

Biogás como Alternativa Energética para Resíduos Industriais¹

Henrique Wedderhoff Herrmann², Gláucia Kovalski², André Lazarin Gallina³, Cynthia Beatriz Fürstenberger², Paulo Rogério Pinto Rodrigues²,

¹Aceito para Publicação no 3º Trimestre de 2015

²Universidade Estadual do Centro- Oeste- Unicentro. Rua Simeão Camargo Varela de Sá, 03- Vila Carli 85040-080- Guarapuava- Paraná- Brasil. henriquehwh@gmail.com

³Universidade Federal da Fronteira Sul- UFFS. Rodovia PR- 182 Km 466, s/n- Realeza- Paraná- Brasil.

Resumo

O glicerol bruto é o principal coproduto da geração do biodiesel, o qual contém impurezas que inviabilizam seu uso comercial direto, o que gera problemas econômicos e ambientais. Este glicerol pode ser transformado biologicamente por microorganismos a partir da fermentação anaeróbica, em que liberam como resultado de seu metabolismo gases como metano CH₄, principal composto do biogás. As indústrias de papel e celulose (IPC) produzem uma série de resíduos após o processamento químico, físico ou mecânico da madeira, os quais apresentam diversos açúcares, e, assim como o glicerol bruto, podem ser assimilados por microorganismos em fermentação, gerando produtos semelhantes e de alto valor agregado. O objetivo deste trabalho é produzir biogás para uso energético, a partir da fermentação anaeróbica da glicerina bruta e de resíduos de biomassa das IPC pela bactéria *Escherichia coli*. Para a fermentação anaeróbica prepararam-se amostras a partir de um planejamento experimental multivariado 2² com ponto central para cada meio estudado. Após 72 h de fermentação, registrou-se por um detector de gases a produção de CH₄. As melhores condições para produção de CH₄ foram nas amostras com 5 mL de *E. coli* e 30% de resíduos da IPC. Foi possível produzir biogás a partir da fermentação anaeróbica da glicerina bruta e de resíduos da IPC pela *E. coli*, caracterizando-se como alternativa energética de

aproveitamento desses subprodutos.

Palavras-chave sustentabilidade; metano; resíduos celulósicos; glicerol bruto.

BIOGAS AS ALTERNATIVE OF ENERGY FOR INDUSTRIAL WASTE

Abstract

The crude glycerol is the main byproduct from biodiesel generation, which contains impurities that preclude the direct commercial use, bringing economic and environmental problems. This glycerol can be biologically transformed by microorganisms through anaerobic fermentation, wherein they release as a result of their metabolism gases such as methane CH₄, the principal biogas component. The paper and pulp industries (PPI) produce a large number of waste after the chemical, physical or mechanical wood processing, which present a several kind of sugars, and, as well as the crude glycerol, it can be assimilated by microorganisms during the fermentation, generating similar products with a high value added. The objective of this research is the production of biogas from crude glycerol and waste of PPI biomass by anaerobic fermentation of *Escherichia coli* for energetical use. For the anaerobic fermentation samples were prepared from a multivariate 2² experimental design with a central point for each studied medium. After 72 h of fermentation, the CH₄ production was registered by a gas detector. The best conditions for CH₄ production were in samples with 5 mL of *E. coli* and 30% of PPI waste. It was possible to produce biogas from crude glycerin and PPI waste by anaerobic fermentation of *E. coli*, characterizing it as an energetical way to utilize these byproducts.

Keyword sustainability; methane; cellulosic residues; crude glycerol.

Introdução

O biogás é uma importante alternativa de energia renovável obtida por meio de um processo natural, com pouco gasto energético em sua produção e baixo custo econômico. Proveniente da degradação da biomassa por microorganismos, o biogás reduz a emissão de gases poluentes e contribui com a preservação do meio ambiente (VAN ELK, 2007;

CUSHION; WHITEMAN; DIETERLE, 2010).

Além do aproveitamento de resíduos sólidos e líquidos e da mitigação do efeito estufa, o uso energético do biogás traz vantagens como o seu fácil armazenamento e distribuição, assim como versatilidade de destino, ou seja, pode ser utilizado como energia térmica, elétrica ou veicular, sendo empregado em domicílios e até no setor industrial. Seus usos domésticos mais conhecidos são para a iluminação, cocção e aquecimento de água. No setor industrial é largamente utilizado como geração de energia elétrica, combustível para motores, bombas e como geração de calor em caldeiras (LANDIM; AZEVEDO, 2008).

O biogás proveniente da degradação da matéria orgânica é geralmente formado por diferentes concentrações de metano CH_4 , dióxido de carbono $CO_{2(g)}$, traços de sulfeto de hidrogênio $H_2S_{(g)}$, amônia $NH_{3(g)}$, hidrogênio $H_{2(g)}$ e nitrogênio $N_{2(g)}$, dependendo em grande parte de sua origem, como pode ser observado na Tabela 1 (SGC, 2012).

