Custo operacional de produção do poli-3-hidroxibutirato a partir de resíduos agroindustriais, em laboratório

Marcela Cassin Chaves

Mestrado em Tecnologia Ambiental pela Universidade Federal Fluminense – UFF
Professora da Fundação Educacional de Volta Redonda
Rua Cento e Cinquenta e Quatro, nº 783. Laranjal. Volta Redonda/RJ. CEP: 27255-085
E-mail: marcelacassin@yahoo.com.br

Afonso Aurélio de Carvalho Peres

Doutorado em Ciência Animal pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF
Professor da Universidade Federal Fluminense – UFF
Avenida dos Trabalhadores, nº 420. Vila Santa Cecília. Volta Redonda/RJ. CEP: 27255-125
E-mail: lelo@metal.eeimvr.uff.br

Carlos Eduardo de Souza Teodoro

Doutorado em Biociências e Biotecnologia pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF
Professor da Universidade Federal Fluminense – UFF
Avenida dos Trabalhadores, nº 420. Vila Santa Cecília. Volta Redonda/RJ. CEP: 27255-125
E-mail: eduardo@metal.eeimvr.uff.br

RESUMO

Objetivou-se analisar comparativamente o custo operacional de produção do poli-3-hidroxibutirato (PHB) a partir de micro-organismos com uso de fontes de carbono derivadas de resíduos agroindustriais, em laboratório. O poli-3-hidroxibutirato, considerado um tipo de bioplástico, é um biomaterial derivado do metabolismo de micro-organismos submetidos ao crescimento em fontes de carbono. A produção de bioplástico surge frente a um acelerado processo de consumo mundial do petróleo que, além de ser uma fonte não renovável, não é biodegradável. Estudos que avaliam a viabilidade técnica na produção de bioplásticos a partir do uso de resíduos agroindustriais vêm sendo realizados; por isso, analisar o custo operacional de produção torna-se extremamente necessário para que se consiga observar a competitividade deste material no mercado frente aos polímeros petroquímicos. Determinaram-se os custos operacionais envolvidos na produção com uso de cultura bacteriana crescida em sacarose, glicose e lactose e em fontes de carbono derivadas de resíduos agroindustriais (glicerol, melaço e soro de leite). Após o levantamento e análise dos resultados obtidos, constatou-se que os menores custos operacionais apresentados se evidenciaram quando se considerou a doação das fontes de carbono

como matéria-prima para a produção de PHB. Ao se utilizar glicerol e melaço como fontes de carbono, o custo de produção é de 74,82% e 94,04%, respectivamente, comparados ao custo de produção com utilização da sacarose. Sendo assim, o uso de resíduos agroindustriais como fontes de carbono provenientes do processamento de matéria prima de origem animal ou vegetal apresentou custos operacionais de produção atrativos para investimento.

Palavras-chave: Bioplástico. *Bradyrhizobium japonicum*. Fontes de carbono. PHB. Resíduo agroindustrial.

Operational costs of poly-3-hydroxybutyrate production from agro-industrial waste, in laboratory

ABSTRACT

This study aimed to comparatively analyze the operating costs of production of poly-3-hydroxybutyrate (PHB) from microorganisms to use carbon sources derived from agro-industrial waste in the laboratory. The poly-3-hydroxybutyrate considered a type of bioplastic, a biomaterial is derived from metabolism of microorganisms subjected to growth on carbon sources. The production of bioplastic comes forward at a fast world oil consumption process, which besides being a non-renewable source, is not biodegradable. Studies assessing the technical feasibility in the production of bioplastic from the use of agro-industrial waste have been conducted and analyze operational cost of production becomes extremely necessary for one to observe the competitiveness of the market compared to the petrochemical polymers. They determined the operational costs involved in the production with the use of bacterial culture grown on sucrose, glucose and lactose and carbon sources derived from agricultural waste (glycerol, molasses and whey). After the survey and analysis of the results, it was found that the lower operating costs presented were when considering the donation of carbon sources as raw material for the production of PHB. By using molasses and glycerol as carbon sources, the cost of production is 74.82 % and 94.04 %, respectively, compared to the cost of production with the use of sucrose. In this way, the use of agricultural waste as carbon sources from the processing of raw materials of animal or vegetable origin presented attractive production operating costs for investment.

Keywords: Agro-industrial waste. Bioplastic. *Bradyrhizobium japonicum*. Carbon sources. PHB.

1 INTRODUÇÃO

Os plásticos na sociedade atual têm papel fundamental. Possuem diversas aplicações e vêm substituindo matérias-primas convencionais em função do seu baixo custo e grande durabilidade (ROSA et al., 2002).

A grande problemática gerada pela excessiva utilização de polímeros sintéticos envolve duas questões ambientais. A primeira está no fato de que esses polímeros são derivados do petróleo, que é um recurso natural não renovável. A segunda relaciona-se com o tempo de degradação desses compostos no meio ambiente. Frente a esses problemas, vários estudos vêm sendo realizados com o objetivo de se produzir polímeros que não sejam derivados do petróleo e que tenham uma degradabilidade mais rápida, proporcionando um menor impacto ambiental (BRITO et al., 2011).

Os polihidroxialcanoatos (PHAs) são uma classe de biopolímeros que surgem como alternativa aos polímeros petroquímicos (SILVA et al., 2007). Os bioplásticos podem ser produzidos por diversos grupos de bactérias (MADISON e HUISMAN, 1999).

