



Encontro Internacional sobre Gestão
Empresarial e Meio Ambiente

ISSN: 2359-1048
Dezembro 2016

Aproveitamento de resíduos para geração de energia: ecoeficiência e sustentabilidade

SONIA VALLE WALTER BORGES DE OLIVEIRA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
soniavw@terra.com.br

ALESSANDRA HENRIQUES FERREIRA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
alessandrahf@usp.br

MARCIO MATTOS BORGES DE OLIVEIRA
mmattos@usp.br

Aproveitamento de resíduos para geração de energia: ecoeficiência e sustentabilidade

RESUMO

O Brasil é um grande gerador de resíduos orgânicos, tendo em vista sua população, larga produção de alimentos, combustíveis, criação de animais e diversos processos produtivos que eliminam subprodutos passíveis de aproveitamento na produção de energia renovável. Um dos objetivos da Agenda 2030 é assegurar o acesso de energia a todos, de forma sustentável, somado a outro, que é o de dar destinação adequada aos resíduos. A produção de energias renováveis é uma das formas de aproveitamento de resíduos orgânicos, contribuindo ao mesmo tempo para o aumento da matriz energética e redução de lançamentos inadequados no meio ambiente. Nesse contexto, o problema de pesquisa é: Quais resíduos orgânicos possuem viabilidade de aproveitamento para geração de energia com sustentabilidade? O objetivo da pesquisa é avaliar a viabilidade de aproveitamento de resíduos orgânicos para geração de energia com sustentabilidade. A pesquisa pode ser classificada com uma pesquisa exploratória, com base em coleta de dados secundários em busca bibliográfica. Avaliou-se a viabilidade de aproveitamento de alguns resíduos para geração de energia com sustentabilidade. Considerando-se as informações geradas na presente pesquisa, pode-se afirmar que o aproveitamento de resíduos orgânicos para a geração de energia torna-se uma alternativa promissora.

Palavras-chave: Resíduos orgânicos. Produção de energia. Digestão anaeróbia. Biogás. Sustentabilidade.

Waste recovery feasibility for power generation: ecoefficiency and sustainability

ABSTRACT

Brazil is a major generator of organic waste, given its population, large production of food, fuel, livestock and various production processes that eliminate by-products capable of use in renewable energy production. One of the objectives of Agenda 2030 is ensure energy access for all, in a sustainable way, added to another, which is to give proper disposal waste. The production of renewable energy is one of the ways of use of organic waste, while contributing to the increase of the energy matrix and reduces improper releases into the environment. In this context, the research problem is: What organic waste has viability use for power generation with sustainability? The objective of the research is to evaluate the feasibility of use of organic waste for power generation and sustainability. The research can be classified as an exploratory research, based on secondary data collection in literature search. The feasibility of use of some waste to generate energy sustainability was assessed. Researchers assessed the feasibility of use of some residues for energy sustainability. Considering the information generated in this study, it can be said that the use of organic waste for energy generation becomes a promising alternative.

Keywords: *Organic waste. Energy production. Anaerobic digestion. Biogas. Sustainability.*

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um grande gerador de resíduos orgânicos, tendo em vista sua população, larga produção de alimentos, combustíveis, criação de animais e diversos processos produtivos que eliminam subprodutos passíveis de aproveitamentos de diferentes formas. A produção de energias renováveis é uma das formas de aproveitamento de resíduos orgânicos, contribuindo ao mesmo tempo para o aumento da matriz energética mundial, redução de lançamentos inadequados no meio ambiente, geração de oportunidades de negócios, renda e maior desenvolvimento social e econômico.

Segundo Reis (2011a), a energia é um bem básico que contribui para a integração do ser humano no desenvolvimento, criando oportunidades e alternativas para a comunidade e cada indivíduo. O autor também comenta a importância do suprimento de energia a custo e credibilidade adequados para que todos possam ter qualidade de vida e desenvolvimento, pautados por elementos essenciais como a educação, saúde e saneamento (REIS, 2011a).

A crise energética e os problemas ambientais ocasionados pelo uso de fontes de energia poluidoras e não renováveis têm causado alterações no cenário mundial sobre esse tema, no qual se buscam soluções sustentáveis, nos três âmbitos: econômico, ambiental e social. Esses aspectos podem ser traduzidos pela volatilidade dos mercados mundiais de combustíveis fósseis e pelo risco das mudanças climáticas causadas pelo uso intensivo de fontes energéticas geradoras de gases de efeito estufa (GEE).

No Brasil e no mundo, o uso da biomassa como fonte energética está sendo incrementado a cada ano, procurando-se incentivar a valorização dos aspectos ambientais, sociais e econômicos. Sendo assim, resíduos ou subprodutos orgânicos de processamentos diversos podem ser recuperados em forma de energia renovável. Um fator importante dessas fontes de energia é que muitas delas podem ser usadas no mesmo local onde foram geradas, descentralizando a produção de energia, minimizando a logística e criando possibilidades de autossuficiência energética para diversos produtores.

Corroborando com esses argumentos, o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) lançou em dezembro de 2015 a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, com os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (PNUD, 2015). Segundo esse documento, deve ser buscado “Um mundo onde o meio ambiente humano seja seguro, resiliente e sustentável, e onde exista acesso universal à energia de custo razoável, confiável e sustentável” (PNUD, 2015, p. 3) e deve-se “[...]desenvolver sociedades do conhecimento, tal como a inovação científica e tecnológica em áreas tão diversas como medicina e energia” (PNUD, 2015, p. 5).

O objetivo 7 do PNUD é diretamente relacionado à energia: “Assegurar a todos o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia” (PNUD, 2015, p. 15), focando as energias renováveis, a eficiência energética, a cooperação internacional em pesquisa e tecnologias de energia limpa, a infraestrutura para energia limpa e os serviços de energia modernos e sustentáveis para todos nos países em desenvolvimento.

Em relação à gestão de resíduos, a Agenda 2030 propõe “até 2030, reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros” (PNUD, 2015, p. 26).

No Brasil, a partir do lançamento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) – Lei 12.305 de 2010 (BRASIL, 2010a) e do Decreto Nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010, que regulamenta a Lei no 12.305 (BRASIL, 2010b), entende-se por destinação final ambientalmente adequada a “[...] destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético [...]” (grifo nosso), desde que sejam observadas todas as normas e restrições legais. No artigo 7º. a PNRS também cita o aproveitamento energético como prática a ser incentivada nas empresas.

