

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

GUSTAVO ARAÚJO ALVES

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE
BIODIESEL DE GORDURA SUÍNA: UMA ESTIMATIVA BASEADA EM
DADOS EXPERIMENTAIS EM ESCALA DE BANCADA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA

2013

GUSTAVO ARAÚJO ALVES

**ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE
BIODIESEL DE GORDURA SUÍNA: UMA ESTIMATIVA BASEADA EM
DADOS EXPERIMENTAIS EM ESCALA DE BANCADA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Coordenação Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Eyng

Co-orientador: Prof. Msc. Evandro Konopatzki

MEDIANEIRA

2013



TERMO DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE GORDURA SUÍNA: UMA ESTIMATIVA BASEADA EM DADOS EXPERIMENTAIS EM ESCALA DE BANCADA

por

GUSTAVO ARAÚJO ALVES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 18 de dezembro de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Eduardo Eyng
Prof.(a) Orientador(a)

Fabio Orsatto
Membro titular

Laércio Mantovani Frare
Membro titular

Evandro Konopatzki
Co-orientador

“O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso”

AGRADECIMENTOS

Prolongar-me em agradecimentos poderia atingir proporções extramundanas, por enquanto me resignarei a proporções terrenas, gostaria de aprofundar este assunto ao confabulo interessante chamado família, este inconfundível grupo de pessoas que fazem com que meus dias sejam mais interessantes e calorosos. Começando a agradecer à realização deste trabalho, a minha jovem mãe (Luciana) que com seu apoio incondicional e sem restrições me proporcionou ideias capazes de me motivar, agradecer ao apoio velado, mas objetivamente sincero de meu Padrasto (José), ao apoio serelepe de minha pequena e doce irmã (Beatriz), ao apoio carinhoso de minha Tia Livia e Tio André, ao apoio corajoso e de fé dos meus Avô e Avó (Valdenor e Lourdes), ao apoio observador de meu Tio Laércio. Ao âmbito social resigno meus agradecimentos ao apoio técnico-científico, Professor Eduardo Eyng e Professor Evandro Konopatzki.

A todos um obrigado sincero e sem medidas.

RESUMO

ALVES, Gustavo Araújo. **ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BODIESEL DE GORDURA SUÍNA: UMA ESTIMATIVA BASEADA EM DADOS EXPERIMENTAIS EM ESCALA DE BANCADA**. 2013. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2013.

O presente trabalho teve por objetivo analisar a viabilidade econômica da utilização de biodiesel a base de gordura de suínos como fonte alternativa de energia (biocombustível). O método utilizado para a análise da viabilidade econômica foi matemático (método Simplex), que busca interagir diversas variáveis buscando a obtenção de um resultado de maximização ou minimização de uma função lucro, os resultados obtidos refletiram a dificuldade em se substituir o combustível fóssil (diesel) por biocombustível devido ao alto custo de variáveis do processo como: mão-de-obra, insumos, matéria-prima e custos de energia.

Palavras-Chave: Viabilidade Econômica, Biodiesel, Método Simplex, Custos de variáveis do processo.

ABSTRACT

ALVES, Gustavo Araújo. **ECONOMIC VIABILITY EVALUATION OF BIODIESEL PRODUCTION FROM SWINE FAT: AN EXPERIMENTAL DATA BENCH SCALE BASED ESTIMATION**. 2013. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2013.

The present work aims to analyze the economic viability use of biodiesel based on fat of pigs as an alternative source of energy (biofuel). The method used for the analysis of the feasibility of economic was mathematician known as simplex method that search interact several variables to obtain a result of maximization or minimization the one profit function. The results obtains represents the difficult to change the fossil fuel per biofuel, because the biofuel have a high cost of variables process how to: costs workers, materials, energy costs.

Keys-words: Economic viability, Biodiesel, Simplex method, Costs of variables process.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 OBJETIVOS	10
1.1.1 Objetivo Geral	10
1.1.2 Objetivos Específicos	10
2 DESENVOLVIMENTO	11
2.2 A UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS COMO FONTE DE ENERGIA .	12
2.3 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS	12
2.3.1 Aproveitamento de resíduos industriais na produção de biocombustíveis	13
2.4 CONCEITOS GERAIS SOBRE PRODUÇÃO DE BIODIESEL.....	14
2.5 FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	18
2.5.1 Ferramentas matemáticas para análise de viabilidade econômica	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.2 MÉTODOS	22
3.2.2 Equação de consumo de energia.....	24
3.2.2.1 Cálculo dos calores específicos	24
3.2.2.2 Cálculo do fluxo de calor	24
3.2.2.3 Cálculo da energia gasta no processo	28
3.2.2.4 Equação de custo de energia.....	29
3.2.2.4.1 <i>Normalização da equação de transferência de calor</i>	29
3.2.2.5 Custo de mão-de-obra.....	31
3.2.2.6 Custo da Matéria-Prima.....	31
3.2.2.7 Custo de insumos.....	32
3.2.2.8 Rendimentos	33
3.2.2.8.1 <i>Normalização de códigos de delineamento composto central</i>	34
3.2.2.8.2 <i>Variáveis de apoio ao cálculo do rendimento</i>	36
3.2.2.9 Receita	36
3.2.2.10 Função Lucro	37
3.2.2.11 Método Simplex.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1 TAXAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	39
4.1.1 Coeficientes de condutividade térmica	39

4.1.2 Resistências de reator químico	39
4.1.2 Coeficiente médio de transmissão de calor por convecção.....	39
4.2 RENDIMENTO	40
4.2.1 Maximização da função Lucro	40
5 CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

“Uma das bases decisivas do progresso conseguido pela humanidade, da pré-história aos dias atuais, fundamenta-se, precisamente, na maior disponibilidade e na maior perfeição dos instrumentos com que se realiza a produção.” (ROSSETTI, 2009).

