



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



Avaliação técnico-econômica da produção de Ácido Succínico por rota fermentativa

Gustavo Cezar Delatin

Uberlândia - MG

2021



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



Avaliação técnico-econômica da produção de Ácido Succínico por rota fermentativa

Gustavo Cezar Delatin

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Uberlândia como parte dos requisitos
necessários para aprovação na disciplina
de Projeto de Graduação de curso de
Engenharia Química.

Uberlândia - MG

2021

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GUSTAVO CEZAR DELATIN
APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA EM 24 DE JULHO DE
2020.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Adilson José de Assis

Prof. Sérgio Mauro da Silva Neiro

Prof. Ubirajara Coutinho Filho

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Carlos Luis Delatin, minha mãe Rosângela das Graças Cezar Delatin, meu irmão Guilherme Cezar Delatin, minha sobrinha Isis Delatin e às minhas avós Elvira e Maria, que sempre foram minha base, meu apoio, aconselhando, passando conhecimento de vida, dando suporte e muito amor. Obrigado por todo investimento emocional e monetário dedicado à minha formação pessoal e profissional, pela convivência e momentos especiais compartilhados, em especial das minhas avós que faleceram durante a minha graduação.

Aos meus padrinhos Ivan José Delatin, Elisete Delatin, à minha tia Lizabete e a todos os meus primos e primas, por todas as conversas, conselhos e principalmente e mais importante o apoio que me fizeram chegar até aqui. À minha namorada pelo apoio e encorajamento em todos os momentos dessa caminhada.

Agradeço também a todos os meus amigos da faculdade pelos momentos de confraternização, estudos, conversas e conselhos, fundamentais para manter o equilíbrio emocional e enfrentar todas as adversidades da vida universitária.

Sou muito grato ao professor Adilson por ter me aceitado como orientando no trabalho de conclusão de curso e por todo suporte. Mesmo quando precisei estar ausente de minhas atividades, ele se manteve presente me auxiliando nos direcionamentos. Para mim, mais que um professor, um amigo que me acompanhou desde o primeiro ano, nas aulas de Introdução, até as disciplinas finais do curso.

Ainda, agradeço ao DAEQ, a Enactus e a Roseli doutoranda que me acompanhou em minha iniciação científica e, que muito contribuiu em minha construção como aluno, profissional e ser humano. Convivências que me proporcionaram experiências, que me agregaram em todas as esferas da minha vida e que me possibilitaram alcançar grandes oportunidades como os artigos publicados no COBEQ, os avanços alcançados nos projetos da Enactus e o sucesso nos eventos esportivos do Diretório Acadêmico.

Por fim, agradeço aos professores, coordenação, funcionários e técnicos da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia por toda a dedicação empregada no ensino de seus alunos. Cada um teve um papel importante na construção do conhecimento que levo para minha carreira como engenheiro. Agradecimento especial ao professor Rubens pelo exemplo de ser humano iluminado e excelente profissional

A todos vocês, que participaram comigo dessa caminhada levarei e honrarei todo conhecimento aprendido, afinal “Conhecimento não é poder até que seja aplicado” – Dale Carnegie.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| LISTA DE FIGURAS..... | i |
| LISTA DE EQUAÇÕES..... | i |
| LISTA DE TABELAS..... | i |
| RESUMO..... | iii |
| ABSTRACT..... | iv |
| | |
| 1- INTRODUÇÃO..... | 1 |
| | |
| 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 3 |
| 2.1- ÁCIDO SUCCÍNICO..... | 3 |
| 2.2- PRODUÇÃO PETROQUÍMICA..... | 5 |
| 2.3- PRODUÇÃO FERMENTATIVA..... | 6 |
| 2.3.1- PRODUÇÃO FERMENTATIVA COM BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR..... | 8 |
| 2.3.2- PRODUÇÃO FERMENTATIVA COM CASA DE ARROZ..... | 10 |
| 2.4- MERCADO DE ÁCIDO SUCCÍNICO..... | 12 |
| | |
| 3- MATERIAIS E MÉTODOS..... | 14 |
| 3.1- CUSTO DE CAPITAL DE INVESTIMENTO (CAPEX)..... | 14 |
| 3.2- CUSTOS OPERACIONAIS (OPEX)..... | 15 |
| 3.3- VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)..... | 16 |
| 3.4- TAXA INTERNO DE RETORNO (TIR)..... | 16 |
| 3.5- RECUPERAÇÃO DE INVESTIMENTO (PAYBACK)..... | 17 |
| | |
| 4- RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 18 |
| 4.1- ESTUDO DE CASO: AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA PLANTA DE PRODUÇÃO DO DE ÁCIDO SUCCÍNICO EM BIORREFINARIA DE CANA DE AÇÚCAR..... | 18 |
| | |
| 5- CONCLUSÃO..... | 26 |
| | |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 27 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 -Molécula de ácido succínico..... | 3 |
| Figura 2.2 -Compostos formados diretamente pelo ácido succínico..... | 4 |
| Figura 2.3 -Rotas metabólicas possíveis com fontes diferentes de açúcar..... | 7 |
| Figura 2.4 - Fluxograma do processo de produção do ácido succínico fermentativo, a partir dos açúcares extraídos do bagaço da cana-de-açúcar..... | 10 |
| Figura 2.5 -Fluxograma do processo de produção do ácido succínico fermentativo, a partir da glicose e xilose extraída da casca do arroz..... | 11 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|--|----|
| Equação 3.1 -Ajuste temporal de CAPEX, a partir do CEPCI..... | 14 |
| Equação 3.2 -Ajuste temporal de Receita e OPEX, a partir da base IPP do IBGE..... | 16 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1 -Propriedades físico-químicas do ácido succínico..... | 3 |
| Tabela 2.2 - Comparação entre os métodos de produção com diferentes substratos..... | 12 |
| Tabela 4.1 -Fluxo de caixa com lucro bruto..... | 18 |
| Tabela 4.2 -Fluxo de caixa com depreciação e imposto de renda..... | 19 |
| Tabela 4.3 -Valores de VPL anual..... | 20 |
| Tabela 4.4 -Fluxo de caixa com lucro bruto em cenário otimista..... | 21 |

| | |
|--|----|
| Tabela 4.5- Fluxo de caixa com depreciação e imposto de renda, em cenário otimista..... | 21 |
| Tabela 4.6- Valores de VPL anual, em cenário otimista..... | 22 |
| Tabela 4.7- Fluxo de caixa com lucro bruto, em cenário pessimista..... | 23 |
| Tabela 4.8- Fluxo de caixa com depreciação e imposto de renda, em cenário pessimista..... | 24 |
| Tabela 4.9- Valores de VPL anual, em cenário pessimista..... | 24 |
| Tabela 4.10 - Comparação entre resultados econômicos dos cenários..... | 25 |

RESUMO

O ácido succínico é um composto carboxílico de grande interesse econômico por sua vasta aplicação, já que dele podem ser produzidos pelo menos 9 outros compostos diretamente e até 30 compostos indiretamente e que podem ser empregados em setores diversos da indústria química. O método tradicional de produção do ácido succínico é por via petroquímica. Entretanto, rotas menos nocivas ao meio ambiente, por realizar sequestro de CO₂ e ter como matéria prima principal uma fonte renovável, têm sido estudadas, com ênfase na produção por fermentação de açúcares. A produção por rota alternativa pode ser implementada, contanto que seja viável do ponto de vista econômico. Assim, neste trabalho, foram analisados fluxos de caixa para três cenários do processo de produção do ácido succínico produzido a partir do bagaço de cana de açúcar, considerando os cenários: estimativa inicial, cenário pessimista e otimista. Partindo-se de estimativas de CAPEX e OPEX obtidos na literatura, os valores foram corrigidos no tempo usando o CEPCI e o IPP do IBGE, obtendo-se um CAPEX de US\$346.722.970,36, um OPEX de US\$ 117.154484,69 e uma Receita de US\$ 208.274.817,23. Considerou-se o tempo de construção de dois anos, vida útil da planta de 25 anos e taxa de imposto de renda de 34%. A estimativa inicial apresentou Valor Presente Líquido de US\$ 127.196.426,50 para uma taxa de desconto de 12% a.a. e a taxa interna de retorno foi de 16,73%, com *payback* de 11 anos e três meses. Considerando um cenário de redução de vendas de 10% (cenário pessimista) o VPL, TIR e *Payback* foram respectivamente, US\$ 85.751.639,65, 15,26% e 13 anos. Já um aumento de vendas em 10% (cenário otimista) obteve-se VPL de US\$ 168.641.213,35, a TIR de 18,14% e *Payback* de 10 anos. Desse modo, a produção de ácido succínico via rota fermentativa utilizando bagaço de cana como matéria prima mostrou atratividade econômica para os cenários analisados. Isso, vai em linha com a crescente demanda por essa substância nos últimos anos e as previsões de continuidade de aumento de demanda no cenário mundial pós pandemia.

