(12) PEDIDO INTERNACIONAL PUBLICADO SOB O TRATADO DE COOPERAÇÃO EM MATÉRIA DE PATENTES (PCT)

(19) Organização Mundial da Propriedade Intelectual
Secretaria Internacional

(43) Data de Publicação Internacional
15 de Novembro de 2012 (15.11.2012)

WIPO | PCT

(10) Número de Publicação Internacional
WO 2012/153189 A2

(51) Classificação Internacional de Patentes : Sem classificação

(21) Número do Pedido Internacional : PCT/IB2012/001034

(22) Data do Depósito Internacional : 25 de Maio de 2012 (25.05.2012)

(25) Língua de Depósito Internacional : Português

(26) Língua de Publicação : Português

(30) Dados Relativos à Prioridade : PI1102151-9 11 de Maio de 2011 (11.05.2011) BR

(71) Requerente *(para todos os Estados designados, exceto US)* : **CETREL S.A.** [BR/BR]; Via Atlântica, Km 09 - Interligação Estrada do Coco/Pólo, Petroquímico, Área Industrial Leste, Pólo Petroquímico de Camaçari, 42810-000, Camaçari BA (BR).

(72) Inventores; e

(75) Inventores/Requerentes *(para US únicamente)* : **CORNELIUS VAN HAANDEL, Adrianus** [BR/BR]; R. Luiza Bezerra Mota 760, apt. 603, Catolé, 58410-410, Campina Grande, PB (BR). **RODRIGUES BARBOSA, Claudia** [BR/BR]; Rua Altino Serbeto de Barros, N°119, Apt.306, Itaigara, 41810-570, Salvador, BA (BR).

(74) Mandatário : **DANNEMANN, SIEMSEN, BILGER & IPANEMA MOREIRA**; Caixa Postal 2142, Rua Marquês de Olinda, 70, 22251-040, Rio de Janeiro - RJ (BR).

(81) Estados Designados *(sem indicação contrária, para todos os tipos de proteção nacional existentes)* : AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Estados Designados *(sem indicação contrária, para todos os tipos de proteção regional existentes)* : ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasiático (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), Europeu (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(Continua na página seguinte)

(54) Title : PROCESS AND SYSTEM FOR PRODUCING BIOGAS FROM ANAEROBIC DIGESTION OF PLANT BIOMASS IN SOLID PHASE

(54) Título : PROCESSO E SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE BIOMASSA VEGETAL EM FASE SÓLIDA

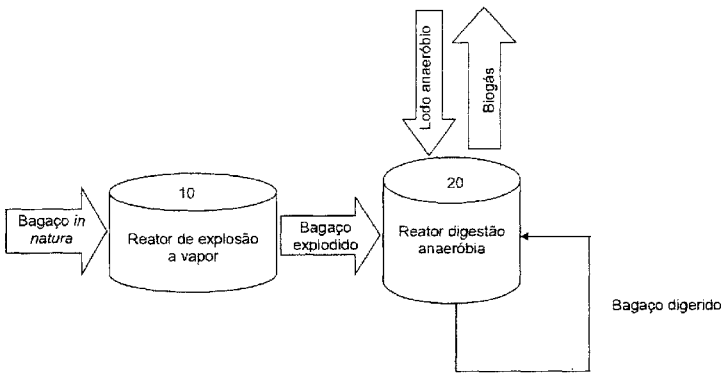


FIG. 1

(57) Abstract : The present invention relates to a process for the production of biogas from lignocellulosic materials, comprising the steps of: (a) treatment of plant biomass by steam explosion; and (b) hydrolysis and anaerobic digestion o the material treated in step (a) by anaerobic bacteria; wherein steps (a) and (b) are carried out in separate reactors, step (b) is carried out in a single reactor and the products of step (b) are biogas and the digested biomass. Alternatively, the hydrolysis and the digestion can be carried out in separate reactors. The present invention further relates to a system for carrying out the process of producing biogas of the present invention, which comprises: (i) first reactor for the treatment of plant biomass by steam explosion; and (ii) second reactor for hydrolysis and anaerobic digestion of the material treated in step (i) by anaerobic bacteria. In a preferred embodiment, both process and system of the invention can further comprise, in the hydrolysis and anaerobic digestion reactor, cellulase enzymes with or without addition of xylanases. In an alternative configuration, the hydrolysis can take place in separate reactors.

(57) Resumo :

(Continua na página seguinte)

WO 2012/153189 A2

Publicado:

— *sem relatório de pesquisa internacional; será republicado após receção do mesmo (Regra 48.2(g))*

— *com informação relativa a pedido de restabelecimento do direito de prioridade em relação a uma (ou mais) reivindicação de prioridade (Regras 26bis.3 e 48.2(b)(vii))*

A presente invenção refere-se a um processo de produção de biogás a partir de materiais lignocelulósicos, compreendendo as etapas de: (a) tratamento de biomassa vegetal através de explosão a vapor; e (b) hidrólise e digestão anaeróbia do material tratado na etapa (a) por bactérias anaeróbias; em que as etapas (a) e (b) são realizadas em reatores separados, a etapa (b) é realizada em um único reator e os produtos da etapa (b) são o biogás e a biomassa digerida. Alternativamente, a hidrólise e a digestão podem ser realizadas em reatores separados. A presente invenção refere-se ainda a um sistema para a realização do processo de produção de biogás também objeto da invenção, o qual compreende: (i) um primeiro reator para o tratamento de biomassa vegetal através de explosão a vapor; e (ii) um segundo reator para a hidrólise e a digestão anaeróbia do material tratado na etapa (i) por bactérias anaeróbias. Em uma concretização preferencial, ambos os processos e sistemas da invenção podem adicionalmente compreender, no reator de hidrólise e digestão anaeróbia, enzimas celulases com ou sem adição de xilanases. Em uma configuração alternativa, a hidrólise pode ocorrer em reatores separados.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"PROCESSO E SISTEMA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE BIOMASSA VEGETAL EM FASE SÓLIDA".**

CAMPO DA INVENÇÃO

A presente invenção insere-se no campo da tecnologia verde, por meio da produção de biogás, a partir de biomassa vegetal, em reatores operados em processo semicontínuo ou contínuo.

FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

As preocupações referentes ao aumento da demanda energética, ao acúmulo de CO_2 atmosférico devido à queima dos combustíveis fósseis, à segurança energética nacional aliada ao fim dos combustíveis fósseis e ao desenvolvimento da economia rural são os principais motivos para a busca de fontes energéticas sustentáveis e provenientes de materiais renováveis. Métodos, materiais e técnicas de geração de novos produtos e processos que causem menos impacto ambiental e/ou que auxiliem na redução da poluição e dos danos ao meio ambiente são englobados no campo da tecnologia verde ou tecnologia ambiental.

Como um dos principais produtos agrícolas do Brasil, cultivada desde a época da sua colonização, a cana-de-açúcar constitui um potencial gerador de energia, com a vantagem de ser completamente renovável. O Brasil encontra-se em uma situação bastante favorável quanto à produção da cana-de-açúcar, sendo que até a segunda quinzena de novembro de 2008, aproximadamente 460 milhões de toneladas de cana foram processadas na safra 2008/2009. Em 2010, aproximadamente 654 milhões de toneladas de cana foram processadas na safra de 2009/2010.

Como consequência do aumento da produção de etanol nos últimos anos, tem-se o aumento dos resíduos agroindustriais deste processo, tais como a palha e o bagaço da cana-de-açúcar. O potencial de produção de resíduos da cana-de-açúcar (matéria-seca) representa em média 14% da massa da cana. Dessa forma, para cada tonelada de cana produzida, têm-se 140kg de bagaço e 140kg de palha, e segundo dados da safra 2008/2009, o Brasil está acumulando aproximadamente 130 milhões de toneladas de resí-

duos (palha e bagaço de cana) (Seabra. Análise de opções tecnológicas para uso integral da biomassa no setor de cana-de-açúcar e suas implicações. *Tese de doutorado*. Unicamp, 298p., 2008). Segundo dados da safra de 2009/2010, o acúmulo é de aproximadamente 183 milhões de toneladas de resíduos (palha e bagaço de cana).

A composição do bagaço e da palha de cana é variável; o maior componente é a celulose (40-50%), seguido de hemicelulose (20-30%) e lignina (25-35%). Cinzas, compostos fenólicos, ácidos graxos e outros constituintes, denominados extrativos, compõem a fração remanescente destas biomassas vegetais (Reddy, N.; Yang, Y. Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications. *Trends in Biotechnology*, v.23, p.22–27, 2005). As frações celulósica e hemicelulósica podem ser hidrolisadas e convertidas em açúcares fermentescíveis, por métodos físicos (por exemplo explosão a vapor), químicos (por exemplo álcalis, ácidos, solventes, gases) e biológicos (por exemplo enzimas ou fungos).

Como alternativas econômicas para a utilização do bagaço e da palha residual de cana, podem ser citados como exemplos: uso como combustível nas caldeiras de indústrias/fazendas, uso na indústria de papel e papelão, uso na produção de biomassa microbiana e uso na alimentação de animais.

O potencial energético observado para o volume de resíduos de cana-de-açúcar também pode ser verificado em outras culturas, como, por exemplo, arroz (casca de arroz), milho (palha de milho), cevada (palha de cevada), trigo (palha de trigo), madeira (cavacos de eucalipto) e banana (pseudocaule de bananeira). Toda esta biomassa vegetal tem sido objeto de uma série de estudos para aplicações em tecnologias verdes para obtenção de produtos de interesse industrial, como alcoóis (por exemplo, etanol, butanol), ácidos orgânicos (por exemplo, ácido láctico, acético, cítrico) e biogás.

A digestão anaeróbia é um processo realizado por um consórcio de micro-organismos sob condições anaeróbias (ausência de oxigênio) convertendo o material orgânico complexo em compostos mais simples e material celular. O biogás gerado é composto de metano, dióxido de carbono,

água, gás sulfídrico, amônia entre outros, dependendo da composição da biomassa empregada. O processo é desenvolvido em estágios sequenciais envolvendo processos metabólicos complexos, que dependem da atividade de, no mínimo, quatro grupos de micro-organismos, sendo: bactérias hidrolíticas, responsáveis pela liberação de exoenzimas que catalisam a hidrólise de polímeros orgânicos complexos como a pectina, a hemicelulose e a celulose a açúcares, ácidos carboxílicos de cadeia longa e glicerol; bactérias acidogênicas, que metabolizam os produtos hidrolisados em outros ainda mais simples como ácidos carboxílicos de cadeia curta, alcoóis, ácido lático, CO_2, H_2, NH_3 e H_2S em função das condições do meio; bactérias acetogênicas que convertem os produtos resultantes do metabolismo das acidogênicas em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono e, por fim, estes são convertidos a metano e dióxido de carbono, pelas bactérias metanogênicas (Chernicharo, C.A.L.. Reatores anaeróbios. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG, 246p.,1997).

Alguns parâmetros possuem uma significância maior no monitoramento de reatores anaeróbios por serem um indicativo da eficiência, do estágio operacional e de alterações externas ou internas dos processos que ocorrem no reator. Pode-se destacar a alcalinidade, o pH, os ácidos graxos voláteis (AGV) e a temperatura como os fatores mais preponderantes.

