



# **ANÁLISE DA COMPETITIVIDADE DE UM BIOPLÁSTICO – UM ESTUDO EXPLORATÓRIO DO PHB**

Daniel Eduardo Hollos Fiorencio

Felipe Brandão de Souza Mendes

Mauricio Franco Mitidieri

Projeto Final de Curso

Orientadores

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Flávia Chaves Alves

Prof Dr Fábio Almeida Oroski

Março de 2013

# ANÁLISE DA COMPETITIVIDADE DE UM BIOPLÁSTICO – UM ESTUDO EXPLORATÓRIO DO PHB

*Daniel Eduardo Hollos Fiorencio*

*Felipe Brandão de Souza Mendes*

*Mauricio Franco Mitidieri*

Projeto de Final de Curso submetido ao corpo docente da Escola de Química como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Graduação de Engenharia Química.

Aprovado por:

---

Bernardo Dias Ribeiro

---

José Roberto Ruschel Siffert

---

Suzana Borschiver

Orientado por:

---

Flávia Chaves Alves

---

Fábio Almeida Oroski

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Março de 2013

Fiorencio, Daniel Eduardo Hollos.

Mendes, Felipe Brandão de Souza.

Mitidieri, Mauricio Franco.

ANÁLISE DA COMPETITIVIDADE DE UM BIOPLÁSTICO – UM ESTUDO EXPLORATÓRIO DO PHB / Daniel Eduardo Hollos Fiorencio, Felipe Brandão de Souza Mendes e Mauricio Franco Mitidieri. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2013.

x, 88p.; il.

(Projeto Final) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2012.

Orientadores: Flávia Chaves Alves e Fábio Almeida Oroski.

1. PHB. 2. Avaliação Econômica. 3. Bioplásticos. 4. Projeto Final (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Prof. Dr<sup>a</sup> Flávia Chaves Alves e Prof. Dr. Fábio Almeida Oroski.

“Escreva então viandante, viajero, amigo, companheiro, sobre sua caminhada e o fim que alcançou. E o quanto de gozo enfim, que conseguiu, apesar de tudo e de todos. Assinale o aprendizado que lhe deu alegrias e glórias e como pensou suas feridas e achaques durante o percurso. Enfim escreva, escreva sempre, para que sua caminhada não tenha sido uma tarefa vã, solitária e pessoal. Divida-a com todos. Escreva. Alguém vai ler, vai aprender, vai acreditar e sua viagem teria sido menos triste, se você tivesse lido outras caminhadas, não com os olhos, mas com o coração, com os sentimentos, com amor e caridade. E, se estivesse escrevendo e descrevendo, com bondade e atenção, suas passadas, veria que só isto, ou muito isto, conta-las, teria feito a caminhada mais tranquila, pois escrever com sinceridade e denodo já é um pouco se confessar em prosa, ou verso. E você, de uma forma, ou de outra, já não estaria mais solitário, porque viajante, viajero, viandante, companheiro, você estaria se dividindo com um leitor, que será um novo viajante, um próximo viajante, que, antes de tudo, por lê-lo, já é um amigo.”

Pedro Franco

## AGRADECIMENTOS

Primeiro, sempre, fica o agradecimento pelo apoio das nossas famílias, que nos sustentaram e apoiaram durante todo o nosso curso: Jorge, Denise, Mariana, Paula, Carlos Eduardo, Renato, Lilian, Mariana, Sergio, Maria Isabel, Eduardo, Jorge e Alia. Sem o apoio de vocês não estaríamos aqui hoje.

Aos nossos colegas da correria do dia-a-dia, que tornaram o caminhar do curso de Engenharia Química mais fácil e feliz. Em especial, nossos agradecimentos a Henrique, Helena, Ronaldo, Marcella, João Henrique, Pedro, Thomáz, Guilherme, Carina, Beatriz e Joyce.

Agradecemos, também, àqueles que mesmo sem entender o que estamos fazendo aqui, se mostraram presentes e nos apoiaram na nossa jornada. Em especial: Eduardo, Matheus, Natalia, Ricardo, Mariana, João Miguel, Rodrigo, Caio, Cabeça, Anão, Bravo, Bela, Saint Martin, Nilo, Aline e Marcela.

A todos os nossos professores e mestres que nos permitiram estar aqui, agora, em especial aos nossos orientadores Flávia e Fábio que nos orientaram sempre entendendo nossos objetivos e vontades, e dos professores membros da nossa banca, Suzana e Bernardo.

Fica, também, um agradecimento sincero a José Roberto Ruschel, pelo companheirismo e disponibilidade em participar da banca avaliadora, mesmo não compondo o quadro da Escola de Química.

Por último, fica um agradecimento de cada um de nós aos outros colegas do trio do projeto, com o desejo de um futuro brilhante na profissão que escolhemos trilhar.

*"A gratidão é a virtude das almas nobres."*

*Esopo*

Resumo do Projeto Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Graduação em Engenharia Química

## **ANÁLISE DA COMPETITIVIDADE DE UM BIOPLÁSTICO – UM ESTUDO EXPLORATÓRIO DO PHB**

Daniel Eduardo Hollos Fiorencio

Felipe Brandão de Souza Mendes

Mauricio Franco Mitidieri

Março, 2013

Orientadores: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Flávia Chaves Alves

Prof. Dr. Fábio Almeida Oroski

Os termoplásticos de origem fóssil são produtos de aplicação amplamente difundida, permeando todas as partes da sociedade. Com o uso crescente dos combustíveis fósseis, vêm surgindo uma maior preocupação associada aos impactos ambientais gerados, seja por conta das emissões de gases do efeito estufa, seja pelo volume de lixo gerado. Essa preocupação ambiental, associada ao temor da escassez futura dos combustíveis fósseis tem criado um terreno favorável ao avanço dos bioplásticos, sejam eles biodegradáveis ou não. O mercado tem visto crescimento acelerado tanto de novos polímeros de origem renovável quanto de polímeros convencionais que vêm sendo produzidos por novas rotas, a partir de matérias primas renováveis. Para entender melhor a competitividade desses novos polímeros frente o mercado de plásticos, foi realizada uma análise a respeito do PHB, um dos mais promissores destes polímeros. Este projeto busca realizar uma análise da viabilidade econômica da produção do polihidroxibutirato (PHB) através de duas rotas com matérias-primas distintas, glicose e glicerol, de forma a avaliar o impacto das diferentes variáveis no resultado do processo, tentando enxergar futuras mudanças que tornem o PHB mais competitivo. Após a construção dos fluxos de caixa dos processos de produção selecionados, foi possível avaliar que a produção de PHB ainda é muito custosa e que os preços ainda não permitem uma competitividade grande perante os plásticos convencionais. Apesar disso, o PHB apresenta grande potencial de crescimento, e, com a queda dos custos de produção e a evolução dos custos de matéria-prima, é possível vislumbrar um grande espaço para o crescimento do PHB no longo prazo.

## ÍNDICE

INTRODUÇÃO .....	11
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	20
1.1 HISTÓRICO .....	20
1.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS .....	24
1.3 APLICAÇÕES .....	27
1.4 PRODUTORES .....	29
2 PROCESSOS DE OBTENÇÃO .....	31
2.1 ANÁLISE DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS .....	31
2.1.1 MICRORGANISMOS.....	32
2.1.2 MEIO .....	32
2.1.3 CONDIÇÕES E MODOS DE CONDUÇÃO DA FERMENTAÇÃO.....	33
2.1.4 RECUPERAÇÃO .....	34
2.2 PROCESSOS ANALISADOS .....	34
2.2.1 PRODUÇÃO DE PHB A PARTIR DE GLICOSE.....	35
2.2.2 PRODUÇÃO DE PHB A PARTIR DE GLICEROL .....	40
2.3 DADOS OBTIDOS .....	42
2.3.1 PRODUÇÃO A PARTIR DA GLICOSE.....	42
2.3.2 PRODUÇÃO A PARTIR DO GLICEROL .....	46
3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA .....	48
3.1 PRODUÇÃO DE PHB A PARTIR DE GLICOSE .....	48
3.1.1 PREMISSAS .....	49
3.1.2 FLUXO DE CAIXA .....	50
3.2 PRODUÇÃO DE PHB A PARTIR DE GLICEROL .....	54
3.2.1 PREMISSAS .....	54
3.2.2 FLUXO DE CAIXA .....	55
4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	60
4.1 PRODUÇÃO DE PHB VIA GLICOSE.....	60
4.1.1 GLICOSE .....	61
4.1.2 ELETRICIDADE .....	63
4.1.3 CASEÍNA.....	64

4.1.4	INVESTIMENTO.....	65
4.1.5	PHB .....	66
4.2	PRODUÇÃO DE PHB VIA GLICEROL .....	68
4.2.1	GLICEROL.....	69
4.2.2	PURIFICAÇÃO .....	70
4.2.3	ELETRICIDADE .....	71
4.2.4	INVESTIMENTO.....	73
4.2.5	PHB .....	74
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS .....	75
	CONCLUSÃO .....	78
	SUGESTÕES .....	81
	REFERÊNCIAS .....	83



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação de alguns plásticos e bioplásticos .....	14
Figura 2 - Fórmula estrutural genérica dos PHAs .....	24
Figura 3 - Fórmula estrutural do PHB .....	25
Figura 4 – Fluxograma do processo de produção de PHB a partir de glicose.....	37
Figura 5 - Balanço material simplificado do processo cuja matéria-prima é a glicose, baseado em uma batelada completa (46 horas). Volume em kL, massa de PHB em kg e pureza do PHB em %p/p. ....	39
Figura 6 - Fluxograma do processo de produção de PHB a partir de glicose .....	41
Figura 7 - Fluxo de caixa do processo de obtenção do PHB por meio de glicose (primeiros cinco anos) .....	52
Figura 8 - Fluxo de caixa do processo de obtenção do PHB por meio de glicose (últimos cinco anos).....	53
Figura 9 - Fluxo de caixa do processo de obtenção do PHB por meio de glicerol(primeiros cinco anos).....	57
Figura 10 - Fluxo de caixa do processo de obtenção do PHB por meio de glicerol (últimos cinco anos) .....	58
Figura 11 - Custos variáveis do processo de produção de PHB por meio de glicose ....	61
Figura 12 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço da glicose .....	62
Figura 13 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço da eletricidade .....	63
Figura 14 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço da caseína.....	64
Figura 15 - Análise de sensibilidade da TIR em função do valor do investimento.....	65
Figura 16 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço de venda do PHB ....	67
Figura 17 - Custos variáveis do processo de produção de PHB por meio de glicerol....	68
Figura 18 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço do glicerol .....	69
Figura 19 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço da purificação.....	71
Figura 20 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço da eletricidade .....	72
Figura 21 - Análise de sensibilidade da TIR em função do valor do investimento.....	73
Figura 22 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço do PHB.....	74
Figura 23 - Série histórica do preço do açúcar por quilograma.....	87
Figura 24 - Evolução da produção de biodiesel no Brasil.....	88

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Bioplásticos promissores – nomes e características .....	16
Tabela 2 - Estrutura dos PHAs .....	24
Tabela 3 - Comparação das propriedades de alguns PHAs com as do PP e do LDPE...	26
Tabela 4 - Comparação das propriedades físicas do PHBV com as de outros bioplásticos .....	26
Tabela 5 - Potencialidade de substituição de polímeros petroquímicos por PHAs .....	28
Tabela 6 - Dados obtidos pela análise do balanço material do processo de produção do glicerol a partir da glicose .....	43
Tabela 7 – Composição do meio de cultivo utilizado no processo que utiliza glicose como matéria-prima.....	43
Tabela 8 - Lista de equipamentos, contendo preços e gastos energéticos.....	45
Tabela 9 - Consumo de insumos e matéria-prima por batelada (glicose) .....	46
Tabela 10 - Quantidades necessárias de matéria-prima e insumos do processo de produção do PHB a partir do glicerol.....	47
Tabela 11 - Preço da matéria-prima, os insumos e das utilidades utilizados na produção do PHB via glicose .....	50
Tabela 12 - Resumo dos investimentos do processo de produção de PHB por glicose .	50
Tabela 13 - Receita e custos variáveis anuais da produção de PHB a partir da glicose.	51
Tabela 14 - Preço da matéria-prima, os insumos e das utilidades utilizados na produção do PHB via glicerol .....	55
Tabela 15 - Receita e custos variáveis anuais da produção de PHB a partir do glicerol	56

# INTRODUÇÃO

---

Desde a descoberta do polietileno em 1933 e o forte crescimento industrial ocorrido na década de 50, os plásticos de origem petroquímica se tornaram produtos de enorme relevância na sociedade (YU, 2007). Os quatro principais termoplásticos – polietileno, polipropileno, PET e policloreto de vinila – são produtos com enorme aplicabilidade, por sua resistência, facilidade e baixo custo de produção. O mercado de plásticos é amplamente dominado por estes plásticos, que respondem por uma fatia maior que 50% do mercado (CIPET, 2012).

No entanto, as estimativas mais recentes da acelerada diminuição das reservas de petróleo (KESHAVARZ, 2010), somadas a todas as preocupações ambientais advindas dos diversos setores da sociedade, estimularam uma nova corrida em busca de materiais que possam substituir esses plásticos, tornando-se importantes direcionadores para que empresas e pesquisadores busquem novas alternativas. (SHEN, 2009). A atual conjuntura econômica mundial trouxe à tona estas importantes discussões a respeito das políticas ambientais globais. Neste sentido, é cada vez mais comum a abordagem de temas intimamente relacionados à sustentabilidade. Acompanhando esta temática, o desenvolvimento de novos produtos, tecnologias e processos, aliado à pesquisa de novas matérias-primas de origem renovável, tem se tornado fundamental no direcionamento das políticas mundiais que visam combinar o crescimento econômico à manutenção da qualidade de vida para as gerações futuras.

Para exemplificar o tamanho do impacto que estes plásticos não biodegradáveis têm no meio ambiente, destaca-se que estes compõem aproximadamente 11% do peso do lixo atualmente, número que em 1960 era de apenas 1% (YU, 2007). Isso mostra que, em um mundo inundado por precauções com aquecimento global, e a recorrente falta de espaço em aterros sanitários, o cenário futuro para produtos verdes está se abrindo com força no começo do novo século. Entretanto, é importante ressaltar que essa é apenas uma das abordagens dos bioplásticos no mercado atual, e o apelo de biodegradabilidade não é universal dentre os novos produtos.

Diferente da consolidada indústria de polímeros de origem fóssil, o mercado de bioplásticos ainda vive em sua infância (SHEN, 2009). Bioplásticos sintetizados têm um histórico da aproximadamente 150 anos. O primeiro deles foi um termoplástico

celulósico inventado nos anos de 1860. Desde então, numerosos compostos foram produzidos a partir de fontes renováveis. No entanto, tais descobertas acabaram ficando restritas à fase de pesquisa, não sendo aproveitadas comercialmente. O principal motivo desta limitação foi a descoberta do petróleo e a consequente produção industrial em larga escala e custo reduzido de polímeros sintéticos a partir do mesmo desde a década de 1950.

Desde então, alguns movimentos de baixa intensidade e pouca duração demonstrando interesse por bioplásticos foram observados, principalmente em momentos em que o petróleo sofreu aumentos significativos de preço, como o que ocorreu na crise do Golfo na década de 1970 devido ao aumento de mais de 300% posto em prática pelos países árabes participantes da OPEP. No entanto, a partir da década de 1990, com o crescimento do acúmulo de resíduos sólidos e o consequente problema gerado pela ausência de um gerenciamento adequado, o conceito de biodegradabilidade foi inserido no mercado e funcionou como um incentivo para que fosse dada uma atenção maior aos plásticos biodegradáveis, sejam eles plásticos petroquímicos ou bioplásticos (SHEN, 2009). Essa atenção não se limita somente aos biodegradáveis, se estendendo para todos os plásticos de base renovável, que tem apelo na diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>.

Porém, foi a partir dos anos 2000 que o tema ganhou ainda mais relevância, devido principalmente às perspectivas negativas de possível esgotamento das reservas de petróleo, bem como à instabilidade política das grandes áreas produtivas e a consequente flutuação e instabilidade do preço do barril, que vem sofrendo um aumento contínuo nos últimos anos. Concomitantemente, os grandes impactos ambientais gerados pela indústria petroquímica têm se apresentado como vilões, impulsionando assim as alternativas mais sustentáveis, como o próprio mercado de bioplásticos.

Os bioplásticos são uma categoria muito ampla, que abrange não somente um tipo de material, mas toda uma gama de polímeros. De acordo com a Associação de Bioplásticos Europeia, bioplástico é qualquer material de origem verde e/ou biodegradáveis. De forma a esclarecer o conceito, a *European Bioplastics* define (2012):

- Material de origem verde: significa qualquer material ou produto que é, total ou parcialmente, derivado de biomassa. A biomassa utilizada para produção de bioplásticos engloba materiais como milho, cana de açúcar, celulose e materiais reaproveitados de segunda geração, como o glicerol, dentre outros.
- Biodegradabilidade: biodegradação é um processo químico no qual microrganismos presentes no ambiente convertem materiais em substâncias naturais básicas como água, dióxido de carbono e adubo (sem adição de nenhum aditivo). O processo de biodegradação é dependente do ambiente no qual os organismos estão inseridos (temperatura, localidade, etc), do material sendo decomposto e da aplicação do composto formado.

Diferentemente do senso comum, a biodegradabilidade não depende da fonte de material utilizada para a produção do polímero, mas sim da sua estrutura química. Em outras palavras, plásticos feitos 100% de material verde podem não ser biodegradáveis, enquanto plásticos de origem 100% fóssil podem ser biodegradáveis. A Figura 1 mostra a classificação de alguns dos plásticos e bioplásticos mais relevantes.

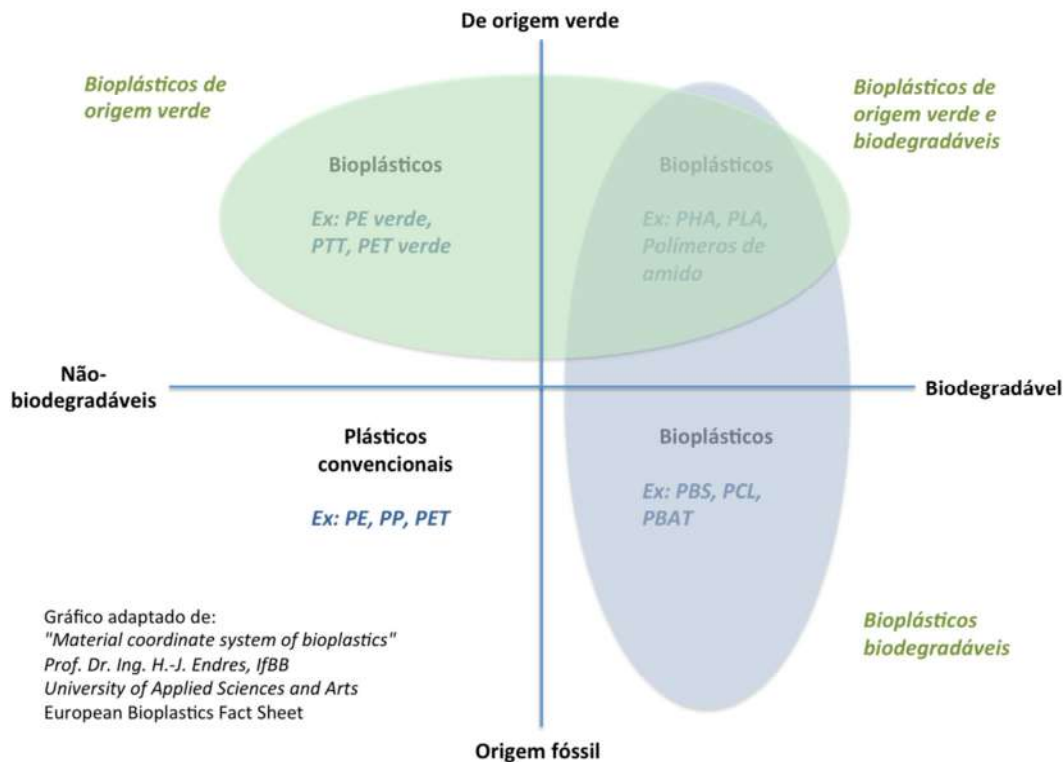


Figura 1 – Classificação de alguns plásticos e bioplásticos

PE - Polietileno; PTT – Politereftalato de trimetileno; PET – Politereftalato de Etileno; PE – Polietileno; PP – Polipropileno; PHA – Polihidroxialcanoatos; PLA – Ácido Polilactico; PBS – Polibutileno Succinato; PCL – Policaprolactona; PBAT – Polibutileno Tereftalano co-adipato.

Fonte: *European Bioplastics Fact Sheet*, 2012

Fica claro que existem plásticos de origem fóssil que são biodegradáveis, mas estes são exceção e, quando usados, são combinados com bioplásticos e materiais naturais (EUROPEAN BIOPLASTICS FACT SHEET, 2012). Vê-se nitidamente na Figura 1 que existe um espaço interessante de aplicação de plásticos de origem verde, mesmo se estes não forem biodegradáveis.

Nessa classificação vale destacar a distinção entre dois grandes grupos de biopolímeros. Um grupo que tem ganhado relevância recentemente é o grupo dos chamados biopolímeros *drop in* (EUROPEAN BIOPLASTICS BULLETIN, 2012), como, por exemplo, o PE verde (produzido em larga escala pela Braskem no Brasil), que abrange polímeros antes provenientes unicamente de origem fóssil, e que agora são completamente, ou parcialmente, produzidos através de matérias-primas renováveis. Esse grupo, apesar de ainda apresentar diferenças de preço frente os polímeros commodities, apresenta maior facilidade de penetração no mercado. O outro grupo

engloba os novos biopolímeros, como o próprio PHB, que são produtos novos e precisam desenvolver aplicações e espaços próprios em um mercado tomado pelos plásticos fósseis.

A grande maioria dos plásticos produzidos hoje ainda é de origem fóssil. A entrada dos bioplásticos no mercado de forma mais significativa, reduzindo de fato os impactos ambientais da indústria de plásticos, só será possível se a fatia dominada pelos bioplásticos se tornar considerável. Substituir plásticos commodities é um objetivo de longo prazo para a categoria, mas a utilização em usos mais específicos, como embalagens, produtos médicos, etc, pode ser o início de um caminho promissor para os bioplásticos.

O desenvolvimento de novos plásticos, e posterior inserção dos mesmos no mercado, é o principal desafio, já que eles estão entrando substituindo plásticos petroquímicos que possuem sua produção otimizada por anos e anos de presença de mercado, além de serem produtos conhecidos por toda a cadeia de produção e fornecimento de materiais. Os plásticos convencionais já estão presentes nos mercados mundiais há mais de 50 anos, e isso lança alguma sombra sobre o futuro dos bioplásticos, já que eles seriam inseridos em um cenário de produtos bem estabelecidos. (SHEN, 2009). Outro fator citado como negativo para o avanço dos bioplásticos é o aumento no número de novos produtores, principalmente a China, que por conta de seus incentivos fiscais e da mão-de-obra barata acaba por inundar o mercado de plásticos convencionais com preços muito baixos, o que fere a competitividade dos bioplásticos. A pequena margem de lucro praticada pelas plantas convencionais de plásticos também faz com que os preços caiam, mais uma vez impondo uma barreira ao avanço dos bioplásticos.

Apesar de todas as dúvidas que possam ser lançadas sobre o futuro dos bioplásticos, os investimentos recentes em plásticos de origem verde indicam que há sim um grande potencial nesse mercado, e que será, sim, possível produzir bioplásticos em escala industrial, revolucionando a indústria química. Nos últimos anos mais e mais rotas tem sido descobertas e exploradas.

Vencida essa primeira barreira, de substituir os plásticos mais tradicionais, outras questões surgem como problemas para a inserção e difusão dos bioplásticos, dentre elas uma questão muito polêmica do uso de terras agricultáveis para produção de plásticos – a mesma discussão que existe na produção de biocombustíveis. Outro ponto

importante é verificar o ciclo de vida dos plásticos verdes, para ver se efetivamente eles são ambientalmente responsáveis.

Justamente por todo seu potencial e as dúvidas que cercam a evolução dos bioplásticos, muitos estudos foram desenvolvidos sobre as perspectivas do mercado e futuro dos bioplásticos, buscando reconhecer os materiais mais promissores, o andamento e evolução dos plásticos já conhecidos e o surgimento de novos materiais com potencial. Dentro do universo dos bioplásticos, através destes estudos (podemos citar, com algum destaque, os internacionais *PRO-BIP*, de 2009 e *Techno-Economic Feasibility of Large Scale Production of Bio-Based Polymers in Europe*, de 2005, além do documento nacional do BNDES, *Biopolímeros e Polímeros de Matérias-Primas Renováveis Alternativas aos Petroquímicos*, de 2007) é possível identificar alguns polímeros mais promissores, seja por suas propriedades ou pelo potencial de substituição. A Tabela 1 lista alguns dos bioplásticos mais promissores, além de algumas informações úteis sobre os mesmos.