Palavras-chave: ácido succínico; fermentação; viabilidade econômica; produção alternativa;

ABSTRACT

Succinic acid is a carboxylic compound of great economic interest due to its wide application, since it can be produced from at least 9 other compounds directly and up to 30 compounds indirectly and can be used in different sectors of the chemical industry. The traditional method of producing succinic acid is via petrochemicals. However, routes that are less harmful to the environment, by sequestering CO₂ and having a renewable source as the main raw material, have been studied, with an emphasis on production by sugar fermentation. Alternative route production can be implemented as long as it is economically viable. Thus, in this work, cash flows were analyzed for three scenarios of the production process of succinic acid produced from sugarcane bagasse, considering the scenarios: initial estimate, pessimistic and optimistic scenario. Based on estimates of CAPEX and OPEX obtained in the literature, the values were corrected in time using the CEPCI and the IPP from IBGE, obtaining a CAPEX of US\$346,722,970.36, an OPEX of US\$ 117,154,484.69 and an Income of US\$208,274,817.23. Construction time of two years, plant life of 25 years and income tax rate of 34% were considered. The initial estimate presented a Net Present Value of US\$ 127,196,426.50 for a discount rate of 12% p.y. and the internal rate of return was 16.73%, with payback of 11 years and three months. Considering a 10% reduction in sales scenario (pessimistic scenario), the NPV, IRR and Payback were, respectively, US\$85,751.639.65, 15.26% and 13 years. On the other hand, an increase in sales of 10% (optimistic scenario) resulted in a NPV of US\$ 168,641,213.35, an IRR of 18.14% and a Payback of 10 years. Thus, the production of succinic acid via fermentation route using sugarcane bagasse as raw material showed economic attractiveness for the analyzed scenarios. This is in line with the growing demand for this substance in recent years and the forecasts for a continued increase in demand in the post-pandemic world scenario

Key words: succinic acid; fermentation; economic viability; alternative production;

1. INTRODUÇÃO

A humanidade cresceu e evoluiu, desde as primeiras civilizações até o neocolonialismo, a partir dos mesmos princípios de expansão, pautado em três pilares, população, poder territorial e recursos naturais. Nas primeiras revoluções industriais não foram diferentes, porém a necessidade dos recursos naturais tornou-se mais importante devido à estrutura formada pela indústria, como as máquinas que precisam do carvão para funcionar e, cronologicamente, passaram usar o petróleo como fonte de energia (Matos, 2012).

Forma-se um mercado consumidor muito forte dos produtos dessa estrutura industrial, tornando-se a sociedade extremamente dependente das matérias primas que envolvem a indústria. Embora a urbanização diminua em partes a explosão demográfica em relação à vida no campo, por outro lado também aumenta a expectativa de vida da população. Chegando a grandes centros urbanos como a grande São Paulo, que é extremamente populosa ou Xangai e Pequim na China, que concentram grandes parcelas de mercado consumidor desse sistema industrial tradicional.

Da estrutura industrial formada e grande crescimento do mercado consumidor, surgem alguns problemas relacionados aos recursos naturais, que o tempo de formação na natureza não acompanha a produção e consumo que o mercado exige, sendo necessário buscar novas formas de produção dos mesmos recursos em que o mercado se estruturou. Nesse cenário foi feita uma lista de produtos químicos mais importantes e que podem ser substituídos. Dentre os compostos estava o Ácido Succínico (Werpy e Petersen, 2004). Esse composto apesar de ser produzido por síntese da indústria petroquímica, tem alguns caminhos alternativos a partir do processamento de biomassa por microrganismos.

O componente chama a atenção pela possibilidade de transformação em diversas moléculas, podendo ser empregado em diversas indústrias como de alimentos, química e até farmacêutica (Zeikus et. al, 1999). Com o interesse na molécula em estudo é necessário buscar cada vez mais rotas de produções alternativas otimizadas e com matérias primas diversificadas. Além disso, essas rotas devem possuir viabilidade econômica e o custo do produto por processos alternativos deve ser competitivo em relação aos processos tradicionais.

Objetivo Geral

- Detalhar a rota de produção do ácido succínico por via fermentativa usando como matéria prima o bagaço da cana de açúcar e realizar análise de viabilidade econômica do processo.

Objetivos Específicos

- Conhecer as diferentes rotas de produção de ácido succínico
- Quantificar o CAPEX, OPEX, VPL, TIR e *payback* para uma planta de produção de ácido succínico que utiliza bagaço de cana de açúcar como matéria prima
- Comparar a rota de produção de ácido succínico que utiliza bagaço de cana de açúcar com rotas alternativas disponíveis na literatura em termos de equipamentos e processos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ácido Succínico (AS)

Molécula de hidrocarboneto, um ácido dicarboxílico saturado (IUPAC: ácido butanodióico), sólido branco e inodoro. Quando solúvel em água é incolor e sua fórmula molecular é $C_4H_6O_4$. A figura 2.1 apresenta a estrutura molecular do ácido succínico e a tabela 2.1 as principais propriedades:

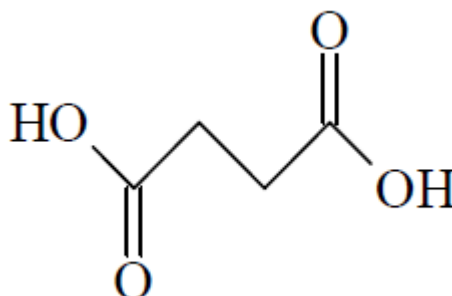


Figura 2.1: Molécula de ácido succínico. (Oliveira et. al, 2013)

Tabela 2.1: Propriedades físico-químicas do ácido succínico (FISPQ)

| | |
|-----------------------------------|------------------------|
| Fórmula | $C_4H_6O_4$ |
| Peso molecular (g/mol) | 118,09 |
| Ponto de Fusão a 1 atm (°C) | 188 |
| Ponto de Ebulição a 1 atm (°C) | 235 |
| pH C=10g/L a 20°C | 2,7 |
| Solúvel | Água, Etanol e Acetona |
| Solubilidade em Água a 25°C (g/L) | 83 |
| Densidade Aparente (g/L) | 940 |

A substância química em estudo, também pode ser chamada de âmbar, por ter sido encontrado pela primeira vez, na forma de resina fósil na casca de uma árvore que fora fermentada por algum tipo de organismo; âmbar traduzido para o latim é *succinum*. Historicamente, o ácido foi isolado pela primeira vez em 1546 por Georgius, para ser usado nas indústrias farmacêuticas e de alimentos (Zeikus et. al, 1999).

Devido sua saturação e estrutura linear da molécula há possibilidade de transformação em moléculas parecidas, também podem ser formadas inúmeras possibilidades de combinações, formando mais de 30 compostos indiretamente com importância econômica. Em resumo é possível ver o ácido succínico como base de vários processos de diversas indústrias, prova disso é a transformação direta do composto, conforme ilustra a figura 2.2 (Moon et. al, 2004).

O AS, consegue se transformar no 1,4-butanodiol, usado na produção do PBS plástico biodegradável, produzido por grandes empresas que estão no mercado verde e em outras moléculas como 1,4-diaminobutano, succinimida, succinonitrila, N-metil-2-pirrolidinona, 2-pirrolidinona, N-vinil-2-pirrolidinona, butirolactona e tetrahidrofurano. Essa gama de produtos ganha vastos mercados nas indústrias de polímeros, tecidos, resinas, tintas, cosméticos e medicamentos, o próprio ácido é usado como aromatizante em bebidas e alimentos, além disso, serve como degradante do acetaldéido tóxico formado a partir etanol no organismo, sendo utilizado em medicamentos para veisalgia (Moon et. al, 2004; Song e Lee, 2006).

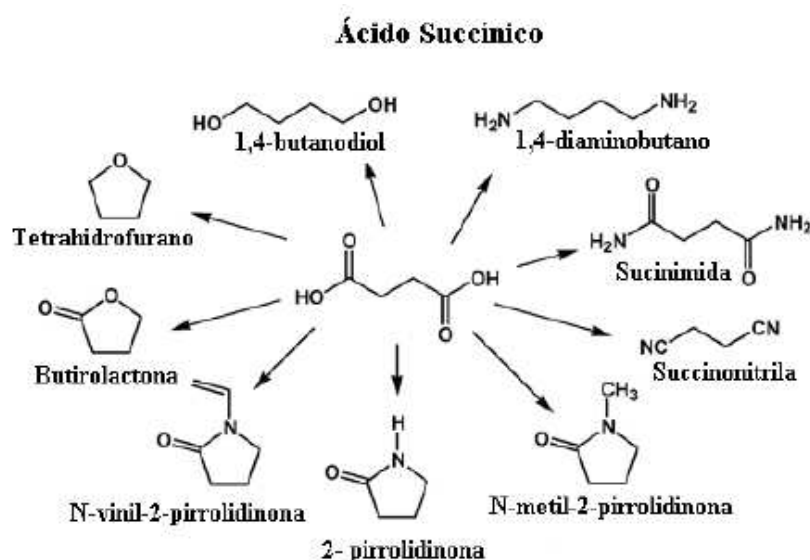


Figura 2.2: Compostos formados diretamente pelo ácido succínico. (Adaptado de Werpy e Petersen, 2004)

2.2. Produção Petroquímica

O método de produção mais utilizado é por via petroquímica. Destacam-se a hidrogenação catalítica do anidrido maleico, a oxidação do ciclohexano e a hidrogenação catalítica do ácido fumárico ou do ácido maleico, descritos em 2006, por Fumagalli. Para realizar a hidrogenação catalítica dos ácidos maleico ou fumárico é necessário que os catalisadores utilizados sejam metais nobres como o Paládio (Pd), Ródio (Rh), Rutênio (Ru), ou uma liga desses metais. Ainda é possível usar o Níquel de Raney, liga metálica composta de Níquel (Ni) com alumínio (Al).

Na oxidação do ciclohexano pelo ácido adípico é obtido uma mistura com três compostos em composições variáveis, sendo de 15 a 25% ácido succínico, 45 a 55% ácido glutárico e 25 a 35% de ácido adípico. Em 1993 foram produzidos cerca de 91 mil toneladas da mistura, que após a formulação tiveram os compostos separados. O método mais amplamente utilizado nas indústrias é o da hidrogenação catalítica do anidrido maleico.