Tabela 1. Propriedades típicas do biogás de aterros sanitários, da digestão anaeróbica e do gás natural (Adaptado de SGC, 2012).

	Unidades	Aterro sanitário	Digestão anaeróbica	Gás Natural
Metano	Vol - %	35 - 65	60 - 70	85 - 92
Hidrogênio	Vol - %	0 - 3	0	-
Dióxido de Carbono	Vol - %	15 - 40	30 - 40	0,2 - 1,5
Nitrogênio	Vol - %	5 - 40	-	0,3 - 1,0
Oxigênio	Vol - %	0 - 5	-	-
Sulfeto de Hidrogênio	Ppm	0 - 100	0 - 4000	1,1 - 5,9
Amônia	Ppm	5	100	-

Dentre os constituintes do biogás, o CH_4 possui grande interesse bioenergético, pois constitui a essência de seu poder calorífico, e pode também ser recuperado por processo de reforma. Sua concentração por volume geralmente varia de 35 a 65 % em aterros sanitários, de 60 a 70 % a partir da digestão anaeróbica, e no gás natural pode se encontrar de 85 a 92 % de CH_4 (SEADI et al., 2008; SGC, 2012).

Diversas matérias primas podem ser utilizadas no processo de digestão anaeróbica para produção de biogás, desde que contenham quantidades suficientes de carboidratos, proteínas, gorduras e açúcares. Dentre as várias formas de biomassa que podem ser aproveitadas para fins energéticos como o biogás, os resíduos industriais têm se mostrado

estratégicos, tanto pela redução dos impactos ambientais causado pelos mesmos, quanto pela valorização das cadeias produtivas envolvidas (DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; GOLDEMBERG; LUCON, 2010).

Os resíduos das indústrias de papel e celulose (IPC) são apontados como um recurso com grande potencial para a geração de biogás, pois apresentam características importantes para a fermentação como o elevado teor de celulose, a presença de glicose, frutose, manose, galactose, xilose, entre outros açúcares que podem ser aproveitados por microorganismos para conversão biológica (TSAVKELOVA et al., 2011; KERBAUY, 2012; TAIZ; ZEIGER, 2013; VAN HAANDEL; BARBOSA; CETREL, 2013).

O crescimento da manufatura de papel e celulose leva a uma produção excedente de resíduos, e na maioria das vezes parte dos rejeitos é queimada e outra parte é removida a aterros inadequados, o que causa grandes danos ao meio ambiente. A manutenção contínua desses rejeitos também gera diversos gastos para as IPC. Com isso a produção de biogás a partir desses recursos pode ser um método interessante de incrementar a cadeia de produção das IPC (MMA, 2011; LIMA; LAVORENTE; SILVA, 2013).

Do mesmo modo que nas cadeias produtivas das IPC, outras indústrias apresentam resíduos com potencial para a geração de biogás, como a do biodiesel, que tem o glicerol bruto como principal coproduto do processo de produção. Cerca de 10% de todo o biodiesel gerado a partir da transesterificação do óleo vegetal ou animal, corresponde à quantidade de glicerol final obtida. Devido ao aumento da produção do biodiesel, existe atualmente um excedente cerca de 10 vezes maior que a demanda tradicional desse coproduto (MOTA; PESTANA, 2011; GALLINA, A. L. et al., 2014).

Por possuir uma série de impurezas como água, resíduo do catalisador, álcool não reagido, e ácidos graxos, entre outros compostos, não pode ser utilizado de forma direta nos setores farmacêuticos e cosmetológicos, nem descartado na natureza, o que pode acarretar danos econômicos e ambientais. Por outro lado, por ser uma grande fonte de açúcares, assim como outros nutrientes, tais qual fósforo, magnésio, potássio entre outros, pode ser empregado em processos fermentativos para geração de biogás, o que seria uma alternativa conveniente para o destino desse coproduto (SUHAIMI et al., 2012 ; HERRMANN et al., 2013; MOTA; MONTEIRO, 2013).

Os bioprocessos e transformações biológicas são estratégias que podem ser aplicadas ao glicerol bruto assim como os resíduos de IPC. Estes resíduos podem ser utilizados como fonte de nutrientes para a fermentação anaeróbica de leveduras e bactérias para a produção de

biogás. Dentre eles, a *Escherichia coli* tem se destacado pela sua capacidade de se adaptar facilmente a diferentes condições, ter baixo custo, facilidade no trabalho e manuseio, além de sintetizar diversos produtos por meio de seu metabolismo. Quando presente em meio anaeróbico, seu crescimento fermentativo permite a produção de ácidos orgânicos, álcoois e também o biogás (KOVALSKI et al., 2013; FUMITAKA; WU, 2010; TSAVKELOVA et al., 2011).

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo produzir biogás a partir da fermentação anaeróbica da bactéria *E. coli* utilizando-se como substratos resíduos da indústria de papel e celulose e glicerol residual da produção do biodiesel.