Somando-se a necessidade de uma melhor gestão dos resíduos e de se assegurar o acesso à energia, o aproveitamento de resíduos orgânicos para a geração de energia torna-se uma alternativa significativa e promissora. Os processos de decomposição biológica anaeróbia com produção de biogás combustível foi o foco desta pesquisa. Deve-se criar formas que possam trazer oportunidades com benefícios dentro dos conceitos: ambientalmente correto, socialmente justo, economicamente viável, culturalmente aceito e espacialmente equilibrado.

A questão de pesquisa do presente artigo é: Quais resíduos orgânicos podem ser aproveitados para geração de energia com ecoeficiência e sustentabilidade?

O objetivo desta pesquisa foi identificar resíduos orgânicos passíveis de recuperação energética com ecoeficiência e sustentabilidade.

Esta pesquisa poderá sintetizar dados e promover informações que contribuam para a tomada de decisão sobre a produção de energia a partir de resíduos, nos diversos níveis da sociedade, com foco na ecoeficiência e sustentabilidade.

2 METODOLOGIA

A pesquisa deve ser planejada com extremo rigor. A existência de um rigor metodológico visa assegurar a realização do estudo. Percebendo-se a necessidade deste rigor metodológico, a pesquisa deverá fundamentar-se em métodos adequados ao tipo de estudo que vislumbra. Segundo Cooper e Schindler (2003, p. 33) “a boa pesquisa segue os padrões do método científico”. A presente pesquisa pode ser classificada com uma pesquisa exploratória, com base em coleta de dados secundários em busca bibliográfica.

Gil (1999) afirma que pesquisas exploratórias são realizadas com a intenção de proporcionar uma visão geral e aproximativa de determinado fato, podem constituir a primeira etapa de uma investigação mais ampla, permitindo aos pesquisadores identificar futuras tarefas de pesquisa, como hipóteses ou questões para pesquisa adicional (GIL, 1999; COOPER; SCHINDLER, 2003).

Segundo Cooper e Schindler (2003) o primeiro passo em um estudo exploratório é a busca de literatura secundária, ou dados secundários, que são interpretações dos dados primários e têm pelo menos um nível de interpretação entre o fato e seu registro. São consideradas fontes de dados secundários: notícias, trabalhos como teses e dissertações, artigos científicos, entre outros documentos. De acordo com Gil (1999, p. 65) “a pesquisa bibliográfica é desenvolvida a partir de material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos”. Ela representa uma etapa fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Foram utilizados *sites* de busca de revistas eletrônicas indexadas, como o *Science Direct* e *SciELO*, bem como *sites* nacionais e internacionais que disponibilizem teses, dissertações, legislação e artigos de congressos.

3 RESÍDUOS E ENERGIA

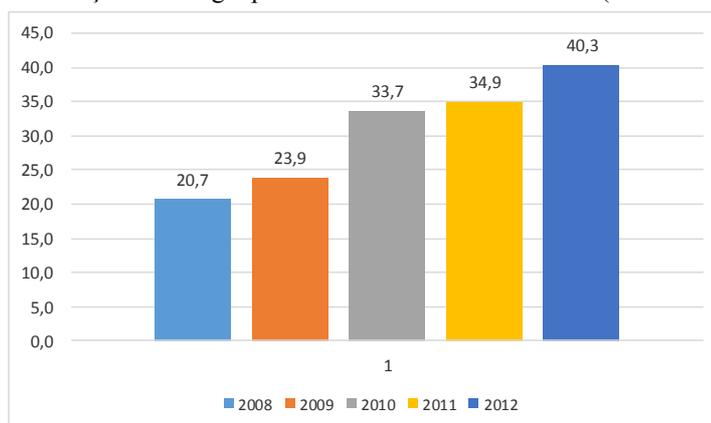
A gestão de resíduos é uma prática antiga, embora formas mais eficazes de tratamento sejam mais recentes. Além da necessidade de afastamento dos resíduos para a não contaminação das cidades, é antiga a prática de geração de energia por meio deles. Um exemplo da eliminação dos resíduos e aproveitamento energético, é o primeiro incinerador para lixo da Inglaterra, de 1876, para iluminação das ruas de Londres (BILITEWSKI; MAREK; HEARDTLE, 1997).

Energia é um dos recursos mais importantes para o desenvolvimento econômico de um país. As fontes energéticas podem ser divididas em dois grupos – biomassa (também chamada tradicional) e não-biomassa (também chamada comercial) (POKHAREL, 2007). A biomassa é composta por matéria orgânica resultante de processos biológicos, envolvendo a captura da energia solar, tendo rico potencial energético, além de ser renovável.

O aumento do interesse pelas tecnologias alternativas de produção de energia a partir da biomassa se deu devido ao aumento da quantidade de resíduos resultantes da agricultura e a necessidade de descartá-los corretamente e com aproveitamento econômico. Somado a isso há também as pressões sociais por fontes limpas de energia, mais especificamente as fontes que não emitam gases causadores do efeito estufa (TOLMASQUIM, 2005).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2015), do Ministério de Minas e Energia, a produção de energia por fontes alternativas vem crescendo a cada ano no Brasil, como pode ser visto na Figura 1. Nesse levantamento, apenas se encontram o uso de lenha, bagaço de cana, lixívia e energia eólica, mas demonstra o direcionamento de produção de energia para outras possibilidades que não apenas a hidrelétrica.

Figura 1: Geração de energia por fontes alternativas no Brasil (biomassa e eólica)



Fonte: EPE (2015).

Sobre a matriz energética brasileira, a EPE ressalta a grande contribuição da energia de usinas hidrelétricas, com a parcela significativa de 62,8%, seguida das usinas termelétricas, com 28,2% (EPE, 2015).

O Anuário Estatístico de Energia Elétrica (EPE, 2015), embora apresente diversas informações sobre a produção de energias alternativas provenientes de resíduos, basicamente se limita a informar sobre as possibilidades com bagaço de cana e resíduos sólidos, não constando maiores detalhes sobre usos de outras fontes ou subprodutos que fossem significativos na matriz energética elétrica do Brasil.

Cabe lembrar que essas informações se restringem à produção de energia elétrica e, nesta pesquisa, pretende-se levantar informações e possibilidades de geração de energia não somente elétrica, mas também térmica ou de gás combustível, para uso direto em equipamentos compatíveis com os mesmos.

4 PROCESSOS BIOLÓGICOS DE DECOMPOSIÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA

Resíduos orgânicos são aqueles que contêm carbono e hidrogênio em sua composição, além de outros elementos, e que tiveram origem de algum ser vivo, vegetal ou animal (CHEREMISINOFF, 2003).