A hidrogenação do anidrido acontece em meio líquido, com temperatura de 80 a 120°C, a uma pressão de 5 a 40bar, e os catalisadores encontrados na literatura para esses processos são Níquel (Ni), Níquel de Raney, Paládio (Pd) e complexos de Paládio. Essa reação é extremamente exotérmica e possui entalpia de $\Delta H_r = -133,99$ KJ/mol. Esses parâmetros do processo exigem que o reator tenha uma ótima troca térmica para remoção de calor e que promova o contato do hidrogênio com os catalisadores. Para aumentar a eficiência de conversão, a injeção de nitrogênio é necessária no *start up*, no *shutdown*, e algumas vezes durante o processo para evitar presença de oxigênio no reator; além disso, os tanques para hidrogenação precisam ser em aço inoxidável.

Dependendo da necessidade de produtiva o processo pode ser batelada, ou contínuo, e independente do sistema produtivo reacional, precisa passar por filtragem para remoção dos catalisadores. O fluido restante é purificado por destilação em baixas pressões (0,04 a 0,13 bar) e obtém-se assim o anidrido succínico, que deve ser hidratado em água quente para conversão em ácido succínico. A cristalização do AS (Ácido Succínico) vem pela evaporação da água até a saturação da solução, seguido de resfriamento do fluido para formação dos cristais e secagem para finalizar.

Para a produção de 907,19 toneladas de Anidrido Succínico é consumido: 1050 Kg de anidrido maleico, 300 m³ de Hidrogênio, 4500 Kg de vapor, 100 m³ de água fria, 350 KW de

eletricidade, 100 m³ de nitrogênio e 100 m³ de metano. Os efluentes do processo a serem tratados são os catalisadores inutilizados, a água usada na torre de destilação e o ar carregado com hidrogênio (Fumagalli, 2006).

2.3. Produção Fermentativa

A produção de AS por via fermentativa leva em consideração o ciclo do ácido tricarboxílico presente em plantas, animais e microrganismos, que possui o AS como um dos possíveis produtos dos seus metabolismos. Para produção, normalmente a fonte matéria prima é açúcar ou carboidrato. No caso de moléculas maiores como a lignina ou a hemicelulose, são necessárias algumas preparações para a quebra das moléculas mais complexas se transformarem em açúcares (Bevilaqua, 2013).

Os diferentes açúcares geram rotas metabólicas diferentes e podem impactar nos microrganismos escolhidos, há uma combinação de matéria prima e microrganismos, levando a um resultado de produção. Na figura 2.3 temos algumas rotas metabólicas possíveis; contudo há estudos que buscam por microrganismos que realizem maiores taxas de conversões (Song e Lee, 2006; Pateraki, 2016; Bevilaqua, 2013).

Uma gama muito grande de microrganismos estudados para a produção de succinato foi observada, tais como fungos filamentosos, bactérias e leveduras, capazes de, durante o metabolismo, produzir o subproduto. Dentre os microrganismos que mais se destacam estão as linhagens que naturalmente são produtoras do AS e que acabam por produzir em maiores concentrações que outras espécies. São elas: *Actinobacillus succinoges*, *Anaerobiospirillum succiniproducens*, *Mannheimia succiniciproducens*, *Basfia succiniciproducens* e também as cepas geneticamente modificadas de *Escherichia coli* (Bevilaqua, 2013; Song e Lee, 2006; Cheng et. al, 2012).

convertido por troca iônica em ácido succínico. E por fim acontece a purificação do ácido succínico e cristalização (Zeikus et. al, 1999; Cheng et. al, 2012).

Uma vantagem que vale a pena ser destacada é a do ácido succínico que no processo fermentativo faz captura de dióxido de carbono. Em regra geral, para cada mol de ácido produzido é necessário um mol de CO₂. Portanto, a quantidade dessa molécula não pode ser deficitária, caso contrário pode ser induzida outra rota metabólica que não seja do interesse ou afetar na eficiência de conversão (Song e Lee, 2006; Bevilaqua, 2013; Pateraki et. al, 2016).

2.3.1. Produção Fermentativa com Bagaço da Cana de Açúcar

O processo fermentativo pode variar muito de acordo com todas as variáveis possíveis na produção fermentativa. Contudo, algumas partes são necessárias e devem ser de conhecimento em toda produção. Para exemplificar o processo fermentativo será utilizado a produção de AS por pentose extraída do bagaço de cana de açúcar, proposto por Klein et. al, 2017, com *Actinobacillus succinogenes* na fermentação.

Esse processo é dividido em quatro partes: o pré tratamento do bagaço, a detoxificação, a fermentação e o *downstream*. As duas primeiras partes são basicamente preparação da matéria prima, a extração dos açúcares e remoção de impurezas. A fermentação será os microrganismos processando os açúcares e por último a separação entre o ácido succínico e os organismos vivos e subprodutos.

A preparação do bagaço começa com a quebra da molécula de xilose usando o ácido sulfúrico (H₂SO₄) diluído, com 0,5% em massa. O ácido contribui para reduzir a formação de possíveis inibidores formados da degradação do açúcar. Esse processo é realizado a temperatura de 140° C por 15 minutos. O caldo extraído segue para o evaporador e o bagaço residual vai para lavagem. Após a lavagem, o resíduo da cana vai para geração de energia e a água de lavagem vai para o evaporador junto com o caldo de xilose.

No evaporador é retirado ácido acético e água, concentrando a solução de pentose para a detoxificação, que começa com a neutralização da solução com cal (CaO), até alcançar pH 7 e volta a ser acidificada com ácido fosfórico (H₃PO₄) chegando a um pH de 2,5. O próximo passo é seguir

para um tratamento com carvão ativado a 60°C durante 30 minutos e ao final é enviado para a fermentação livre de inibidores e impurezas.

Para o processo fermentativo, estima-se que o caldo possua 57,9g/L de Xilose e 6,6g/L de glicose, o pH deve ser 7, a 37° C. Os microrganismos usados são *Actinobacillus succinogenes*, que realizam a fermentação anaeróbica com suprimento de CO₂, durante 72 horas. A taxa de produção é 0,45 g de produto para cada grama de substrato.

Após a fermentação segue-se para última etapa do processo, o *downstream*. Nessa etapa são removidos os microrganismos por meio de centrífugas. Algumas células podem ser reaproveitadas e outras são mandadas para secagem e alimentação da caldeira. Livres de microrganismos o caldo novamente é acidificado com H₂SO₄, até o pH 2,2. Essa parte do processo é importante para melhorar a remoção de ácido acético na evaporação e chegar a 99% de recuperação do AS, uma vez que succinato não é adsorvido por zeólitas com pH maior que 4.

A mistura ácida passa por evaporador de dois estágios, para remoção de água e ácido acético. Após a concentração, a solução segue para adsorção em zeólita, os resíduos de sais são precipitados com óxido de cálcio (CaO), formando sulfatos e fosfatos, sendo enviados para reprocessar na fermentação junto com os açúcares não convertidos. A dessorção do AS é feita com água e a zeólita é recuperada com ar quente a 600°C.

A solução de ácido succínico faz evaporação de múltiplo efeito para aumentar a concentração até a saturação da solução. Com resfriamento da solução o produto é cristalizado com recuperação de 96,8% e com uma pureza de 98,1%, esse nível de pureza dos cristais atende como matéria prima a indústria de base. Após a secagem, a solução residual da cristalização é reciclada para a adsorção. O fluxograma do processo descrito acima é apresentado na figura 2.4.

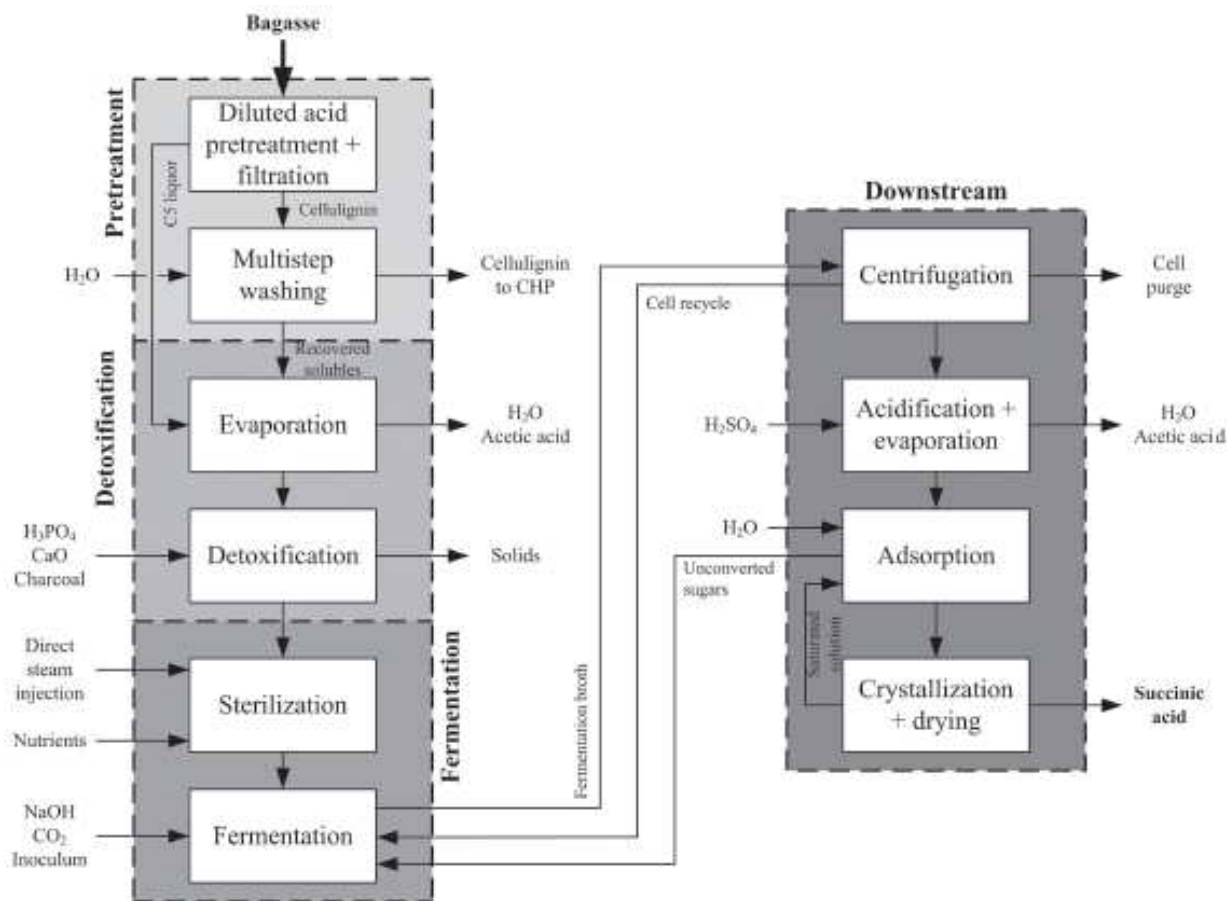


Figura 2.4: Fluxograma do processo de produção do ácido succínico fermentativo, a partir dos açúcares extraídos do bagaço da cana-de-açúcar (Klein et. al, 2017)