A temperatura no processo de digestão anaeróbia exerce influência forte sobre a taxa de conversão do material orgânico e sobre as espécies predominantes em determinada faixa de temperatura. Há três faixas de temperatura que possuem alguma relação com o crescimento microbiano na maioria dos processos biológicos, a saber: a faixa psicrófila compreendida entre 4 e 15 °C; a faixa mesófila de 20 a 40 °C e a faixa termófila entre 45 e 70 °C (Lettinga, G. Sustainable integrated biological wastewater treatment. *Water Science and Technology*, v. 33, n. 3. p. 85–98, 1996).

Alcalinidade de um sistema é a capacidade que este tem de neutralizar ácidos, resultado da presença de espécies químicas de natureza alcalina. A alcalinidade é um indicativo da capacidade tamponante de um determinado sistema e sendo assim, para uma alcalinidade alta, não deve

ser entendida que o pH esteja necessariamente alto. Os ácidos graxos voláteis mantêm uma relação estreita com a alcalinidade. Os ácidos formados no processo tendem a reduzir o pH tornando-o ácido e inadequado aos processos anaeróbios. Neste sentido o efeito tamponante da solução evita quedas bruscas e oscilações frequentes do pH (Chernicharo, C.A.L.. Reatores anaeróbios. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental-UFMG, 246p.,1997).

Um exemplo de sistema de digestão de sólidos para a produção de biogás é descrito no documento de patente WO 2011/020000publicado em 17.02.2011, no qual materiais lignocelulósicos são empregados para a produção de biogás, sendo o processo composto de: 1) um sistema de digestão em fase líquida, utilizando efluentes industriais ou domésticos; (2) mistura do efluente obtido na etapa (1) contendo bactérias anaeróbias com materiais lignocelulósicos de diversas fontes; e (3) digestão anaeróbia da biomassa obtida na etapa (2). A invenção ainda cita a possibilidade de pré-tratamento da biomassa com hidróxido de sódio para remoção de lignina.

A presente invenção diferencia-se da citada anteriormente, pelo tipo de pré-tratamento empregado (explosão a vapor) e possibilidade de adição de catalisador (enzimas industriais) combinado com bactérias anaeróbias para aumentar a produtividade e eficiência da digestão. Adicionalmente, o lodo anaeróbio é selecionado a partir de estações de tratamento de efluentes industriais e domésticos, não sendo parte desta invenção a etapa de digestão de efluente industrial ou doméstico.

As celulases são usualmente uma mistura de diversas enzimas que catalisam a hidrólise da celulose, convertendo-a em açúcares redutores (principalmente glicose) que podem ser utilizados por micro-organismos para a produção de insumos de interesse industrial. Admite-se a existência de três tipos de celulases, responsáveis pela hidrólise da celulose: (1) endocelulase - responsável pelo rompimento de ligações poliméricas que conferem estrutura cristalina à celulose; (2) exocelulase - cliva segmentos das cadeias expostas pela endocelulase, gerando celobiose (dissacarídio); e (3) beta-glicosidase - hidrolisa celobiose, gerando monômeros de glicose. As xilana-

ses catalisam a hidrólise da fração hemicelulósica da biomassa, produzindo hidrolisado com cerca de 90% de pentoses (principalmente xilose e arabinose) (Sun, Y.; Cheng, J. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Bioresource Technology*, v. 83, p. 1 – 11, 2002).

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

A presente invenção refere-se a um processo de produção de biogás a partir de materiais lignocelulósicos, compreendendo as etapas de:

(a) pré-tratamento de biomassa vegetal através de explosão a vapor; e

(b) hidrólise e digestão anaeróbia do material tratado na etapa (a) por bactérias anaeróbias, com ou sem a adição de enzimas celulases, em conjunto ou não com enzimas xilanases, em que as etapas (a) e (b) são realizadas em reatores separados, a etapa (b) é realizada em um único reator e os produtos da etapa (b) são o biogás e a biomassa digerida.

A presente invenção refere-se ainda a um sistema para a realização do processo de produção de biogás também objeto da invenção, o qual compreende:

(i) um primeiro reator para o pré-tratamento de biomassa vegetal através de explosão a vapor;

(ii) um segundo reator para a hidrólise e a digestão anaeróbia do material tratado na etapa (i) por bactérias anaeróbias com ou sem a adição de enzimas celulases em conjunto ou não com enzimas xilanases.

Alternativamente, a etapa de hidrólise pode ser iniciada antes da etapa (b) em um reator intermediário, com adição de enzimas e bactérias anaeróbias, operado em condição termofílica.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

Figura 1 - A figura 1 corresponde à representação esquemática do sistema e do processo de produção de biogás a partir de biomassa vegetal, com um reator de pré-tratamento por explosão a vapor (10) e um reator de digestão anaeróbia (20), sem adição de catalisador (temperatura mesofílica ou termofílica).

Figura 2 - A figura 2 corresponde à representação esquemática

do sistema e do processo de produção de biogás a partir de biomassa vegetal, com um reator de pré-tratamento por explosão a vapor (10) e um reator de digestão anaeróbia (20), com adição de catalisador (temperatura mesofílica ou termofílica).

Figura 3 - A figura 3 corresponde à representação esquemática do sistema e do processo de produção de biogás a partir de biomassa vegetal, com um reator de pré-tratamento por explosão a vapor (10), um reator intermediário (15) para iniciar a hidrólise em condição termofílica com adição de catalisador e bactérias anaeróbias e um reator de digestão anaeróbia (20) (temperatura termofílica).