A matéria orgânica em contato com microrganismos sofre decomposição, seja na presença ou na ausência de oxigênio, gerando diferentes composições de gases. Na presença de oxigênio, a decomposição passa pelas fases de oxidação e síntese, terminando com a respiração endógena, o que produz CO₂, água e NH₃ (amônia) (DAVIS, 2010). Na ausência de oxigênio, ocorre a decomposição anaeróbia, com as fases de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, gerando biogás combustível, composto principalmente por CH₄ (metano) e CO₂ (dióxido de carbono). Há também os microrganismos facultativos, que podem usar oxigênio na decomposição da matéria orgânica, bem como podem se desenvolver na

ausência de oxigênio (DAVIS, 2010). É importante frisar que o metano é um gás de efeito estufa e deve ser utilizado ou queimado para a redução de emissões.

A composição do biogás gerado a partir de processo anaeróbio de decomposição de matéria orgânica é de um percentual molar de 50% de metano, 45% de dióxido de carbono, 5% de nitrogênio e menos de 1% de gás sulfídrico (THEMELIS; ULLOA, 2007). Dependendo do substrato usado como matéria orgânica. Ambientes mais quentes, como o do Brasil, favorecem o processo de decomposição, tornando-o mais rápido.

Diversos processos e equipamentos podem ser utilizados para decomposição anaeróbia da matéria orgânica e geração de biogás combustível. Na zona rural ou em instalações industriais, subprodutos ou resíduos poderão ser recuperados por esses processos diretamente na planta onde foram gerados, possibilitando a redução de transporte, descentralização da produção de energia, minimização de impactos ambientais, além da redução de custos com compra de energia. Em zonas urbanas, os principais sistemas de geração de biogás são os processos anaeróbios de tratamento de esgoto sanitário, como o reator anaeróbio de manta de lodo, e os aterros sanitários para tratamento e destinação de resíduos sólidos urbanos.

A seguir são apresentados alguns elementos sobre esses processos e equipamentos para ilustrar o processo de decomposição e geração de biogás.

4.1 Biodigestores

Os biodigestores são sistemas otimizados de degradação anaeróbia onde são empregados em torno de 50% de resíduos orgânicos para 50% de líquido de diluição, podendo-se empregar água (principalmente pluvial), esgoto sanitário, ou outro efluente líquido que não prejudique o sistema. São formados por câmaras fechadas, que podem operar de forma contínua ou em batelada, quando a matéria orgânica só é substituída após sua decomposição completa (WALKER; LEANDRO; CAMARGO, 2010).

Como vantagens do uso de biodigestores, além da possível utilização do biogás, podem ser citados o uso de resíduos que seriam poluentes se lançados diretamente na natureza devido à alta carga de matéria orgânica, bem como a redução de odores gerados dessa prática (MUELLER, 2007); remoção de patogênicos que reinfestam os animais que se alimentam dos pastos adubados com os resíduos lançados *in natura*; produção de bio sólido que pode ser usado como adubo orgânico na agricultura; produção do biofertilizante ou bio líquido, também rico em nutrientes para a lavoura, aquicultura ou como adubo foliar.

Os biodigestores são uma solução muito usada para a geração de energia na Índia há pelo menos 150 anos, bem como na China. Nesses países, onde há escassez de diversos recursos, os dejetos humanos e de animais são matéria prima valorizada para a geração de energia.

O biogás gerado em processos de degradação anaeróbia, com cerca de 60% de metano, possui poder calorífico de 5.500 kcal/m³, enquanto o do metano puro é 9.000 kcal/m³ (POMPERMAYER; PAULA JÚNIOR, 2000). Segundo Patil e Pujarebio (2005), um metro cúbico de biogás equivale a: 3,47 kg de lenha; 0,63 litros de querosene; 0,61 litros de óleo diesel; 1,5 kg de carvão; 1,25 kW/h de eletricidade; 0,45 kg de gás liquefeito de petróleo; 0,5 kg de butano e pode ser gerado a partir da degradação de 13 kg de esterco.

Em termos econômicos, o biogás pode trazer grandes benefícios energéticos, quando a sua geração for controlada e o investimento for passível de gerar retornos financeiros, incluindo-se os custos de multas e adequações à legislação ambiental.

Na zona rural ou em povoados que não contam com energia elétrica, ou procuram minimizar seus gastos com ela, a disponibilidade de biogás vem a ser tanto uma melhoria na qualidade de vida dos moradores, quanto uma oportunidade de negócios.

4.2 Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB)

O reator anaeróbio de manta de lodo (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket* – UASB) foi desenvolvido na década de 1970, na Holanda, pelo pesquisador Lettinga e seus colaboradores (CAMPOS, 1994), sendo que é muito utilizado no Brasil para tratamento de esgoto sanitário.

O UASB possui diversas vantagens como baixa demanda de área, custo reduzido de construção e operação em relação a sistemas aeróbios, além de baixa produção de lodo (CAMPOS et al., 1999). Porém, como sua eficiência de remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) está na faixa de 65 a 75%, muitas vezes é necessário o pós-tratamento de seu efluente, para atender à legislação brasileira de emissões em corpos de água receptores.

Sob o aspecto construtivo, o reator UASB pode ser executado em concreto armado, sendo necessária uma boa impermeabilização, por exemplo, com proteção interna à base de epóxi (CHERNICHARO, 1997).

Para captação do biogás, os reatores devem possuir uma campana para retenção e acúmulo do mesmo. O biogás deverá ser utilizado à medida que é produzido para não ultrapassar a capacidade de retenção do reator. Sua utilização como energia poderá ser feita da mesma forma que a apresentada para biodigestores no item anterior.

4.3 Aterro sanitário

O aterro sanitário é um sistema de tratamento de resíduos sólidos adequado, com diversas características que o tornam ambientalmente mais correto e mais confiável para a saúde. Ele é composto por uma escavação em terra, na qual é feita a impermeabilização, com manta ou com solo argiloso, no qual há drenagem de fundo para coleta do chorume, bem como coletores de biogás. Durante a sua vida útil, de cerca de 20 anos, os resíduos são depositados, efetuando-se a cobertura dos mesmos com uma camada de terra, sempre compactada por máquina apropriada.

Na degradação de resíduos orgânicos, tanto em “lixões”, quanto em aterros sanitários, há produção de biogás, com um percentual de metano entre 50 e 80% (AXAOPOULUS; PANAGAKIS, 2003).