2.3.2. Produção Fermentativa com Casca de Arroz

No Brasil, Bevilaqua, 2013, apresenta em tese de doutorado a produção de AS através da otimização do pré tratamento da casca de arroz (CA), a fermentação seletiva por *Actinobacillus succinogenes* e o melhor método de separação do ácido succínico após a produção. Assim como na produção por cana de açúcar são necessárias as mesmas etapas de produção, incluindo a detoxificação após o tratamento primário da casca de arroz.

De acordo com Bevilaqua, a preparação da casca deve se iniciar moendo em moinho industrial de facas ou de martelo, para reduzir o tamanho da casca e facilitar o tratamento físico-químico, aumentando a superfície de contato. Para conversão de celulose e hemicelulose em glicose e xilose, o método mais eficiente encontrado é a hidrólise ácida com Ácido Clorídrico (HCl). A

temperatura deve estar a 175°C, a concentração de HCl deve ser de 0,26mol/L e deve reagir durante 46 minutos, produzindo 19g/L de glicose e 3,01g/L de xilose.

Para a etapa de detoxificação a melhor opção é com carvão ativado vegetal e CaOH, em pH 7, que remove grande quantidade de impurezas e substâncias que prejudicam a eficiência da fermentação. Após esse processo o caldo que segue para fermentação está com concentração de glicose e xilose de 18,5g/L e 2,97g/L, respectivamente. A fermentação otimizada é realizada durante 54 horas com aditivo de 1,4g/L de NaHCO_3 e com 8,4g/L de extrato de levedura, operando sem agitação. O rendimento é 59,9% e a taxa de conversão do sistema é de 0,23g/(L.h) de ácido succínico, observando-se uma relação de 0,125g de AS por grama de casca de arroz.

Após a fermentação o *downstream* se inicia com a remoção dos organismos fermentadores *Actinobacillus succinogenes* por meio de centrifuga. Os microrganismos seguem para serem reaproveitados e o caldo segue para remoção de impurezas em segregação molecular. O método que fez melhor trabalho foi o adsorvente de troca iônica de amônia, porém, ainda não há aplicações em escala industrial do método. O adsorvente retém o ácido succínico e passa por liofilização para recuperação do produto, seguido de cristalização em evaporador de múltiplo efeito. Os cristais de AS ao final do processo possuíam pureza de 80%, nesse nível de pureza atende alguns processos da indústria de base.. Na etapa de separação do produto de interesse poderia ser implementado um método mais parecido com o utilizado por Klein, et. al, 2017, onde os resultados são bem melhores em quantidade e qualidade. A figura 2.5 ilustra o fluxograma do processo, de maneira a facilitar o entendimento.

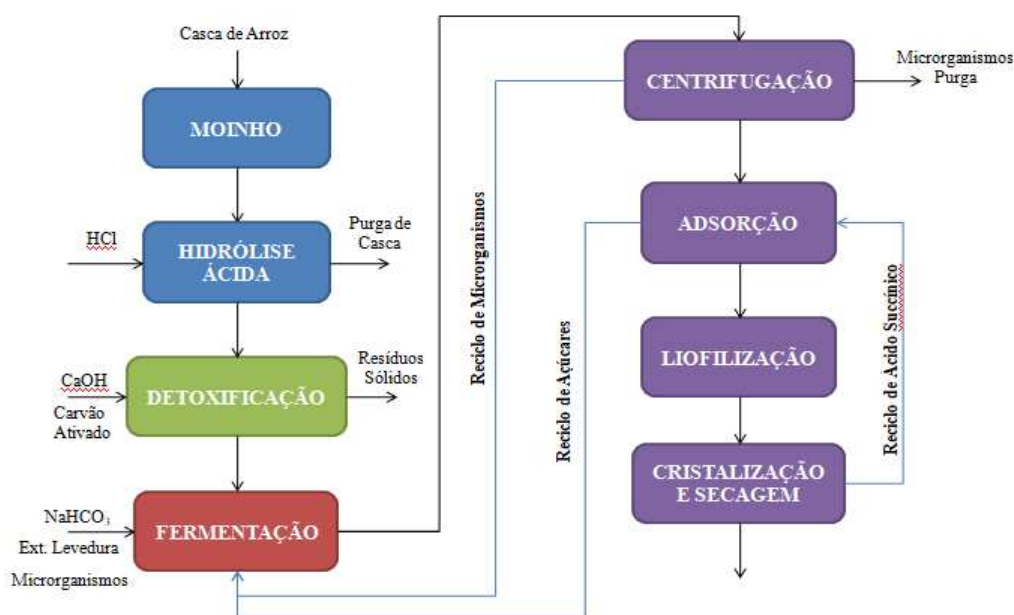


Figura 2.5: Fluxograma do processo de produção do ácido succínico fermentativo, a partir da glicose e xilose extraída da casca do arroz. (Elaboração própria)

Dentre os dois processos existem algumas diferenças entre as etapas envolvidas, cuja análise comparativa está apresentada na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Comparação entre os métodos de produção com diferentes substratos

| Indicadores \ Substrato do Processo | | Bagaço da Cana de Açúcar | Casca de Arroz |
|-------------------------------------|---------------|--------------------------|--------------------|
| Pré-tratamento e Detoxificação | Glicose (g/L) | 6,6 | 18,5 |
| | Xilose (g/L) | 57,9 | 2,97 |
| Fermentação (gProduto/gSubstrato) | | 0,45 | 0,125 |
| Fonte de CO ₂ | | CO ₂ | NaHCO ₃ |
| Tempo de Fermentação (h) | | 72 | 54 |
| Pureza dos Cristais (% mássica) | | 98,1 | 80 |

O processo que utiliza como substrato cana de açúcar é mais vantajoso tecnicamente em relação ao pré tratamento. A concentração de açúcares no caldo da entrada das dornas de fermentação é três vezes o valor da concentração com o processo de casca de arroz. A produtividade na fermentação em relação a biomassa também evidencia o processo com a cana de açúcar ser mais vantajoso, mostrando uma diferença de 0,325 g de produto por grama de substrato; no entanto, o tempo de fermentação do processo com a casca de arroz é menor em 18h.

Em relação à fonte de carbono, o processo com bagaço é feito borbulhando CO₂ enquanto no outro é usado bicarbonato de sódio, durante as fermentações. Na etapa de separação do produto de interesse o método usado no processo com casca de arroz gera um cristal com pureza mássica de 80% e no processo com cana um cristal com 98,1% de pureza.

2.4. Mercado de Ácido Succínico

Em pesquisas realizadas por jornais eletrônicos relacionadas ao mercado industrial foi possível traçar o desenvolvimento do ácido succínico e a expansão do mercado. Uma pesquisa realizada pelo *Grand View Research*, usando dados de 2013 a 2015 de grandes produtoras do

mercado estimou-se que em 2019 movimentaria 181,6 milhões de dólares e para o período de 2015 a 2022 o crescimento médio anual do mercado seria de 9,2 %, chegando a 237,8 milhões de dólares em 2022.

Em outra fonte *Reports and Data*, embasada da mesma maneira que a pesquisa do *Grand View Research*, publicada em 2020, usando dados de 2019 das empresas, verificou-se que o mercado era de 137,42 milhões de dólares e, portanto o crescimento médio anual desse mercado foi de 1,36% de 2015 a 2019. Segundo os dados da *Reports and Data* haverá um CAGR de 6,7% até o ano de 2027, onde poderá alcançar 232,17 milhões de dólares.

Já o *Market Data Forecast*, calculou com dados de 2019 também, numa publicação de 2020, um mercado de 138 milhões de dólares e CAGR de 6,2 % até 2025, alcançando aproximadamente 187 milhões de dólares. As duas projeções dos estudos econômicos de crescimento do mercado estão bem próximas. Essas pesquisas mostram que o mercado tem crescido cada vez mais e tem perspectiva de crescimento contínuo.

Em relação ao valor do produto encontrado no mercado, foram verificados valores de US\$ 5/kg até US\$ 9/kg quando só era produzido por fonte petroquímica; houve uma redução significativa de preço por volta de 2013, quando o ácido succínico derivado do petróleo valia de US\$ 2,40/kg a US\$ 2,60/kg e o produzido via rota fermentativa variava entre US\$ 2,86/kg e US\$ 3,00/kg.