Para CETESB (2005) a inclusão da variável ambiental nas ações de melhoria das operações, e atuando desta forma sobre seus processos produtivos, obtêm-se a minimização de seus custos de produção. A vantagem de medidas de produção que visem à minimização da utilização de recursos destaca-se ainda mais se contrastada com o alto custo operacional do tratamento e da gestão dos resíduos gerados pelas indústrias.

A extinção de recursos naturais tem gerado alta competitividade entre indústrias, que buscam oferecer um produto de qualidade a baixo custo. Atualmente vem sendo realizados diversos estudos no âmbito de redução de custos de produção e também na agregação de valor de subprodutos gerados pelas indústrias.

O caso da indústria de abate de suínos é um bom exemplo de processo industrial que pode gerar subprodutos de alta viabilidade econômica.

O presente trabalho baseou-se em dados experimentais obtidos em escala de bancada para produção de biodiesel de gordura suína, buscando-se, realizar uma estimativa de viabilidade econômica plausível, justificando-se sua utilização em escala industrial. A viabilidade econômica do presente trabalho amparou-se em ferramentas matemáticas que avaliam variáveis do processo de produção de biodiesel como: custo de mão-de-obra, custo de insumos, custo de energia, buscando elucidar a substituição dos combustíveis como diesel por biocombustíveis.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Verificar a viabilidade econômica da utilização de biocombustível proveniente de gordura de suíno comercial.

1.1.2 Objetivos Específicos

Avaliar o potencial de utilização de biodiesel a partir de gordura comercial de suínos;

Determinar via método simplex a viabilidade econômica da utilização do biodiesel, comparando diferentes custos de variáveis do processo: custos de insumos, custo de energia, custo de mão-de-obra.

2 DESENVOLVIMENTO

A geração de renda, as diferentes formas de dispêndio e a acumulação de riquezas resultam da produção, considerada, como atividade econômica fundamental (ROSSETTI, 2009).

O processo produtivo apresenta um dinamismo relativo aos efeitos gerados por sua realização: estritamente ligado à natureza sociológica do ambiente, ou seja, a população; os processos produtivos estão diretamente relacionados ao crescimento, a acumulação e o bem-estar social. A busca pelo atendimento das ilimitáveis necessidades individuais e sociais aumenta o fluxo de atividades econômicas.

O modelo econômico atual necessita de observação macroscópica da ótica comportamental dos recursos naturais dentro dos fluxos de produção, atuando nesta vertente entende-se que só através do estudo sobre a disponibilidade de recursos naturais não renováveis, escassez de fontes convencionais de energia e indicadores de degradação ambiental poderá diagnosticar a capacidade da manutenção do modelo atual de economia.

O grande desafio econômico atual é como relacionar capital, processos de produção e finitude de recursos. A isto o ser humano obriga-se a rever a maneira de uso da matriz energética dos processos de produção deste século.

Redução de custos de produção; aumento de eficiência e competitividade; diminuição dos riscos de acidentes ambientais; melhoria das condições de saúde e de segurança do trabalhador; melhoria da imagem da empresa junto a consumidores, fornecedores, poder público, mercado e comunidades; ampliação de suas perspectivas de atuação no mercado interno e externo; maior acesso a linhas de financiamento; melhoria do relacionamento com os órgãos ambientais e a sociedade, entre outros. (CETESB, 2005).

As indústrias no modelo econômico atual necessitam de sistemas que possam gerar capital com a menor quantidade de recursos possíveis, compõe-se então a dialética do aumento de consumo e a capacidade da manutenção dos níveis de estoque.

2.2 A UTILIZAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS COMO FONTE DE ENERGIA

Escolher um sistema de produção energética que vise à eficiência e economia apresentará reflexos significativos no consumo final individual e coletivo e também importante modificação nos fatores produtivos. Então se fazem necessários estudos da viabilidade econômica energética; Quais os tipos de energias a serem utilizados; Quais os métodos para captação destas energias e quais as maneiras de exploração que os países precisarão para manter seus padrões de desenvolvimento, estudos estes que implicam em atender as demandas atuais por alta eficiência energética, redução de perdas, e cogeração de energia.

Para a produção de bens e serviços é necessária a utilização de energia independente da fonte com que ela seja obtida, um país necessita então produzir grandes quantidades de bens e serviços utilizando as reservas de fontes de energia não-renováveis presentes ou não em seu território.

Ainda segundo Goldemberg (2001) no Brasil existe uma grande disponibilidade de fontes renováveis de energia. O país possui grande capacidade exploratória hídrica, ou seja, as bacias hidrográficas brasileiras apresentam condições ideais para a instalação de usinas hidrelétricas. Além disso, para países em desenvolvimento as necessidades humanas básicas (alimentação, água corrente, saneamento) e a construção de infraestrutura ainda recebem prioridade, atividades estas que consomem menores quantidades de energia.