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

A presente invenção refere-se a um processo de produção de biogás a partir de materiais lignocelulósicos, o qual compreende as etapas de:

(a) pré-tratamento de biomassa vegetal através de explosão a vapor;

(b) hidrólise e digestão anaeróbia do material tratado na etapa (a) por bactérias anaeróbias, com ou sem a adição de enzimas celulases em conjunto ou não com enzimas xilanases, em que as etapas (a) e (b) são realizadas em reatores separados, a etapa (b) é realizada em um único reator e os produtos da etapa (b) são o biogás e a biomassa digerida.

Em uma configuração alternativa, a hidrólise poderá ser iniciada previamente em um reator intermediário entre as etapas (a) e (b), em condição termofílica.

A produção de biogás de acordo com a invenção é realizada a partir de biomassa vegetal, que pode ser selecionada a partir do grupo consistindo em: bagaço de cana-de-açúcar, palha de cana-de-açúcar, casca de arroz, palha de milho, palha de cevada, palha de trigo, cavacos de eucalipto, pseudocaule de bananeira e misturas dos mesmos.

A primeira etapa do processo da invenção, a etapa (a), compreende o pré-tratamento do material lignocelulósico em um primeiro reator (10), através de explosão a vapor, como apresentado esquematicamente

nas figuras 1, 2 e 3. A hemicelulose, por apresentar estrutura amorfa e menor grau de polimerização que a celulose, é hidrolisada parcialmente ou completamente nesta etapa de pré-tratamento, dependendo das condições de reação empregadas. O referido pré-tratamento também visa à desestruturação da fibra da biomassa vegetal, reduzindo a cristalinidade e aumentando a porosidade, de modo a facilitar a hidrólise da fração celulósica.

O pré-tratamento da etapa (a) do processo da invenção compreende explosão a vapor pela aplicação de vapor d'água na biomassa vegetal, no referido primeiro reator, com temperaturas que variam de 150-300°C, preferencialmente 160-260°C, o que corresponde a pressões de 0,62-4,7MPa e tempo de reação variando de alguns segundos a poucos minutos antes da descompressão. Ainda mais preferencialmente, a reação deve ser realizada a temperaturas na faixa de 180-220°C e tempos de reação de 3-15 minutos.

O processo de explosão a vapor consiste na descompressão súbita de um sistema pressurizado contendo o vapor d'água saturado à elevada pressão e a biomassa vegetal. A água, sob elevada pressão, penetra na estrutura celular da biomassa, hidrata a celulose e hidrolisa a hemicelulose. (CHEN e outros Simultaneous saccharification and fermentation of steam exploded wheat straw pretreated with alkaline peroxide. *Process Biochemistry*. v. 5-9, 2008). As pentoses da fração hemicelulósica podem ser separadas e o acesso das enzimas à celulose é facilitado. Alternativamente, antes da etapa de digestão (b), os açúcares provenientes da fração hemicelulósica podem ser transferidos para fase líquida por uma etapa de lavagem da biomassa, e este líquido rico em material orgânico pode ser enviado diretamente para o digestor anaeróbio. A biomassa pré-tratada apresenta umidade em torno de 55-60%.

A segunda etapa do processo da invenção, a etapa (b), compreende a hidrólise e a digestão anaeróbia do material tratado na etapa (a), em um segundo reator (20). O material tratado na etapa (a) sofre hidrólise e digestão anaeróbia no referido reator (conforme apresentado nas figuras 1, 2 e 3), o qual pode operar em condições mesofílicas ou termofílicas, com temperatura na faixa de 20-70°C, preferencialmente de 37 a 55°C. Bactérias anae-

róbias são adicionadas ao reator, o qual deve ser operado com pH de 5,0-8,0, preferencialmente 6,0-8,0, ainda mais preferencialmente 6,5-7,5. A concentração de sólidos totais no reator de hidrólise e digestão anaeróbia está compreendida na faixa de 5-50%, preferencialmente de 5-15%. A alimentação do referido reator pode ser semicontínua ou contínua. Enzimas industriais (celulases em conjunto ou não com xilanases) podem ser adicionadas à digestão anaeróbia combinadas com as bactérias anaeróbias para elevar a eficiência da hidrólise e da digestão anaeróbia.

O pH na etapa (b) pode ser controlado pela adição de agentes alcalinizantes (bases fortes ou fracas), preferivelmente hidróxido de sódio ou ureia. Alternativamente, o controle do pH pode ser obtido recirculando o material contido no reator, com ou sem a adição dos alcalinizantes.

No reator da etapa (b), as frações celulósica e hemicelulósica podem ser convertidas em compostos de menor massa molecular por bactérias anaeróbias e enzimas comerciais, celulases com ou sem adição de xilanases, com o objetivo de aumentar a eficiência e produtividade das reações de hidrólise e digestão anaeróbia.

O fungo *Trichoderma reesei* é o micro-organismo mais utilizado industrialmente para a produção de celulases e xilanases, mas algumas bactérias também são capazes de produzir tais enzimas, como, por exemplo, *Clostridium thermocellum*, *Ruminococcus albus* e *Streptomyces sp.* (Corredor e outros Pretreatment and Enzymatic Hydrolysis of Sorghum Bran. *Cereal Chemistry*, v.84, p.61-66, 2007). As bactérias anaeróbias podem ser selecionadas a partir de lodos anaeróbios provenientes de estações de tratamentos de efluentes ou de resíduos sólidos, domésticos ou industriais. Os micro-organismos devem ser adaptados ao meio contendo a biomassa empregada, durante um período que pode variar de 20-90 dias. A carga orgânica volumétrica mais adequada aplicada no reator está na faixa de 5-25 g DQO/L.dia, mais preferivelmente de 10-20 g DQO/L.dia. Esta carga orgânica deve ser aumentada lentamente, garantindo condições que propiciem o desenvolvimento de bactérias anaeróbias.