Devido aos avanços tecnológicos na engenharia têm-se reduzido os valores como foi percebido principalmente na via fermentativa, que apelo ambiental por ser produzido a partir de matéria prima renovável e devido ao uso de dióxido de carbono (um dos gases causadores do efeito estufa global) no metabolismo dos organismos fermentadores. Além disso, houve avanços em relação à fermentação seletiva e a redução de custos na separação na etapa de *downstream*, chegando a valores de US\$ 2,26/kg para a via fermentativa e em alguns casos até US\$1,00/kg (Klein et. al, 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Custos de Capital de Investimento (CAPEX)

Os custos de capital fixo englobam desde custos com os equipamentos da planta, construção, modificações necessárias no terreno, instalações auxiliares, projetos, capital de giro, transporte de equipamentos, licenças e todos os impostos envolvidos. O nível de precisão desses cálculos depende do quão minuciosa é feita a Análise de Engenharia-Econômica e do nível de maturidade do projeto dos processos industriais que serão empregados.

Em projetos de Classe 5, faz-se analogia com plantas de produção parecidas, levando em consideração dimensões e localização da planta e serão menos precisos. Já os de Classe 1, onde já se tem todo o detalhamento do projeto (com todos os materiais dos equipamentos, os equipamentos já estão dimensionados e escalonados com simulações realizadas e orçamento realizado diretamente com todas as empresas responsáveis por cada bloco ou área de construção) tem-se a maior precisão possível em termos de estimativa.

O CAPEX (*CaPitalEXpenditure*) para o presente estudo foi retirado de avaliação técnico-econômica do artigo de Klein et. al, 2017. Nesse estudo é considerada uma planta de ácido succínico integrada à produção de etanol e energia pela queima do bagaço. Os dados mais importantes utilizados como pré tratamento de matéria prima, conversão de xilose em AS pelos microrganismos e *downstream*, fundamentais na estimativa do custo, basearam-se em experimentos muito bem embasados e foi realizada a simulação da planta proposta com respectiva estimativa de custos, classificando o projeto em classe 3, onde pode ter variações de 20% a menos e até 40% a mais, no valor de CAPEX.

O valor de CAPEX do estudo era de US\$ 330,8 milhões em 2017, que foi ajustado para o ano de 2020 a partir do índice CEPCI. O valor do CEPCI referente ao ano de 2017 é de 568,82; para o ano de 2020 é de 596,2; então o CAPEX ou Custo de Investimento estimado para o ano de 2020 foi de US\$ 346,72 milhões, calculado pela equação 3.1 (Turton et. al, 2018):

$$CAPEX(2020) = CAPEX(2017) \times \frac{CEPCI(2020)}{CEPCI(2017)}$$

Equação 3.1: Ajuste temporal de CAPEX, a partir do CEPCI

3.2. Custos Operacionais (OPEX)

Os custos operacionais estão ligados com o funcionamento da empresa e podem ser divididos ainda em três grandes grupos: custos diretos de manufatura, custos fixos de manufatura e despesas gerais. Os custos diretos estão ligados diretamente a carga produtiva e caso aumente a produção, esses custos aumentarão. Por exemplo, matéria-prima, manutenção, mão-de-obra, utilidades e tratamento de rejeitos.

Para os custos fixos de manufatura, que independem do volume de produção para sua existência, são impostos de propriedades, depreciação de máquinas e equipamentos, salários, seguros prediais e segurança. Já as despesas gerais estão relacionadas com administração, venda e gerenciamento da empresa; esses custos podem até variar com o aumento de produção, mas não na mesma intensidade dos custos diretos de manufatura e normalmente não são impactados pelo volume produtivo. Exemplos desses custos são os recursos humanos, vendas, distribuição, marketing, pesquisas, desenvolvimento de produtos e processos.

Esses custos são todos em unidades monetárias por tempo. Assim para identificar a viabilidade do projeto foi feito o fluxo de caixa iniciando os gastos de OPEX (*Operational Expenditure*) a partir do ano 3 até o ano 25, considerando 25 anos o tempo de vida útil da indústria e sendo que os dois primeiros anos seriam a construção da indústria. A receita e os custos operacionais, reportados por Klein et. Al (2017), foram corrigidos para 2020 com uma taxa do IBGE chamada IPP (Índices de Preços ao Produtor) que no Brasil está ligada aos valores de produtos, serviços, energias de indústrias extrativas e de transformação.

O IPP baseia-se em dados de mais de 2100 empresas no Brasil e leva em conta para essa consulta mais de 6000 preços, para fornecer os ajustes inflacionários, e classifica as indústrias em 24 setores diferentes. No presente estudo, foi utilizada a base de cálculo de preços do setor de produtos de derivados de petróleo e de biocombustíveis. Esse índice serviu para ajuste de OPEX e

Receita. A referência utilizada foi o março de 2017, com o IPP de 113,53 e dezembro de 2020, que foi de 113,68 (IBGE, 2021).

A receita que em 2017 era de US\$ 208 milhões, passou a ser estimada em 2020 com US\$ 208,27 milhões e o OPEX que era de US\$ 117 milhões em 2017, tornou-se em 2020 US\$ 117,15 milhões, ambos ajustados pela equação 3.2, que é similar ao ajuste do CAPEX feito pelo CEPCI:

$$[Receita\ ou\ OPEX(2020)] = [Receita\ ou\ OPEX(2017)] \times \frac{IPP(2020)}{IPP(2017)}$$

.Equação 3.2: Ajuste temporal de Receita e OPEX, a partir da base IPP do IBGE

3.3. Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido é usado para analisar fluxo de caixa a partir de um ponto zero de escala de tempo. Por isso é extremamente importante que o fluxo de caixa esteja bem detalhado e o mais preciso possível. Com o fluxo de caixa realizado os valores futuros são trazidos para o presente usando uma taxa de desconto e a soma total é realizada, resultando no VPL.

Como taxa, normalmente é utilizada a taxa mínima de atratividade (TMA). Caso o VPL seja positivo, significa que há viabilidade financeira no negócio; caso o VPL seja negativo, não há viabilidade (Turton, et. al, 2018). Para o estudo de caso, a TMA utilizada foi de 12% a.a., baseando-se em investimentos com retornos de longo prazo, porém com pouquíssimos riscos.

Foram considerados 2 anos para construção da fábrica, com tempo de vida útil para a planta híbrida de 25 anos, com 34% de alíquota de imposto de renda e depreciação linear em 10 anos de 10% ao ano. Para os valores de receita foi usada a capacidade produtiva da planta em um ano, energia elétrica 4295 MWh/ano, etanol 341,4 milhões de L/ano, ácido succínico 19,7 kton/ano, e os valores de cada produto no mercado: energia elétrica a 47,27 US\$/MWh, etanol a 0,40 US\$/L e o ácido succínico por via fermentativa a 2,40 US\$/kg, chegando ao valor total de US\$ 208 milhões por ano em 2017 e US\$ 208,27 milhões por ano em 2020, conforme correção descrita anteriormente.

3.4. Taxa Interna de Retorno (TIR)

A taxa interna de retorno, assim como o VPL, tem função de auxiliar na decisão da viabilidade do projeto. Para a avaliação, deve-se comparar a TIR com a TMA. No caso de uma empresa a TMA pode depender de qual setor a empresa estará inserida e com a estrutura de capital adotada.

Caso a TIR do projeto seja maior que a TMA, o projeto será economicamente atrativo. Se elas forem iguais, há uma relação de indiferença; no entanto, caso tenha possibilidade de aumento de ganho em um tempo não analisado do projeto, tende-se a ser viável. E, por fim, caso a TIR seja menor que a TMA, então esse projeto é inviável financeiramente (Turton, et. al, 2018).

3.5. Recuperação de Investimento “Payback”

É um indicador de liquidez; serve para medir quanto tempo leva-se para recuperar o investimento inicial. Há dois tipos de *payback*, o simples e o descontado. O simples não leva em consideração a mudança do dinheiro no tempo; portanto, tende-se a obter resultados de tempos de *payback* menores, mas não é usual em análises econômicas, servindo mais para fins de conhecimento acadêmico.

O *payback* descontado mede quanto tempo levou para restituir o investimento inicial levando em consideração o custo de oportunidade ou a mudança do valor do dinheiro no tempo; ou seja, quando o VPL acumulado for igual a zero, significa que o valor inicial foi restituído e partir desta data é considerado lucro. O *payback* apenas mede em quanto tempo o capital será restituído, mas não mede o ganho de um projeto, pois não leva em consideração toda a vida útil do projeto. Neste estudo de caso será calculado o *payback* descontado para os cenários propostos (Turton et. al, 2018).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estudo de Caso: Análise econômica da produção de ácido succínico em biorrefinaria de cana de açúcar

Para as estimativas de CAPEX, OPEX e Receita, feitas com as simulações e avaliação econômica de biorrefinaria para a produção de energia, etanol e ácido succínico ajustadas de Klein, et. Al (2017), então montou-se o fluxo de caixa mostrado na tabela 4.1, considerando o CAPEX totalmente gasto no ano 1 e após 2 anos de construção, iniciaram-se os primeiros faturamentos resultantes das receitas dos produtos, dos quais foram subtraídos os gastos de OPEX, para cada ano, considerando 25 anos a vida útil da indústria, resultando na última coluna, o Lucro Bruto.