Para que o processo de produção dos biopolímeros seja eficiente, é preciso que os micro-organismos recebam uma fonte de carbono.

O custo de produção de plásticos derivados do petróleo apresenta um valor menor que US\$ 1.00/kg; valor esse inferior àquele encontrado para a produção de PHAs (US\$ 4.00 a US\$ 5.00/kg) (BORSCHIVIER et al., 2008). Um dos problemas que freia a aplicação comercial do polihidroxibutirato (PHB), uma classe de PHA, é justamente o alto valor do custo de produção, associado ao custo do substrato, principalmente a fonte de carbono (TSUGE, 2002; WILLKE e VORLOP, 2004).

Para a produção de PHB atingir viabilidade comercial, sua produção deve ser proveniente de fontes renováveis de baixo custo ou, até mesmo, sem custo de aquisição. Desse modo, a produção proveniente do uso de resíduos agroindustriais parece ser uma alternativa interessante (ILES e MARTIN, 2013). Os custos envolvidos podem ser reduzidos para valores entre US\$ 1.00 e US\$ 2.00/kg de PHA (LEE et al., 1999; TSUGE, 2002; WILLKE e VORLOP, 2004).

Dentre as diferentes fontes de carbono provenientes de resíduos agroindustriais, a lactose presente no soro do leite apresenta-se como uma alternativa para reduzir os custos envolvidos na produção de bioplásticos. Os efluentes líquidos são considerados um dos principais responsáveis pela poluição ambiental causada pela indústria de laticínios na produção de derivados lácteos. Em muitos laticínios, o soro de leite é descartado junto aos demais efluentes, sendo considerado um forte agravante ao meio ambiente devido ao seu elevado potencial poluidor (SILVA, 2011).

Alguns autores já relataram a capacidade de produção de PHAs a partir de soro *in natura* ou hidrolisado (KIM, 2000; MARANGONI et al., 2002; NIKEL et al., 2006; KOLLER et al., 2008; BOSCO e CHIAMPO, 2010; POVOLO et al., 2010). O micro-organismo *Escherichia coli*, por exemplo, é capaz de consumir lactose presente no soro de queijo como fonte de carbono para produção de PHAs (WONG e LEE, 1998; AHN et al., 2000; PARK et al., 2002; NIKEL et al., 2006).

Bosco e Chiampo (2010), em seus estudos utilizando soro de queijo, como substrato e lodo ativado como inóculo, obtiveram um acúmulo de PHA de 6,44%, quando o pH foi mantido igual a 7,0 e de 8,67% sem o ajuste do pH inicial do meio de cultivo. Cesca (2011) obteve peso seco celular (PSC) de 2,34 g/L e produtividade de PHB de 0,73 g/L com rendimento de 31,34%, utilizando soro de leite testado em *E. coli*, com 24h de cultivo e pH inicial em torno de 7,0.

O glicerol, outro resíduo que tem se mostrado atrativo para produção de bioplástico, é um subproduto proveniente da produção de biodiesel (DOBROTH et al., 2011). Quando utilizado como matéria-prima para produção de bioplástico, observou-se redução de 45% para 8% no custo de produção (POSADA et al., 2011).

Posada et al. (2011) demonstraram uma alta capacidade da produção de PHB e de produtividade de PHB em relação ao PSC, quando utilizaram glicerol como fonte de carbono para micro-organismos. Os resultados, em termos de produtividade, ficaram entre 37% e 53% de rendimento.

Os resíduos da indústria sucroalcooleira, como bagaços, vinhaça e melaço (além da sacarose e do álcool) representam também uma fonte alternativa de carbono para a

produção de PHAs por micro-organismos (TAGUCHI et al., 2003). Estudos de produção de PHB em batelada com a bactéria *E. coli* recombinante, utilizando melaço como fonte de carbono, foram realizados por Liu et al. (1998), que alcançaram resultados de 39,5 g/L de peso seco celular, 80% de PHB com produtividade de 1 g/L, quando a concentração do melaço foi aumentada de 26,5 g/L para 144,0 g/L. Abe (2010) pesquisou a produção de PHB utilizando o melaço como fonte de carbono em culturas mistas e obteve uma produção de 0,5 g/L.

Dessa forma, devido ao baixo custo de aquisição e boa disponibilidade, os resíduos da agroindústria apresentam-se como uma alternativa para os processos biotecnológicos, agregando assim valor a um produto que certamente seria descartado, não atendendo a legislação ambiental vigente.

Objetivou-se analisar comparativamente os custos operacionais de produção e realizar a composição dos custos, em laboratório, do poli-3-hidroxibutirato (PHB) a partir de micro-organismos com uso de fontes alternativas de carbono derivadas de resíduos agroindustriais, identificando os itens de maior imobilização de capital financeiro.

O artigo está estruturado em cinco capítulos. Na parte introdutória (Capítulo 1), relaciona-se o contexto da proposta, o problema identificado, a revisão de literatura realizada e o objetivo do estudo. No desenvolvimento do artigo, relaciona-se o material utilizado, os tratamentos avaliados e a metodologia aplicada (Capítulo 2), bem como se apresenta a análise dos resultados e a discussão realizada acerca do estudo (Capítulo 3). As considerações finais são apresentadas, finalizando o artigo (Capítulo 4), sendo seguidas pelas Referências utilizadas que corroboram as assertivas apresentadas neste artigo (Capítulo 5).