Em cidades como Nova Deli, havia uma produção de cerca de 5.400 toneladas de resíduos urbanos por dia na época da pesquisa, dos quais cerca de 80% eram coletados e encaminhados a aterros, muitos deles do tipo “lixão”. Estimou-se que a emissão de metano resultante da degradação desses resíduos fosse responsável por 80% da emissão de metano do país (TALYAN et al., 2007). Pelas estimativas dos autores, só a cidade de Nova Deli era responsável por 11,23% do total de emissão de metano do país.

A potencialidade do uso do biogás gerado em aterros sanitários é considerável e passou a ser uma alternativa com diversas vantagens ambientais, econômicas e sociais.

5 RESÍDUOS ORGÂNICOS E GERAÇÃO DE ENERGIA

A seguir são apresentados diversos resíduos orgânicos, muitos deles subprodutos de processos produtivos, com possibilidade de aproveitamento para geração de energia.

5.1 Soro de queijo

O soro de queijo é um subproduto da fabricação do queijo, com carga orgânica de cerca de 68.000 mg/L de DQO, que muitas vezes é descartado em córregos, apesar do elevado poder poluidor (LACERDA; OLIVEIRA; CARUSO, 1990). Os autores comentam a possibilidade de fazer a biodigestão desse produto, com aproveitamento energético e redução de impactos no meio ambiente.

Em pequenas queijarias, a produção de energia a partir de soro de queijo pode ser uma alternativa proveitosa, principalmente se não há uso desse resíduo para a alimentação de

animais. Segundo Cheng (2007), a produção de soro na fabricação de queijos tem a relação de 0,9 kg/kg de leite, podendo ser tratado em um sistema de digestão anaeróbia, com produção de bioenergia para consumo próprio. O autor apresenta um caso real em uma queijaria em Portugal, com uma geração de 7-10m³ de soro/dia, que possibilitou a economia de 60% da energia necessária para as atividades.

Além da produção direta de energia a partir do biogás gerado na decomposição anaeróbia de soro de queijo, há estudos que mostram a possibilidade de produção de hidrogênio em reator anaeróbio de leito fixo de fluxo ascendente, como demonstraram Perna et al. (2013).

Com produção mista de hidrogênio e metano, Fernández et al. (2015) utilizaram a digestão anaeróbia com microrganismos termofílicos tratando soro de queijo, com um reator em batelada sequencial. Os autores obtiveram altas taxas de produção de H₂ e CH₄, passíveis de geração de energia ou uso direto como combustível.

5.2 Glicerol como resíduo da produção de biodiesel

Segundo Bozbas (2008), biodiesel é um combustível alternativo economicamente competitivo, ambientalmente correto, fácil de ser produzido e com fontes renováveis de obtenção. No Brasil, a Portaria nº 255/2003 da Agência Nacional de Petróleo (ANP) estabeleceu uma especificação preliminar do uso do biodiesel em misturas de até 20% (B20), o que se consiste em especificação similar à europeia e à americana, mas com alguma flexibilização para atender as características das matérias-primas nacionais.

Na produção de biodiesel também há geração de resíduo – o glicerol, em cerca de 10% do volume total após a transesterificação de um óleo com etanol ou metanol. Esse subproduto tem tido seu preço cada vez mais reduzido, já que a oferta está superando a demanda, mesmo sendo matéria prima para cosméticos, fármacos ou alimentos.

A purificação do glicerol é um processo caro e, devido aos baixos preços que o mesmo tem atingido, tem se tornado uma alternativa inviável economicamente (SLINN et al., 2008). Portanto, a crescente disponibilidade deste produto, com o aumento da produção de biodiesel, cria um excesso de glicerol no mercado, o que torna imprescindível a busca por fontes alternativas de aplicações.

Um possível uso para o glicerol proveniente da produção de biodiesel é o lançamento em biodigestores, como descrito no trabalho de Robra et al. (2006). Na pesquisa, foi utilizado um biodigestor degradando esterco de gado, no qual se adicionou 5% de glicerina proveniente da produção de biodiesel a partir de óleo de mamona. Os pesquisadores obtiveram um aumento da produção de biogás no sistema de 304%, próximo da literatura por eles pesquisada, que indicava 369%.

Também nos estudos de Chookaew, Prasertsan e Ren (2014), o glicerol produz hidrogênio para células a combustível, a partir de fermentação e eletrólise, sendo uma alternativa viável para transformar o glicerol em bioenergia.

5.3 Vinhaça

A produção do açúcar e etanol traz diversos subprodutos, como o bagaço de cana, o palhiço e a vinhaça. Esta última contém alta carga orgânica e pode ser aproveitada energeticamente para a produção de biogás em biodigestores, gerando biofertilizante aproveitável para a lavoura, como subproduto da decomposição anaeróbia. De acordo com Moraes, Zaiat e Bonomi (2015), a aplicação indiscriminada da vinhaça no solo intensifica a salinização, a lixiviação de metais, emissões de GEE e contaminação de águas subterrâneas.

O Brasil, como líder no setor sucroenergético, pode levar vantagem nesse cenário, como mostra Reis (2011b) nas diversas possibilidades do emprego de resíduos do processamento de cana de açúcar

Em relação à vinhaça, também conhecida por vinhoto ou garapão, é necessário criar formas que reduzam o impacto ambiental de seu lançamento *in natura* na lavoura ou no solo, já que seu potencial poluidor é estimado em cerca de 100 vezes o do esgoto doméstico (LAIME et al., 2011). Além disso, o volume produzido é muito significativo, já que “Para cada litro de álcool produzido, são produzidos, aproximadamente, 13 litros de vinhaça” (BUSS¹, 1977 apud LAIME et al., 2011, p. 17). Uma alternativa para o tratamento da vinhaça, com geração de biogás e biofertilizante, é o biodigestor, com exemplo de sucesso de implantação em Pernambuco pela CETREL (UNICA, 2012). Outra possibilidade mais recente é a geração de gás hidrogênio em processo biológico anaeróbio, desenvolvido por pesquisadores do Laboratório de Processos Biológicos, da Escola de Engenharia de São Carlos – USP (NICOLA, 2013).

No Brasil, o uso da vinhaça para produção de biogás é muito mais uma exceção que uma regra (RIBEIRO; RAIHER, 2013). As autoras ressaltam que essa tecnologia já está disponível para escala industrial, sendo adotada por apenas algumas usinas, e que a escala de produção é um dos fatores de sua viabilidade.