Tabela 1 – Bioplásticos promissores – nomes e características

<b>Produto</b>	<b>Tipo de Polímero</b>	<b>Produção</b>	<b>Aplicação</b>	<b>Produtos que substitui</b>
<b>Polímeros de Amido</b>	Polissacarídeos	Polímero natural modificado com base no amido	Embalagem (filme de recobrimento)	Petroquímica
<b>Polilactatos (PLA)</b>	Poliéster alifático	Ácido láctico produzido por fermentação seguido de polimerização	Embalagens Fios de sutura	PS Cristal, PET
<b>Polihidroxi-butiratos (PHB, PHB/HV e PHB/HHX)</b>	Poliéster biodegradável	Fermentação direta de fonte de carbono por microorganismos ou em vegetais modificados geneticamente	Propriedades semelhantes a dos termoplásticos sintéticos. É usado mais na área médica.	PP, PS, e PEBD, além do PLA na área médica



<b>Politrimetilenotereftalato (PTT)</b>	Poliéster	PDO produzido por fermentação seguido de copolimerização com AT ou DMT	Fibras para confecção e carpetes, frascos e garrafas	NylonPET
<b>Polibutilenotereftalato (PBT)</b>	Poliéster	BDO produzido por fermentação seguido de copolimerização com AT	Sistemas eletroeletrônicos e peças de automóveis	-
<b>Polibutilenosuccinato (PBS)</b>	Poliéster	BDO copolimerizado com AS, ambos produzidos por fermentação	Em blends (25%) para embalagens	PLA
<b>Nylon 6</b>	Poliamidas	Condensação de caprolactama produzida por fermentação	Estabilizante, espessante, emulsificante (ind. farmacêutica, química, cosméticos, alimentos)	Nylon sintético
<b>Nylon 66</b>	Poliamidas	Condensação de hexametileodiamina (HMD) e ácido adípico, este último produzido por fermentação		
<b>Nylon 69</b>	Poliamidas	Monômero obtido por transformação química do ácido oleico		

Fonte: Adaptado de Bastos, 2007

Os bioplásticos apresentados acima estão em ordem de importância no mercado europeu, em termos de quantidades produzidas (WOLF, 2005). Nesse cenário, há grande destaque para os polímeros de amido e para o PLA. Os polímeros de amido foram os primeiros na corrida entre os bioplásticos, mas veem o seu reinado fortemente ameaçado pelo crescimento da produção e da relevância do PLA nos mercados globais.

Próximos a atingirem escalas muito significativas estão os PHAs e o PTT, que possuem num horizonte de curto prazo expectativas de plantas de larga escala. Os outros produtos listados já têm tecnologias conhecidas, mas ainda estão em um estágio inicial de desenvolvimento, e são listados por seu potencial de futuro. Conforme mencionado anteriormente, um movimento recente no mercado vem abrindo maior espaço para os plásticos *drop-in*, como o PET verde, e esse parece ser o foco de curto prazo no desenvolvimento dos bioplásticos.

Apesar do crescimento dos *drop-in*, ainda há muito espaço para o crescimento dos novos biopolímeros, e, como podemos ver, neste grupo se destacam o PLA e os PHAs, mais especificamente o PHB, que vem apresentando grandes aplicações e está ganhando espaço de mercado no passado recente.

Nesse estudo será focado, então, o grupo dos polihidroxicanoatos, os PHAs, mais especificamente o PHB. O PHB, conforme descrito acima, possui propriedades muito interessantes para processamento térmico, com características semelhantes a muitos termoplásticos de origem petroquímica, além de ser um dos bioplásticos do “momento” – ele está prestes a ser produzido em larga escala (SHEN, 2009). Os polihidroxicanoatos possuem um potencial muito elevado também, se encontrando em patamar próximo aos plásticos mais destacados pelos artigos supracitados. A escolha do PHB vai de encontro com este potencial, aliado à maior disponibilidade de dados acerca dos processos produtivos do PHB.

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma análise da competitividade da produção do PHB através de um estudo de viabilidade econômica da mesma, tentando reconhecer os pontos fortes e fracos, e estudar cenários de melhora do projeto para que seja possível alcançar maior competitividade perante os plásticos convencionais. Para tornar possível uma comparação de tecnologias, foram selecionadas duas rotas de produção, uma proveniente de glicose e outra de glicerol, tentando demonstrar a influência da matéria-prima na rota de produção do bioplástico, buscando ilustrar um cenário de integração da planta com possíveis excedentes de glicerol provenientes da produção do biodiesel nacional. Ademais, foram realizadas, para ambas as rotas de produção, algumas análises de sensibilidade, para que fosse possível visualizar a influência de cada componente no projeto.

O trabalho está dividido em cinco capítulos, além desta introdução. O primeiro capítulo permeia uma revisão bibliográfica acerca do bioplástico foco, mostrando um pouco de sua história, propriedades, aplicações e produtores. O segundo capítulo, por

sua vez, apresenta de forma mais detalhada os dois processos de produção escolhidos para este estudo. No terceiro capítulo há a avaliação econômica dos projetos, com premissas, custos, receitas e fluxos de caixa detalhados. O quarto capítulo apresenta a discussão dos resultados obtidos no capítulo anterior, incluindo a realização de diversas análises de sensibilidade e uma discussão dos resultados obtidos na comparação dos dois projetos. O último capítulo engloba as conclusões e futuras possibilidades para o mercado do PHB no Brasil.

# Capítulo 1

---

## 1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo traz uma revisão bibliográfica da literatura que trata do PHB, mostrando um breve histórico sobre o produto, suas propriedades físico-químicas, suas aplicações e seus principais produtores. Essa abordagem, antes de analisar mais a fundo os processos de obtenção do polihidroxibutirato (PHB), é imprescindível, uma vez que através do conhecimento das propriedades físicas e químicas do bioplástico é possível dizer quais plásticos petroquímicos o produto estudado pode vir a substituir e quais são suas possíveis aplicações. Nessa exposição é importante, para que se tenha uma abrangência maior de possibilidades, que sejam citadas não apenas as características do PHB, mas também alguns parâmetros característicos dos diversos polihidroxialcanoatos (PHAs) de acordo com sua composição química, além de suas prováveis aplicações e os plásticos que possam vir a substituir.

### 1.1 HISTÓRICO

A ocorrência de PHA em células bacterianas foi descrita pela primeira vez por Beijerinck em 1888 (CHOWDHURY, 1963). No entanto, os PHAs foram estudados principalmente por bioquímicos que se referiam aos mesmos como lipídios até que Lemoigne determinou, em 1925, a composição química dos PHAs, demonstrando que a substância desconhecida produzida pela bactéria *Bacillus megaterium* era um homopoliéster de hidroxiácido, o poli-3-hidroxibutirato (LEMOIGNE, 1925). Tal substância continuou desconhecida dos químicos de polímeros até 1960 e até mesmo dos bioquímicos e microbiologistas até 1958, por mais que sua presença em células bacterianas em quantidades significativas, sua composição química e o fato de serem polímeros sejam reportados na literatura desde 1926.

Em geral, a comunidade científica não atentou para a existência destes polímeros naturais por muito tempo, devido ao fato de o descobridor Maurice Lemoigne ter publicado seus resultados em pequenos jornais franceses, referindo-se ao material como

lipídios não-solúveis em éter (LENZ, 2005). Em 1923, Lemoigne publicou que o ácido produzido pela bactéria era o ácido 3-hidroxi-butírico e, em 1927, ele descreveu o procedimento de obtenção deste material a partir das células, já caracterizando o mesmo como um polímero, determinando também sua massa molecular e sua temperatura de fusão.

Conforme apontado por Lenz e Marchessault em um artigo de excelência sobre PHAs (LENZ, 2005), Lemoigne publicou suas observações e interpretações no momento em que Herman Staudinger estava propondo a existência de moléculas de grande massa molecular para os quais ele criou a alcunha de macromoléculas. Em 1953, Staudinger foi premiado com o Prêmio Nobel de Química pelo seu trabalho em síntese de polímeros e pelo seu conceito de macromoléculas. Não existe indicação de que Staudinger era consciente da descoberta de Lemoigne sobre polímeros naturais, o que continuou obscuro para químicos de polímeros e orgânicos por mais de 30 anos, apesar de o PHB ser descrito em alguns livros de bioquímica.

De 1923 até 1951, Lemoigne e seus parceiros publicaram 27 artigos. Lemoigne desenvolveu um método para a análise quantitativa do PHB e mostrou que o mesmo poderia ser transformado em um filme transparente. Lemoigne também reportou a grande variedade de bactérias que podiam produzir PHB como um material de reserva. Foi apenas na década de 1950 que a importância do PHB no metabolismo celular das bactérias foi mais bem compreendida. Os pesquisadores Stanier e Wilkinson e seus colaboradores demonstraram que os grãos de PHB serviam como alimento intracelular de bactérias e como fonte de energia reserva e que o polímero era produzido nas células em resposta à limitação de nutrientes no meio com o objetivo de evitar a morte das mesmas, caso algum elemento essencial ficasse indisponível. A limitação de nutrientes ativava um mecanismo metabólico em que unidades de acetil do ciclo tricarboxílico eram envolvidas na produção de PHB, podendo este ser reconvertido em ácido acético por uma série de reações enzimáticas dentro das células (STANIER, 1959).

Em 1958, Macrae e Wilkinson observaram que a produção do homopolímero por *B. megaterium* era ainda mais rápida se existisse uma alta razão de glicose/nitrogênio no substrato e que a degradação subsequente por *B. cereus* ou *B. megaterium* acontecia rapidamente na ausência de outras fontes de energia. Os autores concluíram que o PHB era uma fonte de carbono e de energia reserva e sugeriram o caminho para a síntese do PHB (WILKINSON, 1958). No mesmo ano, também foi demonstrado que a ocorrência deste polímero de reserva era um fenômeno comum em

bactérias Gram-negativas (FORSYTH, 1958). Durante o mesmo período, Stanier, Doudoroff e seus colaboradores detalharam a biossíntese e o mecanismo de colapso do PHB nas células (DOUDOROFF, 1959). As reações envolvidas no caminho metabólico responsável pela biossíntese do PHB a partir do ácido acético foram inicialmente identificadas por Stanier em 1959 em seus estudos de formação de PHB em *R. rubrum*. No entanto, apenas em 1973, Schlegel, da Universidade de Gottingen, e Dawes, da Universidade de Hull, trabalhando de maneira independente, obtiveram sucesso no isolamento e na caracterização de enzimas específicas que catalisavam as reações de síntese do ácido 3-hidroxi-butírico, monômero do PHB. Schlegel desenvolveu suas investigações na produção de PHB por *Alcaligenes eutrophus*, enquanto Dawes estudou o ciclo em *Azotobacter beijerinckii*. Schlegel e Dawes publicaram suas descobertas sobre a identificação das enzimas envolvidas nas reações de conversão de ácido acético em ácido 3-hidroxi-butírico nestas duas diferentes bactérias na mesma edição de 1973 do *Biochemical Journal*.

O 3-Hidroxi-butirato (3HB) foi, por um longo tempo, considerado o único monômero de PHA produzido por bactérias como fonte de energia reserva até que, em 1974, Wallen e Rohwedder identificaram o 3-hidroxi-valerato e o 3-hidroxi-hexanoato em extratos de lodo ativo (WALLEN, 1974). A possibilidade de preparação de vários PHAs em função do substrato utilizado foi revelada por De Smet a partir do cultivo de *Pseudomonas oleovorans* em n-octano (DE SMET, 1983). O polímero formado era constituído principalmente de unidade de 3-hidroxi-octanoatos.

Na década de 1970, o interesse nos PHAs foi crescendo, o que se refletiu em um aumento significativo na quantidade de artigos publicados lidando com os mais variados aspectos destes polímeros (CHODAK, 2008). Além disso, diferentes microrganismos foram descobertos como possíveis produtores de PHAs, o que foi descrito por Davez e Senior em 1973. Ao mesmo tempo, o avanço nas pesquisas de cientistas de polímeros a respeito dos PHAs resultou em uma melhor caracterização dos mesmos em relação aos seus parâmetros macromoleculares, tais como sua massa molecular, sua estrutura cristalina, a morfologia dos grãos e outras propriedades. O contínuo trabalho em aspectos bioquímicos levou a um conhecimento detalhado do metabolismo do PHB e de sua regulação, da enzimologia da síntese do PHB, da degradação intra e extracelular do PHB e de sua função fisiológica. O reconhecimento da relação entre a biossíntese de PHB e o meio extracelular teve uma importância particular, especialmente ao se tornar possível otimizar o processo de preparação do PHB pela definição das condições que

favoreciam o acúmulo de PHB (BRAUNEGG, 2002). Do ponto de vista prático, a identificação de unidades de HA, além do 3HB, e especialmente a possibilidade de produção de copolímeros, revelaram um caminho de vislumbrar outras aplicações práticas para estes polímeros, já que isto resolveria o sério problema de fragilidade mecânica que o polímero apresentava. Sendo assim, ocorreu a primeira produção industrial de PHB-co-valerato, apesar de patentes a respeito do 3PHB como plástico potencialmente biodegradável já terem sido apresentadas em 1962 (BAPTIST, 1962). Na década de 1980, um trabalho extenso foi feito para identificar os potenciais das unidades de HA resultando não apenas na descrição de uma gama de unidades de 3HA, mas também na descoberta de unidades de 4HA e de 5HA na cadeia polimérica.

Para demonstrar a vasta flexibilidade em relação à produção de PHA, foi descoberto que tais materiais eram sintetizados não apenas por bactérias Gram-negativas, mas também por algumas bactérias Gram-positivas, como bactérias aeróbias, anaeróbias, fotossintéticas e em algumas *archaea* (STEINBÜCHEL, 1991 & ANDERSON, 1990). Em 1982, a *Imperial Chemical Industries Ltd.* (ICI) na Inglaterra iniciou a produção de um poliéster termoplástico que era totalmente biodegradável e que podia ser processado por temperatura para preparação de filmes e fibras (ANDERSON, 1990). A tecnologia consistia em um processo fermentativo em larga escala, resultando na produção do polímero no interior de células bacterianas, que chegavam a conter no final do processo aproximadamente 90% em polímero. A bactéria utilizada era a *Alcaligenes eutrophus*, que passou a ser chamada *Ralstonia eutrophae*, mais recentemente, *Wautersia eutropha* e o poliéster gerado comercializado com a marca “Biopol” era um copoliéster contendo arranjos aleatórios de unidades de [R]-3-hidroxitirato (HB) e [R]-3-hidroxisvalerato (HV) (HOLMES, 1988).

O rápido desenvolvimento da biologia molecular, iniciado no final da década de 1970 levou a uma investigação sobre clonagem e caracterização dos genes envolvidos na biossíntese de PHA. No final da década de 1980, o código genético das enzimas envolvidas na síntese de PHA foi clonado da *Ralstonia eutropha* e se mostrou funcionalmente ativo na *Escherichia coli*. A partir disso, a produção de PHAs está atualmente aparentando entrar no estágio mais avançado de seu desenvolvimento, o que pode ser justificado pela utilização da engenharia genética. Este desenvolvimento pode levar em um futuro próximo a uma eficiente produção de PHAs com grande potencial de biodegradabilidade, o que lhes permite uma utilização responsável e sustentável.

## 1.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

Os PHAs são poliésteres alifáticos que apresentam características físico-químicas distintas de acordo com sua fórmula. A Figura 2 representa a fórmula estrutural geral dos PHAs.

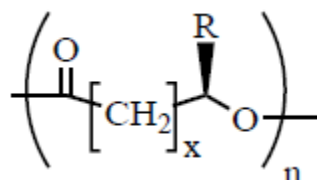


Figura 2 - Fórmula estrutural genérica dos PHAs

Fonte: Willians e Martin, 2005

A variação do parâmetro  $x$  e do radical  $R$ , na Figura 2, leva a formação dos diferentes tipos de PHAs. A Tabela 2 mostra os diferentes radicais  $R$  e valores de  $m$ , e os respectivos nomes dos polímeros gerados.

Tabela 2 - Estrutura dos PHAs

Nome abreviado	Nome do PHA	$x$	$R$
PHB	P(3HB)	1	-CH <sub>3</sub>
PHV	P(3HV)	1	-CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>
PHBV	P(3HB- <i>co</i> -3HV)	1	-CH <sub>3</sub> e -CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>
PHBH <sub><math>x</math></sub>	P(3HB- <i>co</i> -3HH <sub><math>x</math></sub> )	1	-CH <sub>3</sub> e -CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>
PHBO	P(3HB- <i>co</i> -3HO)	1	-CH <sub>3</sub> e -(CH <sub>2</sub> ) <sub>4</sub> CH <sub>3</sub>
PHBD	P(3HB- <i>co</i> -3HD)	1	-CH <sub>3</sub> e -C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> CH <sub>3</sub>
PHBOd	P(3HB- <i>co</i> -3HOd)	1	-CH <sub>3</sub> e -(CH <sub>2</sub> ) <sub>14</sub> CH <sub>3</sub>
-	P(3HB- <i>co</i> -4HB)	2	-CH <sub>3</sub> e -H
-	P(3HB- <i>co</i> -4HV)	2	-CH <sub>3</sub> e -CH <sub>3</sub>

Fonte: Adaptado de Shen, 2009

O PHA mais simples é o PHB, como indicado na Tabela 2, que possui a fórmula estrutural apresentada na Figura 2. O polímero em questão é completamente biodegradável, altamente hidrofílico e termoplástico, características que o assemelham ao polipropileno. Essas características são vantagens e tornam o PHB um interessante



substituto aos plásticos petroquímicos. Entretanto, a aplicação de grandes volumes do polímero é dificultada devido à baixa ductilidade, à grande suscetibilidade a degradação térmica rápida e à pronunciada fragilidade (CHODAK, 2008). Dessa maneira, dependendo da aplicação, essas propriedades precisam ser melhoradas, através da adição de aditivos e plastificantes, para que o polímero possa ser moldado de forma adequada. As propriedades físico-químicas dos PHAs podem ser alteradas com a modificação de sua cadeia carbônica, ou seja, a modificação dos monômeros utilizados na produção gera diferentes tipos de PHAs apresentando diferentes propriedades e podem ser utilizados de acordo com a aplicação desejada. (KOSIOR, 2006).

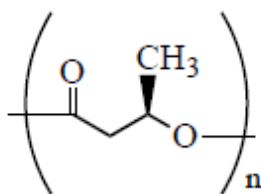


Figura 3 - Fórmula estrutural do PHB

Fonte: Willians e Martin, 2005

A Tabela 3 faz uma comparação entre as características de diferentes PHAs em relação aos polímeros petroquímicos, polipropileno (PP) e polietileno de baixa densidade (LDPE). Após a análise dos dados expostos na Tabela 3, percebe-se que algumas propriedades do PHB são semelhantes as do polipropileno, como o módulo de Young e a resistência à tração (CHODAK, 2008). Por outro lado, sua elongação ao romper é muito menor do que a do PP, o que dificulta sua aplicação nos métodos de moldagem tradicionais como o de extrusão e o de sopro. O PHB apresenta boas propriedades termoplásticas (ponto de fusão 175 °C) e pode ser processado como um termoplástico clássico. Esse polímero apresenta um largo intervalo de temperatura em que artigos com ele confeccionados mantêm sua forma (-30 °C a 120 °C) (SHEN, 2009). Os copolímeros, PHBV e PHBHA, apresentam propriedades muito próximas as LDPE e ligeiramente superiores as do PHB. Todavia, a disponibilidade e o preço desses materiais são impeditivos para que sejam considerados competidores no mercado atualmente (CHODAK, 2008). Esse cenário pode mudar com o barateamento do processo de produção e pelo uso de matérias primas mais baratas, uma vez que o custo

da matéria prima representa em torno de 40% do preço final do polímero (KOSIOR, 2006).

Tabela 3 - Comparação das propriedades de alguns PHAs com as do PP e do LDPE

Polímero	PHB	20V <sup>a,c</sup>	6HA <sup>b,c</sup>	PP	LDP E
Ponto de Fusão (°C)	180	145	133	176	130
Temperatura de transição vítrea (°C)	4	-1	-8	-10	-30
Cristalinidade (%) <sup>c</sup>	60	ng	ng	50	50
Densidade (g cm <sup>-1</sup> ) <sup>c</sup>	1,25	ng	ng	0,91	0,92
Módulo de Young (Mpa)	3,5	0,8	0,2	1,7	0,2
Resistência à tração (Mpa)	40	20	17	38	10
Elongação ao romper (%)	5	50	680	400	620

a Poli(3-hidroxibutyrato- co -20 mol% hidroxivalerato).

b Poli (3- hidroxibutyrato - co -6 mol% Has), HAs (hidroxialcanoatos) \_ 3% 3-hidroxidecano-ate, 3% 3-hidroxidodecanoato, \_ 1% 3-hidroxiocetanoato, \_ 1% 5-hidroxi-dodecanoato, ng \_ negligenciável

c (Chodak, 2008).

Fonte: Shen, 2009; Chodak, 2008

Quando se analisa apenas as propriedades dos biopolímeros comerciais, conforme apresentado Tabela 4, nota-se que todos apresentam densidade superior à unidade, o que pode ser considerado uma desvantagem. Esses materiais podem ser divididos em dois grupos, os que apresentam temperatura de transição vítrea (Tg) maior e menor do que zero. Essa propriedade influencia diretamente na etapa de conformação do material e em sua aplicação. Os polímeros com Tg negativa podem ser utilizados em embalagens em substituição ao polietileno (CHODAK, 2008).

Tabela 4 - Comparação das propriedades físicas do PHBV com as de outros bioplásticos

Polímero	PHBV	PLA	PCL	PEA	PBSA	PBAT
Densidade	1,25	1,25	1,11	1,07	1,23	1,21
Temperatura de fusão (°C)	153	152	65	112	114	110-115
Tg (°C)	5	58	-61	-29	-45	-30
Cristalinidade (%)	51	0-1	67	33	41	20-35
Modulo (MPa)	900	2000	190	260	250	52
Elongação ao romper (%)	15	9	>500	420	>500	>500
Permeabilidade à água (g m <sup>-2</sup> por dia)	21	172	177	680	330	550

PHBV – poli-(3-hydroxibutirato- co-3-valerato), Monsanto (Biopol D400G, HV 7%); PLA – poli(ácido láctico), Dow-Cargill (Nature Works); PCL – policaprolactona, Solvay (CAPA 680); PEA – poliesteramida, Bayer (BAK 1095); PBSA – poli(butilenosuccinato- co-adipato), Showa (Bionolle 3000); PBAT – copoliesteratomático, Eastman (Eastarbio 14766).

Fonte: Chodak, 2008

Diferentemente dos outros biopolímeros que são ou sensíveis à umidade ou solúveis em água, o PHB apresenta baixa permeabilidade à água. Isso leva a crer que esse bioplástico é indicado na fabricação de embalagem. Para corroborar neste sentido, o PHB apresenta baixa permeabilidade ao oxigênio, e gases em geral, tornando-o adequado no empacotamento de produtos sensíveis a esse gás. Além dessas características, esse material não é tóxico, uma vez que é natural, e, portanto, o seu uso é indicado em produtos alimentícios ou que entrarão em contato com seres vivos (SHEN, 2009).

### 1.3 APLICAÇÕES

A procura por bioplásticos, capazes de substituir os plásticos petroquímicos convencionais, conduz à busca de materiais com propriedades similares aos clássicos e, na maioria dos casos, biodegradáveis. A partir das propriedades dos PHAs, apresentadas no item 1.2, como biodegradabilidade, baixa permeabilidade à água e ao oxigênio, termoplasticidade e biocompatibilidade, pode-se dizer que as áreas de materiais médicos, como na confecção de próteses e/ou curativos, e embalagens alimentícias são bastante promissoras em relação à aplicação dos PHAs (CHODAK, 2008).

Em um primeiro momento, nichos de alto valor agregado foram criados para que a produção de pequenas quantidades de PHB fosse lucrativa. Aplicações que exigissem um alto grau de diferenciação dos polímeros, mais específicos do que os polímeros commodities, foram pesquisadas e exploradas. A área médica se mostrou a mais promissora dentre as demais, pois exige características como biocompatibilidade, biodegradabilidade e baixa toxidez (HOLMES, 1985).