2 METODOLOGIA DE ESTUDO

O micro-organismo, utilizado no trabalho, foi a bactéria *Bradyrhizobium japonicum*, cedido pela EMBRAPA Agrobiologia, em Seropédica, RJ. De acordo com

Mercan et al. (2002), o *Bradyrhizobium japonicum* é uma espécie capaz de acumular PHB em suas células.

Para verificar o efeito da fonte de carbono no crescimento e produção de PHB, o micro-organismo foi cultivado em meio de cultura adicionado das seguintes fontes de carbono: glicose, sacarose, lactose, glicerol, melaço e soro de leite. As condições de cultivo utilizadas foram em concentrações de 1%, 2% e 3%, com variação no pH para 5,0, 6,0, 6,5, 7,0 e 8,0 e em condições de temperatura de 25°C, 30°C e 35°C.

Posteriormente à realização dos ensaios iniciais, foram observadas as melhores condições de cultivo para a produção de PHB. As fontes de carbono que apresentaram os maiores resultados de produção tiveram seus custos operacionais avaliados e comparados com o custo de produção de bioplásticos obtidos a partir da sacarose, sendo esta utilizada como tratamento controle.

Na produção do bioplástico, realizada em laboratório, foram identificados e quantificados todos os itens envolvidos. Uma vez realizada a análise e obtida a produção de bioplástico, identificaram-se todos os custos envolvidos no processo produtivo, os quais foram classificados em custos fixos e custos variáveis. A partir daí, determinou-se o custo operacional de produção, de acordo com a metodologia proposta por Matsunaga et al. (1976), considerando-se somente os custos variáveis necessários para a realização da análise laboratorial.

Os componentes financeiros do custo operacional foram separados em categorias, sendo elas: meio de cultura, fonte de carbono e reagentes. Para o preparo do meio de cultura líquido foram utilizados como insumos, o ácido málico, a peptona bacteriológica, o extrato de levedura, o fosfato de potássio dibásico, o sulfato de magnésio, o ácido glutâmico e o hidróxido de potássio, sendo adicionada à cultura bacteriana (*Bradyrhizobium japonicum*). Para a manutenção da cultura em meio sólido, acrescentou-se o ágar bacteriológico. Na obtenção do PHB, foram utilizados como reagentes químicos o hipoclorito de sódio, a acetona e o clorofórmio.

Na análise laboratorial utilizando o soro de leite como fonte de carbono, utilizou-se ainda o ácido clorídrico para realizar a desproteinização do soro e a obtenção do açúcar (lactose).

As fontes de carbono utilizadas nos processos de produção de bioplástico foram: sacarose (testemunha), glicose, lactose, glicerol, melaço e soro de leite.

Os preços dos componentes envolvidos na produção de bioplástico, necessários para a determinação do custo operacional, foram cotados, mensalmente, durante o período compreendido entre setembro de 2013 e dezembro de 2014. Todo o levantamento e as informações foram tabulados em planilhas MS-Excel®. Sobre os preços levantados, aplicou-se o Índice Geral de Preços - Disponibilidade interna (IGP-DI), publicado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2015) para a correção monetária dos valores absolutos levantados mensalmente. Assim, os preços praticados durante o período de estudo foram deflacionados, ou seja, corrigidos monetariamente. Adotou-se, como mês-base para a realização da análise de custos dos tratamentos realizados, o mês de abril do ano de 2015, sendo este considerado a base 100. A partir da atualização monetária dos preços praticados, foi determinado o preço médio para cada item envolvido no cálculo do custo operacional necessário para a produção de PHB em laboratório.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na análise de custo de produção dos bioplásticos produzidos em laboratório, foi avaliado o custo operacional envolvido em cada experimentação, consideradas as diferentes fontes de carbono. Os custos operacionais foram determinados levando-se em conta os componentes necessários para o preparo do meio de cultura, os reagentes utilizados e a fonte de carbono (Tabela 1). Na condição de laboratório, os itens componentes do custo operacional que foram utilizados apresentaram alto valor na cotação de mercado, por tratar-se de insumos que apresentaram alto grau de pureza. Em escala industrial, os custos de aquisição desses insumos tendem a reduzir-se,

Custo operacional de produção do poli-3-hidroxibutirato a partir de resíduos agroindustriais, em laboratório

Marcela Cassin Chaves, Afonso Aurélio de Carvalho Peres, Carlos Eduardo de Souza Teodoro

quando adquiridos em maiores quantidades. Diante disso, a discussão dos resultados será realizada tendo em vista não o valor absoluto encontrado e, sim, a análise comparativa dos dados. A fonte de carbono sacarose foi considerada o tratamento testemunha, por se tratar de uma fonte utilizada em escala industrial para a produção de bioplásticos.

Todas as fontes de carbono analisadas apresentaram valores maiores que aquele obtido para a sacarose (Tabela 1). As fontes glicose e lactose apresentaram os custos operacionais maiores, por serem de fontes de carbono consideradas puras.