Tabela 4.1: Fluxo de caixa com lucro bruto

| ANO | CAPEX | RECEITA | OPEX | LUCRO BRUTO |
|-----|-------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | \$ 346.722.970,36 | \$ - | \$ - | \$ -346.722.970,36 |
| 2 | | \$ - | \$ - | \$ - |
| 3 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 4 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 5 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 6 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 7 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 8 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 9 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 10 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 11 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 12 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 13 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 14 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 15 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 16 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 17 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 18 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 19 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 20 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 21 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 22 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 23 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 24 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |
| 25 | | \$208.274.817,23 | \$ 117.154.584,69 | \$ 91.120.232,54 |

Com o cálculo de lucro bruto e a depreciação linear em 10 anos da indústria, foram obtidos os valores de base para cálculo do imposto de renda a 34% e obtido o fluxo de caixa com Lucro Líquido, presente na tabela 4.2. O lucro líquido é maior durante o período em que o valor de base de cálculo do imposto de renda pode ser descontado do lucro bruto considerando a depreciação dos equipamentos. Isso é extremamente importante de ser considerado porque ocorre um aumento muito grande no VPL, a partir dessa consideração.

Tabela 4.2: Fluxo de caixa com depreciação e imposto de renda

| ANO | LUCRO BRUTO | DEPRECIÇÃO | BASE DE CÁLCULO (IRR) | IRR | LUCRO LÍQUIDO |
|-----|-------------------|------------------|--------------------------|------------------|--------------------|
| 1 | \$-346.722.970,36 | | \$ - | \$ - | \$ -346.722.970,36 |
| 2 | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - |
| 3 | \$ 91.120.232,54 | \$ 34.672.297,04 | \$ 56.447.935,50 | \$ 19.192.298,07 | \$ 71.927.934,47 |
| 4 | \$ 91.120.232,54 | \$ 34.672.297,04 | \$ 56.447.935,50 | \$ 19.192.298,07 | \$ 71.927.934,47 |
| 5 | \$ 91.120.232,54 | \$ 34.672.297,04 | \$ 56.447.935,50 | \$ 19.192.298,07 | \$ 71.927.934,47 |
| 6 | \$ 91.120.232,54 | \$ 34.672.297,04 | \$ 56.447.935,50 | \$ 19.192.298,07 | \$ 71.927.934,47 |
| 7 | \$ 91.120.232,54 | \$ 34.672.297,04 | \$ 56.447.935,50 | \$ 19.192.298,07 | \$ 71.927.934,47 |
| 8 | \$ 91.120.232,54 | \$ 34.672.297,04 | \$ 56.447.935,50 | \$ 19.192.298,07 | \$ 71.927.934,47 |
| 9 | \$ 91.120.232,54 | \$ 34.672.297,04 | \$ 56.447.935,50 | \$ 19.192.298,07 | \$ 71.927.934,47 |
| 10 | \$ 91.120.232,54 | \$ 34.672.297,04 | \$ 56.447.935,50 | \$ 19.192.298,07 | \$ 71.927.934,47 |
| 11 | \$ 91.120.232,54 | \$ 34.672.297,04 | \$ 56.447.935,50 | \$ 19.192.298,07 | \$ 71.927.934,47 |
| 12 | \$ 91.120.232,54 | \$ 34.672.297,04 | \$ 56.447.935,50 | \$ 19.192.298,07 | \$ 71.927.934,47 |
| 13 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |
| 14 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |
| 15 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |
| 16 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |
| 17 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |
| 18 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |
| 19 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |
| 20 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |
| 21 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |
| 22 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |
| 23 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |
| 24 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |
| 25 | \$ 91.120.232,54 | | \$ 91.120.232,54 | \$ 30.980.879,06 | \$ 60.139.353,47 |

Com a tabela do lucro líquido foi calculada a coluna que serve para base de cálculo do VPL com uma taxa mínima de atratividade de 12% ao ano e considerando o ano 1 como tempo presente. Com o somatório do VPL foi obtido o valor US\$ 127,20 milhões, a taxa interna de retorno foi de

16,73% e o *payback* foi de 11 anos e 3 meses, que é o tempo em que o somatório do VPL atinge valor nulo, conforme a tabela 4.3. Esses resultados mostram um cenário positivo (VPL > 0, TIR > TMA) para implementação da planta de ácido succínico a partir do bagaço da cana de açúcar residual da extração do caldo para produção de etanol; cabe salientar que tal planta de produção de ácido succínico é integrada à planta de produção de etanol e de venda de energia por co-geração.

Tabela 4.3: Valores de VPL anual

| ANO | LUCRO LÍQUIDO | BASE DE CÁLCULO VPL | VPL ACUMULADO |
|-----|--------------------|------------------------|--------------------|
| 1 | \$ -346.722.970,36 | \$ -346.722.970,36 | \$ -346.722.970,36 |
| 2 | \$ - | \$ - | \$ -346.722.970,36 |
| 3 | \$ 71.927.934,47 | \$ 57.340.508,98 | \$ -289.382.461,38 |
| 4 | \$ 71.927.934,47 | \$ 51.196.883,02 | \$ -238.185.578,36 |
| 5 | \$ 71.927.934,47 | \$ 45.711.502,70 | \$ -192.474.075,66 |
| 6 | \$ 71.927.934,47 | \$ 40.813.841,69 | \$ -151.660.233,97 |
| 7 | \$ 71.927.934,47 | \$ 36.440.930,08 | \$ -115.219.303,89 |
| 8 | \$ 71.927.934,47 | \$ 32.536.544,72 | \$ -82.682.759,17 |
| 9 | \$ 71.927.934,47 | \$ 29.050.486,35 | \$ -53.632.272,81 |
| 10 | \$ 71.927.934,47 | \$ 25.937.934,25 | \$ -27.694.338,57 |
| 11 | \$ 71.927.934,47 | \$ 23.158.869,86 | \$ -4.535.468,71 |
| 12 | \$ 71.927.934,47 | \$ 20.677.562,38 | \$ 16.142.093,67 |
| 13 | \$ 60.139.353,47 | \$ 15.436.274,14 | \$ 31.578.367,81 |
| 14 | \$ 60.139.353,47 | \$ 13.782.387,63 | \$ 45.360.755,44 |
| 15 | \$ 60.139.353,47 | \$ 12.305.703,24 | \$ 57.666.458,68 |
| 16 | \$ 60.139.353,47 | \$ 10.987.235,03 | \$ 68.653.693,71 |
| 17 | \$ 60.139.353,47 | \$ 9.810.031,28 | \$ 78.463.724,99 |
| 18 | \$ 60.139.353,47 | \$ 8.758.956,50 | \$ 87.222.681,49 |
| 19 | \$ 60.139.353,47 | \$ 7.820.496,88 | \$ 95.043.178,37 |
| 20 | \$ 60.139.353,47 | \$ 6.982.586,50 | \$ 102.025.764,87 |
| 21 | \$ 60.139.353,47 | \$ 6.234.452,23 | \$ 108.260.217,10 |
| 22 | \$ 60.139.353,47 | \$ 5.566.475,20 | \$ 113.826.692,30 |
| 23 | \$ 60.139.353,47 | \$ 4.970.067,15 | \$ 118.796.759,45 |
| 24 | \$ 60.139.353,47 | \$ 4.437.559,95 | \$ 123.234.319,40 |
| 25 | \$ 60.139.353,47 | \$ 3.962.107,10 | \$ 127.196.426,50 |

Para certificação de viabilidade de cenários, foram realizados mais dois fluxos de caixa, um mais otimista e outro mais pessimista. Para o cenário otimista foi elaborado um fluxo de caixa considerando o mesmo investimento inicial, porém com o aumento na receita e no OPEX de 10%; assim, pode-se visualizar quão maior pode ser o alcance de rentabilidade.

Os custos operacionais que eram de US\$ 117,15 milhões passaram a ser US\$ 128,87 milhões. Já a receita de US\$ 208,27 milhões foi para US\$ 229,10 milhões, formulando um novo cenário de lucro bruto, conforme indicado na tabela 4.4:

Tabela 4.4: Fluxo de caixa com lucro bruto em cenário otimista

| ANO | CAPEX | RECEITA | OPEX | LUCRO BRUTO |
|-----|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| 1 | \$ 346.722.970,36 | \$ - | \$ - | \$-346.722.970,36 |
| 2 | | \$ - | \$ - | \$ - |
| 3 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 4 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 5 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 6 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 7 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 8 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 9 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 10 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 11 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 12 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 13 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 14 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 15 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 16 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 17 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 18 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 19 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 20 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 21 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 22 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 23 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 24 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |
| 25 | | \$ 229.102.298,95 | \$128.870.043,16 | \$ 100.232.255,79 |

Nesse novo cenário houve um aumento anual do ano 3 até o ano 25 de US\$ 9,11 milhões, aumentando assim o valor Imposto de Renda, o Lucro Líquido e, conseqüentemente, aumentou o VPL, a TIR e diminuiu tempo de payback, que foram de US\$ 168,64 milhões, 18,14% e 10 anos, respectivamente, como mostram as tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5: Fluxo de caixa com depreciação e imposto de renda, em cenário otimista

| ANO | LUCRO BRUTO | DEPRECIÇÃO | BASE DE CÁLCULO (IRR) | IRR | LUCRO LÍQUIDO |
|-----|--------------------|------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|
| 1 | \$ -346.722.970,36 | | \$ - | \$ - | \$ -346.722.970,36 |
| 2 | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - | \$ - |
| 3 | \$ 100.232.255,79 | \$ 34.672.297,04 | \$ 65.559.958,76 | \$22.290.385,98 | \$ 77.941.869,81 |
| 4 | \$ 100.232.255,79 | \$ 34.672.297,04 | \$ 65.559.958,76 | \$22.290.385,98 | \$ 77.941.869,81 |
| 5 | \$ 100.232.255,79 | \$ 34.672.297,04 | \$ 65.559.958,76 | \$22.290.385,98 | \$ 77.941.869,81 |
| 6 | \$ 100.232.255,79 | \$ 34.672.297,04 | \$ 65.559.958,76 | \$22.290.385,98 | \$ 77.941.869,81 |
| 7 | \$ 100.232.255,79 | \$ 34.672.297,04 | \$ 65.559.958,76 | \$22.290.385,98 | \$ 77.941.869,81 |
| 8 | \$ 100.232.255,79 | \$ 34.672.297,04 | \$ 65.559.958,76 | \$22.290.385,98 | \$ 77.941.869,81 |
| 9 | \$ 100.232.255,79 | \$ 34.672.297,04 | \$ 65.559.958,76 | \$22.290.385,98 | \$ 77.941.869,81 |
| 10 | \$ 100.232.255,79 | \$ 34.672.297,04 | \$ 65.559.958,76 | \$22.290.385,98 | \$ 77.941.869,81 |
| 11 | \$ 100.232.255,79 | \$ 34.672.297,04 | \$ 65.559.958,76 | \$22.290.385,98 | \$ 77.941.869,81 |
| 12 | \$ 100.232.255,79 | \$ 34.672.297,04 | \$ 65.559.958,76 | \$22.290.385,98 | \$ 77.941.869,81 |
| 13 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |
| 14 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |
| 15 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |
| 16 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |
| 17 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |
| 18 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |
| 19 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |
| 20 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |
| 21 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |
| 22 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |
| 23 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |
| 24 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |
| 25 | \$ 100.232.255,79 | | \$ 100.232.255,79 | \$34.078.966,97 | \$ 66.153.288,82 |