2.3 COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

Os biocombustíveis podem ser considerados os possíveis substituintes aos combustíveis fósseis. São obtidos a partir de matérias orgânicas como: óleos vegetais, gorduras animais, decomposição de dejetos, componentes estes de fácil acesso e continuamente presentes nas atividades humanas, gerando grandes volumes de matéria-prima para obtenção de energia.

Os biocombustíveis podem ser obtidos de diferentes fontes, como explica Cardoso, Rosa e Rocha (2009) o caso brasileiro de obtenção de etanol, a partir de açúcares e amido pela fermentação de leveduras (açúcares e amidos presentes na

cana-de-açúcar), podendo também ser obtidos por celulose lenhosa a partir da silvicultura energética, resíduos agrícolas.

Os produtos mais comumente usados para a produção de biocombustíveis são de óleos derivados de plantas, Ferrari *et al.* (2005): “(...) os óleos derivados de plantas são obtidos a partir de semente de girassol, soja, amendoim, caroço de algodão, semente de colza, semente de mamona, milho (...)”.

Infelizmente quando os motores a combustão operam com estes combustíveis eles apresentam baixa eficiência, devido ao poder calorífico destes combustíveis ser menor que do diesel, apresentam maior concentração de oxigênio, alto ponto de névoa e maior viscosidade, o que dificulta sua utilização em ambientes de baixas temperaturas (FERRARI *et al.*, 2005).

Uma solução para a difícil adaptação dos motores que operam à diesel seria a utilização de biocombustíveis de origem animal.

Costa Neto (2000) frisam que em oposição à baixa eficiência os biocombustíveis apresentam-se livres de enxofre, não tóxicos e facilmente biodegradáveis, além de emitirem menores quantidades de carbono à atmosfera, qualidades estas que reduzem os impactos ambientais destes tipos de combustíveis.

2.3.1 Aproveitamento de resíduos industriais na produção de biocombustíveis

Para os níveis de produção atuais, tendo como consequências a grande geração de resíduos, faz-se necessário o aproveitamento desta grande quantidade de resíduos, que muitas vezes, podem ser aproveitadas de maneira eficiente sem grande dispêndio de capital.

Os resíduos podem conter substâncias de alto valor. Se for empregada uma tecnologia adequada, este material pode ser convertido em produtos comerciais ou matérias-primas para processos secundários. Numerosas substâncias relacionadas ao processo de produção de alimentos são adequadas para separação e reciclagem (PELIZER, 2007).

Em geral as indústrias alimentícias são as maiores fornecedoras de matérias-primas para a produção de biocombustíveis.

As matérias-primas como restos de processamento de alimentos (gorduras animais, óleos vegetais, óleos de frituras), são extremamente importantes no processo de produção de biocombustíveis, por conterem elevadas taxas de triglicerídeos (ácidos graxos), matéria essencial na produção de biocombustível (FERRARI *et al.*, 2005).

Por apresentarem normalmente baixo valor comercial, os restos de processamento de alimentos apresentam dificuldade no descarte. O aproveitamento destes em processos, por exemplo, de transformação em biocombustíveis surge como alternativa para solução do problema de destinação final destes resíduos.

2.4 CONCEITOS GERAIS SOBRE PRODUÇÃO DE BIODIESEL

Biodiesel é um combustível renovável que não contém compostos de enxofre em sua composição. O biodiesel pode ser produzido a partir de gordura animal ou de óleos vegetais. Muitas espécies vegetais podem ser utilizadas, como mamona, dendê, girassol, babaçu, amendoim, pinhão manso, milho e soja, além de gordura animal, como aparas e restos de abate de aves, bovinos e suínos. Ferreira *et al.* (1997), mostra que o biodiesel também podem ser utilizados como biodiesel óleo vegetal transesterificado usado em frituras. O biodiesel pode ser utilizado puro ou misturado ao óleo diesel comum sem a necessidade de adaptação do motor.

O biodiesel encontra-se registrado na Agência de Proteção ao Ambiente (Estados Unidos) – Environment Protection Agency, USA – como combustível e como aditivo para combustíveis e, pode ser usado puro a 100% (B100), em mistura com o diesel de petróleo (B20), ou numa proporção baixa como aditivo de 1 a 5%. (FERRARI *et al.*, 2005).

Como combustível o biodiesel possui características que podem representar vantagens em relação aos combustíveis derivados de petróleo, como livres de enxofre e compostos aromáticos, número elevado de cetanos, teor elevado de oxigênio em torno de 11%, maior ponto de fulgor, menor emissão de partículas, hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono, caráter não tóxico e facilmente biodegradável. Algumas dessas características nos levam a crer que a utilização de biodiesel é uma alternativa viável para a substituição das fontes combustíveis a base de petróleo e uma diminuição de gastos com saúde pública,

pois podem evitar doenças causadas por compostos presentes nos combustíveis fósseis.

O biodiesel é comercializado misturado ao diesel. Essa mistura é caracterizada pela letra B seguida de um número correspondente a porcentagem de biodiesel adicionada à mistura, assim B5 é o biodiesel que contém 5% de biodiesel e 95% de diesel de petróleo. Segundo a lei número 11.097 de 13 de janeiro de 2005, a partir de Janeiro de 2008 foi obrigatória, em todo território nacional, a mistura B2, ou seja, 2% de biodiesel em todo diesel comercializado no país. Em Janeiro de 2013, essa obrigatoriedade passará para 5% (CARDOSO; ROSA; ROCHA, 2009).