Muitos estudos já comprovam que a digestão anaeróbia da vinhaça é uma alternativa com diversas vantagens em termos do tripé da sustentabilidade, como os de Salomon (2007), Moares, Zaiat e Bonomi (2015), Moreda (2016), Ferraz Jr. et al. (2016), dentre outros. Deve-se destacar que não somente grandes geradores como usinas de açúcar e etanol podem utilizar a vinhaça para a produção de energia, mas também pequenos produtores de cachaça, como apresentado por Nakandakari et al. (2015), com utilização de um reator UASB.

5.4 Águas residuárias de abatedouros de aves e bovinos

As águas residuárias de abatedouros de animais, como aves e bovinos, possui alta carga orgânica proveniente de sangue e gorduras, que podem ser transformados em energia a partir da biodigestão anaeróbia.

Segundo Orrico Júnior, Orrico e Lucas Júnior (2010), a produção de metano a partir de sangue de frangos chega a 0,10 m³ de CH₄/kg em biodigestores anaeróbios, sendo uma importante fonte de carbono para a geração de biogás e energia.

Em estudo de Oliveira et al. (2011), foi avaliada a possibilidade de incrementar a produção de biogás em biodigestor anaeróbio tratando efluentes de abatedouro de aves, a partir do acréscimo de lipase como catalizador do processo. Os autores concluíram que realmente ocorreu um aumento da produção de biogás e de metano, com uma adição ótima de 1 g/L da enzima e tempo de detenção hidráulica de 7 dias.

Feroldi et al. (2014) relatam que em abatedouros de bovinos é possível produzir cerca de 1.300 MJ por cada animal abatido, a partir do poder energético do metano do biogás. Já para o caso de suínos, os autores citam a possibilidade de alcançar cerca de 140 MJ por cabeça. Em abatedouros de frangos, a concentração de DQO de efluentes chega a cerca de 2.490 mg/L, com alto potencial poluidor, que pode ser convertido a biogás com 66-75% de metano (FEROLDI et al., 2014).

Segundo Ware e Power (2016), as gorduras produzem altas taxas de metano na composição do biogás gerado. Nesse estudo os autores mostraram que com o tratamento das águas residuárias do matadouro, foi possível gerar energia para cobrir 100% das necessidades do local, tanto em relação à energia térmica quanto elétrica, tornando a instalação autossuficiente em termos energéticos.

¹ BUSS, A. **Viabilidade do uso de herbicidas em mistura com vinhaça em soqueiras de cana-de-açúcar**. 1977. 68 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1977.

5.5 Esterco de animais

A possibilidade de geração de energia a partir da biodigestão de esterco de animais vem sendo usada há muito tempo pela Índia e pela China e mais recentemente em propriedades rurais em todo o mundo.

Para a avaliação da produção de biogás pela degradação anaeróbia de esterco de diferentes animais, Batzias, Sidiras e Spyrou (2005) utilizaram gado, suínos, ovelhas, frangos, cavalos e coelhos; os autores concluíram que o esterco dos suínos apresentou a melhor produção dentre os estudados.

Ribeiro e Raiher (2013) levantaram as oportunidades de uso de diversos resíduos do setor agropecuário no estado do Paraná, incluindo o esterco de suínos, muitas vezes lançado não degradado na lavoura como adubo, o que causa muitos impactos ambientais. Esse resíduo poderia ser tratado em biodigestores para a geração de biogás e biofertilizante, trazendo produção de energia com redução dos impactos ambientais.

No estudo de Puzicki et al. (2015) são apresentados os cálculos para geração de energia a partir da produção de hidrogênio proveniente da reforma do biogás de biodigestores operados com esterco de bovinos, equinos, ovinos, suínos e galináceos no oeste do estado do Paraná. Os autores estimaram um aumento de 50% da energia produzida pelo sistema atual, proveniente desse processo, com baixo impacto poluidor, porém ainda com um custo elevado.

A pesquisa de Garfi et al. (2016) mostra a importância dos biodigestores rurais na América Latina e Caribe, principalmente em localidades desprovidas de energia elétrica. Os autores elencaram os principais desafios para a implantação desses equipamentos, relacionados a aspectos culturais de aceitação, tecnológicos e de custos, mostrando as vantagens relacionadas à oportunidade de obtenção da energia e do biofertilizante, com redução de impactos ambientais.

5.6 Cama de frango

O Brasil é um grande produtor de frango, com uma concentração alta na região sul, somando cerca de 60% do total produzido no país (PAULA JÚNIOR, 2014). A cama de frango é um dos resíduos gerados na produção, sendo composta por dejetos, penas, restos de ração e o substrato de forração do piso onde é feita a criação (PAULA JÚNIOR, 2014).

A compostagem da cama de frango é uma forma de tratamento para geração de adubo orgânico, mas nem sempre é viável tendo em vista os custos logísticos para disposição do mesmo, quando a granja se encontra em propriedade sem lavoura para absorvê-lo.

A biodigestão anaeróbia para produção de energia pode ser uma alternativa para a destinação da cama de frango, com concentrações entre 70 e 80% de metano no biogás, segundo Paula Júnior (2014), em biodigestores em batelada. O autor ressalta a importância dessa energia na planta para a produção de pintos, já que é necessário o aquecimento dos mesmos nas primeiras semanas de criação, trazendo economia para o negócio.

Segundo Orrico Júnior, Orrico e Lucas Júnior (2010), a geração de metano pela biodigestão anaeróbia de cama de frango é da ordem de 0,10-0,15 m³/kg de cama. Eles relatam um experimento de degradação de cama de frango com carcaças a partir de uma pré-compostagem de cerca de 60 dias e posterior digestão anaeróbia em reator de batelada, por 98 dias. Os resultados não foram tão favoráveis em relação à produção de biogás, mas reduziram o potencial impacto dos resíduos e produziram biofertilizante com redução de coliformes.

No estudo de Rao et al. (2011) foi utilizado um reator anaeróbio de múltiplos estágios para a decomposição de cama de frango, para redução do tempo de degradação e aumento da taxa de produção de metano. Os autores utilizaram três tipos de reatores, sendo os dois iniciais para o processo de hidrólise, acidogênese e acetogênese, e um reator UASB para finalizar o processo de metanogênese. Houve produção de biogás nos três reatores mostrando que o

processo pôde ser otimizado com o uso do sistema, resultando em produção significativa de metano para geração de energia.

