALOR TOTAL (R\$) |
|---|-------------------|
| 100 x Drenos verticais | 3.000,00 |
| Rede de coleta | 2.000,00 |
| 1 x Secador | 500,00 |
| 2 x Filtros | 2.000,00 |
| 2 x Compressores | 10.000,00 |
| 1 x Motogerador | 588.000,00 |
| 3 x Painéis de controle | 455.000,00 |
| Total investimento em máquinas e equipamentos | 1.060.500,00 |

Fonte: Pesquisa de campo.

O total do investimento será R\$ 3.710.500,00, conforme detalha o quadro 4. Além do equipamento, detalhado no quadro 3, e do valor referencial para instalação da planta (2,2 milhões, Cepea, 2004), além do necessário para venda de crédito de carbono com as custas de auditoria (200 mil reais) e outros valores não detalhados (250 mil reais). O valor normativo da energia toma como base a informação do valor da energia produzida a partir da biomassa (Proinfa, 2005) e é considerada para estimar a receita. Projeto similar, descrito em Cepea (2004), aponta que o prazo de instalação de uma usina destas é 12 meses.

QUADRO 4. Síntese de dados de investimento, custos e receitas para cálculo de uma usina de biogás de 1 MW.

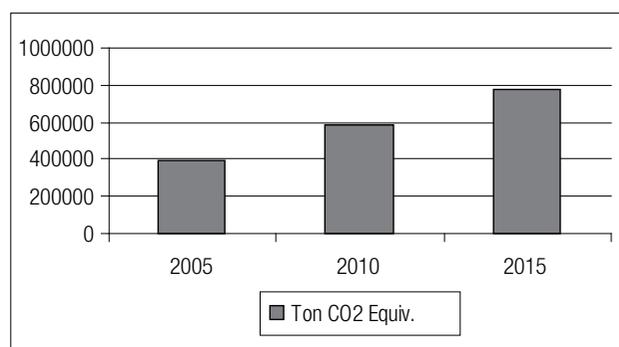
| DADO | VALOR REFERENCIAL |
|---|----------------------|
| Dimensão do motogerador | 1 MW |
| Valor normativo 2001 | 45,77(US\$/MWh) |
| Investimento na Planta da Usina | 2.200.000,00(R\$/MW) |
| Vida útil (anos) | 15 |
| Prazo de instalação(meses) | 12 |
| Cotação do dólar (média de 6 meses de 2005) | 2,80 R\$/US\$ |
| Investimento créditos de carbono (US\$) | 200.000,00 |
| CC 2006 até 2020 (US\$/tCO ₂ eq) | 5 |
| Custos de operação e manutenção (R\$/ano) | 500.000,00 |

Fonte: Quadro 3; Cepea, 2004; Proinfa, 2005.

Como receita considerou-se também a geração de crédito de carbono. Esta foi calculada a partir dos dados

do Cepea (2004) em que se estimou, inclusive, o potencial de geração de créditos de carbono para o aterro sanitário da Caximba (gráfico 2). Desta forma, em 2005 o potencial de créditos de carbono é 389540 ton CO₂eq (toneladas de carbono equivalente); em 2010, de créditos de carbono é 584310 ton CO₂eq e em 2015, de créditos de carbono é 779080 ton CO₂eq. Estes valores são calculados a partir da relação do cálculo da tonelada de CO₂ que se deixa de emitir. Por cada tonelada de CO₂ equivalente que não é emitida na atmosfera, geram-se 21 créditos de carbono, pois o metano é 21 vezes mais poluente que o CO₂.

GRÁFICO 2. Potencial de geração de crédito de carbono aterro da Caximba



Análise de viabilidade

Realizaram-se duas análises: com e sem a venda do crédito de carbono. Conforme detalhado no item Dimensionamento da capacidade da usina, foi adotada uma produção de energia elétrica de 1 MWh.