Materiais e Métodos

Cultivo do Microorganismo

O microorganismo utilizado no trabalho foi a bactéria *Escherichia coli* com padrão ATCC 25922, obtida comercialmente, desidratada por um processo de liofilização, e armazenada para conservação em temperatura próxima de -20°C.

A cepa de *E. coli* foi cultivada em meio líquido específico para a multiplicação quantitativa e desenvolvimento celular. Esse meio era composto por peptona, lactose, bile bovina, cloreto de sódio, fosfato de potássio dibásico e fosfato de potássio monobásico. A bactéria foi incubada por um período de 48 h em estufa bacteriológica a 36°C ± 0,5°C, onde o meio de cultivo apresentava pH neutro.

Resíduos Utilizados

O glicerol bruto utilizado no projeto é proveniente da usina de biodiesel na Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná (UNICENTRO). O glicerol foi autoclavado a 120 °C por 30 minutos a alta pressão para esterilização e estocado em balões de 2 L em geladeira.

Os resíduos da indústria de papel e celulose (IPC) foram fornecidos por uma fábrica de papel cartão da região central do estado do Paraná/BR. O material lignocelulósico empregado no trabalho trata-se da fibra remanescente do processo de produção do papel cartão, que de acordo com a fábrica, representa cerca de 10 toneladas de resíduo seco descartados diariamente.

A fibra foi coletada, passou por processo de secagem e esterilização em temperatura de 120 °C por 48 h. Posteriormente, foi moída em moinho de facas até granulometria reduzida, permitindo a assimilação por microorganismos.

Planejamento Experimental

Para a confecção dos ensaios foram realizados planejamentos experimentais multivariados 2^2 com ponto central para cada meio estudado utilizando o software Design-Expert[®].

As variáveis empregadas foram na concentração de bactéria e fibra de IPC (no qual 100% equivalem a 2 g), e fixou-se um valor padrão para o glicerol de 50 mL para todos os ensaios.

Processo de Fermentação

A fermentação das amostras foi feita em sistema fechado, onde se aplicou gás nitrogênio para criar um ambiente anaeróbico. Os ensaios inoculados (mistura de glicerol, resíduos da IPC e microorganismo) ficaram em processo de fermentação em estufa microprocessada de cultura e bacteriologia - Q316M/Quimis, por 72 horas a $36^{\circ}\text{C} \pm 0,5$.

Quantificação do Teor Metano

A análise e quantificação do gás CH_4 foi feita após 72 horas de fermentação utilizando aparelho detector eletroquímico de gases da marca Instrutherm[®] DG-500 com sensor de leitura SG-80.

Análise de Dados

A análise de dados da pesquisa foi realizada utilizando-se o software Design-Expert[®], para gerar a superfície de resposta, linha de contorno e a tabela ANOVA para todos os meios estudados, sendo possível analisar os melhores parâmetros para produção do CH_4 .

Resultados e Discussão

Proporção de CH₄ obtido no processo de fermentação

Os teores de CH₄ obtidos a partir da fermentação microbiológica do glicerol bruto (50 mL) e diferentes proporções de microorganismo e fibra residual do planejamento inicial estudado encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados obtidos na fermentação para o primeiro planejamento.

Ensaio	Bactéria (ml)	Fibra (m/m %)	CH₄ (% V/V)
1	15	50	16±1,41
2	5	0	19±2,12
3	10	100	16±1,41
4	15	100	15±1,41
5	10	100	14±1,41
6	5	100	16±0,71
7	10	50	16±1,73
8	10	50	16±1,73
9	10	0	13±0,71
10	5	50	15±1,41
11	10	50	13±1,73
12	15	0	15±2,83
13	15	50	14±1,41
14	5	50	17±1,41
15	10	0	14±0,71
16	5	0	16±2,12
17	5	100	15±0,71
18	15	0	11±2,83
19	15	100	13±1,41

As concentrações obtidas de CH₄ no primeiro planejamento variaram de 11% de volume na amostra 18 (15 mL de bactéria e 0% de fibra), a 19% de volume na amostra 2 (5 mL de bactéria, 0% de fibra).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2, o programa estatístico indicou um modelo 2FI, que considera os efeitos e interações dos fatores principais.

Na Tabela 3 são apresentadas as informações referentes à ANOVA da superfície de resposta para o modelo 2FI empregado para o primeiro planejamento.

Tabela 3. Análise dos principais efeitos na fermentação das amostras para o primeiro estudo a partir do planejamento fatorial.

Fatores e interações (FI)	Efeito	p-valor
Intercepção/ Modelo	18.69737	0.0694
A – Bactéria	-0.38333	0.0198
B - Proporção de Fibra	-0.028333	0.8547
AB	3.00000	0.1912
Desvio Padrão: 1.55	R²: 0.3673	Erro Padrão: 0.36

Pode se observar na Tabela 3 que o modelo 2FI não foi significativo, pois o valor de *p-valor* é de 0,0694, porém, este modelo tem um nível de confiança de aproximadamente 93%, o que indica uma expressiva tendência para as melhores condições de produção de CH₄, como pode ser verificado pela superfície de resposta da Figura 1.