O tipo e a dosagem das enzimas empregadas no processo de

hidrólise e digestão anaeróbia são dependentes de fatores como: composição da biomassa, grau de cristalinidade da cadeia polimérica, tipo de pré-tratamento empregado e condições de processo, principalmente temperatura e pH.

A hidrólise da fração celulósica da biomassa vegetal para produção de biogás pode ser realizada com adição de celulases, em quantidades de cerca de 0,05-5% em massa de sólidos totais (ST), mais preferivelmente de 0,5-2,5% em massa de ST. A xilanase é adicionada em uma quantidade suficiente para hidrolisar a hemicelulose em xilose, em concentrações de 0,001-1% em massa de ST, mais preferivelmente de 0,05-0,2%. No entanto, o tratamento da hemicelulose com a adição de xilanase não é obrigatório de acordo com a presente invenção, após o pré-tratamento com explosão a vapor.

As bactérias anaeróbias do referido segundo reator (etapa (b)) são obtidas pela inoculação do mesmo com 5-40% v/v de lodo anaeróbio, preferivelmente de 10-20% v/v. Tal inoculação visa à conversão dos carboidratos produzidos na reação de hidrólise a ácidos orgânicos, os quais poderão ser convertidos a metano e dióxido de carbono neste mesmo reator da etapa (b).

Na etapa (b), o referido segundo reator pode compreender adicionalmente uma solução de nutrientes orgânicos, para propiciar um meio adequado para o desenvolvimento de bactérias anaeróbias. A solução de nutrientes ideal deve conter macro ($N\text{-}NH_4^+$, $P\text{-}PO_4^{3-}$, Mg, Ca) e micronutrientes (Fe, Ni, Zn, Co, etc.), bem como alcalinidade ($NaHCO_3$ ou KH_2PO_4 e K_2HPO_4) (Aquino e outros *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.12, n. 2, p. 192-201, 2007). Uma fração da solução de nutrientes pode ser composta por vinhaça (5-20%), subproduto do processo de destilação para produção de etanol de usinas de álcool e açúcar.

Na etapa (b), os micro-organismos presentes no lodo realizam todas as etapas de conversão da matéria orgânica a biogás (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) no mesmo reator. Não é necessária uma etapa de separação sólido/líquido antes da etapa (b) uma vez que a

digestão anaeróbia ocorre em fase semissólida. Após finalizar a etapa (b), o bagaço digerido pode ser submetido a uma separação sólido/líquido com recirculação de uma das fases para o reator de digestão em fase sólida. Nesta etapa pode-se utilizar filtração, centrifugação ou prensagem, e a fração a ser recirculada (sólida ou líquida) para o reator será dependente do método de separação empregado.

Os parâmetros monitorados no reator de hidrólise e digestão anaeróbia (etapa (b)), para auxiliar no acompanhamento da estabilidade e do desempenho do reator, são pH, temperatura, alcalinidade, ácidos graxos voláteis, DQO (Demanda Química de Oxigênio), sólidos totais, sólidos suspensos, sólidos voláteis, densidade e umidade da biomassa.

A presente invenção refere-se ainda a um sistema para a realização do processo de produção de biogás também objeto da invenção, o qual compreende:

(i) um primeiro reator para o tratamento de biomassa vegetal através de explosão a vapor; e

(ii) um segundo reator para a hidrólise e a digestão anaeróbia do material tratado na etapa (i) por bactérias anaeróbias.

Alternativamente, as etapas de hidrólise e digestão anaeróbia podem ser realizadas em reatores separados. A etapa de hidrólise pode ser iniciada em um reator intermediário (15), conforme demonstrado na figura 3, entre as etapas (a) e (b) na condição termofílica com bactérias anaeróbias, com adição de enzimas celulases, com ou sem a adição de xilanases.

EXEMPLOS:

EXEMPLO 1:

Utilizou-se bagaço de cana-de-açúcar como material de biomassa, o qual foi submetido a um pré-tratamento, em um primeiro reator de explosão a vapor (10), empregando-se temperaturas de 200°C, pressão de 1,6 MPa (16 bar) e tempo de reação de 7 minutos. A umidade do bagaço explodido situou-se em torno de 50%.

O bagaço pré-tratado foi transferido para o segundo reator de digestão anaeróbia (20). O referido reator foi inoculado com 20% v/v de lodo

anaeróbio de um sistema de tratamento de efluentes de cervejaria e adaptado ao substrato (bagaço pré-tratado). A concentração de sólidos voláteis totais do lodo obtido foi de 32gSTV.L^{-1} e atividade metanogênica específica (AME) de 0,3gDQO.$gSTV^{-1}$.dia^{-1} utilizando substrato padrão. O processo foi realizado em condição termofílica, temperatura em torno de 50°C, pH em torno de 7,0, concentração de sólidos em torno de 10%, com tempo de retenção de 20 dias e alimentação semicontínua. Finalizada a etapa de digestão, o bagaço digerido foi submetido à separação sólido/líquido e a fração sólida recirculada para o digestor.

Os parâmetros monitorados no segundo reator, para auxiliar no acompanhamento da sua estabilidade e do seu desempenho no processo, foram: pH, temperatura, alcalinidade, ácidos graxos voláteis, DQO, sólidos totais, sólidos voláteis suspensos, sólidos voláteis totais, sólidos fixos totais, densidade e umidade do bagaço e densidade e umidade da torta.

Não foi empregado nenhum tipo de catalisador no processo, como enzimas industriais ou ácidos inorgânicos.