Tabela 1. Custo operacional, em reais, da produção de PHB em gramas

Fonte de carbono	Sacarose	Glicose	Lactose	Glicerol	Melaço	Soro
	R\$ 0,31	R\$ 1,90	R\$ 3,01	R\$ 1,33	R\$ 0,66	R\$ 0,00
Meio de cultura						
Hidróxido de potássio	R\$ 0,01	R\$ 0,03	R\$ 0,01	R\$ 0,01	R\$ 0,01	R\$ 0,02
Ácido málico	R\$ 0,27	R\$ 0,77	R\$ 0,35	R\$ 0,22	R\$ 0,28	R\$ 0,49
Peptona	R\$ 0,38	R\$ 1,10	R\$ 0,50	R\$ 0,32	R\$ 0,40	R\$ 0,70
Extrato de levedura	R\$ 1,21	R\$ 3,49	R\$ 1,58	R\$ 1,01	R\$ 1,27	R\$ 2,22
Fosfato de potássio	R\$ 0,03	R\$ 0,08	R\$ 0,04	R\$ 0,02	R\$ 0,03	R\$ 0,05
Sulfato de magnésio	R\$ 0,09	R\$ 0,25	R\$ 0,11	R\$ 0,07	R\$ 0,09	R\$ 0,16
Ácido glutâmico	R\$ 0,20	R\$ 0,58	R\$ 0,26	R\$ 0,17	R\$ 0,21	R\$ 0,37
Agar bacteriológico	R\$ 0,34	R\$ 0,98	R\$ 0,44	R\$ 0,28	R\$ 0,36	R\$ 0,62
Colônia	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Reagentes químicos						
Hipoclorito de sódio	R\$ 0,01	R\$ 0,03	R\$ 0,01	R\$ 0,01	R\$ 0,01	R\$ 0,02
Acetona	R\$ 0,02	R\$ 0,06	R\$ 0,03	R\$ 0,02	R\$ 0,02	R\$ 0,04
Clorofórmio	R\$ 0,01	R\$ 0,03	R\$ 0,01	R\$ 0,01	R\$ 0,01	R\$ 0,02
Ácido clorídrico	-	-	-	-	-	R\$ 0,02
Custo operacional						
Total	R\$ 2,86	R\$ 9,29	R\$ 6,35	R\$ 3,46	R\$ 3,35	R\$ 4,73

Fonte: Dados da pesquisa.

US\$ 1.00 = R\$ 2,99. Cotação média do dólar realizada para o mês de abril do ano de 2015 (BCB, 2015)

Ao comparar os custos operacionais da produção de PHB obtidos com as fontes glicose e lactose com aqueles obtidos utilizando os resíduos agroindustriais (glicerol, melaço e soro) como fonte de carbono, verificou-se que estes foram superiores aos encontrados quando se utilizou o carbono proveniente dos resíduos agroindustriais.

Dentre as fontes de carbono derivadas dos resíduos agroindustriais, o melaço foi aquele que apresentou o menor custo operacional de produção (Tabela 1). Trabalhos realizados por Lee et al. (1995) e Rehm (2003) relataram que, para reduzir os custos envolvidos na produção de PHB, faz-se necessário o uso de fontes renováveis mais baratas. De acordo com Choi e Lee (1997), os preços da matéria-prima são os componentes do custo de produção do bioplástico, incluindo a fonte de carbono, que mais contribuem para os altos custos da produção de PHB. Os dados encontrados na composição de custos (Tabela 4) corroboram essa assertiva.

Analisando a composição do custo operacional, verificou-se que a maior representatividade ocorreu com aqueles componentes envolvidos no preparo do meio de cultura (Tabela 2).

Custo operacional de produção do poli-3-hidroxibutirato a partir de resíduos agroindustriais, em laboratório

Marcela Cassin Chaves, Afonso Aurélio de Carvalho Peres, Carlos Eduardo de Souza Teodoro

Tabela 2. Composição do custo operacional, em %, da produção de PHB em gramas

Fonte de carbono	Sacarose	Glicose	Lactose	Glicerol	Melaço	Soro
	10,72	20,40	47,38	38,37	19,72	0,10
Subtotal	10,72	20,40	47,38	38,37	19,72	0,10
Meio de cultura						
Hidróxido de potássio	0,33	0,30	0,20	0,23	0,30	0,37
Ácido málico	9,34	8,33	5,51	6,45	8,40	10,42
Peptona	13,26	11,82	7,82	9,15	11,92	14,79
Extrato de levedura	42,11	37,55	24,82	29,07	37,87	46,96
Fosfato de potássio	0,95	0,84	0,56	0,65	0,85	1,06
Sulfato de magnésio	3,07	2,74	1,81	2,12	2,76	3,42
Ácido glutâmico	6,97	6,21	4,11	4,81	6,27	7,77
Agar bacteriológico	11,84	10,55	6,98	8,17	10,65	13,20
Colônia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Subtotal	87,87	78,35	51,79	60,66	79,02	97,99
Reagentes químicos						
Hipoclorito de sódio	0,33	0,29	0,19	0,23	0,29	0,37
Acetona	0,73	0,66	0,43	0,51	0,66	0,82
Clorofórmio	0,34	0,31	0,20	0,24	0,31	0,38
Ácido clorídrico	-	-	-	-	-	0,35
Subtotal	1,41	1,25	0,83	0,97	1,26	1,92
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Dados da pesquisa.