Na Figura 1 é apresentada a superfície de resposta para a produção de CH₄ na fermentação para os ensaios do primeiro planejamento.

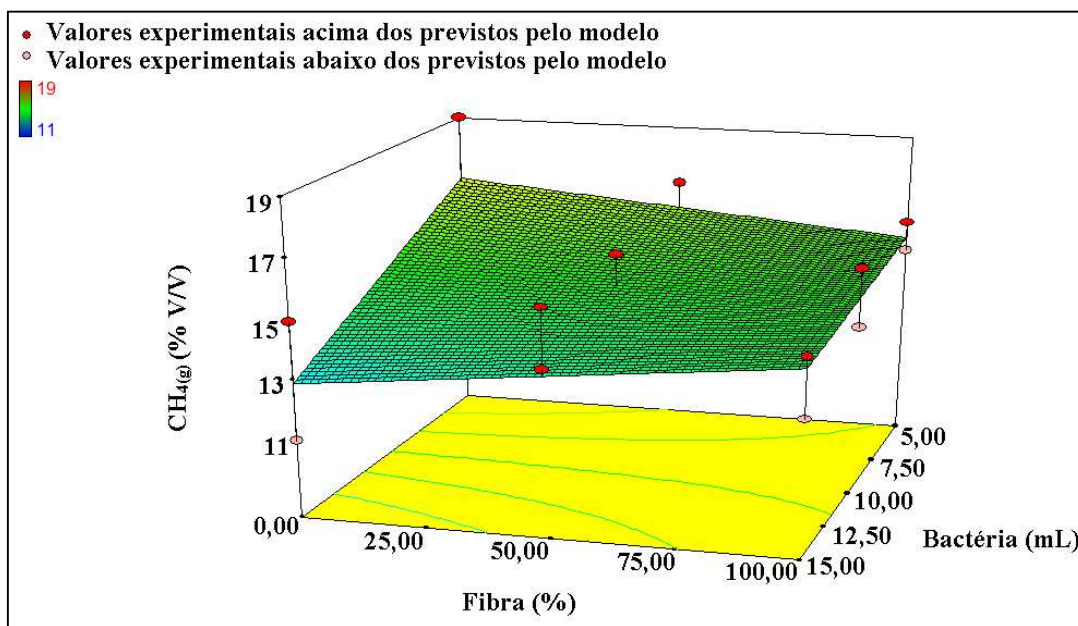


Figura 1. Superfície de resposta para o teor de CH₄ obtido nas amostras do primeiro planejamento.

O gráfico de superfície de resposta (Figura 1) indica uma inclinação no comportamento dos dados experimentais, onde as melhores condições de produção de CH₄ são para valores de menor quantidade de bactéria e de fibra associada ao glicerol.

A Figura 1 demonstra que a maior produção de CH₄ para este planejamento inicial foi na presença de 0% de fibra e 5 mL de *E. coli*. Pode se observar que o efeito dos nutrientes

no crescimento microbiológico influencia o desenvolvimento da população, de forma que afeta sua capacidade na produção de CH₄ (MADIGAN; MARTINKO; PARKER, 2010).

Com isso, realizou-se um segundo planejamento direcionando as condições (bactéria e fibra) de acordo com os resultados obtidos.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos de CH₄ nas amostras do segundo planejamento, assim como as concentrações utilizadas na fermentação.

Tabela 4. Resultados obtidos na fermentação para o segundo planejamento.

Ensaio	Bactéria (ml)	Fibra (m/m %)	CH ₄ (% V/V)
1	1	30	19±2,12
2	3	30	24±3,54
3	5	15	23±0,71
4	3	30	19±3,54
5	3	0	21±2,12
6	5	0	21±0,5
7	1	0	24±1,41
8	3	0	24±2,12
9	3	15	20±1,41
10	1	0	22±1,41
11	5	30	24±0,71
12	5	30	25±0,71
13	1	15	21±1,41
14	5	0	21±0,5
15	5	15	24±0,71
16	1	15	23±1,41
17	1	30	22±2,12
18	3	15	22±1,41

As concentrações obtidas de CH₄ variaram de 19% de volume na amostra 1 (1 mL de bactéria e 30% de fibra), a 25% de volume na amostra 12 (5 mL de bactéria, 30% de fibra).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, o modelo que melhor explica estatisticamente os dados obtidos é o 2FI, que considera as interações e efeitos dos fatores principais.

Na Tabela 5 são apresentadas as informações referentes à ANOVA da superfície de resposta para o modelo 2FI aplicado para o segundo planejamento.