Atualmente, o biopolímero poli(4-hidroxi-butarato), conhecido como P4HB, já é utilizado pela empresa Tephra Medical Devices na confecção de linhas de sutura e, filmes e telas cirúrgicos, e é comercializado com o nome de Tephra FLEX. Todos esses produtos foram aprovados pela FDA (Food and Drug Administration) por serem biocompatíveis e biodegradáveis, uma vez que o seu monômero (4-hidroxi-butarato) é encontrado em vários tecidos do corpo humano e, portanto, facilmente metabolizado (WILLIAMS & MARTIN, 2012).

O PHB e seus copolímeros podem ser utilizados na confecção de embalagens para alimentos em detrimento ao uso do politereftalato de etileno (PET). A substituição do PET na confecção de garrafas plásticas parece ser uma alternativa atraente para e diminuir o volume consumido desse material, visto que, apesar de ser umas das maiores do mundo, a percentagem de PET reciclado atingiu, aproximadamente, apenas 60% no Brasil, em 2011 (ABIPET, 2011). Esse restante que não é reciclado vai para os aterros sanitários do país e corresponde a aproximadamente 221 mil toneladas de resíduo.

Certos autores, como Kosior em 2006 e Shen em 2008, fizeram entrevistas com especialistas de algumas empresas produtoras de PHAs na época dos trabalhos, pois atualmente nem todos continuam produzindo como pode ser visto no item 1.4. Nesses estudos foi discutido o potencial de substituição de cada PHA produzido em relação aos polímeros já estabelecidos no mercado, como polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD), polipropileno (PP), politereftalato de etileno (PET) e policloreto de vinila (PVC). Kosior (2006) obteve informações de representantes da alemã Biomer e da brasileira PHB Industrial, além da Nodax. Em 2008, Shen entrevistou representantes das empresas Telles e Kaneka. Formando uma compilação desses estudos foi possível montar a Tabela 5.

Tabela 5 - Potencialidade de substituição de polímeros petroquímicos por PHAs

(“+” Substituição parcial / “-” Substituição improvável)

	<b>PEBD</b>	<b>PEAD</b>	<b>PP</b>	<b>PET</b>	<b>PVC</b>
P3HB <sup>a</sup> (Biomer)	-	+	+	-	-
P(3HB-co-3HHx) <sup>b</sup> (Kaneka)	+	+	+	-	+
P(3HB-co-3HV) <sup>a</sup> (PHB Industrial)	-	+	+	-	-
Copolímeros do P3HB <sup>b</sup> (Telles)	+	+	+	+	+

a (Kosior, 2006).

b (Shen, 2008).

Fonte: Adaptado de Kosior (2006) e Shen (2008)

Analisando a Tabela 5, percebe-se que os PHAs comerciais têm potencial para substituir a maioria dos polímeros petroquímicos considerados. Isso mostra que a perspectiva de mercado e de aplicações é positiva e, portanto, merece estudos tecnológicos e econômicos mais detalhados para que os preços de venda desses materiais sejam competitivos o suficiente para que possam ser comercializados como commodities.

## 1.4 PRODUTORES

Estudar o mercado de um determinado produto passa pelo conhecimento dos seus principais produtores. Nessa análise, saber não apenas quais são os atuais produtores e suas capacidades de produção, mas como também ter noção do histórico produtivo, é fundamental para que se tenha uma ideia mais abrangente possível sobre o assunto. Para contemplar o que foi exposto, um breve apanhado histórico sobre a produção de PHAs será abordado. Em seguida, os atuais players e suas capacidades de produção serão apresentados.

Desde o primeiro entendimento mais claro sobre a composição do PHA, através da publicação de artigos por Lemoigne, no período entre a década de 1920 e 1930, inúmeras empresas têm empenhado esforços para sua produção e comercialização em escala industrial. Entretanto, demorou cerca de 30 anos para que, de fato, o PHA fosse produzido pela W. R. Grace em 1959 que cessou sua produção após algum tempo devido à baixa produtividade e à falta de processos de purificação. Em 1970, a empresa inglesa Imperial Chemical Industries (ICI) começou a produzir um tipo de PHA sob o nome comercial de Biopol™. A tecnologia foi adquirida pela Monsanto em 1996 e depois vendida para a Metabolix em 1998. (CHANPRATEEP, 2010).

Em julho de 2006, a empresa Metabolix, juntamente com Archer Daniels Midland (ADM), fundou a joint venture Telles para a produção de PHAs nos Estados Unidos, Europa e outros continentes. A empresa construiu uma planta com capacidade de produção de 50.000 ton/ano na cidade de Clinton nos Estados Unidos. No início de 2012, ADM anunciou que retiraria seu capital da Telles finalizando assim a parceria com a Metabolix. Com o término da joint venture a ADM manterá sua fábrica em Clinton e a Metabolix ficará com toda a propriedade industrial e intelectual elaborada

durante a parceria. (SHEN, 2009 & METABOLIX, 2012). A empresa japonesa Kaneka, em parceria com a P&G como financiadora, investiu na produção de um copolímero do PHB, o PHBV, até 2006. Desde então, a empresa japonesa mantém a produção do biopolímero e, conforme anúncio em 2009, espera aumentar sua capacidade de produção para 50.000 toneladas por ano em 2020 (SHEN, 2009).

A brasileira PHB Industrial, proprietária da marca BIOCYCLE®, é uma joint venture entre as empresas Pedra Agroindustrial e Grupo Balbo. A empresa iniciou os estudos sobre a produção do PHB, que tiveram duração de 2 anos, em 1992. Após a finalização dos estudos técnicos e econômicos, a empresa chegou à conclusão que o negócio traria bons frutos e em 1995 finalizou a instalação de uma planta piloto com capacidade de produção de 5,0 ton/ano. Em 2000, após estudos econômicos mais detalhados, a planta teve sua capacidade aumentada para 50 ton/ano. O desejo da empresa é de instalar uma planta com capacidade industrial de 30.000 ton/ano (PHB INDUSTRIAL, 2012).

# Capítulo 2

---

## 2 PROCESSOS DE OBTENÇÃO

### 2.1 ANÁLISE DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS

Biopolímeros podem ser produzidos através de rotas bioquímicas ou químicas. Atualmente, as bactérias são consideradas os principais organismos capazes de produzir PHAs (STEINBÜCHEL, 2003). A síntese bacteriana de bioplásticos é bastante desafiadora e requer instrumentos que desenvolvam sua viabilidade técnica e econômica. Apesar de uma gama extensa de PHAs produzidos com variadas características, a produtividade costuma ser baixa e o custo quando comparado com os plásticos tradicionais é alto, fazendo com que estes fatores inibam a aplicação industrial dos PHAs. No entanto, uma produtividade relativamente elevada já pode ser observada com relação à síntese de P3HB, bem como do copolímero P3HB-co-3HV (OJUMU, 2004). Apesar da baixa produtividade observada na maior parte dos casos, a versatilidade destes biopolímeros fez com que eles fossem encarados como bons candidatos para produção em pequenos volumes, porém com alto valor agregado, podendo ser direcionada a nichos específicos, particularmente para uso na medicina (KESHAVARZ, 2010), conforme descrito no item 2.2 (Aplicações).

Os PHAs variam bastante com relação a seus aspectos físicos e a suas características químicas graças à grande variedade de monômeros que podem constituirlos. Os principais fatores que podem diferenciar tais características incluem: o tipo de microrganismo utilizado, a composição química do meio, as condições e os modos de condução da fermentação, bem como as formas de recuperação do produto. Cada um desses fatores será explorado separadamente nos próximos tópicos.

### 2.1.1 MICRORGANISMOS

Uma grande variedade de bactérias Gram-positivas e Gram-negativas (mais de 300 espécies) exibe a capacidade metabólica de sintetizar PHAs e de acumular o polímero em seu citoplasma como fontes de carbono e energia na forma de grãos (REDDY, 2003). A biossíntese de PHAs pelas bactérias é comumente ligada ao estresse do meio de cultura em relação à limitação de nutrientes ao mesmo tempo em que se utiliza excesso de fonte de carbono (LEE, 1996). No entanto, algumas bactérias como *Azotobacter vinelandii*, *A. eutrophus* e *A. latus* tem a capacidade de acumular PHAs independentemente das condições de limitação de nutrientes.

Um dos pontos fundamentais a ser considerado é a capacidade de adequação do microrganismo a fontes de matéria-prima baratas, o que tem gerado um esforço persistente no sentido de aumentar o rendimento em termos de PHA tanto nas culturas de bactérias quanto nas células individualmente. Para que a produção de PHA seja industrialmente viável, também é importante aumentar a taxa de produção. Neste contexto, uma taxa de crescimento mais elevada dos microrganismos produtores de PHA se faz necessária. Uma das técnicas utilizadas para reduzir o tempo necessário para a geração do polímero é a aplicação de bactérias recombinantes. *E. coli* recombinante, por exemplo, foi inicialmente desenvolvida com foco na produção de P3HB, tendo ocorrido posteriormente a produção de uma variedade de copolímeros (KESHAVARZ, 2010).

### 2.1.2 MEIO

A escolha do meio é bastante relevante não apenas para que se forneçam as condições ótimas de produção dos PHAs nas mais variadas bactérias, mas também para que se alcancem altos índices volumétricos de produção a fim de gerar um produto final que seja economicamente competitivo com os plásticos tradicionais. Como a maior parcela do custo de produção dos PHAs é relativa ao meio (SALEHIZADEH, 2004), os esforços são focados na procura de meios de menor custo. Uma redução significativa no custo final de produção será apresentada caso sejam encontrados meios baratos que atendam às necessidades da síntese de PHAs com alta produtividade.



Muitos estudos focando na seleção de fontes baratas para a fermentação incluem meios contendo melação, milhocina, soro de leite, arroz e trigo, amido e suas águas residuais, águas residuais da produção de óleos de oliva e de palma, lodo ativo e dejetos de suínos (KESHAVARZ, 2010). A escolha do meio depende diretamente da escolha de microrganismos que necessitem ou não de condições limitantes de nutrientes. Outro fator que afeta a escolha do meio é o objetivo final de produção, já que a composição do mesmo varia para o caso de produção de homopolímeros, como o PHB, ou de copolímeros, como PHB-co-HV.

### 2.1.3 CONDIÇÕES E MODOS DE CONDUÇÃO DA FERMENTAÇÃO

Muitas das fermentações que visam à produção do PHA são desenvolvidas em dois estágios. O objetivo inicial é produzir uma grande quantidade de células no primeiro estágio (crescimento) e, posteriormente, aumentar a concentração de PHA durante o segundo estágio (produção), o que ocorre comumente em uma fermentação com limitação de nutrientes. As condições da fermentação dependem das demandas dos microrganismos e normalmente é utilizada uma faixa de temperatura de 30 a 37 °C, além de baixas velocidades de agitação, o que resulta em um baixo teor de oxigênio dissolvido. Em alguns casos, é importante controlar o pH, o que é feito pela adição de substrato ao meio.

Muitos estudos foram desenvolvidos com o intuito de estabelecer fermentações eficientes que levassem a uma alta produtividade de PHA. Neste sentido, foram investigados vários métodos em batelada, em batelada alimentada e em processo contínuo, tendo sido avaliadas diferentes fontes de carbono, alguns nutrientes limitantes (nitrogênio, fosfato e oxigênio, por exemplo), diversos regimes de alimentação e alternadas taxas de diluição (KESHAVARZ, 2010).

## 2.1.4 RECUPERAÇÃO

A recuperação do PHA é uma etapa responsável por uma parcela significativa dos custos de produção. Apesar de uma grande variedade de métodos de isolamento, um processo que ofereça segurança quanto à utilização em larga escala e que seja economicamente favorável ainda está por ser desenvolvido. Uma grande gama de métodos de separação para a recuperação de PHA já foi descrita (LEE, 1996). O desenvolvimento de processos mais baratos e mais seguros para a recuperação de PHA terá um impacto significativo na produção industrial deste biopolímero.

Uma prática comum é a utilização de extração por solvente. O rendimento da recuperação nestes processos é mais elevado do que o rompimento celular com posterior extração aquosa, o que ocorre devido à diminuição da massa molecular do biopolímero que é gerada pelo processo de ruptura celular. A digestão enzimática como forma de separar o PHA de outros constituintes celulares também foi tema de estudo (YASOTHA, 2006 e 2007). Pré-tratamento das células, ruptura celular, digestão química ou enzimática de outros produtos que não o biopolímero no sistema, liberação espontânea do PHB, flotação por ar dissolvido e extração por CO<sub>2</sub> supercrítico foram citados na literatura mais recentemente (JACQUEL, 2008). No entanto, nenhum dos processos supracitados apresentou todos os requisitos necessários de eficiência e viabilidade econômica para aplicação em larga escala, sendo os principais problemas o custo, a segurança e a escala aplicada.

## 2.2 PROCESSOS ANALISADOS

Para realizar a análise econômica de um processo químico é fundamental que se tenha conhecimento das operações unitárias e uma estimativa das quantidades materiais de matérias-primas, insumos e produtos referentes a este processo. Com essa finalidade, foram escolhidos dois processos de obtenção de PHB a partir de diferentes matérias-primas, glicose (VAN WEGEN, 1998) e glicerol (POSADA, 2011). É importante ressaltar, porém, que os processos analisados são fruto apenas de dois artigos isolados. Outras opções de rotas tecnológicas, ou até mesmo de melhorias aos processos descritos, são possíveis, mas simplesmente não compõe o escopo pretendido deste

estudo. A produção de PHB por fermentação bacteriana é regida por quatro principais etapas: (i) pré-tratamento do substrato, (ii) inoculação, (iii) fermentação e (iv) isolamento e purificação do produto obtido. Contudo, só serão consideradas as etapas (iii) e (iv) para os processos escolhidos. Nos dois itens subsequentes, os dois processos serão depurados a fim de explicitá-los de modo a extrair as variáveis importantes para a posterior análise econômica.

### 2.2.1 PRODUÇÃO DE PHB A PARTIR DE GLICOSE

Como pôde ser visto na seção anterior, uma das bactérias utilizadas na produção de PHAs é a *Escherichia coli*. Algumas das vantagens da utilização de *E. coli* são a recuperação mais fácil do produto final devido a fragilidade maior das células e ao maior tamanho dos grânulos de PHA, taxas mais elevadas de crescimento celular e níveis mais altos de produção de PHA, a vasta experiência em pesquisa e a maior quantidade de ferramentas desenvolvidas em engenharia genética para esta bactéria e, por fim, o fato de não ser necessária a limitação de nutrientes, o que facilita o controle do processo. Neste item, será feita uma revisão bibliográfica do método de produção explorado por Van Wegen em artigo publicado em 1998.

Quando cultivada em meios tradicionais, a *E. coli* geralmente não produz níveis elevados de PHA. A maior parte dos exemplos encontrados na literatura, inclusive, demonstra que altos rendimentos em PHA nos processos fermentativos são obtidos em meios complexos, o que é economicamente desvantajoso para a aplicação em larga escala. No entanto, glicose adicionada de milhocina, hidrolisado de caseína e extrato de levedura produz excelentes resultados em operação de batelada alimentada (LEE, 1996). Este meio alcança um peso seco de célula de 113 g/l com 72% de PHB em 41 horas. Para concentrações superiores a 75 g/l é necessária a utilização de oxigênio puro para manter a tensão de oxigênio suficiente, o que é um fator proibitivo em termos de custo para a aplicação em larga escala. Portanto, utilizou-se na análise o valor mais conservador de 75 g/l para a densidade final de células, sendo necessária uma vazão de ar relativamente alta de 2.0 v.v.m. (volume de ar por volume de meio).

O fluxograma simplificado do processo de obtenção do PHB a partir da glicose pode ser acompanhado pela Figura 4. A etapa de fermentação é conduzida em dois reatores em paralelo operando em regime batelada e diversos tanques de

armazenamento, para que o custo da operação seja reduzido. Cada batelada dura em média 40 horas. Após esse período a densidade celular alcança o valor de 75 g/L e contém cerca de 72% em peso correspondente ao PHB acumulado.

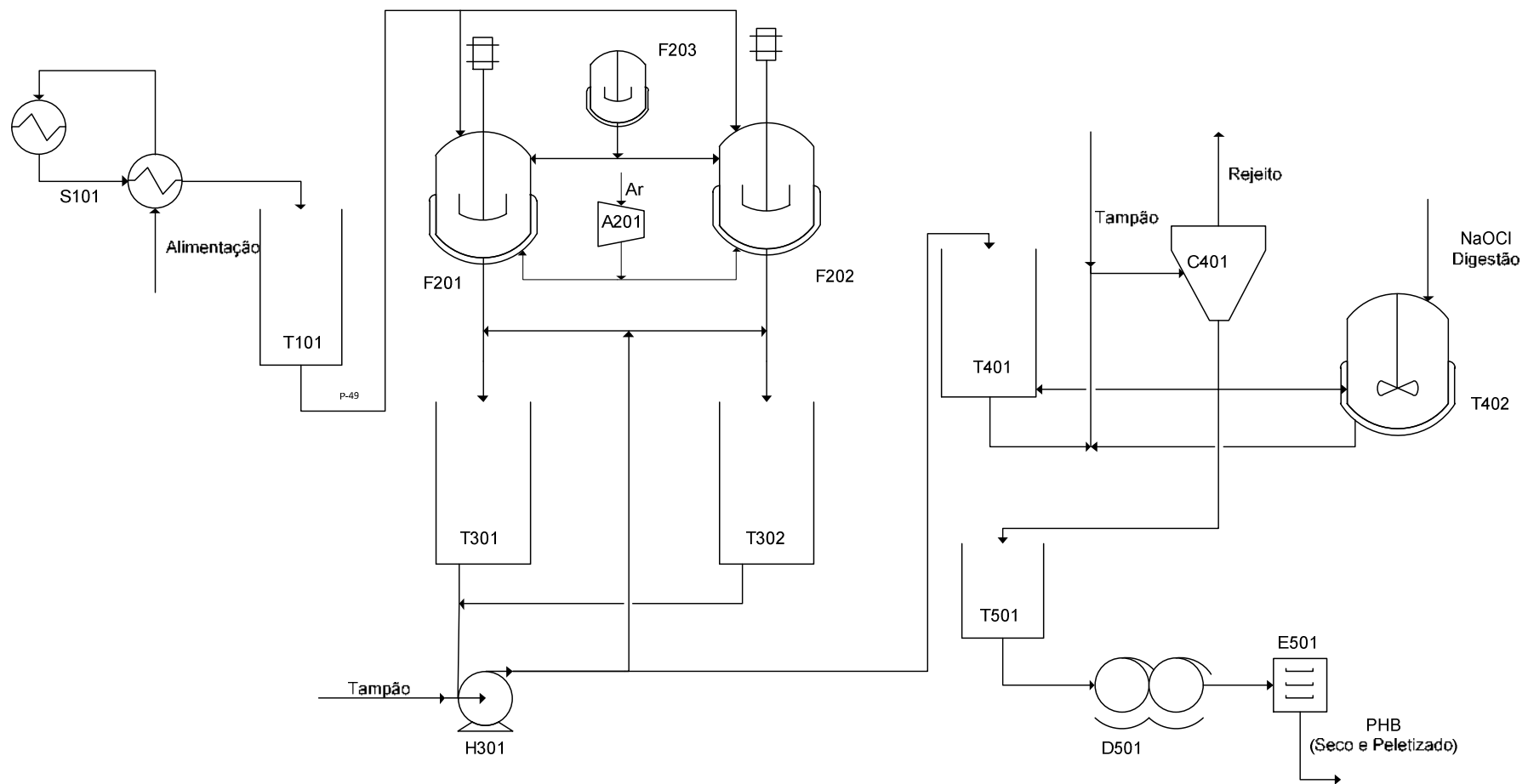


Figura 4 – Fluxograma do processo de produção de PHB a partir de glicose

Fonte: VanWegen, 1998

Os processos de homogeneização e centrifugação são operações unitárias comuns em bioprocessos. Um processo de extração de PHA combinando homogeneização, centrifugação e tratamento com hipoclorito de sódio foi desenvolvido posteriormente (LING, 1997). Este processo alcança uma alta taxa de recuperação de PHA com uma pureza também elevada, além de ser possível a sua aplicação em larga escala.

O referido método se inicia com uma homogeneização que visa à liberação dos grânulos de PHB. Neste procedimento, pode ser utilizada uma alta concentração celular (25 – 50 g/l em peso seco de células) para a produção em escala, já que a eficiência do processo é relativamente pouco sensível à concentração alimentada. Três passagens pelo processo de homogeneização são suficientes para que os detritos celulares tenham seu tamanho minimizado, o que é um importante passo para que se atinja uma eficiência alta de separação no processo de centrifugação. Uma única passagem pelo processo de centrifugação é aplicada posteriormente com o intuito de remover o material celular solúvel, especialmente os ácidos nucléicos. Este passo é essencial devido ao fato de o tratamento químico prévio, visando à remoção de ácidos nucleicos, levar à geração de um produto de baixa pureza, possivelmente devido à aderência do DNA à superfície dos grânulos. A lama de PHB gerada é então suspensa novamente e tratada com NaOCl (0.085 % p/v de cloro ativo) pelo período de 1 hora à temperatura ambiente. Por fim, são empregados mais dois passos de centrifugação para lavar os grânulos de PHB. No processo desenvolvido, foi utilizada uma baixa concentração de alimentação na centrífuga. No entanto, uma concentração de alimentação elevada pode ser utilizada, tendo em vista que o desempenho do processo de centrifugação decai de maneira sutil com o aumento desta concentração. No processo descrito, foi utilizada uma concentração limite de alimentação da centrífuga conservadora de 50 g/l em peso seco de células na primeira passagem. Os passos subsequentes, porém, podem tolerar uma carga de sólidos mais elevada (estimada em 70 – 75 g/l) uma vez que a maior parte dos ácidos nucléicos já ter sido removida e de a viscosidade do meio já ter sido bastante reduzida.

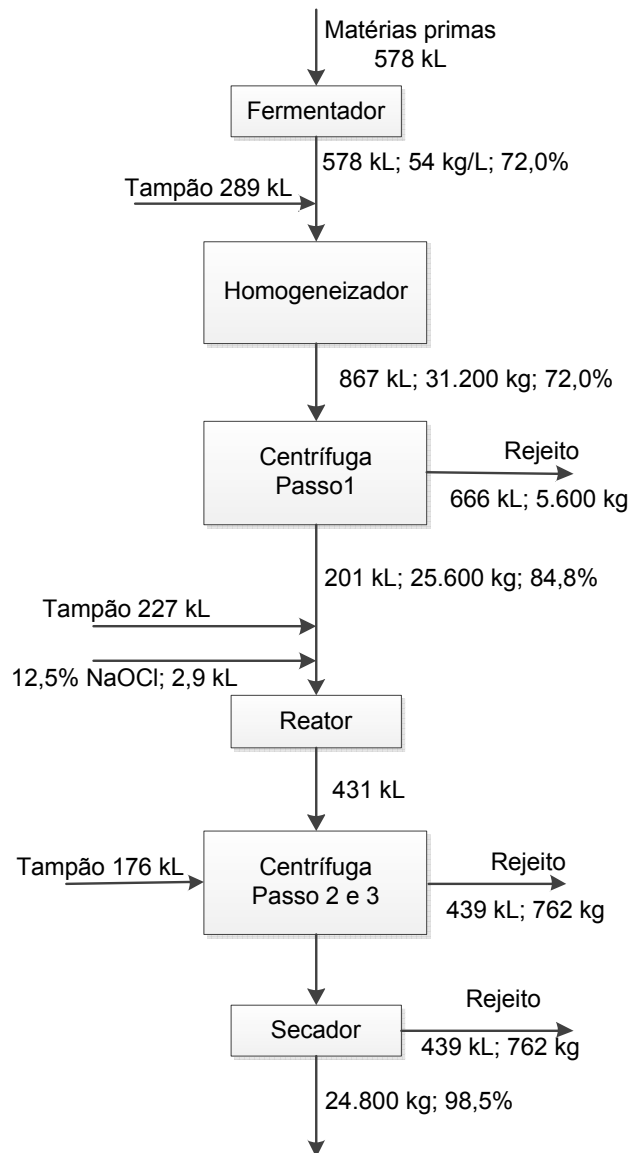


Figura 5 - Balanço material simplificado do processo cuja matéria-prima é a glicose, baseado em uma batelada completa (46 horas). Volume em kL, massa de PHB em kg e pureza do PHB em %p/p.

Fonte: Van Wegen, 1998

A recuperação de PHB e sua purificação após cada passagem da centrifugação foram determinadas experimentalmente e os valores máximos de concentração utilizados na alimentação para as três passagens foram de 50, 70 e 75 g/l em peso seco de células, sendo a recuperação de PHB em peso igual a 82% na primeira passagem, 99 % na segunda e 98 % na terceira passagem. Uma análise final da pureza do PHA confirmou um baixo teor de contaminantes através da utilização do processo descrito (proteínas <0.01% p/p, DNA <0.03% p/p, remoção de detritos celulares >96 % v/v). Após essa etapa, o PHB é seco até atingir aproximadamente 98% de pureza.