Dos itens que compõem a produção de PHB, notou-se que o extrato de levedura utilizado na preparação do meio de cultura foi o item mais expressivo na composição dos custos. A presença desse item elevou o custo da produção do PHB.

As fontes de carbono, lactose e glicerol representaram 47,38% e 38,37%, respectivamente, do custo de produção do PHB. Com o uso da fonte de carbono, proveniente de resíduos agroindustriais adquiridos sem o dispêndio financeiro para a compra, espera-se uma redução expressiva no custo operacional de produção, o que pode refletir na melhoria do preço final do bioplástico.

Por apresentar maior imobilização financeira, o meio de cultura pode ser substituído na produção de bioplástico. Sugere-se a realização de novos trabalhos, utilizando outros meios de cultura, como, por exemplo, o meio mineral, visando à redução no custo operacional de produção do bioplástico. Quando utilizado, esse meio deve conter, no mínimo, (g/L): Na_2HPO_4 6,7; NH_4Cl 0,1; KH_2PO_4 1,5; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,2; CaCl 0,01; Citrato de amônio ferroso 0,06; biotina e 1 mL de elementos traços (RAMSAY et al., 1990).

Tendo em vista que a fonte de carbono derivada de resíduos agroindustriais poderia ser doada, por se tratar de um subproduto da atividade agroindustrial, certamente haveria redução no custo operacional do bioplástico produzido. Nesta condição, observaram-se resultados atrativos para o uso de fontes de resíduos agroindustriais na produção de bioplástico (Tabela 3), quando a fonte de carbono apresenta custo zero na aquisição do produto.

Custo operacional de produção do poli-3-hidroxibutirato a partir de resíduos agroindustriais, em laboratório

Marcela Cassin Chaves, Afonso Aurélio de Carvalho Peres, Carlos Eduardo de Souza Teodoro

Tabela 3. Custo operacional, em reais, da produção de PHB em gramas, considerando a doação da fonte de carbono proveniente do resíduo agroindustrial

Fonte de carbono	Sacarose	Glicose	Lactose	Glicerol	Melaço	Soro
	R\$ 0,31	R\$ 1,90	R\$ 3,01	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Meio de cultura						
Hidróxido de potássio	R\$ 0,01	R\$ 0,03	R\$ 0,01	R\$ 0,01	R\$ 0,01	R\$ 0,02
Ácido málico	R\$ 0,27	R\$ 0,77	R\$ 0,35	R\$ 0,22	R\$ 0,28	R\$ 0,49
Peptona	R\$ 0,38	R\$ 1,10	R\$ 0,50	R\$ 0,32	R\$ 0,40	R\$ 0,70
Extrato de levedura	R\$ 1,21	R\$ 3,49	R\$ 1,58	R\$ 1,01	R\$ 1,27	R\$ 2,22
Fosfato de potássio	R\$ 0,03	R\$ 0,08	R\$ 0,04	R\$ 0,02	R\$ 0,03	R\$ 0,05
Sulfato de magnésio	R\$ 0,09	R\$ 0,25	R\$ 0,11	R\$ 0,07	R\$ 0,09	R\$ 0,16
Ácido glutâmico	R\$ 0,20	R\$ 0,58	R\$ 0,26	R\$ 0,17	R\$ 0,21	R\$ 0,37
Agar bacteriológico	R\$ 0,34	R\$ 0,98	R\$ 0,44	R\$ 0,28	R\$ 0,36	R\$ 0,62
Colônia	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Reagentes químicos						
Hipoclorito de sódio	R\$ 0,01	R\$ 0,03	R\$ 0,01	R\$ 0,01	R\$ 0,01	R\$ 0,02
Acetona	R\$ 0,02	R\$ 0,06	R\$ 0,03	R\$ 0,02	R\$ 0,02	R\$ 0,04
Clorofórmio	R\$ 0,01	R\$ 0,03	R\$ 0,01	R\$ 0,01	R\$ 0,01	R\$ 0,02
Ácido clorídrico	-	-	-	-	-	R\$ 0,02
Custo operacional efetivo						
Total	R\$ 2,86	R\$ 9,29	R\$ 6,35	R\$ 2,14	R\$ 2,69	R\$ 4,72

Fonte: Dados da pesquisa.

US\$ 1.00 = R\$ 2,99. Cotação média do dólar realizada para o mês de abril do ano de 2015 (BCB, 2015).

Ao analisarem-se os resultados obtidos do custo operacional (Tabela 3), levando em consideração a doação das fontes de carbono (glicerol, melaço e soro de leite) provenientes do processo agroindustrial, ou seja, não houve dispêndio de capital financeiro para a compra da fonte de carbono, verificou-se a redução no custo operacional quando se produz bioplástico a partir do uso de glicerol e melaço, sendo os valores apresentados inferiores àqueles obtidos na produção de bioplástico com uso de sacarose como fonte de carbono.