A figura 1 representa de forma esquemática o sistema e processo apresentado neste exemplo.

EXEMPLO 2:

Utilizou-se bagaço de cana-de-açúcar como material de biomassa, o qual foi submetido a um pré-tratamento, em um primeiro reator de explosão a vapor (10), empregando-se temperaturas de 200°C, pressão de 1,6 MPa (16 bar) e tempo de reação de 7 minutos. A umidade do bagaço explodido situou-se em torno de 50%.

O bagaço pré-tratado foi transferido para o segundo reator de digestão anaeróbia (20). O referido reator foi inoculado com 20% v/v de lodo anaeróbio, com concentração de sólidos voláteis totais de 32gSTV.L^{-1} e atividade metanogênica específica (AME) de 0,3gDQO.$gSTV^{-1}$.dia^{-1} utilizando substrato padrão, e com um coquetel de enzimas comerciais composto por celulases e xilanases. O lodo foi adquirido de uma unidade de digestão anaeróbia de efluentes de cervejaria e adaptado ao substrato utilizado (bagaço pré-tratado).

O processo foi realizado em condição termofílica, com temperatura em torno de 50°C, pH em torno de 7,0, concentração de sólidos em torno de 10%, com tempo de retenção de 20 dias e alimentação semicontínua. Finalizada a etapa de digestão, o bagaço digerido foi submetido à separação sólido/líquido e a fração sólida recirculada para o digestor.

Os parâmetros monitorados no segundo reator, para auxiliar no acompanhamento da sua estabilidade e do seu desempenho, foram: pH, temperatura, alcalinidade, ácidos graxos voláteis, DQO, sólidos totais, sólidos voláteis suspensos, sólidos voláteis totais, sólidos fixos totais, densidade e umidade do bagaço e densidade e umidade da torta.

A figura 2 representa de forma esquemática o processo e sistema apresentado neste exemplo.

EXEMPLO 3:

Utilizou-se bagaço de cana-de-açúcar como material de biomassa, o qual foi submetido a um pré-tratamento, em um primeiro reator de explosão a vapor (10), empregando-se temperaturas de 200°C, pressão de 1,6 MPa (16 bar) e tempo de reação de 7 minutos. A umidade do bagaço explodido situou-se em torno de 50%.

O bagaço explodido foi transferido para um reator de hidrólise (15) e inoculado com 20% v/v de lodo anaeróbio, com concentração de sólidos voláteis totais de 32gSTV.L^{-1} e atividade metanogênica específica (AME) de 0,3gDQO.$gSTV^{-1}$.dia^{-1} utilizando substrato padrão, e com um coquetel de enzimas comerciais composto por celulases e xilanases. O lodo foi adquirido de uma unidade de digestão anaeróbia de efluentes de cervejaria e adaptado ao substrato utilizado (bagaço pré-tratado).

Neste reator, as frações celulósicas e hemicelulósicas do bagaço são convertidas a compostos de menor massa molecular (açúcares, alcoóis e ácidos orgânicos) por enzimas e bactérias do lodo. O processo foi realizado em condição termofílica, com temperatura em torno de 50°C, pH em torno de 5,0, concentração de sólidos em torno de 10%, e tempo de retenção de 2 dias. A alimentação do bagaço pré-tratado foi realizada em batelada.

As frações sólida e líquida provenientes do reator de hidrólise foram transferidas para o reator de digestão anaeróbia (20) com alimentação semicontínua. O referido reator foi inoculado com 30% v/v de lodo anaeróbio com concentração de sólidos voláteis totais de 32gSTV.L^{-1} e atividade metanogênica específica (AME) de 0,3gDQO.$gSTV^{-1}$.dia^{-1} utilizando substrato padrão. O lodo foi adquirido de uma unidade de digestão anaeróbia de efluentes de cervejaria e adaptado ao substrato utilizado (bagaço pré-tratado). O reator foi operado em condição termofílica, com temperatura em torno de 50°C, pH em torno de 7,0, concentração de sólidos em torno de 10%, com tempo de retenção de 20 dias. Finalizada a etapa de digestão, o bagaço digerido foi submetido à separação sólido/líquido e a fração sólida recirculada para o digestor.

A figura 3 representa de forma esquemática o processo e sistema apresentado neste exemplo.

REIVINDICAÇÕES

1. Processo de produção de biogás a partir de materiais lignocelulósicos, caracterizado pelo fato de que compreende as etapas de:

(a) pré-tratamento de biomassa vegetal através de explosão a vapor; e

(b) hidrólise e digestão anaeróbia do material tratado na etapa (a) por bactérias anaeróbias;

em que as etapas (a) e (b) são realizadas em reatores separados, a etapa (b) é realizada em um único reator e os produtos da etapa (b) são o biogás e a biomassa biodigerida.

2. Processo de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a biomassa vegetal da etapa (a) é selecionada a partir do grupo consistindo em bagaço de cana-de-açúcar, palha de cana-de-açúcar, casca de arroz, palha de milho, palha de cevada, palha de trigo, cavacos de eucalipto, pseudocaule de bananeira e misturas dos mesmos.

3. Processo de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado pelo fato de que a etapa (a) compreende o processo de explosão a vapor para o tratamento da biomassa vegetal, em um reator com temperatura de 150-300°C, preferencialmente 160-260°C, e pressão de 0,62 a 4,7 MPa.

4. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1-3, caracterizado pelo fato de que a etapa (b) compreende a hidrólise e a digestão anaeróbia do material tratado na etapa (a), em um reator que pode operar em condições mesofílicas, com bactérias anaeróbias, pH de 5,0-8,0, preferencialmente de 6,0-8,0, ainda mais preferencialmente de 6,5-7,5, concentração de sólidos de 5-50%, sendo preferencialmente de 5-15%, alimentação semicontínua ou contínua e temperatura de 20-40°C, preferencialmente de 35-40°C.

5. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1-3, caracterizado pelo fato de que a etapa (b) compreende a hidrólise e a digestão anaeróbia do material tratado na etapa (a), em um reator que pode operar em condições termofílicas, com bactérias anaeróbias, pH de 5,0-8,0, preferencialmente de 6,0-8,0, ainda mais preferencialmente de 6,5-7,5, con-

centração de sólidos de 5-50%, sendo preferencialmente de 5-15%, alimentação semicontínua ou contínua e temperatura de 40-70°C, preferencialmente de 45-55°C.

6. Processo de acordo com as reivindicações 4 e 5, caracterizado pelo fato de que o pH é controlado pela adição de agentes alcalinizantes como ureia e hidróxido de sódio, alternativamente com recirculação da fração líquida, após separação sólido/líquido da biomassa digerida no reator, com ou sem a adição de alcalinizantes.

7. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1-6, caracterizado pelo fato de que as bactérias do reator da etapa (b) são obtidas pela inoculação do referido reator com 5-40-% v/v de lodo anaeróbio, preferivelmente de 10-20 %v/v.

8. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1-7, caracterizado pelo fato de que o reator da etapa (b) compreende ainda adição de uma solução de nutrientes orgânicos.

9. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1-8, caracterizado pelo fato de que a etapa (b) compreende ainda adição de enzimas celulases em conjunto ou não com enzimas xilanases.

10. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1-9, caracterizado pelo fato de que o bagaço digerido na etapa (b) pode ser submetido à separação sólido/líquido com recirculação de uma das fases para o reator da etapa (b).

11. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1-10, caracterizado pelo fato de que o processo pode ser realizado sem adição de enzimas industriais.

12. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1-11, caracterizado pelo fato de que o processo pode ser realizado com adição de enzimas industriais.

13. Processo de acordo com uma das reivindicações 1-12, caracterizado pelo fato de que a biomassa obtida na etapa (a) pode ser submetida a uma etapa de lavagem para recuperação de material orgânico e que este líquido pode ser enviado diretamente para o reator da etapa (b).

14. Processo de acordo com qualquer uma das reivindicações 1-13, caracterizado pelo fato de que o bagaço pode ainda ser hidrolisado previamente em um reator de hidrólise que antecede o digestor da etapa (b), na condição termofílica, temperatura na faixa de 40-70 °C, preferencialmente 45-55 °C, pH na faixa de 4-7, preferencialmente de 5-6, sendo as frações sólida e líquida resultantes posteriormente encaminhadas para o reator da etapa (b).

15. Sistema para a realização do processo de produção de biogás como definido em qualquer uma das reivindicações 1-14, caracterizado pelo fato de que compreende:

(i) um primeiro reator para o tratamento de biomassa vegetal através de explosão a vapor; e

(ii) um segundo reator para a hidrólise e a digestão anaeróbia do material tratado na etapa (i) por bactérias anaeróbias.

16. Sistema para a realização do processo de produção de biogás como definido em qualquer uma das reivindicações 1-15, caracterizado pelo fato de que o bagaço pode ainda ser hidrolisado previamente em um reator de hidrólise que antecede o digestor da etapa (ii).

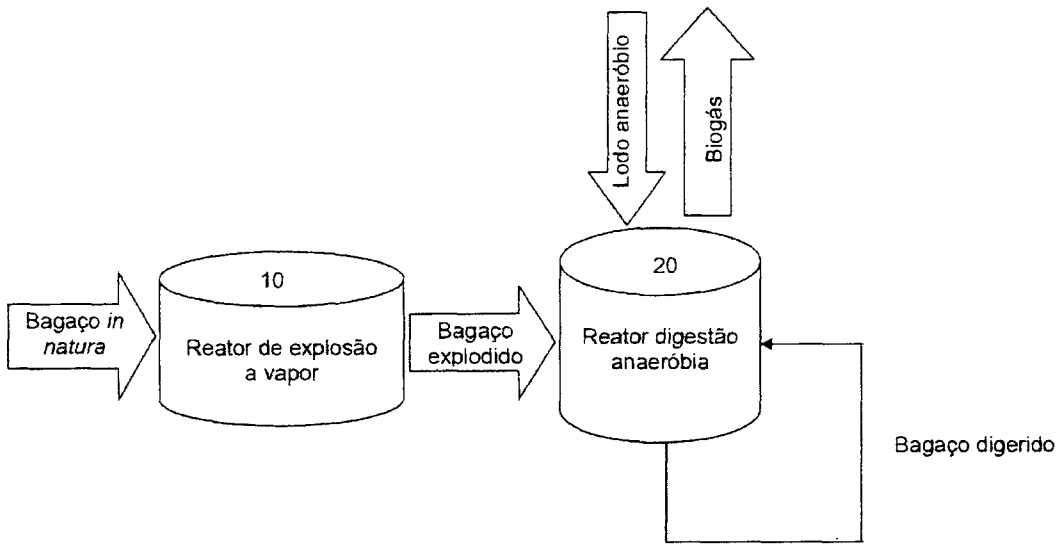

Lodo anaeróbio
Biogás
10
Bagaço *in natura*
Reator de explosão a vapor
Bagaço explodido
20
Reator digestão anaeróbia
Bagaço digerido