## 2.2.2 PRODUÇÃO DE PHB A PARTIR DE GLICEROL

Um dos principais pontos que tornam o PHB um produto ainda pouco competitivo é o custo elevado de sua produção. Neste sentido, o alto custo de matéria-prima é um dos pontos que deve ser considerado. Com o objetivo de minimizar este custo, uma rota alternativa de produção de PHB a partir de glicerol foi desenvolvida, já que o glicerol é um dos subprodutos da produção de biodiesel e o preço do mesmo tem se mostrado bastante competitivo em comparação com outras fontes de matéria-prima. Neste item, será feita uma revisão bibliográfica do método de produção explorado por Posada em artigo publicado em 2011.

O PHB pode ser produzido tanto a partir do glicerol bruto quanto a partir do glicerol puro através da utilização de diferentes bactérias, entre as quais podem ser citadas: *Cupriavidus necator* DSM 545, *Osmophilic organism*, *Methylobacterium rhodesianum* MB 126, *Ralstonia eutropha* DMS 11348, *Cupriavidus necator* JMP 134 e *Escherichia coli* CT 1601, entre outras. Devido à maior acumulação de PHB apresentada pela utilização de *Cupriavidus necator* JMP 134, este foi o microrganismo selecionado para o referido estudo. Entre as principais condições operacionais do processo de fermentação, foram estudados a qualidade do glicerol utilizado, a concentração de glicerol na alimentação, a temperatura, o pH, a concentração de oxigênio dissolvido, o rendimento de biomassa residual, o tempo de operação e rendimento em termos de PHB (MOTHES, 2007). Quando utilizado glicerol bruto ao invés de glicerol puro o desempenho do processo de fermentação pode ser modificado. Portanto, para unificar o processo de avaliação apenas uma concentração de glicerol bruto foi considerada. Uma composição típica da corrente de glicerol bruto gerada na produção de biodiesel é: metanol 32.59% em peso, glicerol 60.05% em peso, NaOCH<sub>3</sub> 2.62% em peso, gorduras 1.94% em peso e cinzas 2.8% em peso (THOMPSON, 2006).

Em um estudo anterior (POSADA, 2011) os processos de purificação do glicerol bruto foram analisados e os resultados da análise técnica e econômica para dois diferentes graus de pureza foram observados (glicerol cru a 88% em peso e glicerol cru a 98% em peso). Neste processo, a mistura alimentada é evaporada e 90% de metanol com 99% em peso de pureza são recuperados, sendo a corrente produzida posteriormente neutralizada com uma solução ácida. Após esta evaporação, as cinzas



são retiradas por centrifugação e a corrente é então lavada com água. Em um processo de evaporação posterior, mais de 90% do conteúdo de água e o metanol remanescente são retirados. Como resultado, é obtida uma corrente de glicerol com 80% em peso. Finalmente, os diferentes percentuais de pureza desejados são alcançados por um processo de destilação. Este processo inclui uma recuperação de metanol que diminui o custo da purificação em 37.5%. Esse processo não será levado em consideração na avaliação econômica proposta neste trabalho e, portanto, sua descrição foi feita de forma elucidativa.

O *C. necator* JMP 134 pode sintetizar PHB com até 70% em peso seco de células a partir de vários tipos de substratos. O processo de fermentação é conduzido em dois estágios. No primeiro deles, ocorre o crescimento celular e, no segundo, o PHB é efetivamente produzido. Ar e oxigênio puro são alimentados no primeiro fermentador, no qual o caldo de fermentação é saturado a uma concentração de oxigênio dissolvido entre 15 e 20%, para que depois a acumulação de PHB seja iniciada no interior das células. As condições detalhadas do processo de fermentação serão apresentadas posteriormente na análise do fluxograma do processo.

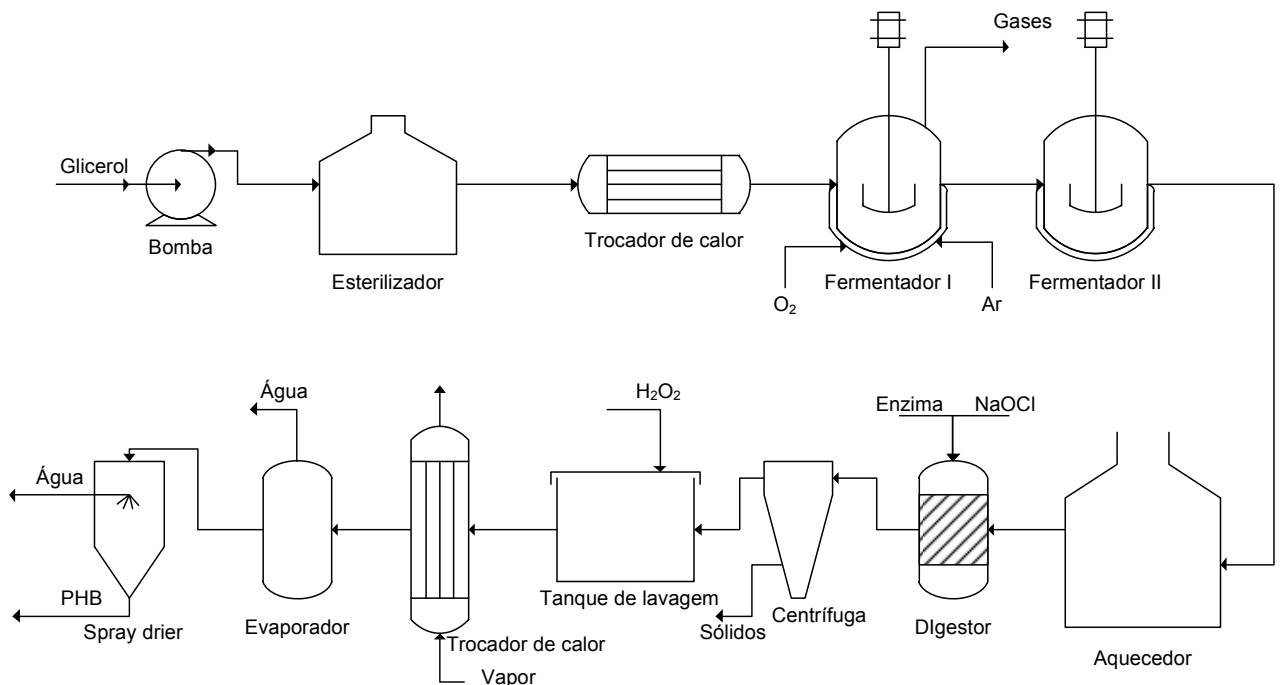


Figura 6 - Fluxograma do processo de produção de PHB a partir de glicose

Fonte: Posada, 2011

O processo de fermentação se inicia com a esterilização do glicerol diluído. O glicerol puro foi diluído até a concentração de 249 g/l e o glicerol bruto até a concentração de 170.8 g/l com base no consumo total de glicerol pelos microrganismos. A conversão do glicerol é realizada em dois processos contínuos de fermentação para o crescimento celular e para a acumulação de PHB com tempo de operação de 21 h e de 22.5 h, respectivamente. Foi assumido o consumo total do glicerol após o segundo processo de fermentação. O artigo aborda a partir daí três processos diferentes de *downstream*. Para simplificar as análises posteriores, o presente trabalho focará no primeiro processo *downstream* apresentado. Este processo é baseado em uma variação do processo utilizado pela BIOPOL. O primeiro passo consiste em um tratamento térmico a 85°C e, posteriormente, um processo de digestão utilizando a enzima *Burkholdeira PTU 9* e NaOCl é utilizado. Este pré-tratamento é responsável pela ruptura celular apropriada, adicionando o PHB produzido ao caldo de fermentação. O produto da digestão contendo de 7 a 9% em peso de biomassa é então filtrado e o material celular residual é retirado. A mistura contendo o PHB com uma concentração de 5.5 – 5.7% em peso é tratada com uma solução de peróxido de hidrogênio. Após este tratamento, um processo de flash é utilizado, fazendo com que a maior parte do conteúdo de água seja retirada. Por fim, através de um processo de *spray drying*, PHB com concentração de 99.9% em peso é obtido.

## 2.3 DADOS OBTIDOS

Os dois processos escolhidos nesse trabalho foram analisados no item 2.2. A partir dessa análise e de balanços materiais, foi possível obter as quantidades de insumos necessários e de produto produzido em cada processo. Esses dados serão apresentados para cada processo separadamente nos itens subsequentes.

### 2.3.1 PRODUÇÃO A PARTIR DA GLICOSE

O artigo utilizado como referência na análise do processo de produção de PHB a partir da glicose explicita o balanço material geral do processo, que foi adaptado e pode ser visualizado na Figura 5. Este contabiliza as quantidades de matéria-prima, insumos, rejeitos e produto por batelada. Através da observação desse balanço de massa, foi

possível extrair os dados das correntes de entrada e de saída do processo e colocá-los na Tabela 6.

Tabela 6 - Dados obtidos pela análise do balanço material do processo de produção do glicerol a partir da glicose

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Composição</b>
PHB	24.800 kg	-
Tampão	692 kL	1,4 g/L KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> 6,5 g/L NaCl
NaOCl	2,9 kL	12,5% Cloro ativo
Água de rejeito	1252 kL	-

Fonte: Van Wegen, 1998

O meio fermentativo utilizado no processo é constituído por glicose e por uma combinação de extrato de levedura, xarope de milho, e caseína que têm suas proporções baseadas na quantidade de glicose utilizada. Levando em consideração 1 kg de glicose seriam necessários 0,0156 kg de extrato de levedura, 0,0900 kg de xarope de milho e 0,0191 kg de caseína.

O artigo não explicita a massa de glicose utilizada em uma batelada. Entretanto, os autores assumiram que o processo possui rendimento de 45% p/p (massa de célula por massa de glicose). No item 2.2.1, foi visto que uma concentração de células igual a 75 g/L é obtida na saída do fermentador. Com esses valores foi possível calcular a composição do meio de cultivo necessário para que uma batelada ocorresse. Esses números podem ser visualizados na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição do meio de cultivo utilizado no processo que utiliza glicose como matéria-prima

<b>Material</b>	<b>Quantidade (kg)</b>
Glicose	96333
Extrato de Levedura	1503
Xarope de Milho	8670
Caseína	1840

Fonte: Van Wegen, 1998

Além das quantidades de insumos, de matéria-prima e de produto, é fundamental saber o custo dos equipamentos necessários para que o processo ocorra e seus gastos energéticos, tanto de vapor quanto de eletricidade. Nesse sentido, a Tabela 8 resume esses dados.

Tabela 8 - Lista de equipamentos, contendo preços e gastos energéticos

<b>Equipamento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Tamanho Total</b>	<b>CustoTotal(U\$ 1995)</b>	<b>Eletricidade (MWh/bat)</b>	<b>Vapor (ton/bat)</b>
Inoculador F203	1	14,4 kL	46.000	1,33	-
Fermentadores F201, F202	2	578 kL	461.000	48,5	-
Homogeneizador H301	1	65,0 m <sup>3</sup> /h	430.000	49,0	-
Centrífugas C401	8	1.170.000 m <sup>2</sup>	1.983.000	27	-
Compressores A201	2	2.510 kW	1.545.000	81,5	-
Secadores D501	3	46,0 m <sup>2</sup>	385.000	-	267
Extrusora e Peletizadora E501	1	540 kg/h	126.000	-	-
Esterilizador S101	1	14,4 m <sup>3</sup> /h	463.000	-	57,8
Tanque T101	1	260 kL	101.000	-	-
Tanques T301, 302 e 401	3	867 kL	322.000	-	-
Tanque T402	1	215 kL	91.000	-	-
Tanque T501	1	84,0 kL	54.000	-	-
<b>Total</b>			<b>6.007.000</b>	<b>207,33</b>	<b>324,8</b>

Fonte: Van Wegen, 1998

Os custos dos equipamentos estão apresentados em dólar americano do ano de 1995. Esses valores deverão ser corrigidos ao longo do tempo para que a avaliação econômica seja realizada com valores mais recentes. Esta correção será realizada em um item posterior do trabalho. Com base nos dados da Tabela 6, da Tabela 7 e da Tabela 8, e através de cálculos estequiométricos foi possível obter as quantidades de todas as principais variáveis do processo de obtenção de PHB a partir da glicose que podem ser visualizadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Consumo de insumos e matéria-prima por batelada (glicose)

<b>Consumo por batelada</b>	
<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>
Glicose	96333 kg
Extrato de levedura	1503 kg
Xarope de milho	8670 kg
Caseína	1840 kg
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	969 kg
NaCl	4498 kg
NaOCl	682 kg
Eletricidade	207 MWh
Vapor	325 ton

Fonte: Elaboração própria a partir de dados de Van Wegen, 1998

É possível notar que o consumo de glicose por batelada é extremamente elevado e representa cerca de 85% em massa dos insumos. Provavelmente, a glicose terá grande impacto nos custos variáveis desse processo, os quais serão calculados posteriormente nesse trabalho.

### 2.3.2 PRODUÇÃO A PARTIR DO GLICEROL

O meio de cultivo utilizado no processo de produção de PHB a partir do glicerol é composto basicamente por glicerol diluído. Outros componentes do meio são citados em outro artigo do mesmo autor, entretanto, não entraram como componentes nesta análise. Fica a ressalva, portanto, que seria preciso, para fins de precisão, analisar o

meio de produção associado ao glicerol que permitiria o crescimento do microrganismo e conseguinte produção do PHB. Portanto, é fundamental conhecer a vazão desse material que entra no primeiro fermentador. Do artigo utilizado como referência, podem ser retirados os valores da vazão total de entrada, 1000 kg/h, e a concentração dessa corrente, 249 g/L (gramas de glicerol por litro de solução). Sabendo que a densidade do glicerol puro é de 1260 g/L e que a da água é de 1000 g/L, foi possível calcular a vazão mássica de glicerol puro por hora e o valor obtido foi o de 237 kg/h. Como o processo irá utilizar glicerol bruto e a composição mássica de glicerol nesse material é, tipicamente, de 60,05%, a vazão mássica de matéria-prima do processo é de 395 kg/h.

Água para diluição, hipoclorito de sódio (NaOCl) e peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) são os principais insumos utilizados nesse processo. As quantidades desses materiais foram calculadas através dos dados disponíveis no artigo e os seguintes valores foram obtidos: 763 kg/h de água, 39 kg/h de NaOCl e 0,3 kg/h de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. A Tabela 10 apresenta estes valores. Além dos insumos e da matéria-prima, a quantidade de PHB produzida é fundamental para a posterior análise econômica. Segundo o artigo, a produção horária de PHB é de 48 kg.

Tabela 10 - Quantidades necessárias de matéria-prima e insumos do processo de produção do PHB a partir do glicerol

<b>Material</b>	<b>Vazão mássica (kg/h)</b>
Glicerol bruto	395
Água para diluição	763
NaOCl	39
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	0,3
PHB	48

Fonte: Posada, 2011

# Capítulo 3

---

## 3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Com os dados dos dois processos explicitados no capítulo anterior é possível partir para a avaliação econômica, objetivo central deste trabalho. Para tornar a análise uniforme, foram adotadas as seguintes premissas gerais na elaboração dos fluxos de caixa:

- Horizonte de avaliação do investimento: 10 anos de operação, com recuperação do capital de giro no último período, sem valor residual do Investimento Fixo;
- Investimento e construção ocorrem em apenas um ano (ano zero) para fim de simplificação;
- Depreciação linear, em 10 anos, do investimento fixo, para fins de imposto de renda;
- Imposto de renda considerado no sistema de lucro real, com alíquota de 25% do lucro tributável (Receita Federal);
- A partir da partida da planta, haverá utilização total da capacidade instalada e venda total da produção em todos os anos (o cenário desenhado é extremamente otimista; entretanto, serve para ilustrar o processo em um cenário positivo);
- Taxa de desconto utilizada na avaliação do valor presente: 10% a.a.

Para fechar a avaliação, outras premissas mais específicas precisam ser consideradas, como, por exemplo, o total de horas que os processos operam durante o período de um ano, e alguns dados atualizados, como os preços dos equipamentos dos processos. Neste capítulo, além dessas, outras considerações serão tomadas para cada processo individualmente e a partir delas resultarão dois fluxos de caixa relativos aos processos estudados.

### 3.1 PRODUÇÃO DE PHB A PARTIR DE GLICOSE



### 3.1.1 PREMISSAS

Para iniciar o fluxo de caixa desse processo de produção foi necessário levantar a quantidade de bateladas que ocorrem em um ano de operação. Sabendo que uma batelada tem duração de 46 horas (VAN WEGEN, 1998), assumiu-se que um ano corresponde a 8000 horas de operação. Fazendo a razão entre o número de horas trabalhadas em um ano e a duração de uma batelada foi possível inferir que ocorrem aproximadamente 174 bateladas por ano.

Os preços dos equipamentos foram atualizados para o ano de 2010 através dos índices *PEP Cost Index*, publicados pelo *Stanford Research Institute – SRI*. Além disso, foi considerado um fator de nacionalização de 1,2 – 20% a mais do valor original – para que o preço fosse correspondente à instalação da planta no Brasil. A partir dos valores dos equipamentos em dólar atualizados para o ano de 2010 no Brasil, foi assumida a cotação em dois reais por dólar e os preços foram convertidos para a moeda brasileira corrente.

O investimento fixo total, o custo de partida (*start-up*) e o capital de giro foram calculados com base nos custos de equipamentos. O cálculo do primeiro levou em consideração um fator de 422% baseado no custo dos equipamentos comprados. O capital de giro foi considerado como sendo 86% do custo base dos equipamentos e o custo de *start-up* como sendo metade do capital de giro, ou seja, 43% dos equipamentos. Essas duas estimativas foram baseadas nos fatores de Lang (PETERS e TIMMERHAUS, 1991).

Foram atualizados os preços dos insumos e das matérias-primas mais importantes, ou seja, daqueles itens que possuem grande representatividade em valor. Os principais preços atualizados foram o da glicose que teve como base a cotação no mercado global e o da caseína. Outro custo relevante para a operação de uma planta industrial, e que traduz os custos locais de funcionamento, é o custo de utilidades. Os preços do vapor, da eletricidade e do tratamento de água foram atualizados com base em referências nacionais, para que se tivessem uma representação do cenário brasileiro. Todos esses valores podem ser visualizados na Tabela 11.

Tabela 11 - Preço da matéria-prima, os insumos e das utilidades utilizados na produção do PHB via glicose

<b>Material</b>	<b>Preço base<sup>a</sup></b>	<b>Preço<sup>b</sup></b>	<b>Referência</b>
Glicose	US\$ 0,188/lb	R\$0,828/kg	ICE, 2013
Extrato de levedura	US\$ 0,539/kg	R\$1,07/kg	Van Wegen, 1998
Xarope de milho	US\$ 0,233/kg	R\$0,462/kg	Van Wegen, 1998
Caseína	US\$ 4,162/lb	R\$18,3/kg	Brian Gould, Agricultural and Applied Economics, UW Madison
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	US\$ 0,120/kg	R\$0,238/kg	Van Wegen, 1998
NaCl	US\$ 0,133/kg	R\$0,264/kg	Van Wegen, 1998
NaOCl	US\$ 0,280/kg	R\$0,555/kg	Van Wegen, 1998
Eletricidade	R\$ 154,53/MWh <sup>c</sup>	R\$202/MWh <sup>d</sup>	AES Eletropaulo, 2013
Vapor	US\$ 8,18/ton	R\$16,2/ton	Posada, 2011
Tratamento de água	R\$ 4,89/m <sup>3</sup>	R\$4,89/m <sup>3</sup>	Hespanhol, 2004

a Preço referenciado na literatura com base na unidade original;

b Preço em real nas unidades convencionais de trabalho;

c Preço da eletricidade por MWh sem impostos; d Preço da eletricidade por MWh com impostos.

### 3.1.2 FLUXO DE CAIXA

Para montar o fluxo de caixa do processo foram estimados o investimento fixo, a receita e os custos fixos e variáveis, além da depreciação dos ativos. O investimento total, o capital de giro e o custo de partida estão resumidos na Tabela 12. Nesta tabela, também, estão os dados de manutenção e mão de obra.

Tabela 12 - Resumo dos investimentos do processo de produção de PHB por glicose

<b>Nome</b>	<b>Valor</b>
Investimento fixo	R\$ 76.464.603
Custo de partida	R\$ 7.791.416
Capital de giro	R\$ 15.582.833

Com base nas premissas determinadas no item 3.1.1 e nos dados do processo apresentados no item 2.3.1, foi possível calcular os valores de entrada e de saída do fluxo de caixa, a Tabela 13 resume esses valores anuais.

Tabela 13 - Receita e custos variáveis anuais da produção de PHB a partir da glicose

<b>Entradas</b>		
<b>Item</b>	<b>Quantidade/ano</b>	<b>Valor/ano</b>
Receita com a venda de PHB	4300000 kg	R\$ 51.864.467
<b>Saídas</b>		
<b>Item</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor/ano</b>
<b>Custos de materiais</b>		
Glicose	16.753.623 kg	R\$ 13.870.422
Extrato de levedura	261.357 kg	R\$ 279.460
Xarope de milho	1.507.826 kg	R\$ 696.955
Caseína	319.994 kg	R\$ 5.871.095
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	168.487 kg	R\$ 40.109
NaCl	782.261 kg	R\$ 206.395
NaOCl	118.616 kg	R\$ 65.886
<b>Custos de utilidades</b>		
Eletricidade	36.057 MWh	R\$ 7.288.356
Vapor	56.487 ton	R\$ 916.641
<b>Custos fixos</b>		
Mão de obra <sup>a</sup>	-	R\$4.489.493
Manutenção <sup>b</sup>	-	R\$1.924.881
<b>Outros custos</b>		
Tratamento de água	217.848 m <sup>3</sup>	R\$ 1.065.276

<sup>a</sup>Van Wegen, 1998, atualizada através do Índice de Construção Civil – Rio de Janeiro e da cotação média do dólar;

<sup>b</sup> Van Wegen, 1998, atualizada através da cotação média do dólar.

O resultado do fluxo de caixa do processo de produção de PHB via glicose pode ser visualizado nas Figura 7 e 8.