O custo operacional, ao utilizar-se o glicerol como fonte de carbono foi reduzido de R\$ 3,46 (Tabela 1) para R\$ 2,14 (Tabela 3), quando não houve custo na aquisição da matéria-prima. Além do custo reduzido, quando a fonte de carbono foi doada, observou-se que o custo operacional determinado nesta condição apresentou-se inferior àquele obtido com o uso da sacarose como fonte de carbono, tornando atrativa a utilização de glicerol para a produção de bioplástico para o investidor. Além de promover a redução no custo operacional de produção, utilizar fonte de carbono proveniente de resíduos agroindustriais apresenta, ainda, a vantagem da destinação correta desse resíduo, que acarreta a redução do impacto ambiental, tornando a agroindústria referência na destinação correta dos resíduos produzidos, ou seja, sustentável. Situação semelhante pode ser constatada quando se utilizou o melaço como fonte, que apresentou redução no custo operacional, passando de R\$ 3,35 para R\$ 2,69, ficando abaixo do custo operacional de produção da sacarose, que foi na ordem de R\$ 2,86 (Tabela 3).

Analisada a composição do custo operacional, cujas fontes de carbono oriundas dos resíduos agroindustriais foram doadas, observou-se que o meio de cultura apresentou maior participação nos custos de produção dos bioplásticos (Tabela 4). Dentre os itens necessários para o preparo do meio de cultura, o extrato de levedura foi aquele que teve maior representatividade, situação semelhante quando considerados os custos com aquisição das fontes de carbono.

Custo operacional de produção do poli-3-hidroxibutirato a partir de resíduos agroindustriais, em laboratório

Marcela Cassin Chaves, Afonso Aurélio de Carvalho Peres, Carlos Eduardo de Souza Teodoro

Tabela 4. Composição do custo operacional, em %, da produção de PHB, em gramas, considerando a doação da fonte de carbono proveniente do resíduo agroindustrial

Fonte de carbono	Sacarose	Glicose	Lactose	Glicerol	Melaço	Soro
	10,72	20,40	47,38	0,00	0,00	0,00
Subtotal	10,72	20,40	47,38	0,00	0,00	0,00
Meio de cultura						
Hidróxido de potássio	0,33	0,30	0,20	0,37	0,37	0,37
Ácido málico	9,34	8,33	5,51	10,46	10,46	10,43
Peptona	13,26	11,82	7,82	14,85	14,85	14,80
Extrato de levedura	42,11	37,55	24,82	47,17	47,17	47,00
Fosfato de potássio	0,95	0,84	0,56	1,06	1,06	1,06
Sulfato de magnésio	3,07	2,74	1,81	3,44	3,44	3,43
Ácido glutâmico	6,97	6,21	4,11	7,81	7,81	7,78
Agar bacteriológico	11,84	10,55	6,98	13,26	13,26	13,21
Colônia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Subtotal	87,87	78,35	51,79	98,43	98,43	98,08
Reagentes químicos						
Hipoclorito de sódio	0,33	0,29	0,19	0,37	0,37	0,37
Acetona	0,73	0,66	0,43	0,82	0,82	0,82
Clorofórmio	0,34	0,31	0,20	0,38	0,38	0,38
Ácido clorídrico	-	-	-	-	-	0,35
Subtotal	1,41	1,25	0,83	1,57	1,57	1,92
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Dados da pesquisa.

Ao analisar a composição do custo operacional envolvido na produção de PHB, sem despesa na aquisição da fonte de carbono, o extrato de levedura apresentou maior representatividade, oscilando entre 24,82% e 47,17% (Tabela 4). Nesta condição experimental, na qual se considerou não haver custo com a compra das fontes de carbono provenientes da agroindústria, a sacarose, a glicose e a lactose apresentaram representatividade na composição dos custos operacionais com 10,72%, 20,40% e 47,38%, respectivamente. Visando compreender os resultados obtidos na determinação

dos custos de produção e estabelecer uma análise comparativa, promoveu-se a determinação da relação entre as fontes de carbono analisadas com a sacarose, fonte de carbono considerada tratamento testemunha, nas duas condições de estudo, com a compra da fonte de carbono e com a doação da fonte de carbono proveniente dos resíduos agroindustriais (Tabela 5).

A sacarose, considerada o tratamento testemunha, teve a sua relação mantida como base em 100% e, a partir daí, se a comparou às demais fontes em termos percentuais de quanto seria a participação de cada uma.

Tabela 5. Análise comparativa do custo operacional, em reais, e a relação, em %, da produção de PHB em gramas das fontes de carbono com a sacarose

Fonte	Com a compra da fonte de carbono		Sem a compra da fonte de carbono*	
	Custo operacional	Relação	Custo operacional	Relação
Sacarose	R\$ 2,86	100,00%	R\$ 2,86	100,00%
Glicose	R\$ 9,29	324,82%	R\$ 9,29	324,82%
Lactose	R\$ 6,35	222,02%	R\$ 6,35	222,02%
Glicerol	R\$ 3,46	120,97%	R\$ 2,14	74,82%
Melaço	R\$ 3,35	117,13%	R\$ 2,69	94,04%
Soro de leite	R\$ 4,73	165,38%	R\$ 4,72	165,03%

Fonte: Dados da pesquisa.

*Considerando a doação da fonte de carbono quando esta foi proveniente da produção de resíduos agroindustriais

Haja vista a compra da fonte de carbono, a relação percentual dos custos envolvidos para produção de PHB foi superior àquela obtida com a sacarose. Dentre as fontes de carbono analisadas, o melaço e o glicerol foram os que apresentaram menores percentuais entre as fontes de carbono testadas, representando 117,13% e 120,97%, respectivamente. Visto que a doação da fonte de carbono proveniente do processo agroindustrial não acarretou dispêndio de capital financeiro para a aquisição

da fonte, observou-se que as fontes glicerol e melaço apresentaram um percentual de custo operacional inferior àquele obtido com a sacarose. Esse fato evidenciou que o uso de resíduos agroindustriais utilizados na produção de PHB promoveu a redução do custo operacional de produção.