5.7 Cascas, polpas e palhas

O processamento de alimentos pode gerar uma infinidade de resíduos, como cascas, bagaços e palhas, que quando não são revertidos na composição de alimentos e rações, podem trazer impactos ambientais se lançados indevidamente no meio ambiente, devido à alta carga orgânica dos mesmos. Uma alternativa é a digestão anaeróbia para produção de energia.

A digestão anaeróbia de casca e palha de arroz, somados a outros resíduos, é apresentada por Lim et al. (2012), que listam uma série de artigos mostrando essa possibilidade em países como China, Índia, Honduras, Colômbia, Etiópia, Tanzânia, Vietnã e Camboja. Os autores também apresentam artigos que utilizam casca e palha de arroz para produção de etanol por fermentação, outra oportunidade energética para esses resíduos.

Hassam et al. (2014) também estudaram a possibilidade de geração de energia elétrica da palha de arroz, pelo uso de célula a combustível com microrganismos degradadores de celulose. A produção de energia foi da ordem de 145mW/m², com uma concentração de palha de arroz de 1 g/L.

Cascas de batata foram o substrato utilizado por Liang e McDonald (2015) para produção de biogás, com uma taxa de 60-70% de metano presente. As batatas, maior produção agrícola da costa noroeste dos EUA, são processadas como batatas fritas e outros produtos, gerando cerca de 8% de resíduos em peso, com necessidade de tratamento e disposição final (LIANG; MCDONALD, 2015). Os autores mostraram a eficiência dos reatores em batelada, com a produção de cerca de 273 L biogás/kg de sólidos voláteis.

No estudo de Siles et al. (2016) são apresentadas possibilidades de valorização de cascas de laranja a partir da combustão, biometanização e tecnologias de co-compostagem. Em relação à produção de biogás, foram utilizadas bactérias termofílicas para a degradação, com aproveitamento dos óleos essenciais presentes na casca. Os autores alcançaram altas taxas de metano, de cerca de 280 L por kg de DQO, com tempo de 120 dias de degradação, mostrando a possibilidade de aproveitamento desse resíduo para a produção de energia.

5.8 Esgoto sanitário

Da mesma forma que todos os demais resíduos orgânicos já comentados, o esgoto sanitário possui uma carga orgânica de cerca de 550 mg/L de DQO, passível de ser transformada em biogás e energia, a partir de reatores anaeróbios.

Tendo em vista o crescente emprego com sucesso da associação de sistemas anaeróbios seguidos de aeróbios (CAMPOS et al., 1994; CHERNICHARO et al., 2001), é possível o aproveitamento energético da parcela carbonácea decomposta nos reatores anaeróbios, que fazem parte do processo inicial do tratamento secundário de esgoto sanitário.

Os reatores UASB têm sido largamente utilizados em estações de tratamento de esgoto (ETE) no Brasil e demais países, com potencial para geração significativa de biogás, principalmente em grandes centros urbanos. Infelizmente, devido aos custos de implantação de sistemas de geração de energia a partir do biogás, muitas ETE não fazem o seu aproveitamento energético, apenas queimando os gases por meio de um *flare*.

Bilotta e Ross (2016) mostram esse potencial a partir de estimativa de geração de energia e emissão evitada de GEE na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos (ETE). O estudo foi realizado em uma ETE de um município de 190.000 habitantes, mostrando que poderia ser gerada uma cota de metano da ordem de 1.427 m³/dia, produzindo cerca de 65.280 kWh/mês, o que reduziria a demanda média mensal de energia necessária na ETE em 59%, evitando a emissão dos gases para a atmosfera. Os autores ressaltam a importância ambiental e econômica gerada pela recuperação do biogás.

5.9 Resíduos sólidos urbanos

Resíduos sólidos urbanos (RSU) também são foco de preocupações ambientais cada vez mais complexas, dado o crescente aumento de geração per capita, principalmente por conta dos hábitos de consumo, e dificuldades na implantação de segregação e coleta seletiva.

Embora haja diversas composições dos resíduos nos aterros, bem como estejam localizados em diversas regiões do planeta com climas totalmente diferentes, Zamorano et al. (2007) citam que a composição típica do biogás nesses sistemas é da ordem de 55% de metano para 45% de gás carbônico somado a traços de diversos compostos orgânicos voláteis. A produção de biogás do estudo foi da ordem de 250 a 550 Nm³/h (Normal metro cúbico por hora, ou seja, a 1 atm, 0°C e 0% de umidade), que poderia ser usada para produzir eletricidade na ordem de 4.500.000 kWh/ano. Os autores também indicam que a maior parte do metano e gás carbônico é gerada nos 20 anos de vida útil do sistema, porém as emissões deverão continuar por 50 anos, ou mais.

Pesquisas em aterros sanitários nos Estados Unidos, realizadas por Themelis e Ulloa (2007) apresentam dados sobre a captação e uso de metano emitido. Os autores afirmam que são coletados cerca de 2,6 milhões de toneladas de metano por ano nos aterros do país, dos quais 70% são utilizados para gerar calor ou eletricidade. A concentração de metano e dióxido de carbono no biogás emitido nesses aterros foi da ordem de 50% e 45%, respectivamente, sendo os demais 5% compostos por outros gases. Os autores apresentaram dados de diversos aterros sanitários dos Estados Unidos, dos quais puderam fazer uma estimativa conservadora de que pelo menos 50 Nm³ de metano podem ser geradas a partir de uma tonelada de resíduos sólidos municipais, embora em muitos aterros eles encontraram volumes de até 100 Nm³.

As possibilidades de uso do biogás gerado em aterros sanitários vêm ganhando novas alternativas. Os estudos de Duerr et al. (2007) mostraram ser possível o uso de gás hidrogênio produzido do metano gerado em degradação de resíduos orgânicos, como os encontrados em aterros sanitários. Quando utilizado em células a combustível, o hidrogênio oferece boa eficiência energética, além de trazer benefícios ambientais pelo não lançamento de GEE.

Khalid et al. (2011) realizaram estudos com a digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos, ressaltando que a taxa de produção é de cerca de 770 g/hab.dia em países em desenvolvimento, com crescimento crescente a cada ano. Segundo os autores, à época do estudo, a geração mundial de resíduos sólidos municipais era de cerca de dois bilhões de toneladas por ano, com previsão de chegar a três bilhões em 2025. Desse montante, há uma parcela significativa de resíduos orgânicos passíveis de decomposição biológica, como a digestão anaeróbia, que pode gerar biogás para produção de energia (KHALID et al., 2011).