O biodiesel possui elevado poder calorífico, o que poderia levar ao uso diretamente em motores. Entretanto, características de baixa volatilidade e alta viscosidade dificultam os processos de combustão e geram inúmeros problemas que podem comprometer a vida útil de motores. Observando estas características, busca-se melhorar a qualidade deste combustível através de tratamentos químicos, modificando a estrutura química e, conseqüentemente, as suas propriedades físicas.

O processo mais utilizado para produção de biodiesel é a transesterificação. A transesterificação de óleos vegetais e gordura animal para a obtenção de biodiesel é uma alternativa para a produção de combustíveis menos poluentes.

A reação de transesterificação obedece ao princípio de Le Chatelier, que estabelece que qualquer alteração em uma das concentrações das espécies envolvidas no equilíbrio provocará uma reação do sistema de maneira a restabelecer o equilíbrio (FERREIRA *et al.*, 1997).

Para Cardoso, Rosa e Rocha (2009) nesta reação a matéria-prima é colocada para reagir com um álcool, geralmente metanol ou etanol, em presença de um catalisador. O catalisador pode ser básico ou ácido, os catalisadores mais comumente utilizados são bases fortes como NaOH ou KOH. Os produtos são éster $R-COO-CH_3$, a partir de metanol reagente (CH_3OH) ou $R-COO-CH_2-CH_3$ a partir do etanol reagente (CH_3-CH_2-OH) e glicerol ($(OH-CH_2)_2-CHOH$). O éster é o biodiesel e deve ser separado do glicerol, o qual é imiscível no biodiesel.

Após a reação de transesterificação, obtêm-se um produto constituído de duas fases. Na fase mais densa fica a glicerina e na fase menos densa fica o éster, apresentado na Figura 01. Ambas as fases são contaminadas com álcool que não reagiu, água e impurezas.

A reação de síntese, geralmente empregada a nível industrial, utiliza uma razão molar óleo: álcool de 1:6 na presença de 0,4% de hidróxido de sódio ou de potássio, porque o meio básico apresenta melhor rendimento e menor tempo de reação do que o meio ácido. Por outro lado, o excesso de agente transesterificante (álcool primário) faz-se necessário devido ao caráter reversível da reação (COSTA NETO, 2000).

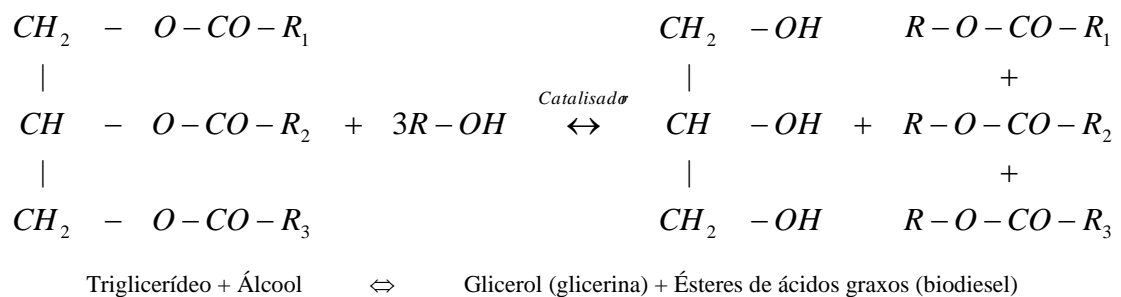
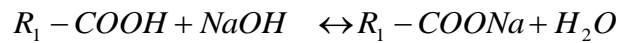


Figura 1 – Transformação de triglicerídeos em biodiesel
Fonte: Adaptado de Leung e Leung (2009)

O curso da transesterificação é influenciado por vários fatores que incluem o tipo de catalisador (alcalino ou ácido), temperatura, pureza dos reagentes (principalmente o conteúdo de água) e o teor de ácidos graxos livres.

Quanto aos álcoois, os mais frequentemente empregados são os de cadeia curta, tais como metanol, etanol, propanol e butanol. No Brasil o uso de etanol anidro é vantajoso, pois este é produzido em larga escala para ser misturado à gasolina além de ser um produto obtido através de biomassa e, dessa maneira, o processo torna-se totalmente independente do petróleo.

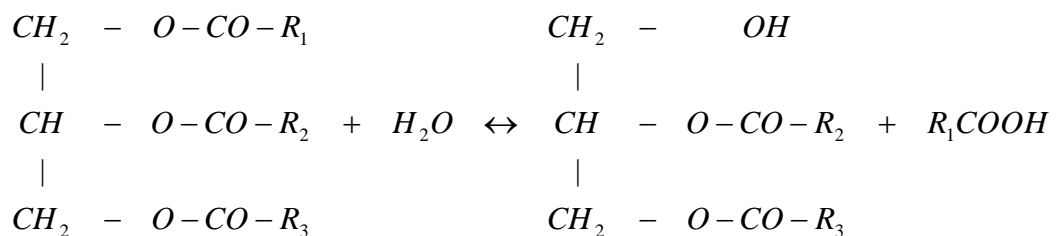
Em relação aos catalisadores a reação pode ser realizada tanto em meio básico como em meio ácido, mas ocorre de maneira mais rápida em meio básico, observando maiores rendimentos. Entretanto existem alguns pontos negativos na utilização de meios básicos como catalisadores. Algumas reações secundárias podem diminuir o rendimento da reação principal (obtenção de ésteres de ácidos graxos). Desta forma, na catálise básica, pode haver a reação de saponificação, como apresentado na Figura 02, entre ácidos graxos livres e a base (como por exemplo, NaOH ou KOH), resultando em sabão e água.