Ano -->	0	1	2	3	4	5
<b><u>Entradas</u></b>						
Vendas de PHB	R\$ -	R\$ 51.864.467,20	R\$ 51.864.467,20	R\$ 51.864.467,20	R\$ 51.864.467,20	R\$ 51.864.467,20
Recuperação Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
<b><u>Saídas</u></b>						
Glicose	R\$ -	R\$ (13.870.422,93)	R\$ (13.870.422,93)	R\$ (13.870.422,93)	R\$ (13.870.422,93)	R\$ (13.870.422,93)
Extrato de levedura	R\$ -	R\$ (279.460,22)	R\$ (279.460,22)	R\$ (279.460,22)	R\$ (279.460,22)	R\$ (279.460,22)
Xarope de milho	R\$ -	R\$ (696.955,52)	R\$ (696.955,52)	R\$ (696.955,52)	R\$ (696.955,52)	R\$ (696.955,52)
Caseína	R\$ -	R\$ (5.871.095,22)	R\$ (5.871.095,22)	R\$ (5.871.095,22)	R\$ (5.871.095,22)	R\$ (5.871.095,22)
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	R\$ -	R\$ (40.109,33)	R\$ (40.109,33)	R\$ (40.109,33)	R\$ (40.109,33)	R\$ (40.109,33)
NaCl	R\$ -	R\$ (206.395,93)	R\$ (206.395,93)	R\$ (206.395,93)	R\$ (206.395,93)	R\$ (206.395,93)
NaOCl	R\$ -	R\$ (65.886,94)	R\$ (65.886,94)	R\$ (65.886,94)	R\$ (65.886,94)	R\$ (65.886,94)
Eletricidade	R\$ -	R\$ (7.288.356,68)	R\$ (7.288.356,68)	R\$ (7.288.356,68)	R\$ (7.288.356,68)	R\$ (7.288.356,68)
Vapor	R\$ -	R\$ (916.641,18)	R\$ (916.641,18)	R\$ (916.641,18)	R\$ (916.641,18)	R\$ (916.641,18)
Tratamento de água	R\$ -	R\$ (1.065.276,72)	R\$ (1.065.276,72)	R\$ (1.065.276,72)	R\$ (1.065.276,72)	R\$ (1.065.276,72)
Manutenção	R\$ -	R\$ (1.977.264,12)	R\$ (1.977.264,12)	R\$ (1.977.264,12)	R\$ (1.977.264,12)	R\$ (1.977.264,12)
MDO	R\$ -	R\$ (308.722,28)	R\$ (308.722,28)	R\$ (308.722,28)	R\$ (308.722,28)	R\$ (308.722,28)
<b>EBITDA</b>	<b>R\$ -</b>	<b>R\$ 19.277.880,14</b>	<b>R\$ 19.277.880,14</b>	<b>R\$ 19.277.880,14</b>	<b>R\$ 19.277.880,14</b>	<b>R\$ 19.277.880,14</b>
Investimento Fixo	R\$ (76.464.603,47)	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Custos de Startup	R\$ -	R\$ (7.791.416,94)	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Capital de Giro	R\$ -	R\$ (15.582.833,88)	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
<b><u>Tratamento fiscal</u></b>						
Depreciação	R\$ -	R\$ (7.646.460,35)	R\$ (7.646.460,35)	R\$ (7.646.460,35)	R\$ (7.646.460,35)	R\$ (7.646.460,35)
Lucro base para o IR	R\$ -	R\$ 11.631.419,79	R\$ 11.631.419,79	R\$ 11.631.419,79	R\$ 11.631.419,79	R\$ 11.631.419,79
IR	R\$ -	R\$ (2.907.854,95)	R\$ (2.907.854,95)	R\$ (2.907.854,95)	R\$ (2.907.854,95)	R\$ (2.907.854,95)
Lucro Líquido	R\$ -	R\$ 8.723.564,84	R\$ 8.723.564,84	R\$ 8.723.564,84	R\$ 8.723.564,84	R\$ 8.723.564,84
<b>Fluxo de Caixa Livre</b>	<b>R\$ (76.464.603,47)</b>	<b>R\$ (7.004.225,64)</b>	<b>R\$ 16.370.025,19</b>	<b>R\$ 16.370.025,19</b>	<b>R\$ 16.370.025,19</b>	<b>R\$ 16.370.025,19</b>

Figura 7 - Fluxo de caixa do processo de obtenção do PHB por meio de glicose (primeiros cinco anos)

Ano -->	6	7	8	9	10	11
<b>Entradas</b>						
Vendas de PHB	R\$ 51.864.467,20	R\$ 51.864.467,20	R\$ 51.864.467,20	R\$ 51.864.467,20	R\$ 51.864.467,20	R\$ -
Recuperação Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 15.582.833,88
<b>Saídas</b>						
Glicose	R\$ (13.870.422,93)	R\$ (13.870.422,93)	R\$ (13.870.422,93)	R\$ (13.870.422,93)	R\$ (13.870.422,93)	R\$ -
Extrato de levedura	R\$ (279.460,22)	R\$ (279.460,22)	R\$ (279.460,22)	R\$ (279.460,22)	R\$ (279.460,22)	R\$ -
Xarope de milho	R\$ (696.955,52)	R\$ (696.955,52)	R\$ (696.955,52)	R\$ (696.955,52)	R\$ (696.955,52)	R\$ -
Caseína	R\$ (5.871.095,22)	R\$ (5.871.095,22)	R\$ (5.871.095,22)	R\$ (5.871.095,22)	R\$ (5.871.095,22)	R\$ -
KH2PO4	R\$ (40.109,33)	R\$ (40.109,33)	R\$ (40.109,33)	R\$ (40.109,33)	R\$ (40.109,33)	R\$ -
NaCl	R\$ (206.395,93)	R\$ (206.395,93)	R\$ (206.395,93)	R\$ (206.395,93)	R\$ (206.395,93)	R\$ -
NaOCl	R\$ (65.886,94)	R\$ (65.886,94)	R\$ (65.886,94)	R\$ (65.886,94)	R\$ (65.886,94)	R\$ -
Eletricidade	R\$ (7.288.356,68)	R\$ (7.288.356,68)	R\$ (7.288.356,68)	R\$ (7.288.356,68)	R\$ (7.288.356,68)	R\$ -
Vapor	R\$ (916.641,18)	R\$ (916.641,18)	R\$ (916.641,18)	R\$ (916.641,18)	R\$ (916.641,18)	R\$ -
Tratamento de água	R\$ (1.065.276,72)	R\$ (1.065.276,72)	R\$ (1.065.276,72)	R\$ (1.065.276,72)	R\$ (1.065.276,72)	R\$ -
Manutenção	R\$ (1.977.264,12)	R\$ (1.977.264,12)	R\$ (1.977.264,12)	R\$ (1.977.264,12)	R\$ (1.977.264,12)	R\$ -
MDO	R\$ (308.722,28)	R\$ (308.722,28)	R\$ (308.722,28)	R\$ (308.722,28)	R\$ (308.722,28)	R\$ -
<b>EBITDA</b>	<b>R\$ 19.277.880,14</b>	<b>R\$ 19.277.880,14</b>	<b>R\$ 19.277.880,14</b>	<b>R\$ 19.277.880,14</b>	<b>R\$ 19.277.880,14</b>	<b>R\$ -</b>
Investimento Fixo	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Custos de Startup	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
Capital de Giro	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -
<b>Tratamento fiscal</b>						
Depreciação	R\$ (7.646.460,35)	R\$ (7.646.460,35)	R\$ (7.646.460,35)	R\$ (7.646.460,35)	R\$ (7.646.460,35)	R\$ -
Lucro base para o IR	R\$ 11.631.419,79	R\$ 11.631.419,79	R\$ 11.631.419,79	R\$ 11.631.419,79	R\$ 11.631.419,79	R\$ -
IR	R\$ (2.907.854,95)	R\$ (2.907.854,95)	R\$ (2.907.854,95)	R\$ (2.907.854,95)	R\$ (2.907.854,95)	R\$ -
Lucro Líquido	R\$ 8.723.564,84	R\$ 8.723.564,84	R\$ 8.723.564,84	R\$ 8.723.564,84	R\$ 8.723.564,84	R\$ -
<b>Fluxo de Caixa Livre</b>	<b>R\$ 16.370.025,19</b>	<b>R\$ 16.370.025,19</b>	<b>R\$ 16.370.025,19</b>	<b>R\$ 16.370.025,19</b>	<b>R\$ 16.370.025,19</b>	<b>R\$ 15.582.833,88</b>

VPL@10,0%	<b>R\$8.334.484,10</b>
TIR	<b>11,91%</b>

Figura 8 - Fluxo de caixa do processo de obtenção do PHB por meio de glicose (últimos cinco anos)

Após a observação do fluxo de caixa exposto acima, é possível notar que o processo de obtenção de PHB através da glicose, levando em consideração todas as premissas adotadas neste trabalho, possui taxa interna de retorno (TIR) igual a 11,91% e valor presente líquido (VPL) igual a R\$ 8.334.484,10. Esse resultado não inviabiliza economicamente o processo. Entretanto, devido ao risco e às incertezas do investimento, valores da TIR superiores seriam considerados mais aceitáveis. A análise de outros cenários, buscando aumento da TIR e melhores resultados, será realizada no próximo capítulo de análise de sensibilidade.

## 3.2 PRODUÇÃO DE PHB A PARTIR DE GLICEROL

### 3.2.1 PREMISSAS

Assim como foi definido nas premissas do processo anterior, estabeleceu-se o número de horas que a planta opera durante um ano. Esse valor foi considerado igual para os dois processos, ou seja, 8000 horas por ano.

A partir dessa informação, foi calculada a produção anual do processo. O valor obtido foi de aproximadamente 390 toneladas por ano. Como o processo de produção de PHB através da glicose possui produção anual de 4300 toneladas, foi adotado um fator de aumento de escala de dez vezes para todos os materiais. Foi considerado, também, que todas as características, como, por exemplo, o rendimento e as transferências de massa e de calor, fossem mantidas. Essa é uma simplificação que pode ser realizada uma vez que trata-se de uma avaliação em fase preliminar. Pressupõe-se que, se o fluxo de caixa nestas condições indicar que o processo em questão não é economicamente viável, muitos estudos para melhorá-lo deverão ser feitos.

Outra simplificação diz respeito ao custo de equipamentos desse processo que foi considerado igual ao do processo de obtenção de PHB a partir de glicose. Tomando essa premissa, assumiu-se, também, que as necessidades energéticas das plantas são iguais, ou seja, o gasto de vapor e eletricidade são os mesmos entre os dois processos.

Os preços dos insumos foram quase todos iguais ao do processo anterior, uma vez que os materiais utilizados são praticamente os mesmos. O grande diferencial entre os processos é a matéria-prima que eles utilizam. De todo o modo, para facilitar o

entendimento, a Tabela 14 resume os preços considerados, assim como suas respectivas referências.

Tabela 14 - Preço da matéria-prima, os insumos e das utilidades utilizados na produção do PHB via glicerol

<b>Material</b>	<b>Preço base<sup>a</sup></b>	<b>Preço<sup>b</sup></b>	<b>Referência</b>
Glicerol bruto	R\$ 0,300/kg	R\$ 0,300/kg	Machado, 2012
Purificação	US\$ 0,149/kg	R\$ 0,296/kg	Posada, 2011
NaOCl (kg)	US\$ 0,280/kg	R\$ 0,555/kg	Van Wegen, 1998
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (kg)	US\$ 0,345/lb	R\$ 1,52/kg	US Peroxide, 2013
Água de diluição (m3)	US\$ 1,252/kg	R\$ 2,48/kg	Posada, 2011
Eletricidade (MWh)	R\$ 154,53/MWh <sup>c</sup>	R\$202/MWh <sup>d</sup>	AES Eletropaulo, 2013
Vapor (ton)	US\$ 8,18/ton	R\$16,2/ton	Posada, 2011

a Preço referenciado na literatura com base na unidade original;

b Preço em real nas unidades convencionais de trabalho;

c Preço da eletricidade por MWh sem impostos; d Preço da eletricidade por MWh com impostos.

### 3.2.2 FLUXO DE CAIXA

Conforme citado anteriormente, para a montagem do fluxo de caixa do processo foi preciso estimar o investimento fixo, a receita, os custos fixos e variáveis, e a depreciação dos ativos. Tais valores serão apresentados nesse item.

Com base nas premissas determinadas no item 3.2.1 e nos dados do processo apresentados no item 2.3.2, foi possível calcular os valores de entrada e de saída do fluxo de caixa, a Tabela 15 resume esses valores anuais. O investimento total, o capital de giro e o custo de partida estão resumidos na Tabela 12 do item 3.1.2.

Tabela 15 - Receita e custos variáveis anuais da produção de PHB a partir do glicerol

<b>Entradas</b>		
<b>Item</b>	<b>Quantidade/ano</b>	<b>Valor/ano</b>
Receita com a venda de PHB	3.858.068 kg	R\$ 46.534.103
<b>Saídas</b>		
<b>Item</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Valor/ano</b>
Custos de materiais		
Glicerol bruto	31.589.475 kg	R\$ 9.476.842
NaOCl	3.109.796 kg	R\$ 1.727.379
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	22.927 kg	R\$ 34.870
Custos de utilidades		
Água	61.071 m <sup>3</sup>	R\$ 151.681
Eleticidade	36.057 MWh	R\$ 7.288.356
Vapor	56.487 ton	R\$ 916.641
Custos fixos		
Mão de obra <sup>a</sup>	-	R\$4.489.493
Manutenção <sup>b</sup>	-	R\$1.924.881
Outros custos		
Purificação	31.589.475 kg	R\$ 9.337.413

a Van Wegen, 1998, atualizada através do Índice de Construção Civil – Rio de Janeiro e da cotação média do dólar;

b Van Wegen, 1998, atualizada através da cotação média do dólar.

Na Figura 9 é possível observar o fluxo de caixa do processo de obtenção de PHB via glicerol. O fluxo de caixa foi dividido em duas imagens para que a visualização das cifras fosse possível e ficasse mais nítida.



	0		1		2		3		4		5	
<b>Entradas</b>												
Vendas de PHB	R\$	-	R\$	46.534.103,46	R\$	46.534.103,46	R\$	46.534.103,46	R\$	46.534.103,46	R\$	46.534.103,46
Recuperação Capital de Giro	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
<b>Saídas</b>												
Glicerol bruto (kg)	R\$	-	R\$	(9.476.842,63)	R\$	(9.476.842,63)	R\$	(9.476.842,63)	R\$	(9.476.842,63)	R\$	(9.476.842,63)
Purificação (kg)	R\$	-	R\$	(9.337.413,00)	R\$	(9.337.413,00)	R\$	(9.337.413,00)	R\$	(9.337.413,00)	R\$	(9.337.413,00)
NaOCl (kg)	R\$	-	R\$	(1.727.379,81)	R\$	(1.727.379,81)	R\$	(1.727.379,81)	R\$	(1.727.379,81)	R\$	(1.727.379,81)
H2O2(kg)	R\$	-	R\$	(34.870,70)	R\$	(34.870,70)	R\$	(34.870,70)	R\$	(34.870,70)	R\$	(34.870,70)
Água (m3)	R\$	-	R\$	(151.681,93)	R\$	(151.681,93)	R\$	(151.681,93)	R\$	(151.681,93)	R\$	(151.681,93)
Eletricidade (MWh)	R\$	-	R\$	(7.288.356,68)	R\$	(7.288.356,68)	R\$	(7.288.356,68)	R\$	(7.288.356,68)	R\$	(7.288.356,68)
Vapor (ton)	R\$	-	R\$	(916.641,18)	R\$	(916.641,18)	R\$	(916.641,18)	R\$	(916.641,18)	R\$	(916.641,18)
Manutenção	R\$	-	R\$	(1.977.264,12)	R\$	(1.977.264,12)	R\$	(1.977.264,12)	R\$	(1.977.264,12)	R\$	(1.977.264,12)
MDO	R\$	-	R\$	(308.722,28)	R\$	(308.722,28)	R\$	(308.722,28)	R\$	(308.722,28)	R\$	(308.722,28)
<b>EBITDA</b>	R\$	-	R\$	15.314.931,12	R\$	15.314.931,12	R\$	15.314.931,12	R\$	15.314.931,12	R\$	15.314.931,12
Investimento Fixo	R\$	(76.464.603,47)	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
Custos de Startup	R\$	-	R\$	(7.791.416,94)	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
Capital de Giro	R\$	-	R\$	(15.582.833,88)	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
<b>Tratamento fiscal</b>												
Depreciação	R\$	-	R\$	(7.646.460,35)	R\$	(7.646.460,35)	R\$	(7.646.460,35)	R\$	(7.646.460,35)	R\$	(7.646.460,35)
Lucro base para o IR	R\$	-	R\$	7.668.470,77	R\$	7.668.470,77	R\$	7.668.470,77	R\$	7.668.470,77	R\$	7.668.470,77
IR	R\$	-	R\$	(1.917.117,69)	R\$	(1.917.117,69)	R\$	(1.917.117,69)	R\$	(1.917.117,69)	R\$	(1.917.117,69)
Lucro Líquido	R\$	-	R\$	5.751.353,08	R\$	5.751.353,08	R\$	5.751.353,08	R\$	5.751.353,08	R\$	5.751.353,08
<b>FCF</b>	R\$	<b>(76.464.603,47)</b>	R\$	<b>(9.976.437,40)</b>	R\$	<b>13.397.813,43</b>	R\$	<b>13.397.813,43</b>	R\$	<b>13.397.813,43</b>	R\$	<b>13.397.813,43</b>

Figura 9 - Fluxo de caixa do processo de obtenção do PHB por meio de glicerol(primeiros cinco anos)

	6		7		8		9		10		11	
<b>Entradas</b>												
Vendas de PHB	R\$	46.534.103,46	R\$	46.534.103,46	R\$	46.534.103,46	R\$	46.534.103,46	R\$	46.534.103,46	R\$	-
Recuperação Capital de Giro	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	15.582.833,88
<b>Saídas</b>												
Glicerol bruto (kg)	R\$	(9.476.842,63)	R\$	(9.476.842,63)	R\$	(9.476.842,63)	R\$	(9.476.842,63)	R\$	(9.476.842,63)	R\$	-
Purificação (kg)	R\$	(9.337.413,00)	R\$	(9.337.413,00)	R\$	(9.337.413,00)	R\$	(9.337.413,00)	R\$	(9.337.413,00)	R\$	-
NaOCl (kg)	R\$	(1.727.379,81)	R\$	(1.727.379,81)	R\$	(1.727.379,81)	R\$	(1.727.379,81)	R\$	(1.727.379,81)	R\$	-
H2O2(kg)	R\$	(34.870,70)	R\$	(34.870,70)	R\$	(34.870,70)	R\$	(34.870,70)	R\$	(34.870,70)	R\$	-
Água (m3)	R\$	(151.681,93)	R\$	(151.681,93)	R\$	(151.681,93)	R\$	(151.681,93)	R\$	(151.681,93)	R\$	-
Eletricidade (MWh)	R\$	(7.288.356,68)	R\$	(7.288.356,68)	R\$	(7.288.356,68)	R\$	(7.288.356,68)	R\$	(7.288.356,68)	R\$	-
Vapor (ton)	R\$	(916.641,18)	R\$	(916.641,18)	R\$	(916.641,18)	R\$	(916.641,18)	R\$	(916.641,18)	R\$	-
Manutenção	R\$	(1.977.264,12)	R\$	(1.977.264,12)	R\$	(1.977.264,12)	R\$	(1.977.264,12)	R\$	(1.977.264,12)	R\$	-
MDO	R\$	(308.722,28)	R\$	(308.722,28)	R\$	(308.722,28)	R\$	(308.722,28)	R\$	(308.722,28)	R\$	-
<b>EBITDA</b>	<b>R\$</b>	<b>15.314.931,12</b>	<b>R\$</b>	<b>15.314.931,12</b>	<b>R\$</b>	<b>15.314.931,12</b>	<b>R\$</b>	<b>15.314.931,12</b>	<b>R\$</b>	<b>15.314.931,12</b>	<b>R\$</b>	<b>-</b>
Investimento Fixo	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
Custos de Startup	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
Capital de Giro	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-	R\$	-
<b>Tratamento fiscal</b>												
Depreciação	R\$	(7.646.460,35)	R\$	(7.646.460,35)	R\$	(7.646.460,35)	R\$	(7.646.460,35)	R\$	(7.646.460,35)	R\$	-
Lucro base para o IR	R\$	7.668.470,77	R\$	7.668.470,77	R\$	7.668.470,77	R\$	7.668.470,77	R\$	7.668.470,77	R\$	-
IR	R\$	(1.917.117,69)	R\$	(1.917.117,69)	R\$	(1.917.117,69)	R\$	(1.917.117,69)	R\$	(1.917.117,69)	R\$	-
Lucro Líquido	R\$	5.751.353,08	R\$	5.751.353,08	R\$	5.751.353,08	R\$	5.751.353,08	R\$	5.751.353,08	R\$	-
<b>FCF</b>	<b>R\$</b>	<b>13.397.813,43</b>	<b>R\$</b>	<b>13.397.813,43</b>	<b>R\$</b>	<b>13.397.813,43</b>	<b>R\$</b>	<b>13.397.813,43</b>	<b>R\$</b>	<b>13.397.813,43</b>	<b>R\$</b>	<b>15.582.833,88</b>

VPL@10,0%	<b>-R\$9.928.470,52</b>
TIR	<b>7,67%</b>

Figura 10 - Fluxo de caixa do processo de obtenção do PHB por meio de glicerol (últimos cinco anos)

Como se pode observar no fluxo de caixa exposto acima, o processo de obtenção de PHB via glicerol, considerando todas as premissas adotadas neste trabalho, possui taxa interna de retorno (TIR) igual a 7,67% e valor presente líquido negativo (VPL) igual a R\$ 9.928.470,52. O VPL negativo significa que o investimento não seja totalmente recuperado, ou seja, haveria perda de quase dez milhões de reais do capital inicialmente imobilizado. Conseqüentemente, esse resultado inviabiliza economicamente o processo.

Pode-se observar que os processos estudados apresentam um elevado investimento e altos custos de produção, não condizentes com a geração de receitas projetada. É válido ressaltar também que, como foi proposta uma taxa mínima de atratividade do investimento (TMA) de 10%, o primeiro processo avaliado apresenta o valor da TIR superior a este, enquanto o segundo processo estudado apresenta o valor da mesma inferior. No entanto, mais importante que o valor adotado para a TMA é a comparação entre as taxas de retorno de cada processo. Neste sentido, pode-se perceber que o processo de produção de PHB a partir da glicose apresentou uma TIR superior à apresentada no processo a partir do glicerol.

Entretanto, ambos os processos explorados apresentaram valores de TIR relativamente pequenos que não são condizentes com projetos com elevada percepção de risco como a produção dos bioplásticos. Dessa maneira, é necessário entender a influência dos diferentes parâmetros considerados na elaboração dos fluxos de caixa no valor da TIR e como estes podem ser alterados com a finalidade de melhorar a avaliação econômica e viabilizar o processo. O próximo capítulo contempla esta análise.

# Capítulo 4

---

## 4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Com o objetivo de avaliar outros possíveis cenários, o presente trabalho apresenta neste capítulo uma análise de sensibilidade envolvendo os parâmetros críticos de cada processo. Neste sentido, avaliaram-se os fatores mais influentes no custo variável total de cada um deles, além daqueles parâmetros considerados importantes para ambos – o preço final de venda do PHB e o valor total do investimento. Os preços dos referidos fatores sofreram variações, tanto positivas quanto negativas, de 10, 20 e 30%.

### 4.1 PRODUÇÃO DE PHB VIA GLICOSE

Na Figura 11, é possível observar a influência de cada um dos parâmetros no custo variável total. Percebe-se que apenas três parâmetros são responsáveis por um total de 89% do custo em questão, sendo estes a glicose, a caseína e a eletricidade. A partir dessa observação fez-se a opção de analisar a sensibilidade da taxa interna de retorno em função dos preços dos parâmetros supracitados.

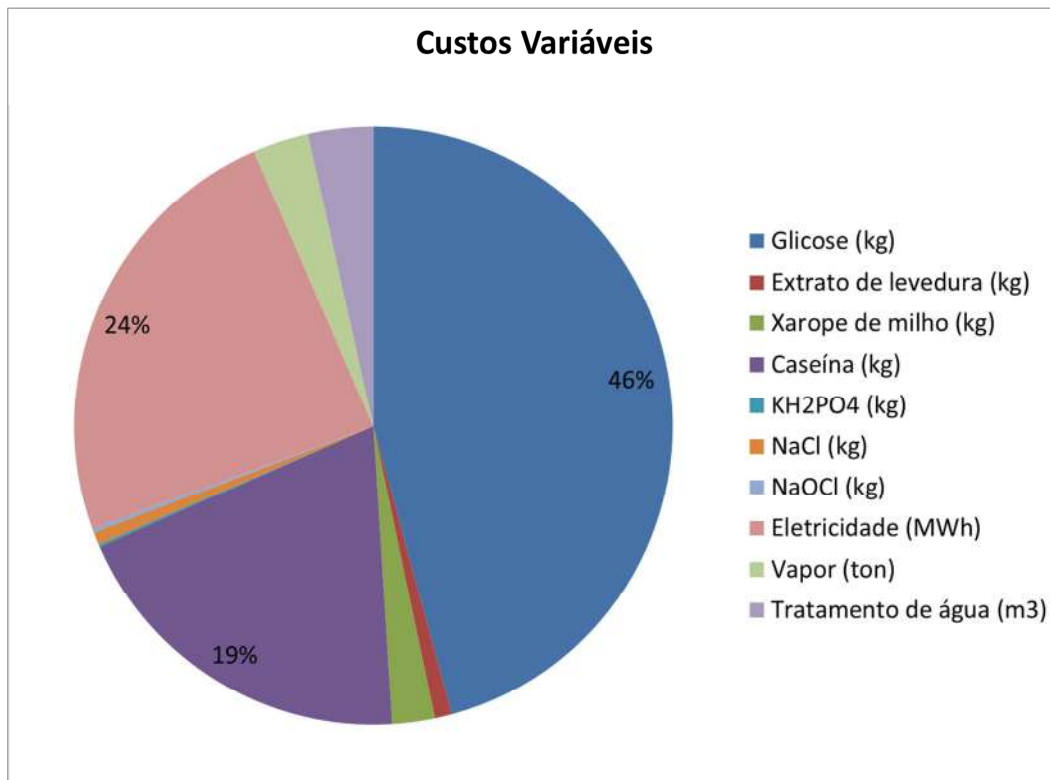


Figura 11 - Custos variáveis do processo de produção de PHB por meio de glicose

### 4.1.1 GLICOSE

Conforme citado na literatura (POSADA, 2011) e ratificado no presente trabalho, a matéria-prima possui a maior influência no custo variável da produção de PHB. Sendo assim, para verificar a relevância deste parâmetro na TIR, realizou-se a análise de sensibilidade cujo resultado encontra-se na Figura 12.