Tabela 5. Análise dos efeitos principais na fermentação das amostras a partir do planejamento fatorial do segundo estudo.

Fatores e interações (FI)	Efeito	p-valor
Intercepção/ Modelo	23.54167	0.0667
A – Bactéria	-0.45833	0.2184
B - Proporção de Fibra	-0.15000	1
AB	0.050000	0.0171
Desvio Padrão: 1.57	R ² : 0.03909	Erro Padrão: 0.37

Observa-se na Tabela 5 que o de *p-valor* é de 0,0667, ou seja, o modelo 2FI empregado não foi significativo. Porém, este modelo possui grau de confiança de aproximadamente 93%, e indica tendência para as melhores condições de produção de CH₄, como pode ser verificado pela superfície de resposta da Figura 2.

Na Figura 2 é demonstrada a superfície de resposta para a produção de CH₄ na fermentação das amostras do segundo planejamento.

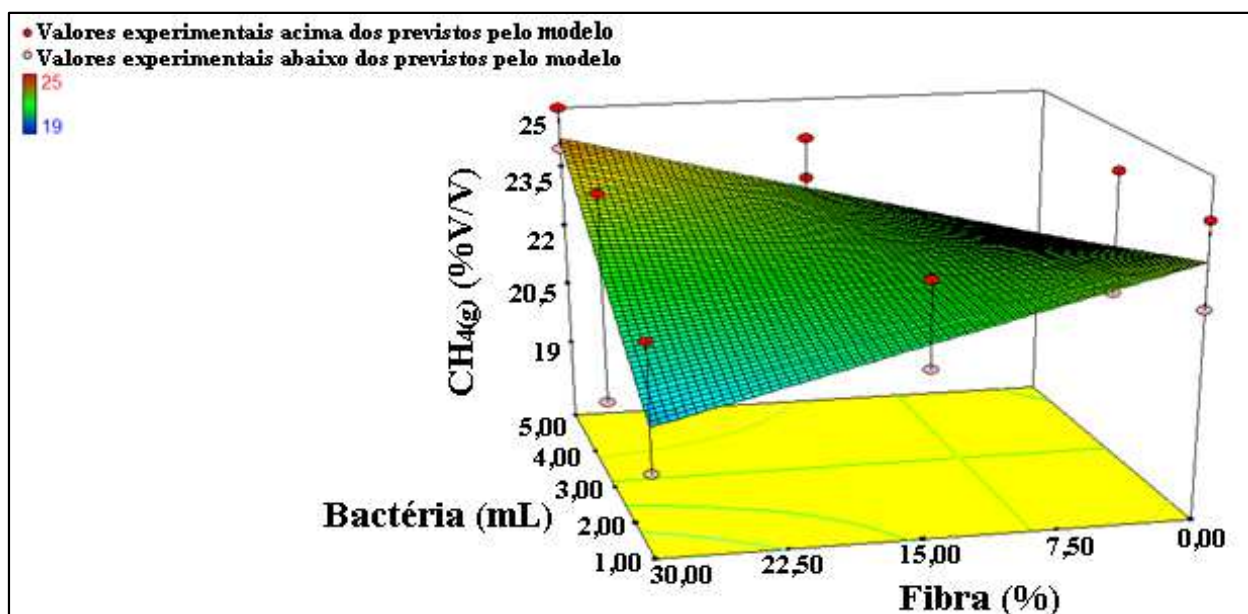


Figura 2. Superfície de resposta para o teor de CH₄ obtido nas amostras do segundo planejamento.

Observa-se que o gráfico de superfície de resposta da Figura 2 apresenta orientação no comportamento dos dados experimentais, o qual aponta as melhores condições de produção de CH₄ para valores de maior quantidade de bactéria e de fibra.

A Figura 2 demonstra que a maior produção de CH₄ é na presença de 30% de fibra e

5 mL de *E. coli*. Observa-se a partir dos resultados obtidos que em quantidades menores que 5 mL de bactéria, ocorre limitação enzimática, não sendo suficiente a concentração de *E. coli* para a oferta de nutrientes, ocorrendo a restrição do desenvolvimento do microorganismo e da produção de CH₄ (TORTORA, FUNKE; CASE, 2012).

Quanto à presença de fibra associada ao glicerol, foi demonstrado que em proporções inferiores a 30% o aproveitamento do substrato é menor, e dessa forma a eficiência de produção de CH₄ apresentou considerável queda.

Dessa maneira, elaborou-se um terceiro planejamento visando otimizar a produção de CH₄, e encontrar as melhores condições (bactéria e fibra).

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos de CH₄ nas amostras do terceiro planejamento, assim como a quantidade de bactéria e fibra utilizadas na fermentação.

Tabela 6. Resultados obtidos na fermentação para o terceiro planejamento.