Triglicerídeo + Hidróxido de Sódio \leftrightarrow Sabão + Água

Figura 2 – Saponificação
Fonte: Adaptado de Leung e Leung (2009)

A água proveniente da reação de saponificação, somada ao teor de umidade apresentado inicialmente pela gordura, pode resultar na reação de hidrólise, como apresentado na Figura 03, que consiste na “quebra” da molécula de triglicerídeo, produzindo mais ácidos graxos livres, que por sua vez, podem participar da reação de saponificação apresentada anteriormente.



Triglicerídeo + Água \leftrightarrow Diglicerídeo + Ácido graxo livre

Figura 3 – Reação de hidrólise
Fonte: Adaptado de Leung e Leung (2009)

As reações de saponificação são extremamente prejudiciais ao processo de transesterificação, gerando dificuldades na separação destes compostos dos ésteres. Quanto maior a quantidade de sabão presentes nos ésteres menores são os níveis de pureza do biodiesel, o que leva a um menor desempenho do combustível.

Quanto aos ácidos graxos, eles participam da constituição dos monoglicerídios, diglicerídeos e triglicerídios, principais constituintes dos óleos e gorduras. Os ácidos graxos não passam de ácidos carboxílicos que apresentam cadeias longas e insaturadas. A presença elevada de ácidos graxos livres indica deterioração das longas cadeias carbônicas presentes nos triglicerídeos. Esta deterioração causa aumento na quantidade de ácidos (excesso de íons de hidrogênio H^+ capaz de aceitar um par de elétrons), o que diminui a qualidade final do biodiesel.

Os ácidos graxos também podem ser responsáveis pela água no combustível, uma vez que os ácidos graxos podem ser formados pela hidrólise dos ésteres tanto nos triglicerídeos da matéria-prima como no biodiesel durante sua obtenção.

A transesterificação também pode ocorrer via catálise ácida, esta via é a mais indicada quando a matéria prima utilizada no processamento apresenta altos teores de ácidos graxos livres como descreve Leung e Leung (2009), que um catalisador ácido é extremamente útil para o tratamento de óleos e gorduras com elevado teor de ácidos graxos livres, pois evita a formação de sabões. Esta reação pode ser demonstrada através da Figura 04, o ácido graxo é quebrado sendo transformado em éster (biodiesel) e água.

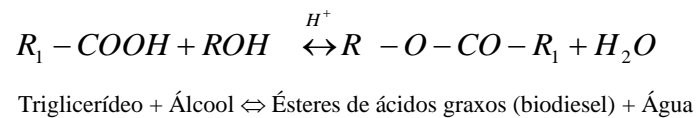


Figura 4 – Reação de transesterificação via catálise ácida
Fonte: Adaptado de Leung e Leung (2009)

2.5 FUNDAMENTOS DA ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A utilização de biodiesel no mercado de produção de energia representa um grande avanço na área econômica e ambiental de quem faz uso desta fonte de energia alternativa. Existem diversas maneiras de se avaliar a viabilidade econômica de um projeto, ou produto, devendo ser respeitados diversos fatores como apresenta Neves (1981).