Tabela 4.6: Valores de VPL anual, em cenário otimista

| ANO | LUCRO LÍQUIDO | BASE DE CÁLCULO VPL | VPL ACUMULADO |
|-----|--------------------|------------------------|--------------------|
| 1 | \$ -346.722.970,36 | \$ -346.722.970,36 | \$ -346.722.970,36 |
| 2 | \$ - | \$ - | \$ -346.722.970,36 |
| 3 | \$ 77.941.869,81 | \$ 62.134.781,42 | \$ -284.588.188,94 |
| 4 | \$ 77.941.869,81 | \$ 55.477.483,41 | \$ -229.110.705,53 |
| 5 | \$ 77.941.869,81 | \$ 49.533.467,33 | \$ -179.577.238,20 |
| 6 | \$ 77.941.869,81 | \$ 44.226.310,12 | \$ -135.350.928,08 |
| 7 | \$ 77.941.869,81 | \$ 39.487.776,89 | \$ -95.863.151,19 |
| 8 | \$ 77.941.869,81 | \$ 35.256.943,65 | \$ -60.606.207,53 |
| 9 | \$ 77.941.869,81 | \$ 31.479.413,98 | \$ -29.126.793,56 |
| 10 | \$ 77.941.869,81 | \$ 28.106.619,62 | \$ -1.020.173,94 |
| 11 | \$ 77.941.869,81 | \$ 25.095.196,09 | \$ 24.075.022,15 |
| 12 | \$ 77.941.869,81 | \$ 22.406.425,08 | \$ 46.481.447,23 |
| 13 | \$ 66.153.288,82 | \$ 16.979.901,56 | \$ 63.461.348,79 |
| 14 | \$ 66.153.288,82 | \$ 15.160.626,39 | \$ 78.621.975,18 |
| 15 | \$ 66.153.288,82 | \$ 13.536.273,56 | \$ 92.158.248,74 |
| 16 | \$ 66.153.288,82 | \$ 12.085.958,54 | \$ 104.244.207,28 |
| 17 | \$ 66.153.288,82 | \$ 10.791.034,41 | \$ 115.035.241,69 |
| 18 | \$ 66.153.288,82 | \$ 9.634.852,15 | \$ 124.670.093,84 |
| 19 | \$ 66.153.288,82 | \$ 8.602.546,56 | \$ 133.272.640,40 |
| 20 | \$ 66.153.288,82 | \$ 7.680.845,15 | \$ 140.953.485,55 |
| 21 | \$ 66.153.288,82 | \$ 6.857.897,45 | \$ 147.811.383,00 |
| 22 | \$ 66.153.288,82 | \$ 6.123.122,72 | \$ 153.934.505,73 |
| 23 | \$ 66.153.288,82 | \$ 5.467.073,86 | \$ 159.401.579,59 |
| 24 | \$ 66.153.288,82 | \$ 4.881.315,95 | \$ 164.282.895,54 |
| 25 | \$ 66.153.288,82 | \$ 4.358.317,81 | \$ 168.641.213,35 |

Outro cenário proposto em oposição ao otimista foi considerando uma queda de 10% em todas as receitas e OPEX do ano 3 até o ano 25, para um o fluxo de caixa com lucros brutos anuais inferiores ao cenário padrão. A receita que era US\$ 208,27 milhões caiu para US\$ 187,45 milhões e o OPEX variou de US\$ 117,15 milhões, para US\$ 105,44 milhões, conforme demonstrado na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Fluxo de caixa com lucro bruto, em cenário pessimista

| ANO | CAPEX | RECEITA | OPEX | LUCRO BRUTO |
|-----|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | \$346.722.970,36 | \$ - | \$ - | \$ -346.722.970,36 |
| 2 | | \$ - | \$ - | \$ - |
| 3 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 4 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 5 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 6 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 7 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 8 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 9 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 10 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 11 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 12 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 13 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 14 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 15 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 16 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 17 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 18 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 19 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 20 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 21 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 22 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 23 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 24 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |
| 25 | | \$ 187.447.335,51 | \$ 105.439.126,22 | \$ 82.008.209,28 |

Na proposta pessimista as tabelas 4.8 e 4.9 mostram que houve uma redução anual de Lucro Bruto do ano 3 até o ano 25 com a mesma variação de US\$9,11 milhões, diminuindo o Imposto de Renda, Lucro Líquido e consequentemente reduziu o VPL para US\$ 85,75 milhões, a TIR foi 15,26% e aumentou tempo de *payback* para 13 anos.

Tabela 4.8: Fluxo de caixa com depreciação e imposto de renda, em cenário pessimista

| ANO | LUCRO BRUTO | DEPRECIÇÃO | BASE DE CÁLCULO (IRR) | | IRR | LUCRO LÍQUIDO | |
|-----|-------------------|------------------|--------------------------|---------------|-----|---------------|--------------------|
| 1 | \$-346.722.970,36 | | \$ | - | \$ | - | \$ -346.722.970,36 |
| 2 | \$ - | \$ - | \$ | - | \$ | - | \$ - |
| 3 | \$ 82.008.209,28 | \$ 34.672.297,04 | \$ | 47.335.912,25 | \$ | 16.094.210,16 | \$ 65.913.999,12 |
| 4 | \$ 82.008.209,28 | \$ 34.672.297,04 | \$ | 47.335.912,25 | \$ | 16.094.210,16 | \$ 65.913.999,12 |
| 5 | \$ 82.008.209,28 | \$ 34.672.297,04 | \$ | 47.335.912,25 | \$ | 16.094.210,16 | \$ 65.913.999,12 |
| 6 | \$ 82.008.209,28 | \$ 34.672.297,04 | \$ | 47.335.912,25 | \$ | 16.094.210,16 | \$ 65.913.999,12 |
| 7 | \$ 82.008.209,28 | \$ 34.672.297,04 | \$ | 47.335.912,25 | \$ | 16.094.210,16 | \$ 65.913.999,12 |
| 8 | \$ 82.008.209,28 | \$ 34.672.297,04 | \$ | 47.335.912,25 | \$ | 16.094.210,16 | \$ 65.913.999,12 |
| 9 | \$ 82.008.209,28 | \$ 34.672.297,04 | \$ | 47.335.912,25 | \$ | 16.094.210,16 | \$ 65.913.999,12 |
| 10 | \$ 82.008.209,28 | \$ 34.672.297,04 | \$ | 47.335.912,25 | \$ | 16.094.210,16 | \$ 65.913.999,12 |
| 11 | \$ 82.008.209,28 | \$ 34.672.297,04 | \$ | 47.335.912,25 | \$ | 16.094.210,16 | \$ 65.913.999,12 |
| 12 | \$ 82.008.209,28 | \$ 34.672.297,04 | \$ | 47.335.912,25 | \$ | 16.094.210,16 | \$ 65.913.999,12 |
| 13 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |
| 14 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |
| 15 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |
| 16 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |
| 17 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |
| 18 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |
| 19 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |
| 20 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |
| 21 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |
| 22 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |
| 23 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |
| 24 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |
| 25 | \$ 82.008.209,28 | | \$ | 82.008.209,28 | \$ | 27.882.791,16 | \$ 54.125.418,13 |