Ensaio	Bactéria (ml)	Fibra (m/m %)	CH ₄ (% V/V)
1	6	15	17±1,41
2	6	30	17±0,71
3	5	45	19±1,41
4	6	45	19±1,41
5	4	45	22±1,41
6	6	30	18±0,71
7	6	45	21±1,41
8	4	15	20±1,41
9	5	30	24±0,71
10	5	15	21±1,41
11	4	15	22±1,41
12	5	15	19±1,41
13	5	45	21±1,41
14	4	30	21±1,41
15	6	15	19±1,41
16	4	30	19±1,41
17	4	45	20±1,41
18	5	30	25±0,71

As concentrações obtidas de CH₄ variaram de 17% de volume na amostra 1 (6 mL de bactéria e 15% de fibra), a 25% de volume na amostra 18 (5 mL de bactéria, 30% de fibra).

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6, o programa estatístico indicou um modelo quadrático para análise dos dados, considerando os efeitos e interações dos fatores principais.

Na Tabela 7 são apresentadas as informações referentes à ANOVA da superfície resposta para o modelo quadrático aplicado para o terceiro planejamento.

Tabela 7. Análise dos efeitos principais na fermentação das amostras a partir do planejamento fatorial do terceiro estudo.

Fatores e interações (FI)	Efeito	p-valor
Intercepção/ Modelo	-32.31579	0.0143
A – Bactéria	21.99561	0.0514
B - Proporção de Fibra	0.16433	0.5262
AB	0.033333	0.4390
A²	-2.40789	0.0078
B²	-5.14620	0.1629
Desvio Padrão: 1.78	R²: 0.5592	Erro Padrão: 0.65

Na Tabela 7, o valor de *p-valor* 0,0143 demonstra que este modelo é significativo e apresenta alto nível de confiança, de aproximadamente 98,6%, apontando as melhores condições de produção de CH₄. Isso pode ser verificado na Figura 3, onde é demonstrada a superfície de resposta para a produção de CH₄ na fermentação das amostras do terceiro planejamento.

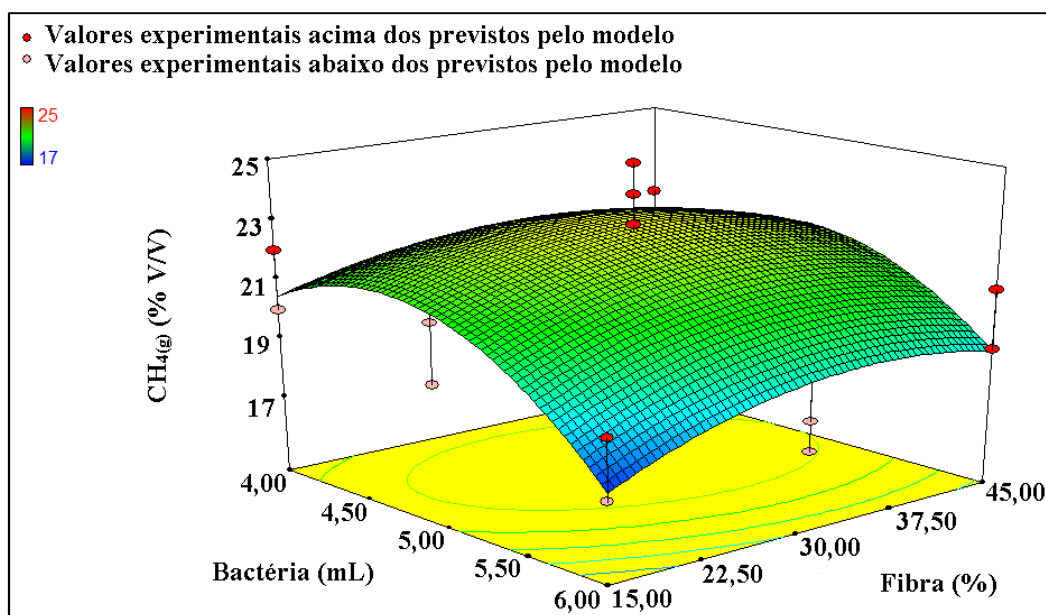


Figura 3. Superfície de resposta para o teor de CH₄ obtido nas amostras do terceiro planejamento.

A Figura 3 apresenta o gráfico de superfície de resposta, o qual indica o ponto ótimo

para produção de CH₄ conforme o modelo estatístico estudado. De acordo com o comportamento dos dados experimentais as melhores condições de produção de CH₄ são para valores de 30% de fibra e 5 mL de bactéria.

Na Figura 4 encontra-se a linha de contorno para a produção de CH₄ na fermentação dos ensaios no terceiro planejamento, segundo o modelo quadrático aplicado, e na Tabela 8 as melhores condições para a produção de CH₄.