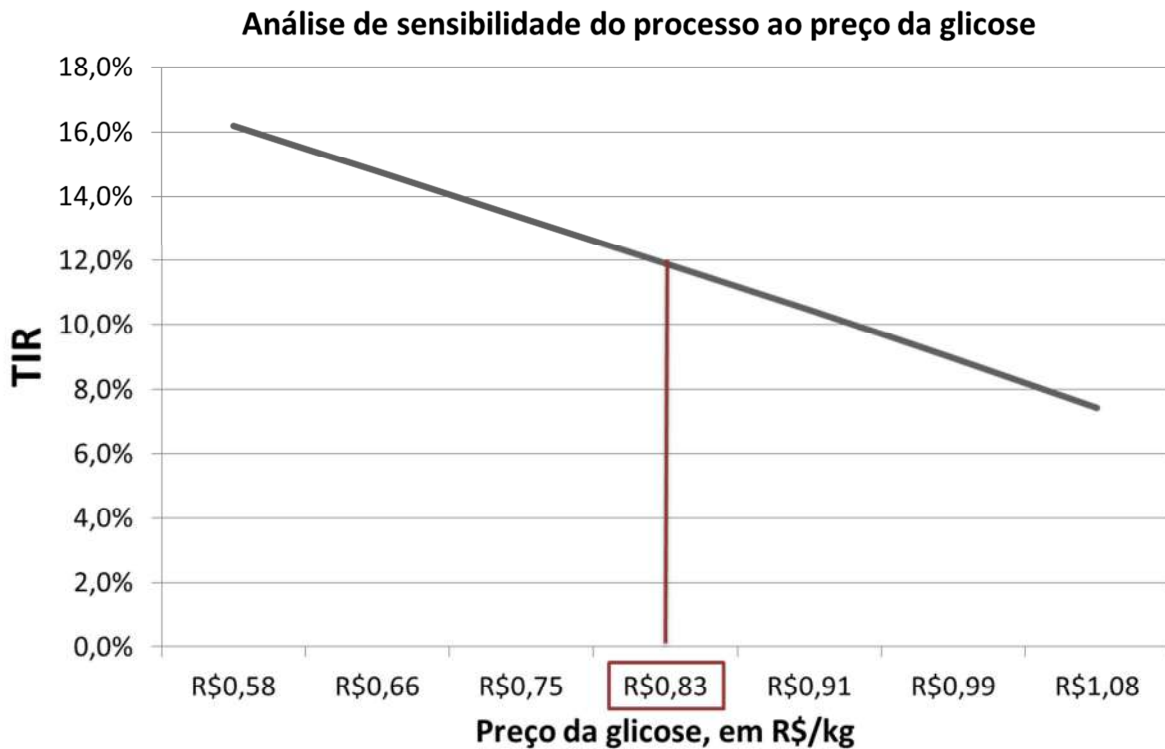


Figura 12 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço da glicose

Como se pode observar na Figura 12, a TIR atinge o valor máximo de aproximadamente 16% quando o preço da glicose sofre redução de 30% em relação ao valor adotado no presente trabalho. Por outro lado, caso o preço da matéria-prima sofra aumento superior a 20%, a TIR atinge valores inferiores a 10%. Levando-se em consideração que uma das premissas adotadas no capítulo de avaliação econômica fixava o valor da taxa de desconto em 10%, tais elevações no preço da glicose resultariam em um valor presente líquido (VPL) negativo, inviabilizando o processo.

De acordo com a série histórica em anexo, Figura 23, é plausível que o preço da glicose atinja valores inferiores a R\$ 0,60 por quilograma, conforme verificado em praticamente todo o ano de 2008. Portanto, o cenário descrito acima é factível, pois desde 2011 o preço do açúcar vem apresentando quedas.

Outro fator que pode contribuir para a diminuição do preço da glicose é a consolidação da produção do açúcar de segunda geração. Diversos estudos têm sido realizados com o objetivo de desenvolver processos que viabilizem tal produção. Caso haja essa consolidação, haverá um aumento na oferta de açúcar o que tenderia a diminuir seu preço.

## 4.1.2 ELETRICIDADE

Um dos principais custos variáveis que podem influenciar a decisão a respeito da viabilidade de uma instalação industrial é o custo de utilidades, dentre elas vapor e eletricidade. Nesse processo, o custo da eletricidade se mostrou mais relevante do que o do vapor, representando cerca de 24% do custo variável total. A análise de sensibilidade para este fator encontra-se na Figura 13.

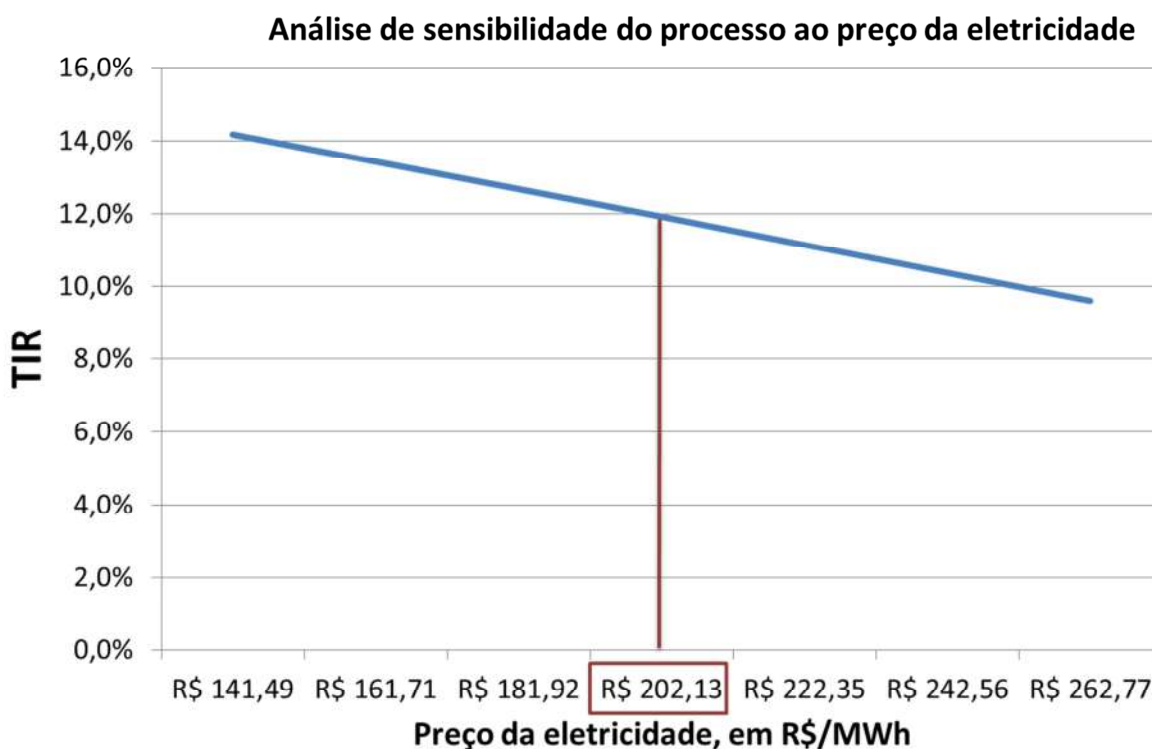


Figura 13 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço da eletricidade

Apesar de ser o segundo custo variável de maior relevância desse processo, a eletricidade torna o processo inviável caso sofra aumentos superiores a 30% em seu preço base. Com os recentes incentivos do governo brasileiro para a diminuição do custo de eletricidade, é possível conceber um cenário em que ocorra uma redução de cerca de 20% do mesmo, o que corresponderia a uma TIR de aproximadamente 13%.

Outra possibilidade para a redução dos custos de eletricidade pode ser obtida através da aplicação do conceito de biorrefinaria. Nesse sentido, a integração de diferentes processos a partir de biomassa em um mesmo local, gerando diferentes

produtos, pode ajudar na integração energética. Sendo assim, a geração de parte ou de toda a eletricidade consumida poderia ser realizada na própria planta.

### 4.1.3 CASEÍNA

Um terceiro fator que também apresentou alta participação no custo variável total de produção do PHB foi o preço da caseína. Apesar de utilizada em quantidade muito menor que a glicose, a caseína apresenta um valor agregado mais elevado, o que torna seu custo um fator relevante no custo total de produção, correspondendo a cerca de 20% do mesmo. Portanto, optou-se por realizar a análise de sensibilidade da TIR em função do preço da caseína. A referida análise encontra-se ilustrada na Figura 14.

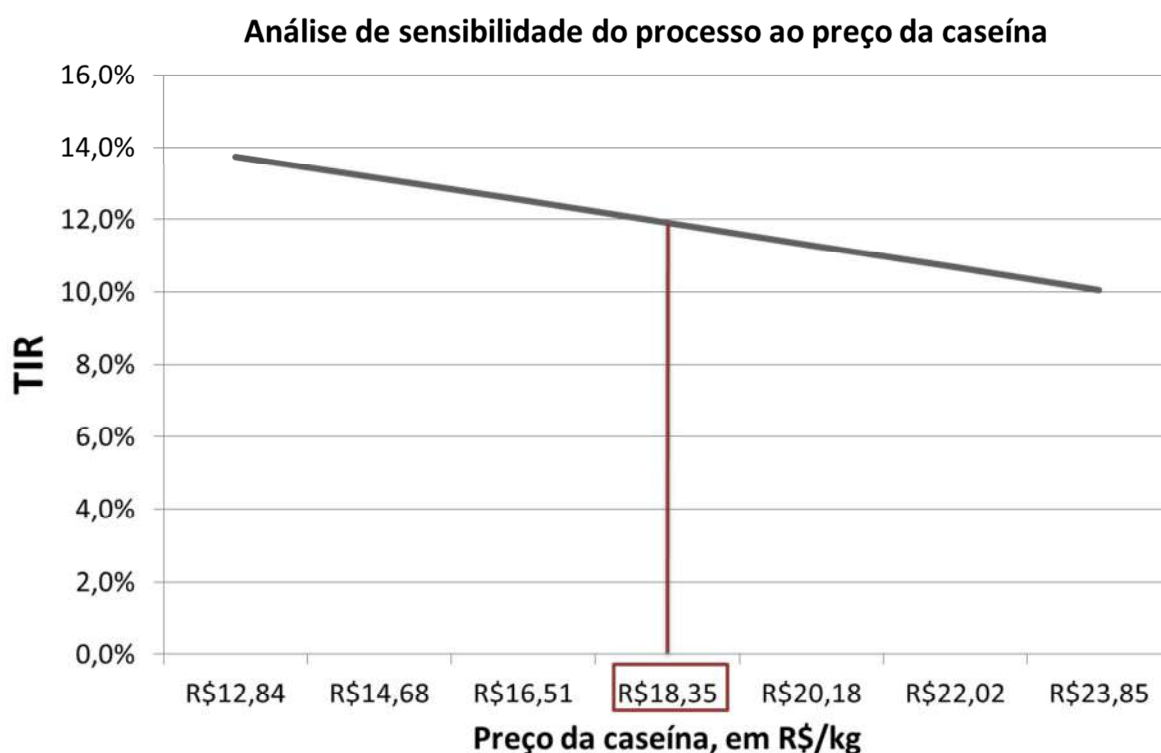


Figura 14 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço da caseína

Como se pode observar, dos três fatores analisados inicialmente, a caseína foi o que apresentou menor variação percentual da TIR. Ainda que ocorra um aumento de 30% no preço da mesma, a TIR é mantida acima de 10%. Por outro lado, uma



diminuição dos mesmos 30% no preço eleva a TIR a aproximadamente 14%. Tal comportamento pode ser considerado similar ao analisado para a eletricidade.

Uma possível solução para reduzir os custos com a elaboração do meio fermentativo poderia ser obtida através da substituição da caseína por outra proteína de menor valor agregado. É válido ressaltar que tal substituição exigiria um estudo mais aprofundado para se verificar a manutenção dos índices de produtividade do microrganismo.

#### 4.1.4 INVESTIMENTO

Conforme comentado no capítulo de revisão bibliográfica do presente trabalho, um dos gargalos para o desenvolvimento dos bioplásticos é o alto custo de investimento necessário para a produção em escala industrial. Tal afirmação foi confirmada após a observação do fluxo de caixa do processo em questão, o que motivou a realização de uma análise de sensibilidade da TIR em função do valor do investimento fixo, conforme exposto na Figura 15.

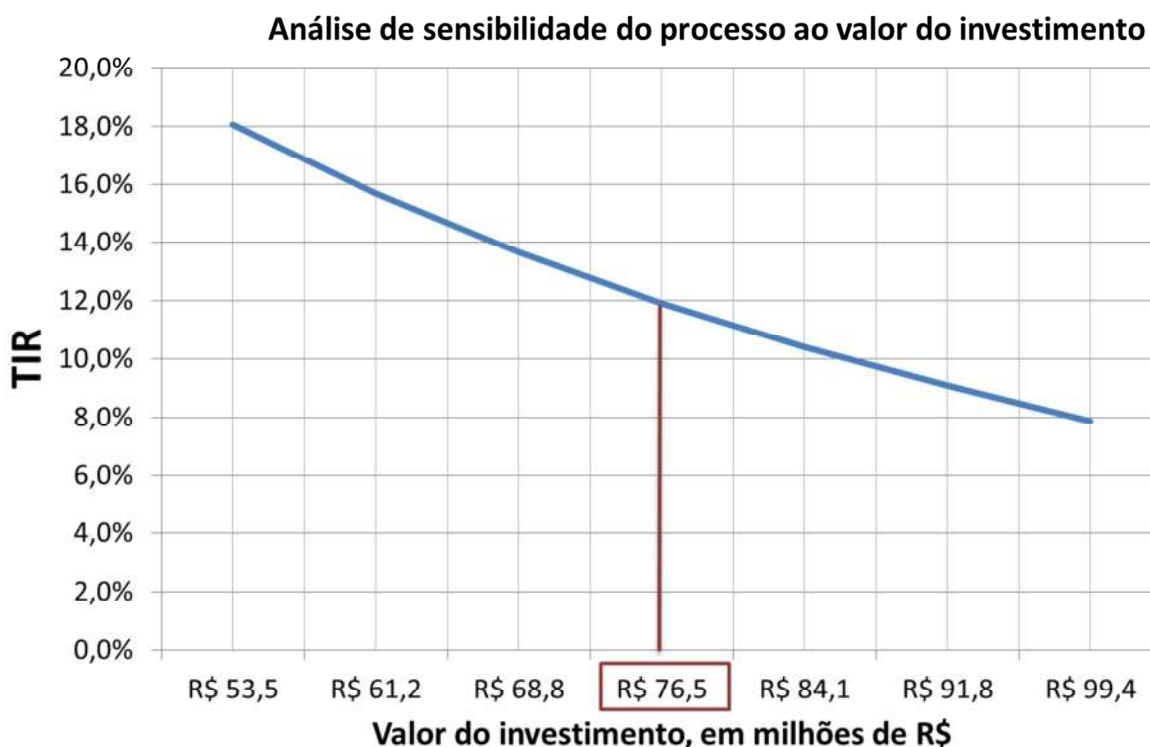


Figura 15 - Análise de sensibilidade da TIR em função do valor do investimento

Através da observação da Figura 15, pode-se perceber que a variação da TIR com o aumento do valor do investimento fixo é não linear, uma vez que uma diminuição de 30% do valor do mesmo gera um aumento percentual absoluto de aproximadamente 7% na TIR, enquanto um aumento de 30% desse valor gera uma diminuição percentual absoluta de 3% nesta. Outra observação que pode ser feita é com relação à necessidade do amadurecimento tecnológico do processo, objetivando reduzir o valor do investimento fixo.

#### 4.1.5 PHB

Característica comum de grande parte dos processos químicos, o preço de venda do produto final influencia diretamente no estudo de viabilidade econômica de determinada instalação industrial. Neste sentido, foi realizada uma variação do preço final de venda do PHB, com o objetivo de verificar a variação da TIR em função do mesmo. Tal análise é fundamental na determinação da competitividade do bioplástico no mercado em que ele será inserido.

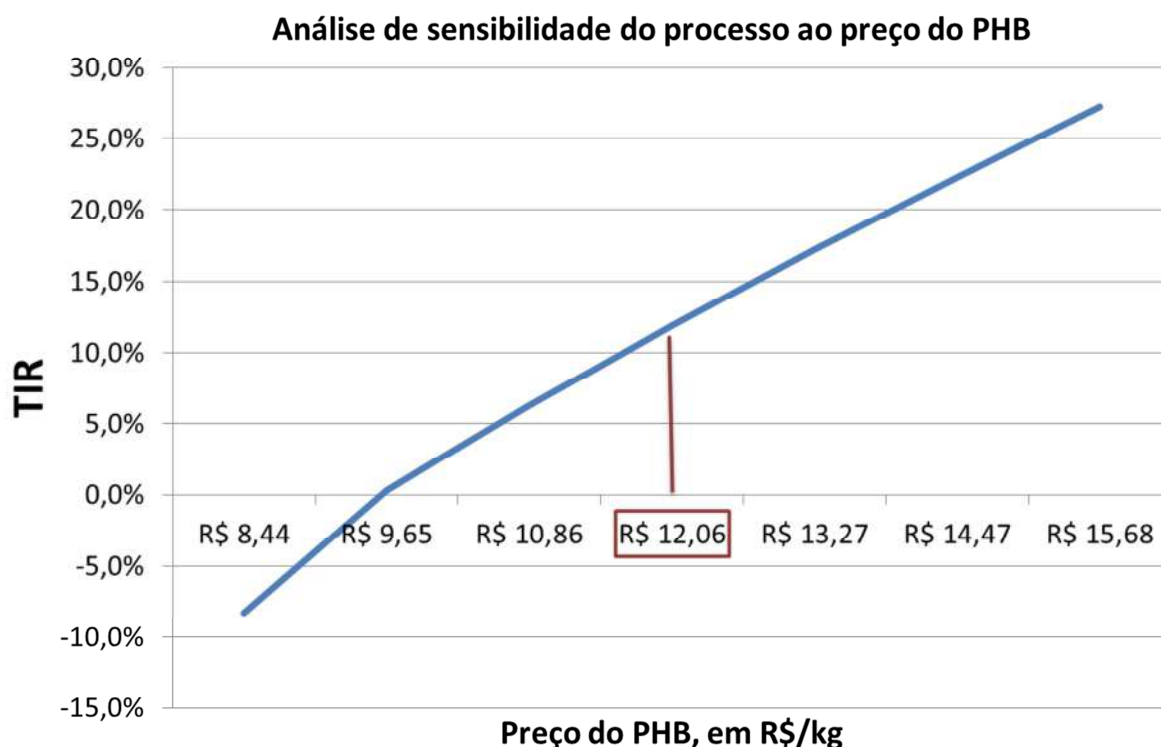


Figura 16 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço de venda do PHB

Conforme podemos observar, a variação da TIR em relação ao preço de venda do PHB foi a maior dentre todas as analisadas para este processo. Até a presente análise, a TIR ainda não havia atingido valores negativos, o que foi observado a partir de reduções superiores a 20% no preço de venda do PHB utilizado como referência. Por outro lado, aumentos superiores a 15% no preço de venda do produto elevaram a TIR a valores acima de 20%, algo que também não ocorrera para nenhum dos outros fatores analisados.

Por fim, é válido ressaltar que, para um aumento de 30% no preço de venda do PHB, a TIR atinge o valor máximo de 27%. Este valor já seria suficiente para tornar o investimento atrativo, mesmo com os altos custos envolvidos. Este cenário, porém, envolveria um preço superior a R\$ 15,00 por quilograma do produto, o que impediria uma competição direta com os plásticos commodities. Uma possível solução para este impasse seria a busca por mercados voltados para aplicações mais específicas do bioplástico, como, por exemplo, a área médica, conforme discutido no item 1.3. Vale ressaltar que a tendência, à medida que novos produtores surjam no mercado, é que o aumento de oferta contribua para a diminuição no preço de venda do PHB.

## 4.2 PRODUÇÃO DE PHB VIA GLICEROL

Na Figura 17 é possível observar os parâmetros que influenciam no custo variável total do processo de produção de PHB através do glicerol. Como foi observado no processo analisado anteriormente e na literatura, o custo da matéria-prima detém a maior participação no custo supracitado. Nesse processo, especificamente, o gasto com a matéria-prima está representado pelo custo do glicerol bruto somado ao da purificação desse material. Como no processo anterior, aqui é possível observar que a eletricidade está entre os três mais relevantes custos variáveis. Neste item, para saber a influência de cada um desses parâmetros será realizada uma análise de sensibilidade da taxa de retorno em função dos mesmos.

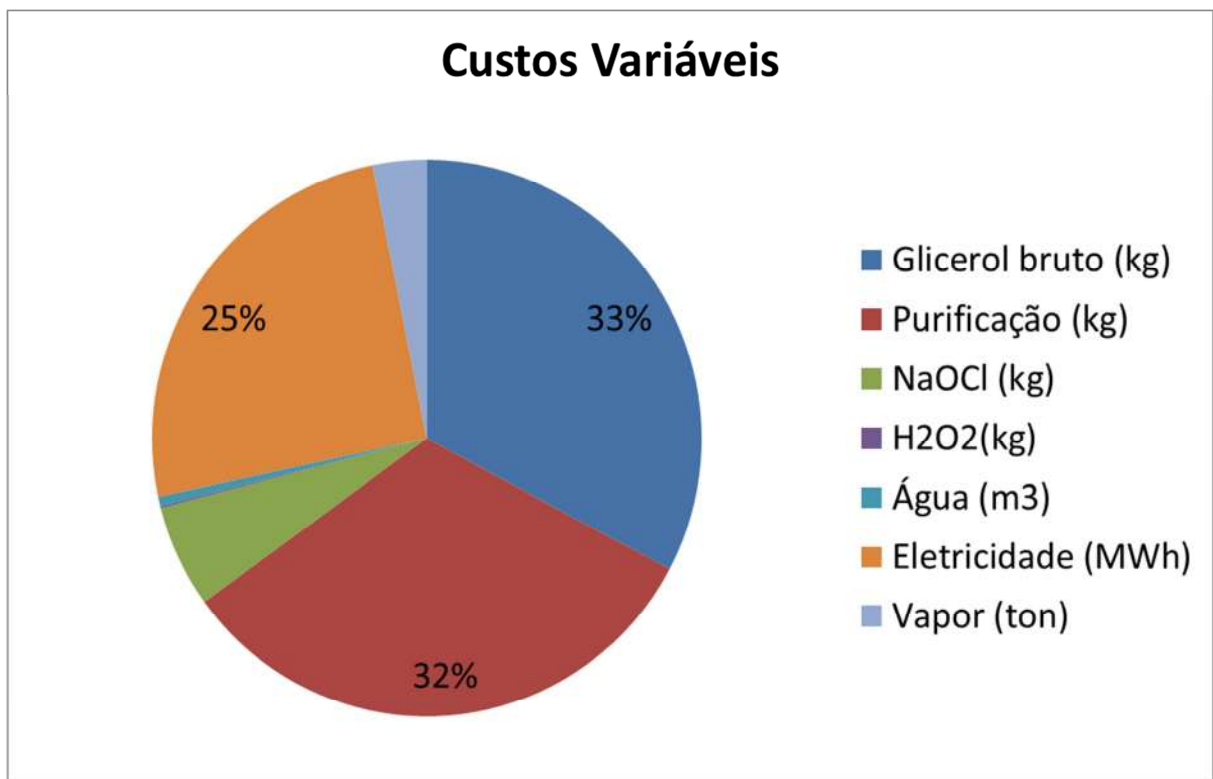


Figura 17 - Custos variáveis do processo de produção de PHB por meio de glicerol

## 4.2.1 GLICEROL

Da mesma maneira que a glicose, confirmando o que já havia sido citado na literatura (POSADA, 2011), o glicerol possui a maior influência no custo variável da produção de PHB. Portanto, com a finalidade de verificar a influência deste parâmetro na TIR, uma análise de sensibilidade foi realizada, e seu resultado pode ser visualizado na Figura 18

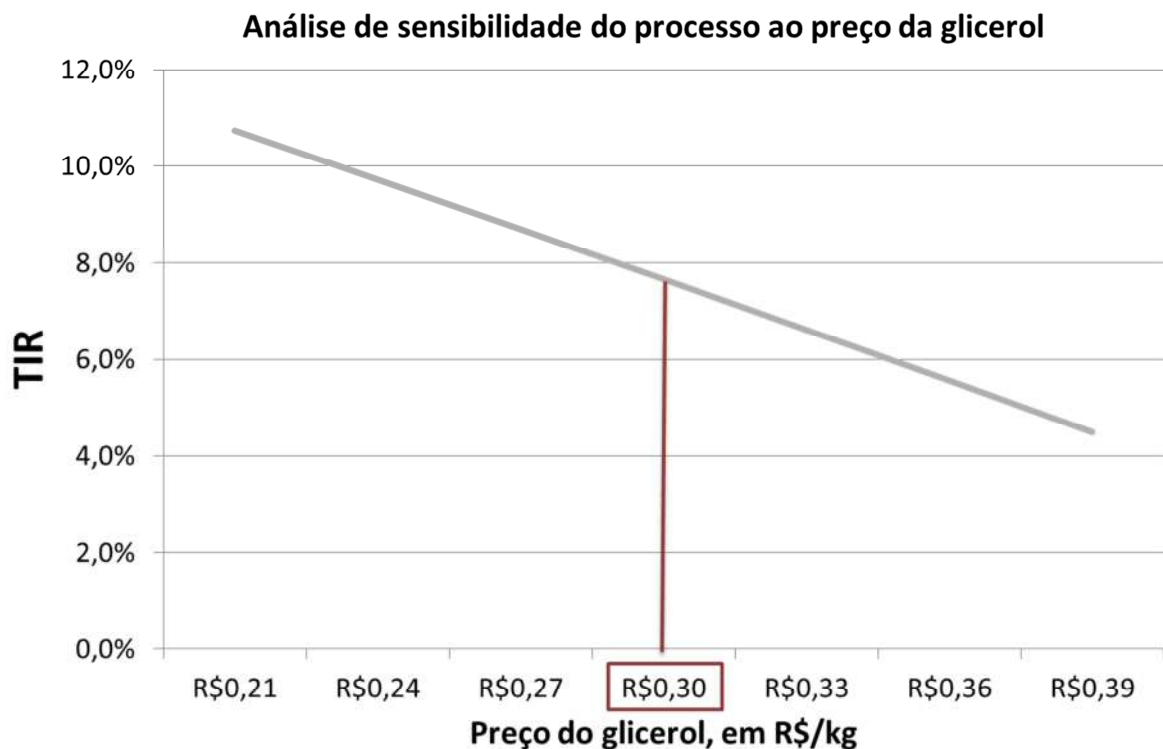


Figura 18 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço do glicerol

Como é possível observar na Figura 18, a TIR atinge seu valor máximo de aproximadamente 11% quando o preço do glicerol sofre redução de 30%, o que corresponde ao preço de R\$ 0,21 por quilograma de glicerol. O aumento do preço da matéria-prima leva a valores de TIR extremamente pequenos, chegando ao mínimo de aproximadamente 4% quando o preço do glicerol sofre aumento de 30%. Lembrando que no capítulo anterior o valor da taxa de desconto do investimento foi fixado em 10%, o processo só se torna viável economicamente quando o preço do glicerol sofre reduções superiores a 20%.