A receita da energia produzida é dada a partir dos dados do quadro 4, ou seja, considerando: valor adotado para a venda de energia elétrica de US\$ 45,77; cotação média do dólar de 2,80; produção de 20 h diária por 365 dias; tem-se que a receita de energia será igual a R\$ 935.538,80 (1 MW x 20 h x 365d x US\$45,77x R\$ 2,80/ US\$=R\$ 935.538,80). O investimento total na usina será de R\$ 3.710.500,00 e os custos de operação e manutenção de R \$500.000,00 ao ano. A vida útil do equipamento foi considerada 15 anos e a depreciação em 10 anos. Os tributos foram 32% do valor da receita.

Realizou-se o cálculo da TIR (Taxa Interna de Retorno) e do VPL (Valor Presente Líquido) após estruturar o fluxo de caixa para cada alternativa (Hirschheld, 2000). A taxa mínima de atratividade considerada foi de 19,75% ao ano (taxa Selic de julho de 2005). A primeira alternativa considerou sem a venda do crédito de carbono (tabela 1); a segunda alternativa com a venda deste crédito (tabela 2). Pode-se observar que a viabilidade econômica está condicionada a venda do crédito

de carbono, caso contrário a comercialização da energia. Considerando a escala de produção, não torna o investimento atrativo. Na alternativa 1 (sem crédito de carbono), o investimento também desconsidera o valor alocado para este mercado.

Comparando os aspectos econômicos, ambientais e sociais pode-se observar que o desenvolvimento da cadeia de biogás, para produção de energia a partir dos resíduos urbanos, é positiva em todos os aspectos, quando considerada também a venda do crédito de carbono. Plantas pequenas, como o caso estudado, não são viáveis economicamente somente com a produção e comercialização da energia, apesar de sócio e

ambientalmente apresentarem resultados satisfatórios também.

O quadro 5 sintetiza os ganhos ambientais e econômicos com a viabilidade da alternativa 2 e considera ainda o impacto social por meio da redução de problemas de saúde, ocasionada pela disposição sem reaproveitamento do lixo.

A queima de combustíveis fósseis (derivados do petróleo, carvão, gás natural, etc) é a principal fonte de emissão do gás carbônico, que vem se acumulando na atmosfera, intensificando o efeito estufa. Uma maneira de minimizar o problema é o plantio de árvores e o em-

ABELA 1. FLUXO de caixa e análise de viabilidade da alternativa de receita sem a venda de crédito de carbono. Valores em reais (r\$) constantes de 2005. Alternativa 1.

| Fluxo de Caixa | 2005 | 2006 a 2015 | 2016 a 2020 |
|--|----------------|-------------|--------------------|
| INVESTIMENTOS | (3.510.500,00) | - | - |
| Equipamentos | (1.060.500,00) | - | - |
| Fabricação, montagem e comissionamento | (2.200.000,00) | - | - |
| Diversos | (250.000,00) | - | - |
| CUSTOS | - | 924.324,77 | 805.132,42 |
| Operação e manutenção | - | 500.000,00 | 500.000,00 |
| Depreciação (10 anos) | - | 247.366,67 | - |
| Tributos (32%* Receita) | - | 305.132,42 | 305.132,42 |
| RECEITAS | - | 953.538,80 | 953.538,80 |
| Fornecimento de energia | - | 953.538,80 | 953.538,80 |
| RESULTADO (Investimento ou Receita menos Custo) | 3.510.500,00) | 29.214,03 | 148.406,38 |
| Valor Presente Líquido (1) | | | (R\$ 3.172.410,60) |

TABELA 2. Fluxo de caixa e análise de viabilidade da alternativa de receita com a venda de crédito de carbono. Valores em reais (r\$) constantes de 2005. Alternativa 2.