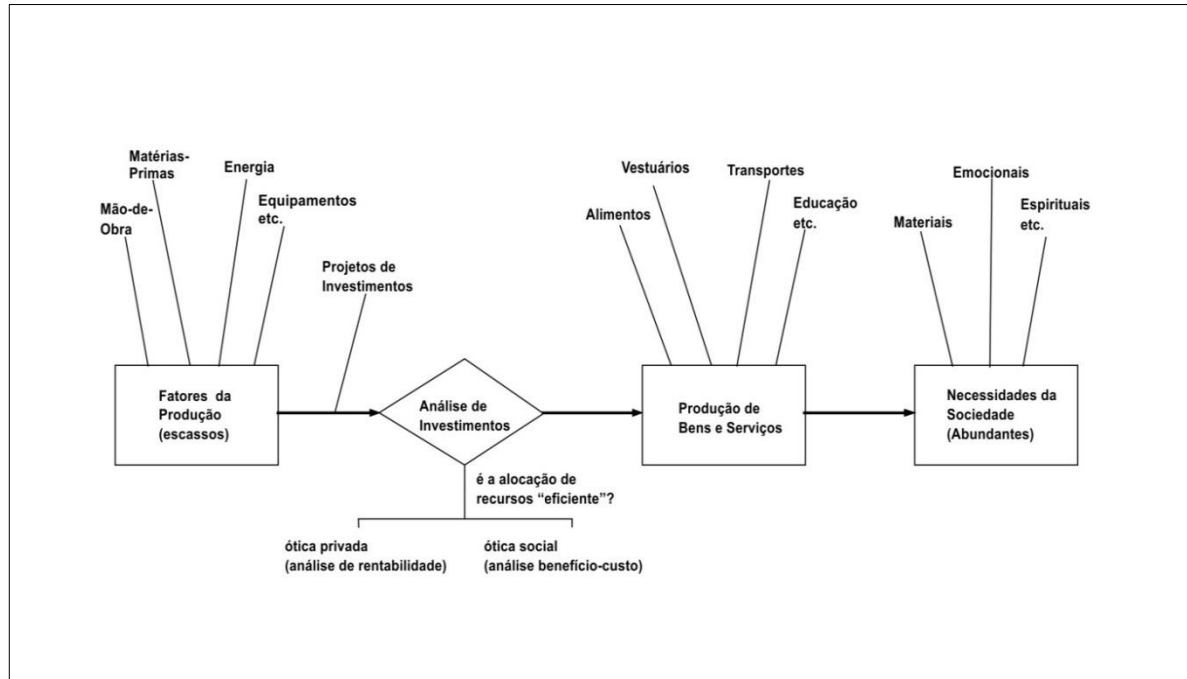


Figura 5 – O problema econômico e a análise de investimentos em projetos
Fonte: Adaptado de Neves (1981)

Alguns métodos amplamente conhecidos da matemática, usados na engenharia, podem representar com clareza as formas de avaliação de produtos, para que possam ser avaliados como economicamente viáveis ou não. Algumas funções matemáticas são intrínsecas a outras para que o cálculo final da viabilidade econômica possa ser realizado.

O trabalho científico de Alves *et al.* (2012) buscou avaliar o rendimento de biodiesel através de variáveis como razão molar (gordura:álcool), percentual de catalisador (H_2SO_4) em relação a massa de gordura, tempo reacional e temperatura, fornecendo uma ampla base de dados para a montagem de um modelo matemático, o qual responderá a fatores influenciáveis na viabilidade econômica do biocombustível.

2.5.1 Ferramentas matemáticas para análise de viabilidade econômica

Algumas ferramentas matemáticas são de extrema importância para a análise da viabilidade de se investir em algum projeto, atualmente observa-se um grande avanço das ferramentas computacionais para a realização destas tarefas. O setor industrial utiliza de ferramentas da pesquisa operacional (método matemático

para auxiliar na tomada de decisões nas operações de organizações) para o estudo da viabilidade econômica de determinados processos e também de projetos.

O método Simplex é uma técnica usada para determinar a solução ótima de um modelo de programação linear através de soluções matriciais.

A importância da programação linear deriva em parte de suas muitas aplicações e em parte, da existência de boas propostas gerais para descobrir soluções ótimas. A programação linear é útil para guiar decisões relativas à quantidade - feita nos negócios, empresas de engenharia industrial, e de forma menor em atividades dentro da vida e ciências sociais (MTETWA, 2010).

O método de Simplex utiliza da programação linear para resolução de problemas de maximização ou minimização de custos envolvidos em processos como: matérias-primas, mão-de-obra, equipamentos, energia.

A busca de uma solução mais adequada entre diversas soluções alternativas traz consigo os elementos de um problema de otimização: um critério de avaliação das soluções alternativas, o qual nos permite dizer que uma solução é “melhor” que outra (objetivo ou subjetivo). A este critério de avaliação chamamos de função objetivo, que buscamos otimizar, ou seja, maximizar ou minimizar. Por outro lado, as soluções alternativas devem ser passíveis de execução indicando a presença de restrições que devem ser respeitadas (SANTOS; CAMARGO, 2005).

Como função objetivo avaliou-se quais são as variáveis responsáveis que melhoram o processo de transformação do biodiesel, gerando a resposta de viabilidade.

Para definir as variáveis, restrições e suas influências utilizaram-se expressões matemáticas básicas para os modelos de programação linear como define (ROCHA *et al.*, 2005). Através das Equações 01, 02, 03.

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

Equação 01

Obedecendo as seguintes restrições:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq, =, \geq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq, =, \geq b_2$$

...

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq, =, \geq b_m$$

Equação 02

E de forma que as variáveis sejam não negativas, ou seja:

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0.$$

Equação 03

Temos que c_j , a_{ij} e b_i são constantes conhecidas, para todo i e j .

Os parâmetros e variáveis do modelo são:

Z = medida de eficiência do sistema (chamada de função objetivo ou F.O.);

x_j = nível da atividade j (variável de decisão);

c_j = taxa de contribuição unitária da atividade j ;

b_i = disponibilidade de recursos i ;

a_{ij} = coeficiente tecnológico (quantidade i / consumido por j);

n = número de atividades no modelo;

m = número de restrições no modelo.

Raggi *et al.* (2005) afirmam que para construir um modelo de programação linear precisa-se:

- a) Definir as atividades: definir as atividades (x_j) e escolher uma unidade de medida para o seu nível;
- b) Definir recursos: determinar os recursos consumidos e escolher a unidade de medida conveniente;
- c) Determinar as condições externas: determinar a quantidade de recursos disponíveis (b_i);
- d) Calcular os coeficientes insumo/produção: determinar a relação entre as atividades e recursos (a_{ij});
- e) Construir modelo: associar x_1, x_2, \dots, x_n às n atividades; escrever as equações de balanceamento por recurso; indicar o uso do recurso; estabelecer a função objetivo como medida de eficiência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2 MÉTODOS

A metodologia a ser utilizada neste trabalho baseou-se na estimativa de rendimento da reação de biodiesel com base em resultados experimentais obtidos em escala de bancada, com procedimento experimental aplicado por Alves *et. al.* (2012) que visou

A produção (transesterificação) e obtenção do rendimento de biodiesel de gordura de suíno comercial *in natura* via catálise ácida com H_2SO_4 e etanol como álcool, através da metodologia experimental, que proporciona um delineamento embasado na obtenção de um modelo empírico da variável-resposta em função dos fatores estudados (variáveis independentes).