Vale ressaltar que no Brasil a produção de glicerol está intimamente ligada à do biodiesel. Segundo a Embrapa, a porcentagem típica de glicerol produzida em relação à de biodiesel é de 10% em massa. (EMBRAPA, 2013) É natural esperar que o aumento da produtividade do biocombustível aumente a oferta de glicerol no mercado. Consequentemente, o preço do glicerol tende a diminuir. Através da observação da Figura 24, em anexo, é completamente plausível esperar que esse cenário aconteça, uma vez que a produção de biodiesel no Brasil tende a aumentar. Entretanto, é importante ressaltar que a queda necessária do preço do glicerol, para gerar taxas de retorno interessantes, precisaria ser bem elevada, e isso é um fator complicador para a competitividade deste processo.

#### 4.2.2 PURIFICAÇÃO

O custo da purificação está diretamente relacionado com a quantidade de glicerol bruto utilizada no processo de produção de PHB. Dessa maneira, caso não haja grandes discrepâncias entre o preço do glicerol bruto e o preço da sua purificação, os custos desses dois parâmetros devem apresentar a mesma influência no custo variável total. Consequentemente, é possível esperar que a sensibilidade do processo em relação à purificação seja equivalente ao glicerol. A fim de ratificar essa afirmação, a análise de sensibilidade com relação à purificação foi realizada, e seu resultado pode ser visualizado na Figura 19.

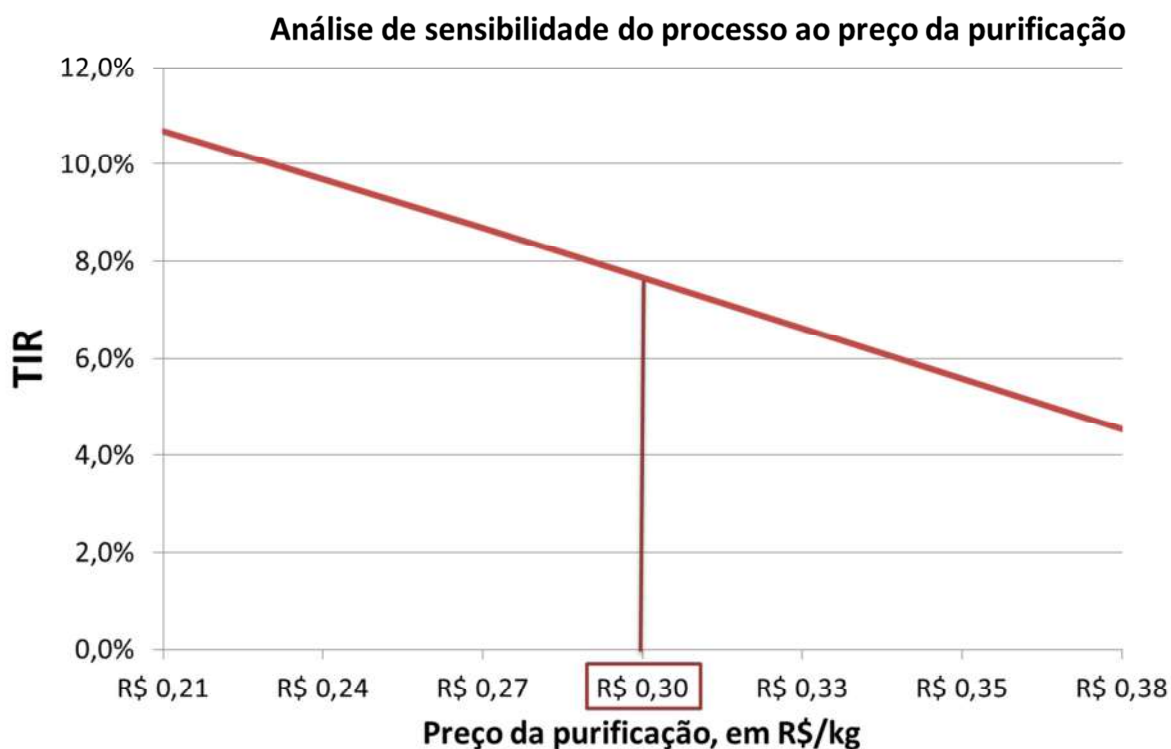


Figura 19 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço da purificação

Após a observação da Figura 19, pode-se inferir que a TIR varia de forma linear em relação à purificação. Essa variação é equivalente àquela observada para o glicerol, confirmando o que foi dito no parágrafo anterior. Sendo assim, o processo torna-se economicamente viável, com a ressalva de que a taxa de desconto seja fixada em 10%, quando ocorrem variações do preço da purificação superiores a 30%. Uma possibilidade de diminuição deste custo de purificação do glicerol poderia ser gerada através do desenvolvimento dos aspectos técnicos desse processo.

### 4.2.3 ELETRICIDADE

Como já foi comentado na análise de sensibilidade da eletricidade do processo anterior, o custo de utilidades, dentre elas vapor e eletricidade, pode influenciar decisivamente na viabilidade econômica de um processo industrial. Para este processo, o custo da eletricidade se mostrou mais relevante do que o do vapor, representando cerca de 25% do custo variável total. A análise de sensibilidade para este fator pode ser vista na Figura 20.

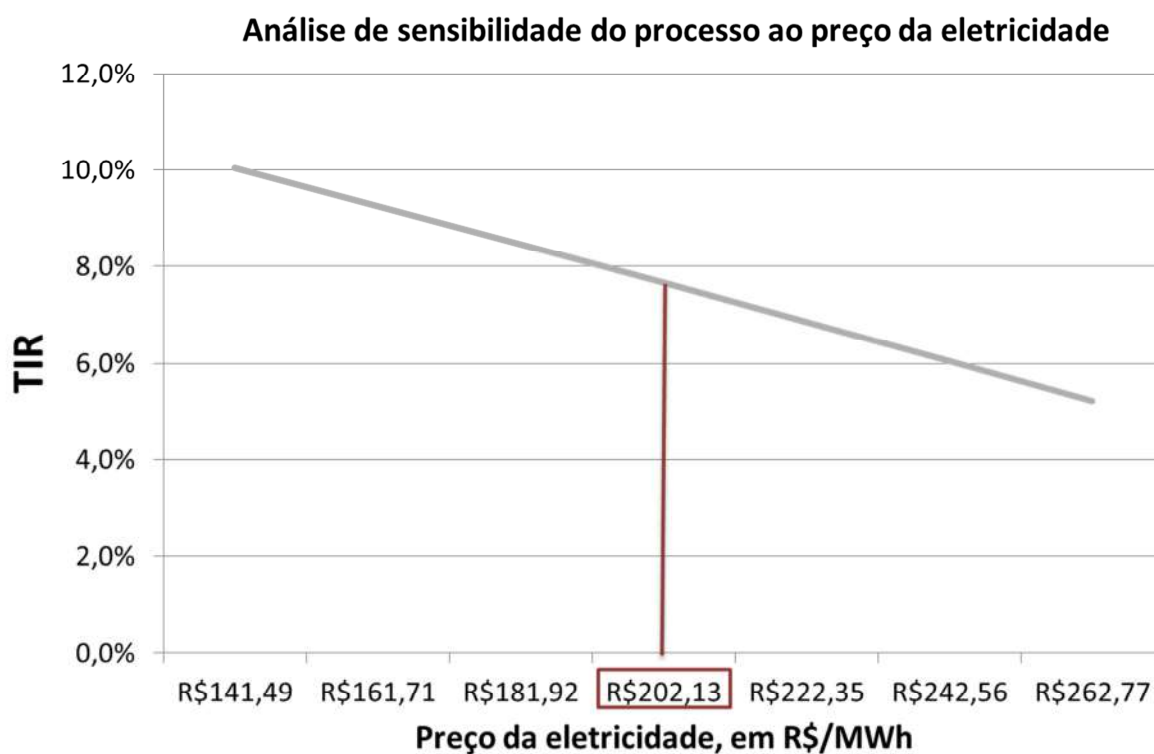


Figura 20 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço da eletricidade

Feita a análise da influência da eletricidade sobre a TIR, mesmo com a diminuição de 30% do preço daquela, esta não atinge um valor substancialmente superior a 10%. Portanto, apesar da prevista redução de 20% do preço da eletricidade planejada pelo governo brasileiro, o processo, ainda assim, não se tornaria economicamente viável.

A mesma discussão apresentada para a análise de sensibilidade da eletricidade no processo anterior pode ser considerada. A aplicação do conceito de biorrefinaria, com a finalidade da integração energética da planta, traria uma redução no custo de eletricidade, já que a mesma poderia ser gerada na própria planta.



#### 4.2.4 INVESTIMENTO

O alto risco embutido nos processos de produção de bioplásticos torna o investimento, um parâmetro crucial para a determinação da viabilidade econômica. Mesmo considerando a premissa, explicitada anteriormente, de que o investimento fixo de ambos os processos estudados é o mesmo, a análise de sensibilidade deste parâmetro se faz necessária, uma vez que o fluxo de caixa dos processos é distinto. O resultado da análise é apresentado na Figura 21

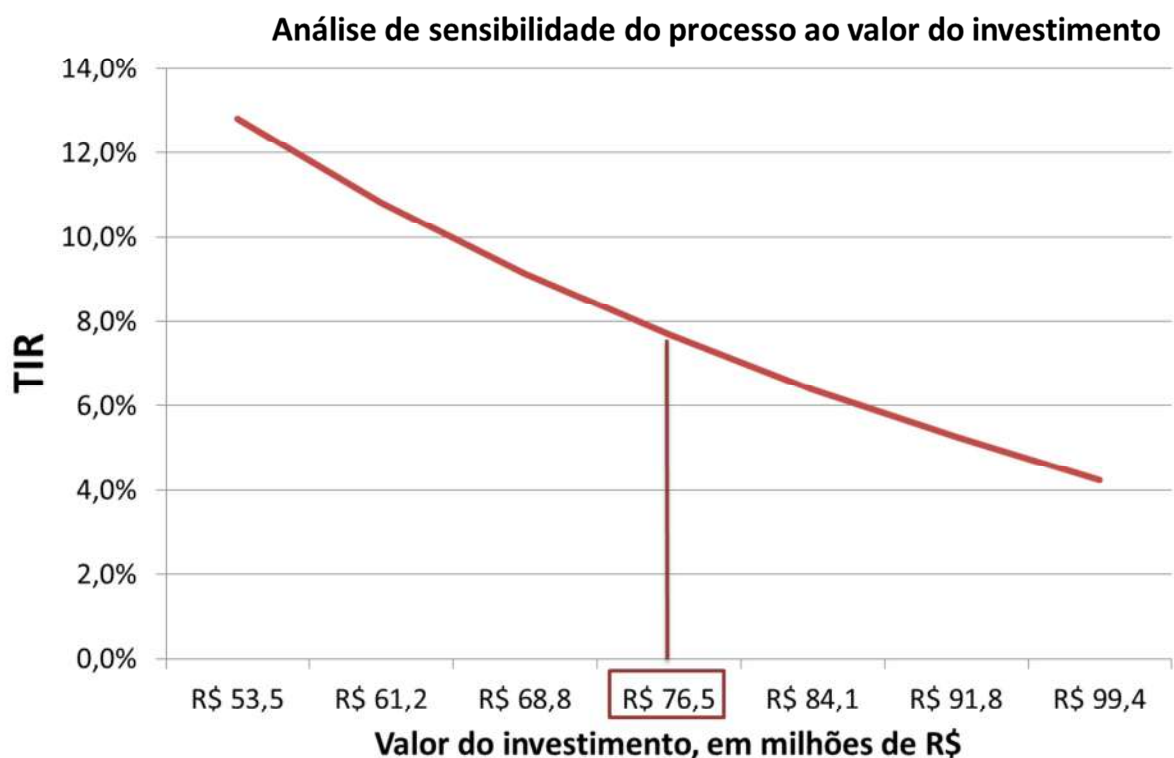


Figura 21 - Análise de sensibilidade da TIR em função do valor do investimento

A variação não linear da TIR com relação ao valor do investimento pode ser constatada através da Figura 21. Uma diminuição de 30% no valor do investimento gera um aumento de aproximadamente 6% da TIR, enquanto um aumento de 30% no parâmetro em questão faz com que a taxa tenha uma redução de apenas 3%.

Diminuições superiores a 20% no valor do investimento tornam o processo economicamente viável, ou seja, tornam o valor presente líquido (VPL) positivo, visto que a taxa interna de retorno se torna maior do que a taxa mínima de atratividade. O

valor máximo atingido pela TIR é de aproximadamente 13% quando o investimento é reduzido em 30% no seu valor original.

#### 4.2.5 PHB

Em processos químicos ou bioquímicos, o preço de venda do produto final apresenta grande relevância na viabilidade econômica. É natural pensar que, com o aumento do preço de venda do produto, a TIR também seja aumentada, enquanto que, com a diminuição de tal preço, a taxa decresça. A relação entre o preço do PHB e a TIR deve chegar a um equilíbrio para que o processo seja economicamente atrativo sem que o produto se torne excessivamente caro. A fim de verificar essa relação, a análise de sensibilidade da TIR em função do preço de venda do PHB foi realizada. Seu resultado encontra-se exposto na Figura 22.

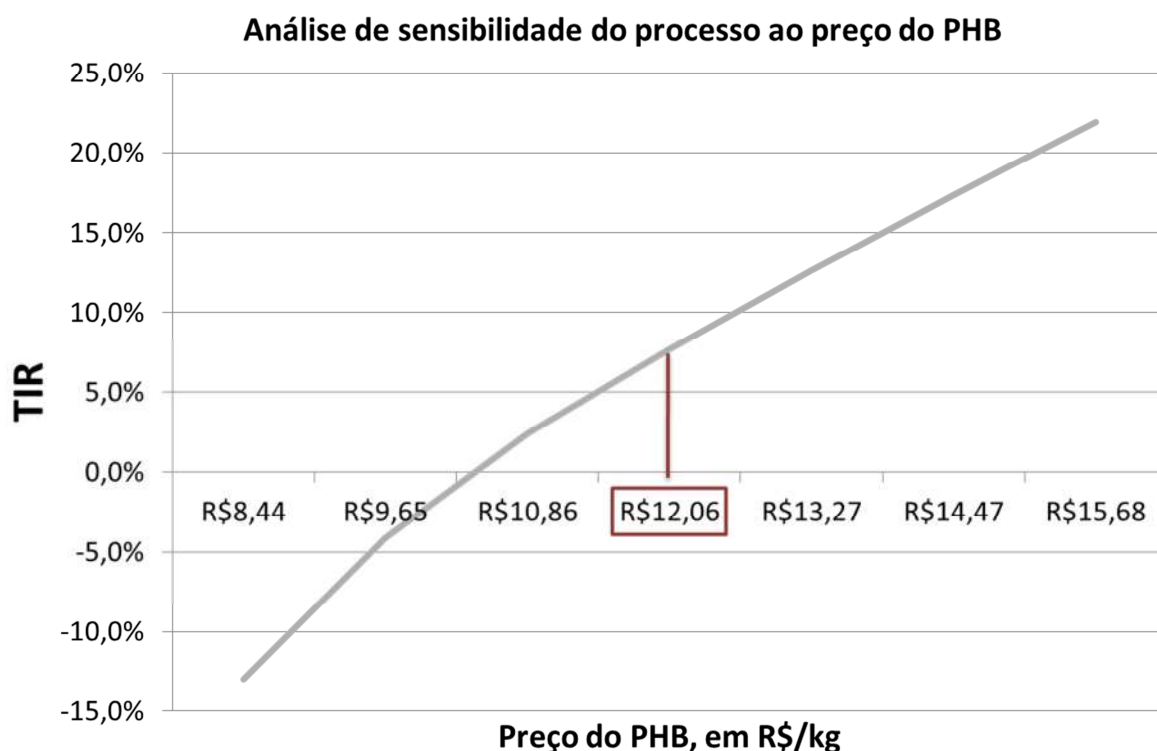


Figura 22 - Análise de sensibilidade da TIR em função do preço do PHB

A partir da observação da figura acima, é possível inferir que o preço do PHB foi o parâmetro ao qual a TIR foi mais sensível, já que foi este o parâmetro que gerou a

maior variação da taxa dentre todos analisados até aqui para este processo. A TIR atinge seu valor máximo de aproximadamente 22% quando o preço do PHB sofre aumento de 30%. Por outro lado, a TIR torna-se negativa, atingindo o valor de -13%, quando o preço do produto é reduzido em 30%.

Variações superiores a 5% no preço do PHB levam a TIR a valores maiores do que 10%. Essas variações já viabilizam o projeto economicamente, ou seja, tornam o valor presente líquido (VPL) positivo. Considerando o cenário de maior taxa interna de retorno, o PHB seria vendido por um preço superior a R\$ 15,00 por quilograma. Esse valor é extremamente alto para que o produto tenha competitividade frente ao mercado de plásticos commodities. A mesma busca por nichos de mercado de aplicação mais específica proposta na discussão da análise de sensibilidade do PHB no processo via glicose pode ser considerada uma alternativa.

### 4.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCESSOS

Após o estudo em separado de cada um dos processos, tanto com relação aos aspectos econômicos adotados quanto com relação aos cenários avaliados na análise de sensibilidade, é natural que se deseje comparar ambos a fim de verificar qual deles apresenta maior possibilidade de inserção do PHB no mercado de plásticos.

Retomando a análise dos fluxos de caixa dos processos estudados, pode-se verificar que o processo de produção de PHB através de glicose apresentou valor presente líquido (VPL) acima de oito milhões de reais, valor este superior ao apresentado pelo processo via glicerol, que inclusive apresentou a cifra negativa de quase dez milhões de reais.

Ainda com relação às análises econômicas, o processo via glicose apresentou uma taxa interna de retorno (TIR) superior a 11%, enquanto o outro processo apresentou uma TIR inferior a 8%. Vale ressaltar que a taxa mínima de atratividade (TMA) foi fixada em 10%. Dessa maneira, o primeiro processo analisado apresentou a TIR superior a TMA o que gerou o VPL positivo. Por outro lado, o segundo processo analisado apresentou a TIR inferior a TMA deixando o VPL negativo.

Redirecionando o foco para as análises de sensibilidade, pode-se perceber que parâmetros semelhantes afetam ambos os processos, podendo ser citados a matéria-prima, a eletricidade, o investimento e o produto final. Dentre as premissas assumidas, a

eletricidade e o investimento foram considerados iguais para ambos. Como os processos apresentam praticamente o mesmo valor para o custo variável total, os parâmetros que foram assumidos iguais apresentaram comportamento semelhante nas respectivas análises de sensibilidade.

O parâmetro que evidenciou a maior distinção entre os processos foi a matéria-prima. No caso da glicose, um fator que influencia diretamente seu preço é a evolução do preço do açúcar no mercado. Pela análise da série histórica dos últimos cinco anos, percebe-se que este preço oscilou entre os valores de R\$ 0,50 e R\$ 1,50 por quilograma. Além disso, nos últimos dois anos apresentou uma tendência de queda tendo atingido o valor de R\$ 0,83 por quilograma em fevereiro deste ano. Sendo assim, caso esta tendência se mantenha, valores menores do que R\$ 0,83 podem ser alcançados e o processo torna-se economicamente mais atrativo. Outro fator que pode contribuir para a queda do preço da glicose é o desenvolvimento da produção de açúcar de segunda geração, uma das apostas que tem atraído grande atenção tanto no meio acadêmico quanto no mercado. É válido ressaltar que, devido às grandes oscilações apresentadas pelo preço do açúcar, se faz necessária a busca por um aumento de produtividade do processo a fim de diminuir a quantidade de glicose utilizada, evitando assim que tais variações afetassem a viabilidade econômica da produção do bioplástico.

Com relação ao glicerol, uma das formas de produção para qual se tem dado maior relevância é aquela que envolve a produção de biodiesel. Nesse processo ocorre a formação de uma quantidade considerável de glicerol como subproduto. Sendo assim, caso seja observado um aumento na produção de biodiesel, será gerado, em consequência, uma maior quantidade de glicerol. Tal aumento tende a influenciar diretamente na redução do preço do mesmo. Considerando que o Brasil é um dos maiores produtores de biodiesel mundial e que a evolução da produção do biocombustível tem aumentado nos últimos anos, pode-se esperar que essa redução efetivamente ocorra, o que poderia tornar o processo economicamente atrativo. Sempre destacando que, apesar do cenário de redução, a queda dos preços do glicerol teria quer ser muito relevante para gerar retornos positivos no processo. Além disso, uma queda muito acentuada no preço do mesmo faria com que o glicerol fosse utilizado com outros fins, inclusive de exportação, por exemplo.

Por fim, é possível considerar que os processos estudados são altamente influenciados pelo preço da matéria-prima. Como se considerou um mesmo investimento fixo inicial para ambos os processos e fixou-se a taxa mínima de

atratividade, a escolha da matéria prima seria um parâmetro fundamental para definir o sucesso da construção de uma planta, uma vez que um dos processos poderia ser economicamente viável e o outro não. Além disso, outro custo variável que participa fortemente da composição do custo final da produção de PHB é o custo de eletricidade. Tais fatores associados ao custo de investimento e ao preço de venda final do PHB compõem os parâmetros primordiais ao se estudar a viabilidade econômica dos processos.

# CONCLUSÃO

---

O mercado de bioplásticos ainda é, apesar das recentes evoluções, um mercado jovem, com muitos desafios pela frente. Conforme apresentado na introdução do trabalho, há grandes perspectivas de mercado para todos os tipos de biopolímeros. Recentemente, os biopolímeros *drop-in* têm tido maior penetração de mercado, mas isso já foi diferente há cinco anos, quando os novos bioplásticos eram os mais promissores. De qualquer forma, para ambos, o desafio ainda é muito grande, e a produção dos plásticos convencionais é feita em uma escala inimaginável ainda para os novos biopolímeros.

Para o PHB, que é um polímero novo, ainda há um longo caminho a percorrer antes de se tornar um plástico utilizado em larga escala. Ainda há dúvidas sobre suas propriedades físicas e químicas, e um amadurecimento natural da tecnologia ainda está em processo. O campo de aplicações, apesar de vasto, ainda é um pouco desconhecido, e há sempre a possibilidade de surgimento de novos concorrentes. Uma tecnologia em desenvolvimento sempre enfrentará esses problemas no início, mas, ainda assim, o PHB pode ser considerado um biopolímero promissor.