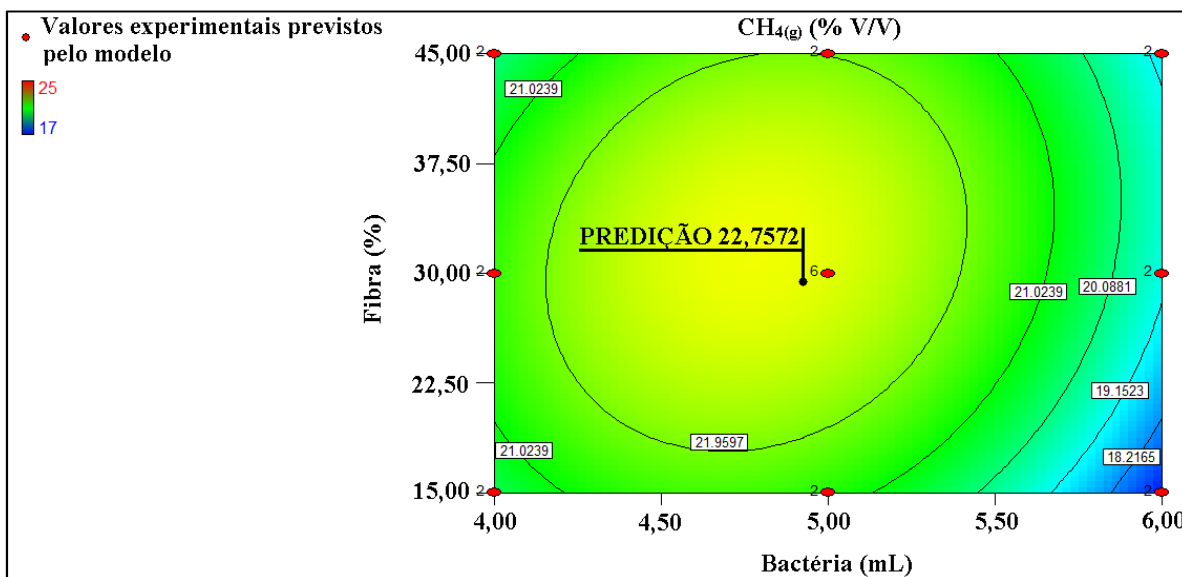


Figura 4. Linha de contorno para o teor de CH₄ obtido nas amostras do terceiro planejamento.

Tabela 8. Melhores condições para produção de CH₄.

Bactéria (mL)	Fibra (m/m %)	CH ₄ (% V/V)
5	30	25

A linha de contorno apresentada na Figura 4 sugere os que ensaios resultam em um mesmo valor de CH₄. As Figuras 3, 4 e a Tabela 8 confirmam que segundo o modelo estatístico empregado, as condições utilizadas no segundo planejamento (30% de fibra e 5 mL de bactéria) são as que alcançaram os melhores resultados, sendo este o ponto ótimo para produção de CH₄ dentro dos limites estudados.

Com isso, percebe-se que concentrações maiores ou inferiores a 5 mL de *E. coli* adstringem a produção eficaz de CH₄. Presume-se que quantidades menores a essa não são capazes de aproveitar a disponibilidade de nutrientes (glicerol e fibra) no meio de maneira eficiente, pois sofrem o efeito de supressão durante a fermentação. Já quantidades maiores são

afetadas pelo próprio metabolismo bacteriano, onde o desenvolvimento torna-se lento pelo acesso reduzido ao substrato pela alta densidade celular, interferindo na produção de CH₄ (MADIGAN; MARTINKO; PARKER, 2010).

Quanto à proporção de fibra, concentrações maiores ou menores que 30% influenciaram de forma negativa a produção de CH₄. Volumes menores que 30% foram insuficientes para provocar uma maior produção de CH₄ na conversão microbiológica, e por sua vez, concentrações maiores possivelmente dificultaram o desenvolvimento da bactéria por saturação enzimática (WILLEY; SHERWOOD; WOOLVERTON, 2008).

As concentrações de CH₄ obtidas são consideradas altas quando comparadas a outros trabalhos, como o de JAYALAKSHMI, JOSEPH e SUKUMARAN (2007), que conseguiram o rendimento de 17% na fermentação de resíduos alimentares orgânicos pela bactéria *E. coli*. Porém, não alcançam concentrações próximas às encontradas na associação da *E. coli* à outros microorganismos, que no estudo de FUMITAKA e WU (2010) obteve-se 60% de CH₄.

O modelo quadrático do terceiro planejamento pode ser representado pela Equação (1), que é capaz de prever o valor de produção de CH₄ que seria obtido com valores diferentes para os fatores, sendo válida apenas para os limites estudados.

$$\text{Teor de CH}_4 = - 32.31579 + 21.99561 * [\text{vol. bactéria}] + 0.16433 * [\text{proporção de fibra}] + 0.033333 * [\text{vol. bactéria}] * [\text{proporção de fibra}] - 2.40789 * [\text{volume de bactéria}]^2 - 5.14620 * [\text{proporção de fibra}]^2 \quad (\text{Equação 1})$$

Conclusões

- O glicerol oriundo da produção do biodiesel apresentou-se como meio nutriente adequado para o desenvolvimento microbiológico na produção de CH₄ em todas as condições de estudo;
- A fibra residual da indústria de papel e celulose mostrou-se viável como substrato, interferindo de forma relevante na produção de CH₄;
- Foi possível produzir CH₄ para fins energéticos a partir da fermentação anaeróbica dos resíduos industriais pela *Escherichia coli* ATCC 25922, com o melhor resultado (25% de volume na amostra) nas condições de 5 mL de bactéria e de 30% de fibra residual.