O produto desenvolvido neste trabalho experimental não atende aos requisitos de qualidade para comercialização, porém é parte integrante de um projeto de pesquisa que busca melhorar a qualidade de biocombustíveis.

Com vista a estas informações, pode-se ressaltar que o trabalho é uma estimativa inicial de viabilidade econômica baseado em dados para obtenção de melhores condições para elaboração biodiesel.

O organograma de viabilidade da produção de biodiesel (Figura 02) contém as variáveis imprescindíveis para a avaliação econômica: custo-de-mão de obra, energia consumida no processo, reagentes, ácido sulfúrico, gordura e álcool etílico.

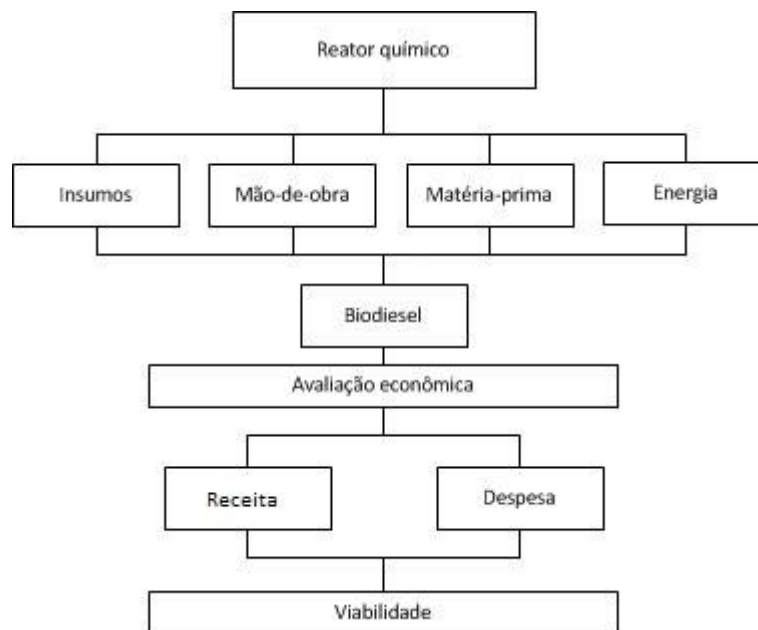


Figura 1 – Organograma de viabilidade de produção de biodiesel

3.2.1 Cálculo da taxa de transferência de calor

No presente trabalho utilizaram-se ferramentas auxiliares para a obtenção da viabilidade econômica do biodiesel proveniente de gordura suína como o cálculo da taxa de transferência de calor, calores específicos, resistências de condução e convecção e os coeficientes de transferência de calor, através das condições apresentadas em trabalho científico de Alves *et al.* (2012) com faixa de temperatura entre 55°C e 65°C.

Consideraram-se fatores como: custos de insumos (álcool, ácido sulfúrico) e custos de matéria-prima (gordura comercial suína), sendo desta, descontado 20% de seu valor de mercado.

Outro importante fator considerado foi-se o custo do metro cúbico de lenha, utilizado no processo de aquecimento, como fornecedor de energia.

Através destes fatores relacionou-se uma expressão linear geral (Lucro), otimizada via método simplex pela ferramenta *Solver* do software Excel[®].

3.2.2 Equação de consumo de energia

Como parte integrante da metodologia obteve-se a equação de consumo de energia, onde se calculou inicialmente a taxa de transferência de calor por condução e convecção de um reator químico hipotético.

3.2.2.1 Cálculo dos calores específicos

Os calores específicos dos materiais estão contidos na equação de consumo de energia, sendo assim, realizaram-se os cálculos destes, baseados em Perry (1997).

Tabela 1 – Tabela dos calores específicos

Materiais	Calores específicos [cal/g.°C]	Calores específicos [kJ/°C]	Temperaturas [°C]
Álcool Etílico	0,5770	2,5602	23
Ácido Sulfúrico	0,3352	1,4025	20
Gordura comercial suína	0,3608	1,5096	20

Fonte: Adaptado de Perry (1997)

3.2.2.2 Cálculo do fluxo de calor

Como parte da metodologia realizou-se o cálculo do fluxo de calor no reator químico buscando-se o gradiente de temperatura entre amostra dentro do reator (biodiesel) e a temperatura do ambiente.

$$\dot{q} = \frac{T_{m\acute{a}xima\ amostra} - T_{ambiente}}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \times k_A \times L} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi \times k_B \times L} + \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{2\pi \times k_C \times L} + \frac{1}{\bar{h} \times 2\pi \times r_4 \times L}}$$

Equação 04

\dot{q} = fluxo de calor [W].

k_A, k_B, k_C = coeficiente de transferência de calor dos materiais [W/m.K] ou [W/m.°C].

r_1, r_2, r_3, r_4 = raio [m].

L = altura do reator [m].

\bar{h} = coeficiente médio de transferência de calor por convecção [$W/m^2.K$].