FIG. 1

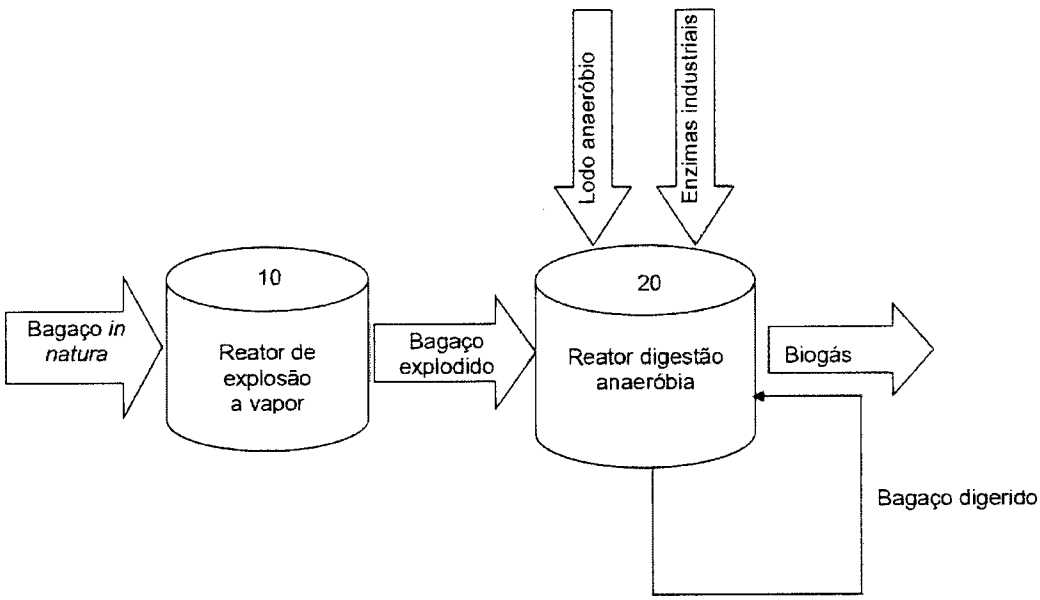

Lodo anaeróbio
Enzimas industriais
10
20
Bagaço *in natura*
Reator de explosão a vapor
Bagaço explodido
Reator digestão anaeróbia
Biogás
Bagaço digerido

FIG. 2

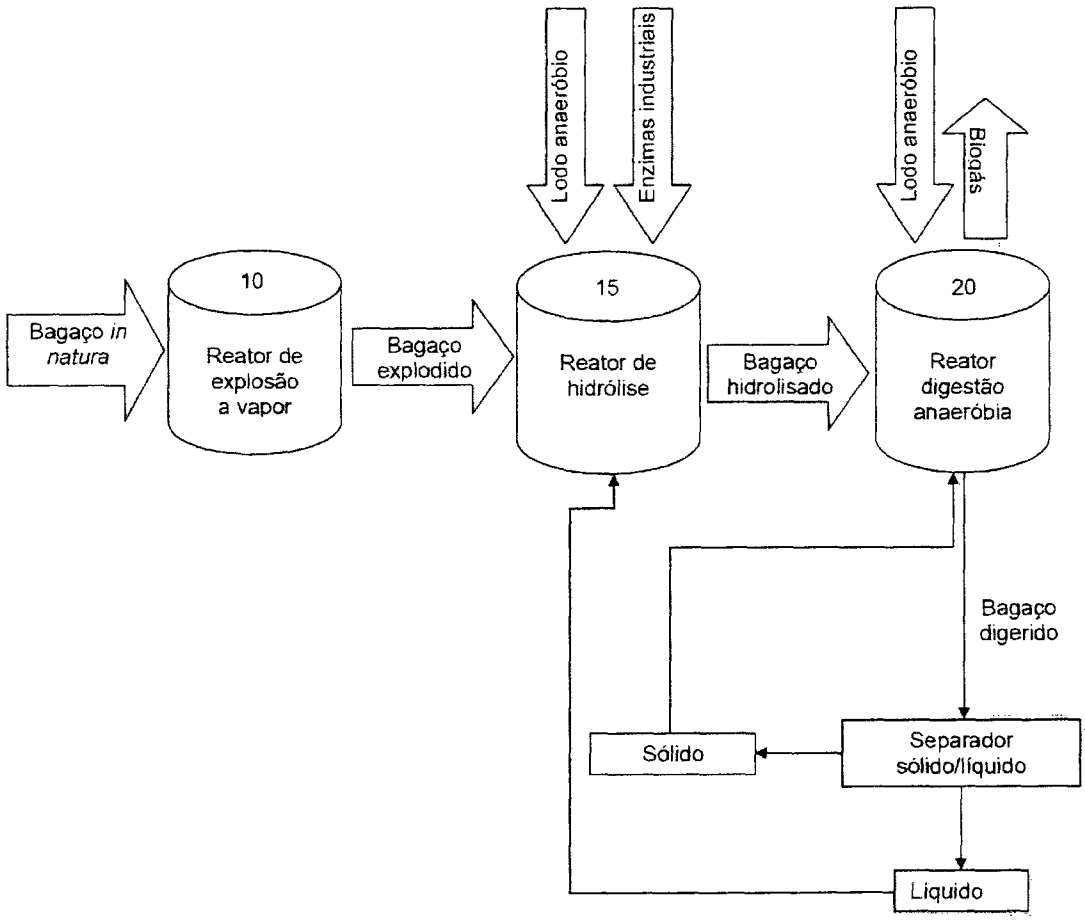

Lodo anaeróbio
Enzimas industriais
Lodo anaeróbio
Biogás
10
15
20
Bagaço *in natura*
Reator de explosão a vapor
Bagaço explodido
Reator de hidrólise
Bagaço hidrolisado
Reator digestão anaeróbia
Bagaço digerido
Sólido
Separador sólido/líquido
Líquido

FIG. 3