Os RSU foram uma das possíveis fontes de energia a partir de decomposição em aterro sanitário e geração de biogás, no estudo de Lima Júnior et al. (2014) em estados do nordeste brasileiros, mostrando a potencialidade de geração de 27.941 MWh.

6 DISCUSSÃO

O Quadro 1 apresenta a relação entre os possíveis processos biológicos de decomposição, os tipos de resíduos orgânicos e possibilidades de aproveitamento para geração de energia apresentados nos artigos analisados.

Pode-se verificar, com base nos artigos analisados, que é possível identificar diversas possibilidades de uso de alguns tipos de resíduos atualmente produzidos em grande escala em todo o planeta. Foram mostradas formas alternativas para o seu manejo com vistas à geração de energia e sustentabilidade.

Quadro 1: Tipos de processos e equipamentos para diversos tipos de resíduos

Processo/Equipamento	Tipo de Resíduo	Referências
Biodigestor	Esterco de animais	Batzias, Sidiras e Spyrou (2005); Ribeiro e Raiher (2013); Puzicski et al. (2015); Garfi et al. (2016)
	Glicerol	Bozbas (2008); Slinn et al. (2008); Robra et al. (2006); Chookaew, Prasertan e Ren (2014)
	Vinhaça	Unica (2012); Nakandakari (2015)
	Vinhaça	Nicola (2013); Salomon (2007); Moraes, Zaiat e Bonomi (2015); Moreda (2016); Ferraz Jr. et al. (2016); Nakandakari (2015)
Reator anaeróbico de manta de lodo	Esgoto Doméstico	Chernicharo et al. (2001); Bilotta e Ross (2016)
	Águas residuárias de abatedouros	Orrico Júnior, Orrico e Lucas Júnior (2010); Oliveira et al. (2011); Feroldi et al. (2014); Ware e Power (2016)
	Soro de Leite/Queijo	Lacerda, Oliveira e Caruso (1990); Cheng (2007); Perna et al. (2013); Fernández et al. (2015)
Biodigestor de sólidos	Cascas, polpas e palhas	Lim et al. (2011); Liang e McDonald (2015); Siles et al. (2016); Hassam et al. (2014)
	Cama de frango	Paula Júnior (2014); Orrico Júnior, Orrico e Lucas Júnior (2010); Rao et al. (2011)
Aterro sanitário	Resíduos sólidos urbanos	Zamorano et al. (2007); Themelis e Ulloa (2007); Duerr et al. (2007); Khalid et al. (2011)

Fonte: dos autores.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando-se as informações geradas na presente pesquisa, pode-se afirmar que o aproveitamento de resíduos orgânicos para a geração de energia torna-se uma alternativa promissora. Avaliou-se a viabilidade de aproveitamento de alguns resíduos para geração de energia com sustentabilidade, como: soro de queijo, glicerol, vinhaça, águas residuárias de abatedouros de aves e bovinos, esterco de animais, cama de frango, cascas, polpas e palhas, esgoto doméstico e resíduos sólidos urbanos.

Como em qualquer esforço de pesquisa, há limitações e preocupações a serem praticadas a respeito das conclusões alcançadas pela pesquisa. As limitações dessa pesquisa estão relacionadas ao fato de identificar-se alguns possíveis resíduos e as possibilidades de aproveitamento para geração de energia com base em pesquisa exploratória, sendo essa a primeira etapa de uma investigação mais ampla.

Esta pesquisa apresentou dados e informações que poderão contribuir para a tomada de decisão sobre a produção de energia a partir de resíduos. Para estudos futuros, intenciona-se a investigação mediante procedimentos mais sistematizados de cada uma das possibilidades de aproveitamento desses resíduos orgânicos para geração de energia e seus processos biológicos de decomposição. Além de verificar outros possíveis resíduos que ainda estão em fase de estudos de como se fazer o aproveitamento energético.

REFERÊNCIAS

AXAPOULUS, P.; PANAGAKIS, P. Energy and economic analysis of biogas heated livestock buildings. **Biomass and Bioenergy**, v. 24, p. 239-248, 2003.

BATZIAS, F. A.; SIDIRAS, D. K.; SPYROU, E. K. Evaluating livestock manures for biogas production: a GIS based method. **Renewable Energy**, v. 30, p. 1161–1176, 2005.

BILITEWSKI, B.; MAREK, K.; HEARDTLE, G. **Waste Management**. Heidelberg: Springer-Verlag, 1997.

BILOTTA, P.; ROSS, B. Z. Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 275-282, abr./jun. 2016.

BOZBAS, K. Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 2, p. 542-552, 2008.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº. 12.305** – Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2010a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 4 ago. 2016.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº. 7.404** – Regulamenta a Lei nº. 12.305. 2010b. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm>. Acesso em: 4 ago. 2016.

BUSS, A. **Viabilidade do uso de herbicidas em mistura com vinhaça em soqueiras de cana-de-açúcar**. 1977. 68 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1977.

CAMPOS, J. R. **Alternativas para tratamento de esgotos** – Pré-tratamento de águas para abastecimento. Americana: Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, 1994.

CAMPOS, J. R. (Coord.) et al. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES (PROSAB), 1999.

CHENG, C. Y. Energia alternativa na indústria láctea: a produção e aproveitamento de biogás numa pequena queijaria Minhota. In: JORNADAS DE HIDRÁULICA RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTE, 2., Porto, Portugal, 2007. **Anais ...** Porto: FEUP, 2007.

CHEREMISINOFF, N. P. **Handbook of solid waste management and waste minimization technologies**. Burlington, MA: Elsevier Science, 2003.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Depto de Engenharia Hidráulica e Sanitária, UFMG, 1997.

CHERNICHARO, C. A. L. (Coord.) et al. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: [s.n.], 2001.

CHOOKAEW, T.; PRASERTSAN, P.; REN, Z. J. Two-stage conversion of crude glycerol to energy using dark fermentation linked with microbial fuel cell or microbial electrolysis cell. **New Biotechnology**, v. 31, n. 2, p. 179-184, March 2014.

COOPER, D. R.; SCHINDLER, P. S. **Métodos de pesquisa em administração**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman, 2003.

DAVIS, M. L. **Water and wastewater engineering: Design Principles and Practice**. New York: McGraw Hill, 2010.

DUERR, M. et al. Hydrogen and electrical energy from organic waste treatment. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, 705-709, 2007.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA-EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>>. Acesso em: 2 ago. 2016.