| Fluxo de Caixa | 2005 | 2006 a 2010 | 2011 a 2015 | 2016 a 2020 |
|--|----------------|--------------|---------------|-------------------|
| INVESTIMENTOS | (3.710.500,00) | - | - | - |
| Equipamentos | (1.260.500,00) | - | - | - |
| Fabricação, montagem e comissionamento | (2.200.000,00) | - | - | - |
| Diversos | (250.000,00) | - | - | - |
| CUSTOS | - | 4.564.576,07 | 5.777.993,17 | 4.295.410,82 |
| Operação e manutenção | - | 500.000,00 | 500.000,00 | 500.000,00 |
| Depreciação (10 anos) | - | 1.141.734,85 | 1.482.582,35 | - |
| Tributos(32%* Receita) | - | 2.922.841,22 | 3.795.410,82 | 3.795.410,82 |
| RECEITAS | - | 9.133.878,80 | 11.860.658,80 | 11.860.658,80 |
| Fornecimento de Energia | - | 953.538,80 | 953.538,80 | 953.538,80 |
| Crédito de CO2 | - | 8.180.340,00 | 10.907.120,00 | 10.907.120,00 |
| RESULTADO (Investimento ou Receita menos Custo) | (3.710.500,00) | 4.569.302,73 | 6.082.665,63 | 7.565.247,98 |
| Taxa Interna de Retorno | | | | 124% |
| Valor Presente Líquido | | | | R\$ 17.711.594,21 |

QUADRO 5. Síntese do impacto do investimento de uma usina de 1 MW de biogás no aterro da Caximba.

| SITUAÇÃO | ATUAL | PROJETADA (COM BIOGÁS) |
|------------------|--|---|
| Ambiental | Biogás queimado na boca dos drenos de gás, implicando em riscos de incêndios e explosões e queima incompleta e sem controle. O biogás é lançado direto na atmosfera contribuindo para a ocorrência do "efeito estufa", proporcionando riscos de incêndios e escorregamento de taludes, proporcionando grandes problemas ao meio ambiente. | Com a existência do projeto todo metano consumido pelo motor ou pelo flare será convertido em CO ₂ de fonte renovável cujo balanço em termos de potencial de aquecimento global é considerado nulo. Aproveitamento do Biogás para o processo de evaporação do chorume; O projeto incorpora do ponto de vista ambiental, além da recuperação do metano, a geração de energia elétrica de fontes renováveis. |
| Social | Impacto negativo para saúde | Tratamento e uso dos resíduos diminuindo impactos negativos para saúde |
| Econômica | Gasto de R\$ 328.000,00 com o tratamento de chorume; Energia proveniente do metano não aproveitada; Sem investimento no potencial de geração de créditos de carbono. | Geração de receita através do aproveitamento da geração do biogás Geração de receita com os créditos de carbono Viável apenas ao considerar as duas receitas. |

Fonte: Quadros 3 e 4; tabelas 1 e 2.

prego de combustíveis de origem vegetal, já que os vegetais absorvem gás carbônico através da fotossíntese.

O gás metano também causa o efeito estufa; é gerado quando a matéria orgânica (resíduos animais e vegetais) sofre decomposição na ausência de oxigênio. Este processo gera biogás, gás do lixo e gás natural. Isso reforça a importância da viabilização deste tipo de cadeia, mostrando apenas a necessidade de reaproveitamento de todos os recursos para tornar o negócio, além de tudo, rentável, como é o caso da participação no mercado de carbono.

Conclusões

A limitação do crescimento das fontes não renováveis de energia demanda uma avaliação da viabilidade e impactos socioeconômicos e ambientais das fontes de energias renováveis, ainda pouco representativas na matriz energética mundial. Este artigo contribui para esta questão no meio acadêmico, empresarial e da administração pública. Para o meio acadêmico pode-se avançar na discussão entre a diferença do discurso e a prática da busca pela sustentabilidade e das novas fontes de energia. Mostrou que ainda há necessidade de por efetivamente em prática e avaliar a viabilidade dessas novas fontes para o desenvolvimento sustentável. Esta avaliação interessa também ao meio empresarial, que observar as fontes renováveis como negócios promissores tendo em vista a busca por alternativas aos combustíveis fósseis. Neste sentido, este trabalho contribui com a avaliação econômica, social e ambiental de uma destas fontes: o biogás. De forma enfática mostrou-se a necessidade de escalas mínimas de produção ou a necessidade de combinação deste mercado com o de carbono, tornando um investimento rentável desta forma. Para a administração pública, a contribuição foi importante para mostrar alternativas para lidar com um problema crescente nos grandes centros urbanos: os resíduos sólidos urbanos. Desta forma, se valida a hipótese.