Como objetivo deste trabalho, foi colocado o desafio de analisar a competitividade do PHB, posto aqui como um dos materiais promissores da categoria dos novos biopolímeros, e tentar enxergar, através da análise de sensibilidade dos principais fatores influentes no fluxo de caixa dos processos, os principais pontos de desenvolvimento, na tentativa de projetar novos rumos que levariam o processo a caminhos de maior competitividade.

Através, então, das análises mostradas no presente estudo, foi possível verificar, a partir dos dados analisados, que ainda é difícil imaginar o PHB como concorrente direto dos termoplásticos convencionais. Além disso, mesmo quando comparado com alguns exemplares de biopolímeros *drop-in*, como o PET e o PE verde, o produto ainda apresenta preço elevado, dificultando sua ampliação de mercado. Apesar de muitas empresas já apresentarem disposição para pagar preços mais elevados por plásticos verdes, os valores apresentados ainda inviabilizariam qualquer tipo de utilização em grande escala, limitando o escopo da produção a usos muito específicos e de pequena demanda.

Na comparação das duas rotas de produção, foi sensível o melhor desempenho da produção via glicose, e a série histórica dos preços do açúcar mostra que há espaço para uma maior redução dos custos associados a esta matéria prima vital ao processo, mostrando que há vias de melhorar a produção por esta rota.

Já a produção via glicerol, embora tenha mostrado resultados piores, apresenta um grande potencial, pois a questão envolvendo o excesso de glicerol gerado na produção de biodiesel no Brasil pode gerar excelentes oportunidades de sinergias entre produtores de biodiesel e potenciais produtores de PHB, com grande redução dos preços do glicerol, tornando o projeto viável. Conforme já foi mencionado, entretanto, a queda de preços precisaria ser bastante elevada para que houvesse efeito significativo no retorno do processo.

Em ambas as rotas, é claro, existe espaço para maiores integrações energéticas e reduções de investimento, resultando em uma óbvia melhoria de desempenho. Vale destacar, porém, que reduções de preços em equipamentos afetariam da mesma maneira ambos os processos analisados, sendo necessário algum tipo de desenvolvimento tecnológico que efetivamente reduzisse o tamanho e quantidade de equipamentos utilizados, para que, dessa maneira, os custos fossem de fato reduzidos. Como em todo produto novo, ainda há muito espaço para o aprimoramento dos processos de produção do PHB, o que poderá efetivamente significar um aumento de competitividade no longo prazo.

Outro custo que se mostrou relevante durante as análises foi o custo da energia elétrica. Mesmo após os recentes esforços do governo, através da Medida Provisória 579, que acarretou numa redução significativa das tarifas de energia elétrica, as tarifas brasileiras ainda estão muito elevadas, prejudicando a competitividade de projetos industriais. Uma redução ainda maior dos preços de energia não parece viável no curto prazo. Um conceito que poderia significar uma inovação disruptiva, nesse cenário, são as biorrefinarias, que por conta de suas integrações energéticas de alta complexidade, poderiam reduzir significativamente os gastos energéticos da planta de PHB e tornar o produto mais competitivo no mercado.

Após todas as reflexões anteriores, é possível visualizar que, no atual momento, ainda é difícil imaginar a entrada do PHB no mercado de forma intensiva, mas o produto ainda está em fase inicial de desenvolvimento, mostrando um grande potencial e, como visto anteriormente, existem diversas possibilidades de sinergias positivas, capazes de alavancar o produto em um futuro próximo. Ao se observar o PHB, fica mais

claro o estágio atual do desenvolvimento dos novos biopolímeros no mercado mundial. Apesar de ainda serem investimentos altos e de risco elevado, é possível alcançar o ponto da virada, pois melhorias de processo e desenvolvimento de integrações (como, por exemplo, em biorrefinarias) podem representar o começo de uma nova era dos plásticos, a partir de matérias primas renováveis, com propriedades físico-químicas melhoradas e com rentabilidade garantida.



## SUGESTÕES

---

O estudo aqui apresentado representa apenas uma análise inicial acerca da competitividade do PHB, e dos bioplásticos em geral. Uma análise mais detalhada deve se iniciar em um aprofundamento do mercado dos biopolímeros em geral, detalhando os nichos, mercados, produtores e preços praticados, para permitir uma análise mais completa do cenário em que se encontra o PHB.

Outro fator de grande importância que não foi abordado, por não fazer parte do objetivo deste estudo, é uma análise regulatória acerca dos bioplásticos em um cenário internacional, mostrando tendências da legislação pro-biopolímeros em todo o mundo, tentando enxergar possíveis leis que gerem oportunidades disruptivas e rápida viabilização de projetos de bioplásticos.

Na avaliação dos processos, é preciso reforçar a ideia anterior, de que foram abordados aqui apenas dois processos, retirados de artigos específicos, sem uma pesquisa maior sobre se estas seriam as melhores referências, ou até as mais precisas, apenas buscando pintar um cenário da conjuntura atual do PHB. Tanto melhorias destes processos, quanto novos processos e maior detalhamento de todas as etapas do processos seriam necessárias para afirmações mais categóricas acerca da viabilidade ou não das plantas.

Além disso, é preciso ressaltar que não houve, mais uma vez por não ser o foco do projeto, uma busca por novas matérias-primas, como por exemplo utilizar como fonte de glicose para o primeiro processos materiais “rejeitos” como o melaço de cana, que gerariam preços bem reduzidos de insumos e, conseqüentemente, melhores resultados. O porém é que, para avaliar o processo com a profundidade assim descrita, se constituiria em um projeto por si só, portanto, o foco foi mantido somente na avaliação econômica das variáveis anteriormente discutidas.

Na avaliação econômica, primeiramente, recomenda-se um aprofundamento maior no detalhamento dos custos fixos de investimento, em principal na rota sugerida a partir do glicerol, além da exploração de outras rotas novas e diferenciadas que possam vir a oferecer uma vantagem competitiva no longo prazo. É preciso destacar que, como era objetivo deste estudo ser apenas exploratório, e não exaustivo, existem muitos parâmetros que foram estimados de forma simplificada, buscando fornecer apenas uma avaliação preliminar da produção do PHB pelas rotas escolhidas.

Ademais, sugere-se que uma evolução deste estudo envolva uma estrutura de capital diferenciada, com opções de financiamento do investimento sendo amplamente exploradas e discutidas, de forma a tornar o projeto mais rentável. É importante lembrar que esta possibilidade não foi escopo do presente trabalho, que buscava apenas exemplificar a viabilidade da produção de PHB no cenário atual do mercado.

Para completar o aprofundamento do estudo, indica-se que seja também realizada uma pesquisa de mercado, buscando identificar tendências de preços e usos tanto dos termoplásticos fósseis quanto dos possíveis concorrentes verdes, desenhando assim um cenário mais aprofundado do mercado.

# REFERÊNCIAS

---

- ABIPET. Disponível em: <http://www.abipet.org.br>. Acesso em: 19 de ago. 2012.
- AES ELETROPAULO. Disponível em: <http://www.aeseletropaulo.com.br>. Acesso em: 02 de fev. 2013.
- AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS. Disponível em: [http://future.aae.wisc.edu/data/monthly\\_values/by\\_area/801](http://future.aae.wisc.edu/data/monthly_values/by_area/801). Acesso em: 02 de fev. 2013.
- ANDERSON, A. J.; DAWES, E. A. Occurrence, metabolism, metabolic role, and industrial uses of bacterial polyhydroxyalkanoates. *Microbiol. Rev.*, v. 54, p. 450-472, 1990.
- BAPTIST, J. N. *Processing for preparing poly-β-hydroxybutyric acid*. Estados Unidos, US Patent, 3,044,942, 1962.
- BRAUNEGG, G. In: SCOTT, G. *Sustainable Poly(hydroxyalkanoate) (PHA) Production Degradable Polymers: Principles and Application*. Inglaterra: Kluwer Academic Publisher, 2002. Capítulo 8.
- CHANPRATEEP, S. Current trends in biodegradable polyhydroxyalkanoates. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, v. 110, p. 621-632, 2010.
- CHODAK, I. Polyhydroxyalkanoates: Origin, Properties and Applications. In: BELGACEM, M. N.; GANDINI, A. *Monomers, Polymers and Composites from Renewable Resources*. Reino Unido: Elsevier, 2008. p. 451-477.
- CHOWDHURY, A. A. Poly-β-hydroxybuttersaeure abbauende bakterien und exoenzym. *Arch. Mikrobiol.*, Alemanha, v. 47, p. 167-200, 1963.
- CIPET. Disponível em: [http://cipet.gov.in/plastics\\_statics.html](http://cipet.gov.in/plastics_statics.html). Acesso em: 20 de dez. 2012.
- DE SMET, M. J.; EGGINK, G.; WITHOLT, B.; KINGMA, J.; WYNBERG, H. Characterization of intracellular inclusions formed by *Pseudomonas oleovorans* during growth on octane. *J. Bacteriol.*, v.154, p. 870-878, 1983.
- DOUDOROFF M.; STANIER R. Y. Role of poly-beta-hydroxybutyric acid in the assimilation of organic carbon by bacteria. *Nature*, Inglaterra, v.183, p. 1440-1442, 1959.
- EUROPEAN BIOPLASTICS. Disponível em: [http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/fs/Bioplastics\\_eng.pdf](http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2011/04/fs/Bioplastics_eng.pdf). Acesso em: 25 de nov. 2012.

EUROPEAN BIOPLASTICS. Disponível em: [http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2012/newsletter/Issue3\\_12.pdf](http://en.european-bioplastics.org/wp-content/uploads/2012/newsletter/Issue3_12.pdf). Acesso em: 25 de nov. 2012.

FORSYTH W. G. C.; HAYWARD A. C.; ROBERTS J. B. Occurrence of poly- $\beta$ -hydroxybutyric acid in aerobic gram-negative bacteria. *Nature*, Inglaterra, v. 182 , p. 800-801, 1958.

FRANCO, P. F. Disponível em: <http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2011/biodiesel-glicerol-e-microorganismos-1/>. Acesso em: 22 de fev. 2013.

HESPANHOL, I. . Conservação e reuso como instrumentos de gestão para atenuar os custos da cobrança pelo uso da água no setor industrial. In: BICUDO, C. E. M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. (Org.). *Águas do Brasil: Análises Estratégicas*. São Paulo: Instituto de Botânica - Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2010. p. 59-76.

HOLMES, P. A. Applications of PHB – a microbially produced biodegradable thermoplastic. *Physics in Technology*, v. 16, p. 32, 1985.

HOLMES, P. A. Biologically produced PHA polymers and copolymers. In: BASSET, D.C. *Development in Crystalline Polymers-2*. Londres: Elsevier, 1988. p. 1-65.

ICE. Disponível em: <https://www.theice.com/productguide/ProductSpec.shtml;jsessionid=407A0B2F6E1758B95399DBCA9D509172?specId=23#data>. Acesso em: 02 de fev. 2013.

JACQUEL, N.; LO, C. W.; WEI, Y. H.; WU, H. S.; WANG, S. S. Isolation and purification of bacterial poly(3-hydroxyalkanoates). *Biochem. Eng. Journal*, v. 39, p. 15-27, 2008.

KESHAVARZ, T.; ROY, I. Polyhydroxyalkanoates: bioplastics with a green agenda. *Current Opinion in Microbiology*, Reino Unido, v.13, p. 321-326, 2010.

KOSIOR, E.; Braganca, R. M.; Fowler, P. *Lightweight compostable packaging: literature review*. Reino Unido: Wrap, 2006, 48 p.

LEE, S. Y. Bacterial polyhydroxyalkanoates. *Biotechnol. Bioeng.*, v. 49, p. 1-14, 1996.

LEMOIGNE, M. Etudes sur l'autolyse microbie acidification par formation d'acide  $\beta$ -oxybutyrique. *Ann. Inst. Pasteur*, Paris, v. 39, p. 144, 1925.

LENZ, R.; MARCHESSAULT R. H. Bacterial polyesters: Biosynthesis, biodegradable plastics and biotechnology , *Biomacromolecules* , v. 6, p. 1-8, 2005.

LING, Y.; WILLIAMS, D. R. G.; THOMAS, C. J.; MIDDELBERG, A. P. J. Recovery of poly-3-hydroxybutyrate from recombinant E. coli by homogenization and centrifugation. *Biotechnol. Tech.*, v. 11, p. 409-412, 1997.

MACHADO, B. A. S.; FIGUEIREDO, T. V. B.; SANTOS, J. C. P.; REIS, J. H. O.; SANTANA, M. C. C. B.; DRUZIAN, J. I. Mapeamento tecnológico do glicerol/glicerina sob o enfoque em documentos de patentes depositados no Brasil. In: ProspeCT&I, 2012, Bahia. Cadernos de Publicação, 2012, p. 14-22.

MACRAE R. M.; WILKINSON J. F. Poly- $\beta$ -hydroxybutyrate metabolism in washed suspensions of *Bacillus cereus* and *Bacillus megaterium*. *Journal of general microbiology*, v. 19, p. 210-222, 1958.

METABOLIX. Metabolix to redefine strategy of bioplastics and renewable chemicals platforms. Disponível em: <http://ir.metabolix.com/releasedetail.cfm?releaseid=639044>. Acesso em: 23 de nov. 2012.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. Disponível em: [http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/Desenvolvimento\\_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/precos/JANEIRO\\_2013/acucar/14\\_pc\\_acucar\\_sp.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/estatisticas/precos/JANEIRO_2013/acucar/14_pc_acucar_sp.pdf). Acesso em: 21 de fev. 2013.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Disponível em: <http://www.aprobio.com.br/Boletim%20DCR%20n%C2%BA%20060%20-%20janeiro%20de%202013.pdf>. Acesso em: 22 de fev. 2013.

MOTHES, G.; SCHNORPFEIL, C.; ACKERMANN, C. J. U. Production of PHB from crude glycerol. *Eng. Life Sci.*, v. 7, p. 475-479, 2007.

OJUMU, T. V.; YU, J.; SOLOMON, B. O. Production of Polyhydroxyalkanoates, a bacterial biodegradable polymer. *Afr. J. Biotechnol.*, v. 43, p. 18-24, 2004.

PETERS, M. S.; TIMMERHAUS, K. D. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. New York: McGraw-Hill, 1991.

PHB INDUSTRIAL. Disponível em: <http://www.biocycle.com.br>. Acesso em: 22 de nov. 2012.

POSADA, J. A.; NARANJO, J. M.; LÓPEZ, J. A.; HIGUITA, J. C.; CARDONA, C. A. Design and analysis of poly-3-hydroxybutyrate production processes from crude glycerol. *Process Biochemistry*, v. 46, p. 310-317, 2011.

RECEITA FEDERAL. Disponível em: <http://www.receita.fazenda.gov.br/aliquotas/contribpj.htm>. Acesso em: 14 de fev. 2013.

REDDY, C. S. K.; GHAI, R.; RASHMI; KALIA, V. C. Polyhydroxyalkanoates: an overview. *Bioresour. Technol.*, v. 87, p. 137-146, 2003.

SALEHIZADEH, H.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. Production of polyhydroxyalkanoates by mixed culture: recent trends and biotechnological importance. *Biotechnol. Adv.*, v. 22, p. 261-279, 2004.

SHEN, L.; HAUFE, J.; PATEL, M. K. Product overview and market projection of emerging bio-based plastics. Utrecht; 2009. 243 p.

STANIER R. Y.; DOUDOROFF M.; KUNISAWA R.; CONTOPOULOU R. The role of organic substrates in bacterial photosynthesis. *Proc. NAS, Estados Unidos*, v. 45, p. 1246-1260, 1959.

STEINBÜCHEL, A. Polyhydroxyalkanoic acids. In: BYROM, D. *Biomaterials*. Inglaterra: MacMillan, 1991. p. 125-213.

STEINBÜCHEL, A.; LUTKE-EVERSLOH, T. Metabolic engineering and pathway construction for biotechnological production of relevant polyhydroxyalkanoates in microorganisms. *Biochem. Eng. Journal*, v.16, p. 81-96, 2003.

THOMPSON, J. C.; HE, B. B. Characterization of crude glycerol from biodiesel production from multiple feedstocks. *Appl. Eng. Agric.*, v. 22, p. 261-265, 2006.

US PEROXIDE. Disponível em: <http://www.h2o2.com/faqs/FaqDetail.aspx?fid=25>. Acesso em: 05 de fev. 2013.

VAN WEGEN, R. J.; LING, Y.; MIDDELBERG, A. P. J. Industrial production of polyhydroxyalkanoates using *Escherichia coli*: an economic analysis. *Institution of Chemical Engineers Trans IChemE*, v.76, p.417-426, 1998.

WILLIAMS, S. F.; MARTIN, D. P. Applications of PHAs in medicine and pharmacy. Disponível em: <http://www.tepha.com/assets/Applications-of-PHAs-in-Medicine-and-Pharmacy.pdf>. Acesso em: 31 de ago. 2012.

WOLF, O. Techno-economic Feasibility of Largescale Production of Bio-based Polymers in Europe. Sevilla; 2005. 260 p.

YASOTHA, K.; AROUA, M. K.; RAMACHANDRAN, K. B.; TAN, I. K. P. Recovery of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates (PHAs) through enzymatic digestion treatments and ultrafiltration. *Biochem. Eng. Journal*, v. 30, p. 260-268, 2006.

YASOTHA, K.; KHEIREDDINE, A. M.; KADATHUR, B. R.; TAN, I. K. P. Chemical characterization of medium-chain-length polyhydroxyalkanoates (PHAs) recovered by enzymatic treatment and ultrafiltration. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, v. 82, p. 847-855, 2007.

YU, J. Microbial Production of Bioplastics from Renewable Resources. In: Yang, S. T. *Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources*. Londres: Elsevier, 2007. p. 585-610.

# ANEXOS

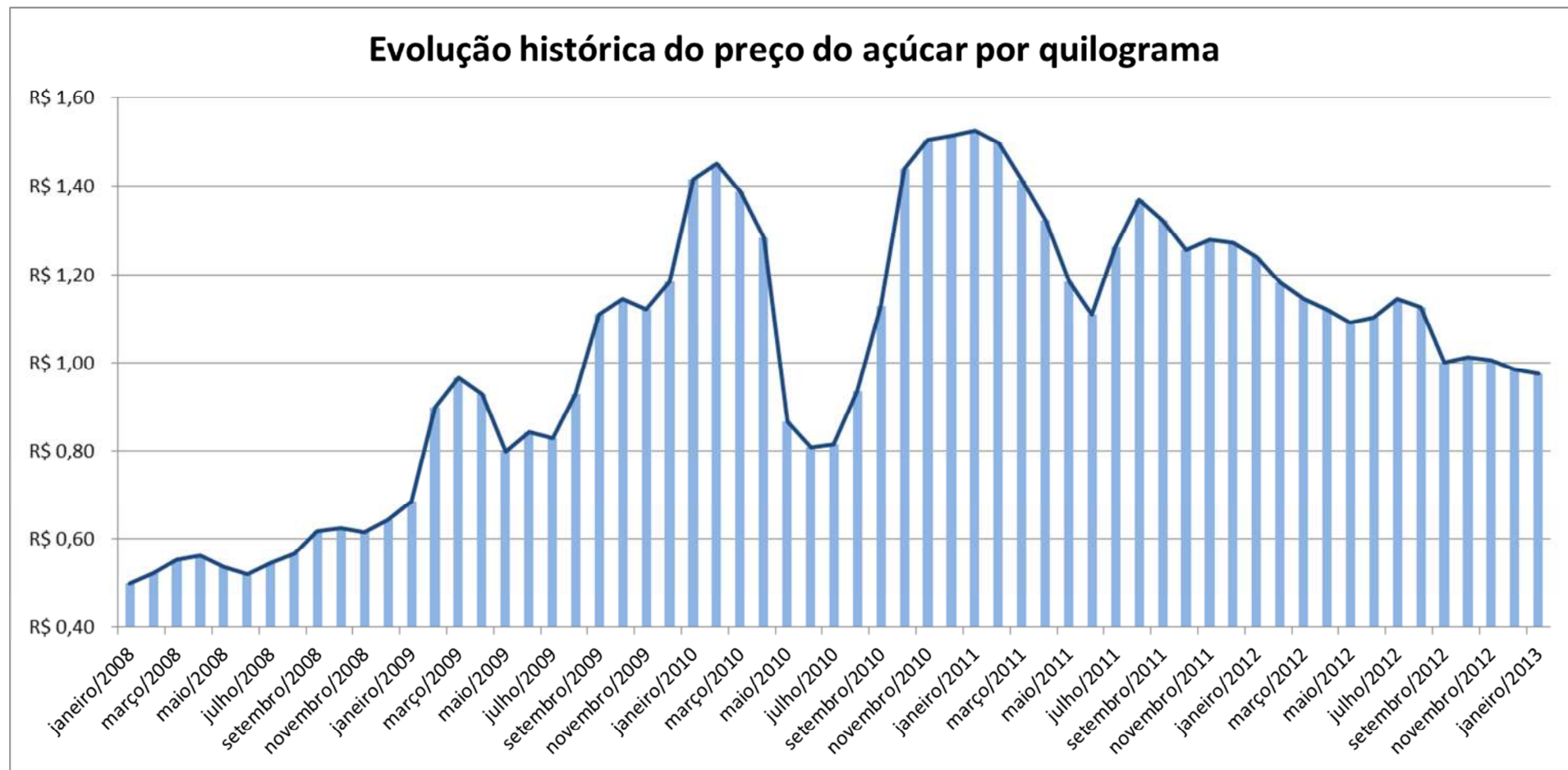


Figura 23 - Série histórica do preço do açúcar por quilograma

Fonte: Ministério da Agricultura, 2013

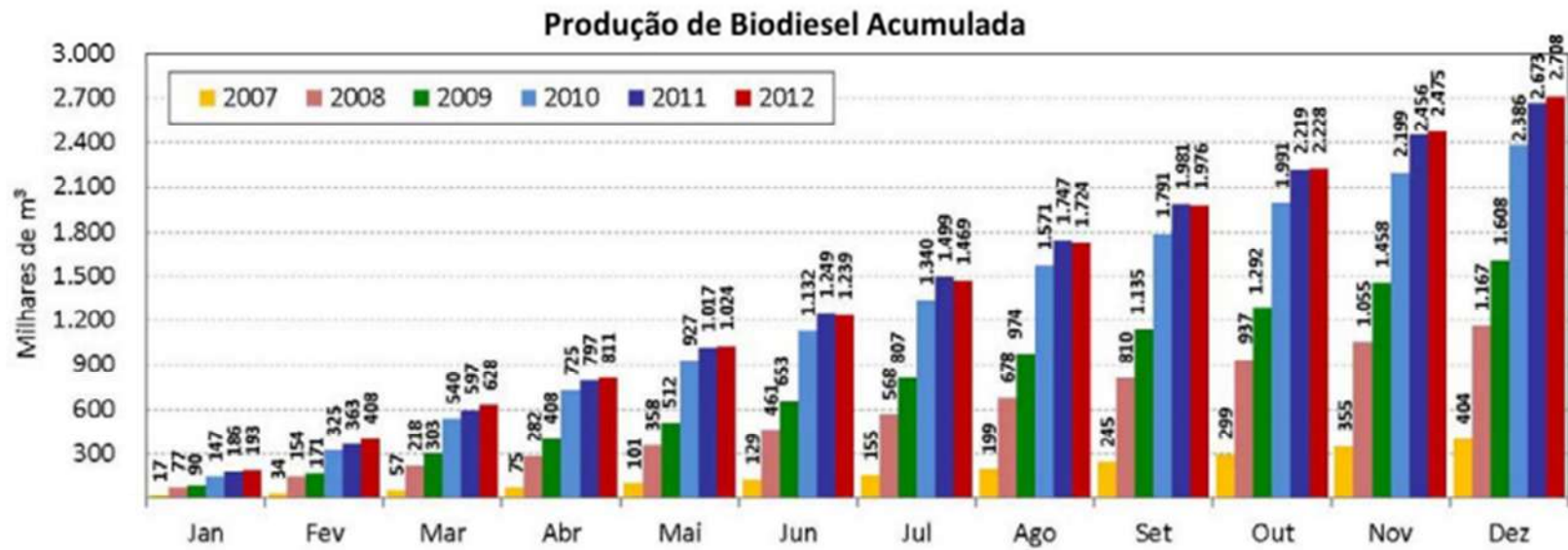


Figura 24 - Evolução da produção de biodiesel no Brasil

Fonte: Aprobio, 2013