Ressalta-se que os resultados econômicos foram obtidos por meio dos custos levantados em condição laboratorial e que os valores absolutos não refletem os valores encontrados quando a produção de PHB ocorre em escala industrial. Dessa forma, salienta-se que a análise dos resultados deve ser realizada comparativamente quando se discutem os custos operacionais observados na produção de PHB a partir de resíduos agroindustriais como fonte de carbono.

Sugere-se ainda que, na dificuldade da doação de determinados resíduos junto à agroindústria, como é o caso do glicerol, uma vez que o mesmo pode ser utilizado em indústrias farmacêuticas e de cosméticos, o recomendado é que a mesma planta industrial produtora de biodiesel amplie suas atividades e promova a produção de PHB. Nesse caso, o grupo empresarial promoverá a destinação correta de seus resíduos produzidos, atendendo à legislação ambiental vigente; reduzirá o impacto ambiental devido às suas atividades comerciais e, ainda, promoverá a geração de emprego e renda em seu negócio. Ao aderir à proposta, pode-se buscar incentivo por meio de investidores e realizar um *marketing* no que diz respeito à empresa ser altamente sustentável.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo analisar comparativamente os custos de produção do poli-3-hidroxibutirato (PHB) mediante a utilização da metodologia do custo operacional de produção, com uso de fontes alternativas de carbono derivadas de resíduos agroindustriais. Cada etapa do processo foi estudada e descrita de acordo

com as metodologias propostas, e os itens componentes dos custos variáveis foram identificados de acordo com sua utilização no processo de produção do PHB.

O extrato de levedura é o componente do meio de cultura que apresenta maior representatividade no custo operacional de produção do bioplástico, independente da compra ou não da fonte de carbono. A utilização de outros meios de cultura para a produção de PHB pode reduzir o custo operacional deste componente.

A sacarose é a fonte de carbono que apresenta o menor custo operacional de produção, na condição em que todos os insumos são adquiridos, sendo considerada uma fonte atrativa para a produção do bioplástico.

As fontes de carbono (glicerol e melaço), derivadas de resíduos agroindustriais, apresentam menor custo operacional de produção, na condição em que não necessitam de dispêndio de capital financeiro para aquisição, permitindo assim que a indústria promova a destinação correta de seus resíduos gerados, preservando o meio ambiente e garantindo a sustentabilidade do sistema produtivo.

REFERÊNCIAS

ABE, L. L. (2010). Desenvolvimento de estratégias para aumentar a produtividade e controlar as propriedades de biopolímeros (PHAs) produzidas por culturas mistas. (*Dissertação de Mestrado*). Nova Lisboa: UNL. 81p.

AHN, W. S; PARK, S. J; LEE, S. Y. (2000). Production of poly(3-hydroxybutyrate) by fed-batch culture of recombinant *Escherichia coli* with a highly concentrated whey solution. *Applied and Environmental Microbiology*, v.66, p.3624-3627.

BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). *Taxas de câmbio - conversão de moedas*. Disponível em: <http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>>. Acesso em: 13/jun/2015.

BORSCHIVIER, S.; ALMEIDA, L. F. M.; ROITMANET, T. (2008). Monitoramento tecnológico e mercadológico de biopolímeros. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v.18, p.256-261.

BOSCO, F.; CHIAMPO, F. (2010). Production of polyhydroxyalcanoates (PHAs) using milk whey and dairy wastewater activated sludge production of bioplastics using dairy residues. *Journal Bioscience Bioengineer*, v.109, p.418-421.

BRITO, G. F.; AGRAWAL, P.; ARAÚJO, E. M.; MÉLO, T. J. A. (2011). Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.6, p.127-139.

CESCA, K. (2011). Estudo da produção de poli-hidroxialcanoatos *Escherichia coli* recombinante a partir de soro de queijo. Florianópolis, SC. (Dissertação de Mestrado). UFSC. 103p.

CHOI, J.; LEE, S. Y. (1997). Process analysis and economic evaluation for poly(3-hydroxybutyrate) production by fermentation. *Bioprocess Engineering*, v.17, p.335-342.

DOBROTH, Z. T.; HU, S.; COATS, E. R.; MCDONALD, A. G. (2011). Polyhydroxybutyrate synthesis on biodiesel wastewater using mixed microbial consortia. *Biosource Technology*, v.102, p.3352-3359.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV) - *Índice geral de preços - disponibilidade interna (IGP-DI)*. Disponível em: <http://www.antigofgvdados.fgv.com.br>. Acesso em: 13/mai/2015.

ILES, A.; MARTIN, N. A. (2013). Expanding bioplastics production: sustainable business innovation in the chemical industry. *Journal of Cleaner Production*, v.45, p.38-49.

KIM, B. S. (2000). Production of poly(3-hydroxybutyrate) from inexpensive substrates. *Enzyme Microbial Technology*, v.27, p.774-777.