Nas três esferas de contribuições pode-se avaliar que o biogás é uma fonte de energia renovável, com vantagens ambientais, sociais, econômicas e tecnológicas significativas. Sem captação, o biogás gerado em lixões é lançado à atmosfera, onde tem grande impacto ambiental no aquecimento global do planeta. Assim sendo, a utilização do biogás como fonte energética gera a comercialização de créditos de carbono. Tanto este fato é verdade que muitos estados brasileiros se comprometendo com a redução das emissões de gases do efeito estufa estão investindo significativamente em projetos de geração de energia com biogás. Uma vantagem adicional do uso do biogás é a característica de descentralização na geração de energia, já que a recuperação do biogás permite a redução da necessidade de importação de energia.

Essa avaliação é, contudo, uma forma de aproveitamento do biogás. Outros usos podem ser avaliados a fim de otimizar ainda mais o uso do recurso gerado. Como proposta de novos trabalhos sugere-se, por exemplo, avaliar a utilização do biogás para evaporação do chorume do aterro da Caximba, a fim de eliminar as lagoas de tratamento de chorume; ou analisar o aproveitamento conjunto do biogás com biodiesel provenientes do óleo usado nas redes de lanchonetes de Curitiba; ou ainda a co-geração de energia térmica e elétrica a partir do biogás. Desta forma, a busca por alternativas de uso e aplicações para as fontes renováveis de energia continua são um amplo campo de pesquisa, com resultados promissores em termos da efetividade para a sustentabilidade socioeconômica e ambiental.