Tabela 4.9: Valores de VPL anual, em cenário pessimista

| ANO | LUCRO LÍQUIDO | BASE DE CÁLCULO VPL | VPL ACUMULADO |
|-----|--------------------|------------------------|--------------------|
| 1 | \$ -346.722.970,36 | \$ -346.722.970,36 | \$ -346.722.970,36 |
| 2 | \$ - | \$ - | \$ -346.722.970,36 |
| 3 | \$ 65.913.999,12 | \$ 52.546.236,54 | \$ -294.176.733,82 |
| 4 | \$ 65.913.999,12 | \$ 46.916.282,63 | \$ -247.260.451,19 |
| 5 | \$ 65.913.999,12 | \$ 41.889.538,06 | \$ -205.370.913,13 |
| 6 | \$ 65.913.999,12 | \$ 37.401.373,27 | \$ -167.969.539,86 |
| 7 | \$ 65.913.999,12 | \$ 33.394.083,28 | \$ -134.575.456,58 |
| 8 | \$ 65.913.999,12 | \$ 29.816.145,78 | \$ -104.759.310,80 |
| 9 | \$ 65.913.999,12 | \$ 26.621.558,73 | \$ -78.137.752,07 |
| 10 | \$ 65.913.999,12 | \$ 23.769.248,87 | \$ -54.368.503,20 |
| 11 | \$ 65.913.999,12 | \$ 21.222.543,63 | \$ -33.145.959,57 |
| 12 | \$ 65.913.999,12 | \$ 18.948.699,67 | \$ -14.197.259,90 |
| 13 | \$ 54.125.418,13 | \$ 13.892.646,73 | \$ -304.613,17 |
| 14 | \$ 54.125.418,13 | \$ 12.404.148,86 | \$ 12.099.535,70 |
| 15 | \$ 54.125.418,13 | \$ 11.075.132,91 | \$ 23.174.668,61 |
| 16 | \$ 54.125.418,13 | \$ 9.888.511,53 | \$ 33.063.180,14 |
| 17 | \$ 54.125.418,13 | \$ 8.829.028,15 | \$ 41.892.208,30 |
| 18 | \$ 54.125.418,13 | \$ 7.883.060,85 | \$ 49.775.269,15 |
| 19 | \$ 54.125.418,13 | \$ 7.038.447,19 | \$ 56.813.716,34 |
| 20 | \$ 54.125.418,13 | \$ 6.284.327,85 | \$ 63.098.044,18 |
| 21 | \$ 54.125.418,13 | \$ 5.611.007,01 | \$ 68.709.051,19 |
| 22 | \$ 54.125.418,13 | \$ 5.009.827,68 | \$ 73.718.878,87 |
| 23 | \$ 54.125.418,13 | \$ 4.473.060,43 | \$ 78.191.939,30 |
| 24 | \$ 54.125.418,13 | \$ 3.993.803,96 | \$ 82.185.743,26 |
| 25 | \$ 54.125.418,13 | \$ 3.565.896,39 | \$ 85.751.639,65 |

Com os resultados de todos os cenários para os fluxos de caixa projetados para o processo de produção fermentativa do ácido succínico a partir do bagaço da cana de açúcar por via fermentativa integrado à produção de etanol e energia pode-se dizer que essa rota de produção de ácido succínico mostra-se completamente favorável do ponto de vista econômico; os resultados dos 3 cenários podem ser verificados conjuntamente na tabela 4.10.

Tabela 4.10: Comparação entre resultados econômicos entre os cenários.

| Cenário | VPL (12% a.a.) | TIR | Payback (anos) |
|------------|-------------------|--------|----------------|
| Inicial | R\$127.196.426,50 | 16,73% | 11,26 |
| Otimista | R\$168.641.213,35 | 18,14% | 10,05 |
| Pessimista | R\$ 85.751.639,65 | 15,26% | 13,03 |

Entre os cenários há viabilidade econômica em todos e mesmo no pior cenário é alcançado VPL e TIR que favoreçam a implantação da indústria. Para maior segurança financeira da planta de produção é preciso garantir a receita do etanol e da energia, que já possuem um mercado muito mais sólido e são responsáveis por 66% e 11% da receita, respectivamente, totalizando 77% da receita total, de acordo com Klein, et. al (2017).

Portanto, para esse modelo que une um mercado sólido com inovação, representada pela produção de ácido succínico por via fermentativa, tem-se um ótimo meio de introduzir uma rota alternativa de maneira competitiva com as rotas petroquímicas. Outros cenários similares podem ser estudados e se mostrarem favoráveis, como a indústria de arroz produzindo AS a partir da casca de arroz ou a indústria de extração do óleo de soja produzindo AS a partir da casca da soja.

5. CONCLUSÃO

A partir do conhecimento dos processos fermentativos de produção de ácido succínico verifica-se que quanto maior o desenvolvimento dos métodos de produção, mais otimizados são os processos e mais dados para os cálculos econômicos são fornecidos, como condições de operações e consumos de utilidades. O processo que utiliza casca de arroz para produzir AS está em um estágio inicial para o qual foram realizados experimentos laboratoriais, sem escala industrial e onde pode ser muito evoluído ainda e otimizado; além disso, a destinação final da casca de arroz usualmente não possui renda favorável como a produção de energia a partir do bagaço de cana de açúcar. Portanto, pode ser interessante a produção de AS quando integrada à indústria do Arroz, a fim de se aumentar a lucratividade da cadeia.

No processo com bagaço de cana que está bem mais avançado e otimizado e fornece base de dados suficientes para uma avaliação econômica de classe 3, a avaliação econômica realizada identifica grande viabilidade econômica na implementação da planta de produção de ácido succínico por via fermentativa com o bagaço da cana, mesmo após a atualização dos valores de receita, OPEX e CAPEX de 2017 para 2020. Os valores obtidos com os fluxos de caixa se mostraram muito vantajosos para os valores de VPL, TIR e retorno do capital investido, até no cenário mais pessimista com redução de receitas. Outro fator que agrega viabilidade ao projeto é o mercado do ácido succínico que é crescente e tem expectativa de aceleração no crescimento, em especial no cenário pós pandemia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEVILAQUA, D., B.; **Produção Biotecnológica de Ácido Succínico a partir de casca de arroz.** Tese(doutorado) – Universidade Federal de Santa Maria, Faculdade de Química, Santa Maria, RS, Brasil, 2013

CHENG, K., K.; ZHAO, X., B.; ZENG, J.; ZHANG, J., A.; **Biotechnological production of succinic acid: current state and perspectives.** Wiley Online Library Biofuels, Bioprod. Bioref., v. 6: p. 302-318, 2012

FUMAGALLI, L.C.; **Succinic Acid and Succinic Anhydride.** Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. Copyright John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved. Vol. 22 p. 535

GRANDA VIEW FORECAST; **Succinic Acid Market size, share & trends Analysis report by Application , by region (North America, Europe, Asia Pacific, Row) and segments Forecasts, 2015-2020.** Março, 2016. (“Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/succinic-acid-market>”).

IBGE, **Índice de Preços ao Produtor – Indústrias Extrativas e de Transformação.** Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2 de agosto de 2021. (“Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/precos-e-custos/9282-indice-de-precos-ao-produtor-industrias-extrativas-e-de-transformacao.html>”)

KLEIN, B., C.; SILVA, J., F., L.; JUNQUEIRA, T., L.; RABELO, S.,C.; ARRUDA, P., V.; IENCZAK, J., L.; MANTELTO, P., E.; PRADELLA, J., G., C.; VAZ JUNIOR, S.; BONOMI, A.; **Process development and techno-economic analysis of bio-based succinic acid derived from pentoses integrated to a surgarcanebiorefinery.** Wiley Online Library Biofuels, Bioprod. Bioref. 28 de junho de 2017.

MARKET DATA FORECAST; **Succinic Acid Market by origin (Petro-Based Succinic Acid), end - use industry (food & beverages, industrial pharmaceutical) and region (Latin America, North America, Asia Pacific, Europe, Middle East and Africa) – Industry Analysis, Size, Share growth, Trends, and Forecasts, 2020-2025.** Fevereiro, 2020. (“Disponível em: <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/succinic-acid-market>”).

MATOS, R. **População, recursos naturais e poder territorializado: uma perspectiva supratemporal.** R. bras. Est. Pop., Rio de Janeiro, v. 29, n. 2, p. 451-476, jul./dez. 2012.

MERK S.A. **Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico – FISPQ**ÁCIDOSUCCÍNICO PARASÍNTese. 2021

MOON, S.,K.; WEE, Y., T.; YUN, T., S.; RYU, H., W.; **Production of fumaric acid using rice bran and subsequent conversion to succinic acid through a two-step process.** Applied Biochemistry and Biotechnology, v.113/116, p.843-855, 2004.

NGHIEM, N.P.; DAVISON, B.E.S.; RICHARDSON, G.R. **Production of succinic acid by Anaerobiospirillum succiniciproducens.** Applied Biochemistry and Biotechnology, v.63/65, p.565-576, 1997

OLIVEIRA, S., D.; SCHLITTLER, L., A., F., S.; ANTUNES, A., M.,S.; JUNIOR, N., P. **Mapeamento Tecnológico da Produção do Bio-Ácido Succínico no cenário Brasileiro.** Escola de Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Academia de Propriedade Intelectual do INPI, Instituto Nacional de Propriedade Industrial Caderno de **Prospecção** - ISSN 1983-1358, 2317-0026, 2013, vol.6, n.2, p.162-173

PATERAKI, C.; PATSALOU, M.; VLYSIDIS, A.; KOPSAHELIS, N.; WEBB, C.; KOUTINAS A., A.; KOUTINAS, M. **Actinobacillus succinogenes: Advances on succinic acid production and prospects for development of integrated biorefineries.** Biochemical Engineering Journal, 2016.

REPORTS AND DATA; **Succinic Acid Market by type (Petro-Based, Bio-Based), by Applications (food & beverages, pharmaceutical, personal care, coatings, industrial and others), by regions Forecasts to 2027.** 19 de Agosto de 2020. (“Disponível em: <https://www.reportsanddata.com/report-detail/succinic-acid-market>”).

SONG, H., S.; LEE, S., Y. **Production of succinic acid by bacterial fermentation.** Enzyme and Microbial Technology, v 39, p. 352-361, 2006

TURTON, R.; SHAEIWITZ, J., A.; BHATTACHARYYA, D.; WHITING, W., B. **Analysis, synthesis and design of chemical processes.** Pearson Education, 2018.

WERPY, T.; PETERSEN, G. **Top value added chemicals from biomass.** Volume I – Results of screening for potential candidates from sugars and synthesis gas. US Department of Energy (US DOE) Oak Ridge, USA, 2004

ZEIKUS, J.G.; JAIN, M.K.; ELANKOVAN, P. **Biotechnology of succinic acid production and markets for derived industrial products**. Applied Microbiology Biotechnology, v.51, p.545-552, 1999