KOLLER, M.; BONA, R.; CHIELLINI, E.; FERNANDES, E. G.; HORVAT, P.; KUTSCHERA, C.; HESSE, P.; BRAUNEGG, G. (2008). Polyhydroxyalcanoate production from whey by *Pseudomonas hydrogenovora*. *Bioresource Technology*, v.99, p.4854-4863.

LEE, E.; KANG, S.; CHOI, C. (1995). Biosynthesis of poli(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) by newly isolated *Agrobacterium* sp. SH-1 and GW-014 from structurally unrelated single carbon substrates. *Journal of Fermentation and Bioengineering*, v.79, p.328-334.

LEE, S. Y.; CHOI, J.; HAN, K.; SONG, J. Y. (1999). Removal of endotoxin during purification of poly(3-hydroxybutyrate) from gram-negative bacteria. *Applied Environmental Microbiology*, v.65, p.2762-2764.

- LIU, F.; LI, W.; RIDGWAY, D.; GU, T.; SHEN, Z. (1998). Production of poly- β -hydroxybutyrate on molasses by recombinant *Escherichia coli*. *Biotechnology Letters*, v.20, p.345-348.
- MADISON, L. L.; HUISMAN, G. W. (1999). Metabolic engineering of poly(3-hydroxyalkanoates): from DNA to plastic. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, v.63, p.21-53.
- MARANGONI, C.; FURIGO, A.; ARAGÃO, G. M. F. (2002). Production of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxycaproate) by *Ralstonia eutropha* in whey and inverted sugar with acid propionic feeding. *Process Biochemistry*, v.38, p.137-141.
- MATSUNAGA, M.; BEMELMANS, P. F.; TOLEDO, P. E. N.; DULLEY, R. D.; OKAWA, H.; PEDROSO, I. A. (1976). Metodologia de custo de produção utilizada pelo IEA. *Boletim Técnico do Instituto de Economia Agrícola*, v.23, p.123-139.
- MERCAN, N.; ASLIM, B.; YUKSEKDAG, Z. N.; BEYATLI, Y. (2002). Production of poly- β hydroxybutyrate (PHB) by some rhizobium bacteria. *Turk Journal Biology*, v.26, p.215-219.
- NIKEL, P. I.; ALMEIDA, A.; MELILLO, E. C.; GALVAGNO, M. A.; PETTINARI, M. J. (2006). New recombinant *Escherichia coli* strain tailored for the production of poly (3-hydroxybutyrate) from agroindustrial by-products. *Applied and Environmental Microbiology*, v.72, p.3949-3954.
- PARK, S. J.; PARK, J. P.; LEE, S. Y. (2002). Metabolic engineering of *Escherichia coli* for the production of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates rich in specific monomers. *FEMS Microbiology Letters*, v.214, p.217-222.
- POSADA, J. A.; NARANJO, J. M.; LÓPEZ, J. A.; HIGUITA, J. C.; CARDONA, C. A. (2011). Design and analysis of poly-3-hydroxybutyrate production processes from crude glycerol. *Process Biochemistry*, v.46, p.310-317.
- POVOLO, S.; TOFFANO, P.; BASAGLIA, M.; CASELLA, S. (2010). Polyhydroxyalkanoates production by engineered *Cupriavidus necator* from waste material containing lactose. *Bioresource Technology*, v.26, p.7902-7907.
- REHM, B. H. A. (2003). Polyester synthases: natural catalysts for plastics. *Biochemical Journal*, v.376, p.15-33.
- ROSA, D. S.; HANG-CHUI, Q. S.; PANTANO FILHO, R.; AGNELLI, J. A. M. (2002). Avaliação da biodegradação de poli-hidroxibutirato, polihidroxibutirato co-valerato e poli- ξ -caprolactona em solo compostado. *Polímeros*, v.12, p.311-317.

SILVA, D. J. P. (2011). *Resíduos na indústria de laticínios*. Série Sistema de Gestão Ambiental. Viçosa: UFV, 20p. Boletim.

SILVA, L. F.; GOMES, J. C. C.; ROCHA, R. C. S.; TACIRO, M. K.; PRADELLA, J. G. C. (2007). Produção biotecnológica de polihidroxialcanoatos para a geração de polímeros biodegradáveis no Brasil. *Química Nova*, v.30, p.1732-1743.

TAGUCHI, S.; NAKAMURA, H.; KICHISE, T.; TSUGE, T.; YAMATO, I.; DOI, Y. (2003). Production of polyhydroxyalkanoate (PHA) from renewable carbon sources in recombinant *Ralstonia eutropha* using mutants of original PHA synthase. *Biochemical Engineering Journal*, v.16, p.107-113.

TSUGE, T. (2002). Metabolic improvements and use of inexpensive carbon sources in microbial production of polyhydroxyalkanoates. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, v.94, p.579-584.

WONG, H. H.; LEE, S. Y. (1998). Poly-(3-hydroxybutyrate) production from whey by high-density cultivation of recombinant *Escherichia coli*. *Applied Microbiology Biotechnology*, v.50, p.30-33.

WILLKE, T.; VORLOP, K. D. (2004). Industrial bioconversion of renewable resources as an alternative to conventional chemistry. *Applied Microbiology Biotechnology*, v.66, p.131-142.

Data de Submissão: 01/02/2016

Data de Aceite: 18/05/2016