Referências

- Alves, J. W. S. (2000). *Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos*. Tesis de maestria no publicação, Programa Interunidades de Pós Graduação em energia da Universidade de São Paulo (Escola Politécnica, Instituto de Física, Faculdade de Economia e Administração e Instituto de Eletrotécnica e Energia), Universidade São Paulo, São Paulo.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas (1987). *Resíduos Sólidos: classificação*. NBR 10004. Rio de Janeiro.
- Bristish Petroleum (2007, dezembro). BP Statistical Review of World Energy June 2007. Disponível em www.bp.com/statisticalreview. Acesso em: dez. 2007.
- Blackely, E. J. (1994). *Planning local economic development: Theory and practice* (2 ed.). USA: Sage Publications.
- Braga, B., Hespagnol, I., Conejo, J. G. & Lotufo. (2005). *Introdução à Engenharia Ambiental* (2ª. Ed). São Paulo: Prentice Hall.
- Castañón, M. J. B. (2005), janeiro 13. *Biogás - originado a partir de rejeitos rurais*. Disponível em: <http://www.cenbio.org.br/pt/documentos.html>
- CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa (2005), janeiro 13. *Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto*. Disponível em: <http://www.cenbio.org.br/pt/documentos.html>
- CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (2004), março 4. *Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos "aterros sanitários" nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil*. São Paulo, Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/economiaambiental/page.php?id=144>
- Cervo, A. L. (1996). *Metodologia científica* (4 ed.). São Paulo: Makron Books.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1998). *Inventário nacional de emissões de metano pelo manejo de resíduos*. Relatório Final. São Paulo: CETESB.
- Ferling, F. F. (dezembro 2003). *Unidade movida a Biogás do aterro sanitário de São José dos Campos*. Disponível em : <http://www.cenbio.org.br/pt/documentos.html> > .
- EIA – Energy Information Administration. (2007). dezembro15. *Statistical data*. Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/energyconsumption.html>.
- FMI – Fundo Monetário Internacional. (2007). dezembro15. *Dados Estatísticos*. Disponível em: www.imf.org.
- Furtado, A. (2003). *Crise Energética e Trajetórias de Desenvolvimento Tecnológico*. Ciclo de Seminários – Brasil em Desenvolvimento. Rio de Janeiro: Instituto de Economia/UFRJ, Cepal.
- Gil, A. C. (1999). *Métodos e técnicas de pesquisa social* (5 ed). São Paulo: Atlas.
- Guillén, R. F. (2004). Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Em Menegat, R., Almeida, G. *Desenvolvimento Sustentável e Gestão Ambiental nas Cidades: estratégias a partir de Porto Alegre* (pp. 59-78). Porto Alegre: UFRGS..
- Hinrichs, R. A. & Kleinbach, M. (2003). *Energia e meio ambiente*. São Paulo: Pioneira Thomson.
- Hirschheld, H. (2000). *Engenharia Econômica e análise de custos: aplicações práticas para economistas, engenheiros, analistas de investimentos e administradores*. (7 Ed.). São Paulo: Atlas.
- IPCC - Intergovernmental Panel On Climate Changes. (2007). novembro 25. *Statistical data*. Disponível em: www.ipcc.org
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Changes. (1996). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories - Reference Manual*. Bracknell.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, CEMPRE - Compromisso Empresarial para Reciclagem. (2000). *Lixo Municipal – Manual de Gerenciamento Integrado* (2. ed.). São Paulo: IPT, CEMPRE.
- Kochê, J. C. (1982). *Fundamentos da metodologia científica*. Petrópolis: Vozes.
- Lakatos, E. M. & Marconi, M de A. (1985). *Fundamentos da metodologia científica*. São Paulo: Atlas.
- MAP - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2005). *Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011*. Brasília, D.F.: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.
- MME – Ministério de Minas e Energia. (2007). Dezembro 20. *Análises energéticas e dados agregados*. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>>>
- Mercado, A. & Cordova, K. (jan.-jun. 2005). *Desarrollo Sustentable – Industria: más controversias menos respuestas. Ambiente & Sociedad*, 8(1), 27-50.
- Norton, B. G (2005). *Sustainability: A philosophy of adaptive ecosystem management*. Chicago, USA: The University of Chicago Press.
- Proinfa. (2005, 23 de março). *Consultoria e implementação do meio ambiente*. Disponível em: <http://www.bancor.com.br/Index/Proinfa-VETEF%201.pdf>>>
- Rodrigues, R. (2005). *Apresentação. Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011*. Brasília, D.F.: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.
- Silva, C. L. (2005). Desenvolvimento sustentável: um conceito multidisciplinar. Em Silva, C.L., Mendes, J. T. G. (Org.). *Reflexões sobre o Desenvolvimento Sustentável: agentes e interações sob a ótica multidisciplinar* (pp. 11-40). Rio de Janeiro: Vozes.
- Singer, G. (2007). *Mercado de carbono e Protocolo de Quioto: aspectos negociais e tributação*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Soto Torres, M. D., Fernández Lechón, R. (dezembro 2006). *Feedback process in economic growth: relations between hours worked and labour productivity*. Conference System Dynamics, 1-20. Disponível em: www.systemdynamics.org/conferences/2006/proceed/papers/soto-170.pdf
- Ushida, A., Jansen, H. & Bagatelli, R. (2004). *Análise de viabilidade técnica e econômica – financeira do uso de biodigestor na área urbana de Curitiba*. Trabalho de conclusão de curso não publicado: Cefet-PR.
- Vivien, F. (2005). *Le développement soutenable*. Paris: La Découverte.
- Wyllen, G. V., Sonntag, R. & Borgnakke, C. (1999). *Fundamentos da Termodinâmica clássica*. São Paulo: Edgar Blücher.
- Yin, R. K. (1994). *Case study research*. London: Sage Pub.