FERNANDEZ, C. et al. Thermophilic anaerobic digestion of cheese whey: Coupling H₂ and CH₄ production. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 55-62, 2015.

FERRAZ JR. et al. Thermophilic anaerobic digestion of raw sugarcane vinasse. **Renewable Energy**, v. 89, p. 245-252, April 2016.

FEROLDI, M. et al. Geração de biogás a partir de efluentes de abatedouros. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 3, n. esp., p.130-148, 2014.

GARFÍ, M. et al. Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 599–614, 2016.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas da Pesquisa Social**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

HASSAM, S. H. A. et al. Electricity generation from rice straw using a microbial fuel cell. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 39, p. 9490-9496, 2014.

KHALID, A. et al. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management**, v. 31, p. 1737–1744, 2011.

LACERDA, T. H. M.; OLIVEIRA, A. J.; CARUSO, J. G. B. Viabilidade do tratamento do soro de queijo com digestão anaeróbia. **An. ESALQ**, Piracicaba, v. 47, n. 2, p. 557-573, 1990.

LAIME, E. M. O. et al. Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça: uma revisão. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 3, p. 16-29, 2011.

LIANG, S.; MCDONALD, A. G. Anaerobic digestion of pre-fermented potato peel wastes for methane production. **Waste Management**, v. 46, p. 197–200, 2015.

LIM, J. S. et al. A review on utilization of biomass from rice industry as a source of renewable energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 3084-3094, 2012.

LIMA JÚNIOR, C. et al. Potencial de Aproveitamento Energético de Fontes de Biomassa no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 07, n. 02, p. 207-221, 2014.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888–903, 2015.

MOREDA, I. L. The potential of biogas production in Uruguay. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1580-1591, Feb. 2016.

MUELLER, S. Manure's allure: Variation of the financial, environmental, and economic benefits from combined heat and power systems integrated with anaerobic digesters at hog farms across geographic and economic regions. **Renewable Energy**, v. 32, p. 248–256, 2007.

NAKANDAKARI, R. et al. Potencial de geração de energia elétrica pela biodegradação da vinhaça em produtor de cachaça de pequeno porte. In: ENCONTRO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO EMPRESARIAL E MEIO AMBIENTE, 17., São Paulo, 2015. **Anais do XVII ENGEMA**. São Paulo: FEA-USP, 2015.

NICOLA, N. **Digestão anaeróbia transforma vinhaça em hidrogênio**. Agência USP de Notícias, 16 jul. 2013. Disponível em: <<http://www.usp.br/agen/?p=145165>>. Acesso em: 12 set. 2016.

OLIVEIRA, A. B. M. et al. Biodigestão anaeróbia de efluente de abatedouro avícola. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 58, n. 6, p. 690-700, nov./dez. 2011.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P.; ORRICO, A. C. A.; LUCAS JÚNIOR, J. Biodigestão anaeróbia dos resíduos da produção avícola: cama de frangos e carcaças. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 3, p. 546-554, maio/jun. 2010.

PATIL, R. U.; PUJAREBIO, G. A. **Biogas - A gift for rural electrification system**. 2005. Disponível em: <http://www.vpmthane.org/publication-aenergysource/Alternate_Energy_ebook.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2016.

PAULA JÚNIOR, S. E. M. **Avaliação das alternativas de disposição final do resíduo da produção de frango de corte**: cama de frango. 2014. 100 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental)-Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

PERNA, V. et al. Hydrogen production in an upflow anaerobic packed bed reactor used to treat cheese whey. **Internacional Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, p. 54-62, 2013.

POKHAREL, S. Kyoto protocol and Nepal's energy sector. **Energy Policy**, n. 35, p. 2514–2525, 2007.

POMPERMAYER, R. S.; PAULA JÚNIOR, D. R. de. Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas, 2000.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO-PNUD. **Transformando Nosso Mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. 2015. Disponível em: <http://www.pnud.org.br/Docs/Agenda2030completo_PtBR.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2016.

PUZICKI, D. et al. Potencial de produção de hidrogênio para o acionamento de células a combustível a partir da reforma do biogás: estudo de caso. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, n. esp, p. 394-410, dez. 2015.

RAO, A. G. et al. Multi stage high rate biomethanation of poultry litter with self mixed

anaerobic digester. **Bioresource Technology**, v. 102, p. 729-735, 2011.

REIS, L. B. **Geração de Energia Elétrica**. 2. ed. Barueri: Manole, 2011a.

REIS, L. B. **Matrizes Energéticas: Conceitos e usos em Gestão e Planejamento**. Barueri, SP: Manole, 2011b.

RIBEIRO, M. F. S.; RAIHER, A. P. Potentialities of energy generation from waste and feedstock produced by the agricultural sector in Brazil: The case of the State of Paraná. **Energy Policy**, v. 60, p. 208–216, 2013.

ROBRA, S. et al. Usos alternativos para a glicerina proveniente da produção de biodiesel: Parte 2 - Geração de biogás. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DO BIODIESEL, 1., Brasília, 2006. **Anais...** Brasília, 2006.

SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Univ. Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SILES, J. A. et al. Integral valorisation of waste orange peel using combustion, biomethanisation and co-composting technologies. **Bioresource Technology**, v. 211, p. 173–182, 2016.

SLINN, M. et al. Steam reforming of biodiesel by-product to make renewable hydrogen. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 5851–5858, 2008.

TALYAN, V. et al. Quantification of methane emission from municipal solid waste disposal in Delhi. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 3, p. 240-259, 2007.

THEMELIS, N. J.; ULLOA, P. A. Methane generation in landfills. **Renewable Energy**, v. 32, p. 1243–1257, 2007.

TOLMASQUIM, M. T. **Geração de energia elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR. **Bioeletricidade: Cresce utilização de vinhaça de cana para gerar energia e como fertilizante**. 27 abr. 2012. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/noticia/39870311920324775593/cresce-utilizacao-de-vinhaca-de-cana-para-gerar-energia-e-como-fertilizante/>>. Acesso em: 14 ago. 2016.

WALKER, E.; LEANDRO, G. V.; CAMARGO, R. F. Viabilidade econômica da implantação de biodigestores em propriedades rurais. **Revista Científica da AJES**, Juína, MT, v. 1, n. 1, maio/ago. 2010.

WARE, A.; POWER, N. Biogas from cattle slaughterhouse waste: Energy recovery towards an energy self-sufficient industry in Ireland. **Renewable Energy**, v. 97, p. 541-549, 2016.

ZAMORANO, M. et al. Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, p. 909–922, 2007.