Agradecimentos

A Capes, CNPq e a Ibema Cia. Brasileira de Papel pelo suporte financeiro a esta pesquisa.

Referências

CUSHION, E.; WHITEMAN, A.; DIETERLE, G. Bioenergy Development: Issues and impacts for poverty and natural resource management. Washington D. C: **The World Bank**. 2010. 272 p.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. Biogas from waste and renewable resources: an introduction. **Wiley-Backwell**. 2008. 450 p.

FUMITAKA, S.; WU, J. Agency For Science, Technology And Research. **Methods for improving biogas production in the presence of hard substrates**. EP nº PI2010114481A1, 2 abr. 2009, 7 out. 2010.

GALLINA, A. L. et al. Estudo ambiental e socioeconômico da produção de biodiesel do óleo da *Cyperus esculentus*. **Ambiência**, v. 10, p. 303-317, 2014.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energy, environment and development**. 2. ed. London: Earthscan, 2010. 481 p.

HERRMANN, H. W. et al. Analysis of gases released in the glycerin microbiological fermentation in dextrose medium. In: Formatex Research Center. (Org.). **Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments**. 1ed.Espanha: Formatex Research Center, v. 1, 2013. p. 202-205.

JAYALAKSHMI, S.; JOSEPH, K.; SUKUMARAN, V. Methane production from kitchen waste using *Escherichia coli*. **Journal Of Environmental Science And Engineering**, Thanjavur, v. 49, n. 2, p.99-102, abr. 2007.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2012. 498 p.

KOVALSKI, G. et al. Microbiological fermentation of glycerol to obtain alcohol in tryptose culture medium. In: A. Méndez-Vilas. (Org.). **Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments**. 1ed. ESPANHA: Formatex Research Center, v. 1, 2013. p. 293-301.

LANDIM, A. L. P. F.; AZEVEDO, L. P. **O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao sustentável**. Rio de Janeiro: Bndes, 2008. 41 p.

LIMA, M. A.; LAVORENTE, G. B.; SILVA, H. K. P. Effects of pretreatment on morphology, chemical composition and enzymatic digestibility of eucalyptus bark: a potentially valuable source of fermentable sugars for biofuel production – part

1. **Biotechnology For Biofuels**, Piracicaba - Sp, v. 75, n. 6, p.1-17. maio. 2013.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; PARKER, J. **Microbiologia de Brook**. 12 ed. Porto Alegre: Artmed, 2010. 1160 p.

MMA, MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: MMA, 2011. 109 p.

MOTA, C. J. A.; MONTEIRO, R. S. Química e sustentabilidade: Novas Fronteiras em biocombustíveis. **Química Nova**, Rio de Janeiro, v. 36, n. 10, p.1483-1490. set. 2013.

MOTA, C. J. A.; PESTANA, C. F. M. Co-produtos da Produção de Biodiesel. **Revista Virtual de Química**, Rio de Janeiro, v. 3(5): p. 416-425, 2011.

SEADI, T. A. et al. **Biogas: handbook**. Esbjerg: University Of Southern Denmark, 2008. 126 p.

SGC, SWEDISH GAS CENTER. **Basic Data on Biogas**. 2. ed. Sweden: Svenskt Gastekniskt Center Ab, 2012. 29 p.

SUHAIMI, S. N. et al.: Bioconversion of glycerol for bioethanol production using isolated *Escherichia coli* SS1. **Brazilian Journal Of Microbiology**, São Paulo, v. , n. , p.506-516, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 596 p.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia**. 10. ed. Porto Alegre, Artmed, 2012. 920 p.

TSAVKELOVA, E. A. et al. Biogas production by microbial communities via decomposition of cellulose and food waste. **Applied Biochemistry And Microbiology**, Moscow, v. 48, n. 4, p.417-424, maio 2011.

VAN ELK, A. G. H. P. **Redução de emissões na disposição final de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 40 p.

VAN HAANDEL, A. C.; BARBOSA, C. R.; CETREL S. A.. **Processo e sistema de produção de biogás a partir da biomassa vegetal**. BR nº PII102153-5A2, 11 maio 2011, 25 jun. 2013.

WILLEY, J. M.; SHERWOOD, L. WOOLVERTON, C. J. Prescott, Harley, and Klein's **Microbiology**. 7. ed. United States: **Mcgraw-hill Higher Education**, 2008. 1088 p.