A Equação 04 apresenta além das temperaturas (ambiente e amostra), a resistência dos materiais. A resistência do material da parede do reator químico (aço inox AISI 304), em contato com a mistura de biodiesel pode-se ser calculada através da Equação 05.

$$R_1 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \times k_A \times L}$$

Equação 05

A resistência do material isolante térmico (fibra de vidro), presente entre as paredes de aço inox AISI 304 do reator químico pode-se ser calculada através da Equação 06.

$$R_2 = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi \times k_B \times L}$$

Equação 06

A resistência entre o material isolante térmico e a segunda parede de aço inox AISI 304 do reator químico pode-se ser calculada através da Equação 07.

$$R_3 = \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi \times k_C \times L}$$

Equação 07

A resistência entre a parede de aço inox AISI 304 do reator químico e o fluido (ar) pode-se ser calculada através da Equação 08.

$$R_4 = \frac{1}{\bar{h} \times 2\pi \times r_4 \times L}$$

Equação 08

Para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor dos materiais componentes do reator químico se utilizaram as Equações 09, 10 e 11.

a) Viscosidade cinemática

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho}$$

Equação 09

ϑ = viscosidade cinemática [m^2/s].

μ = viscosidade dinâmica [$\text{Pa}\cdot\text{s}$].

ρ = densidade [kg/m^3].

b) Número de Prandtl

$$Pr = \frac{\vartheta}{\alpha}$$

Equação 10

Pr = número de Prandtl [adimensional].

α = difusividade térmica [m^2/s].

c) Condutividade térmica

$$k = \frac{x \times \Delta Q}{A \times \Delta t \times \Delta T}$$

Equação 11

k = coeficiente de transferência de calor dos materiais [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$] ou [$\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$].

$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ = taxa de fluxo de calor [$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$].

A = área total da superfície condutora [m^2].

x = espessura da superfície condutora que separa duas temperaturas

ΔT = diferença de temperatura [K].

E ainda as Equações 12, 13 e 14 foram utilizadas para o cálculo do coeficiente de transferência de calor.

d) Coeficiente de expansão volumétrica do ar

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \times \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P$$

Equação 12

β = expansão volumétrica [$^{\circ}\text{C}^{-1}$].

ρ = densidade [kg/m^3].

T_s = temperatura de superfície [K] ou [$^{\circ}\text{C}$].

T_{∞} = temperatura do fluido [K] ou [$^{\circ}\text{C}$].

e) Número adimensional de Grashof

$$Gr_L = \frac{g \times \beta \times (T_s - T_{\infty}) \times L^3}{\vartheta^2}$$

Equação 13

g = gravidade [m/s^2].

β = expansão volumétrica [$^{\circ}\text{C}^{-1}$].

T_s = temperatura de superfície [K] ou [$^{\circ}\text{C}$].

T_{∞} = temperatura do fluido [K] ou [$^{\circ}\text{C}$].

ϑ = viscosidade cinemática [m^2/s].

L = comprimento da parede do reator [m].

f) Número adimensional de Rayleigh

$$Ra = Gr \times Pr$$

Equação 14

Gr = número adimensional de Grashof.

Pr = número de Prandtl [adimensional].

g) Número de Nusselt.

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} \times L}{k} = C \times Ra_L^n$$

Equação 15

C = constante para escoamento laminar.

n = constante para escoamento laminar.

L = comprimento da parede do reator [m].

k = coeficiente de transferência de calor dos materiais [W/m.K] ou [W/m.°C].

\bar{h} = coeficiente médio de transferência de calor por convecção [W/m².K].

3.2.2.3 Cálculo da energia gasta no processo

Como metodologia para o cálculo da energia gasta no processo fixou-se a temperatura inicial em 20°C sendo esta energia responsável pelo aquecimento (calor sensível) da mistura reacional (Equação 16), não se considerando o calor da reação.

$$Q = [(m_{\text{álcool}} \times c_{p(\text{álcool})} + m_{\text{ácido}} \times c_{p(\text{ácido})} + m_{\text{gordura}} \times c_{p(\text{gordura})}) \times (T_{\text{processo}} - 20)] + 60 \times \dot{q} \times t$$

Equação 16

Q = Quantidade de Energia [kJ].

$C_{p(\text{álcool})}, C_{p(\text{ácido})}, C_{p(\text{gordura})}$ = calores específicos [cal/g.°C] ou [kJ/°C].

\dot{q} = taxa de transferência de calor (transferência de calor das paredes do reator para o fluido ar) [W].

$m_{\text{álcool}}$ = massa de álcool usada no processo [kg].

$m_{\text{ácido}}$ = massa de ácido sulfúrico usado no processo [kg].

m_{gordura} = massa de gordura usada no processo [kg].

T_{processo} = Temperatura do processo [°C].

t = tempo necessário para o processo (período, ciclo ou duração) [min].

3.2.2.4 Equação de custo de energia

Para a obtenção da equação de custo de energia utilizou-se da quantidade de energia necessária para se realizar a reação (Equação 16) e da energia disponível no combustível utilizado no reator (Equação 17).

$$Q' = \frac{(m_{álcool} \times c_{p(álcool)} + m_{ácido} \times c_{p(H_2SO_4)} + m_{gordura} \times c_{p(gordura)}) \times (T_{processo} - 20)}{E_{madeira}} + \frac{60 \times t \times \dot{q}}{E_{madeira}}$$

Equação 17

Q' = Quantidade de madeira necessária para obtenção da energia para o processo
 $[\frac{kg_{madeira}}{h}]$.

$E_{madeira}$ = Quantidade de energia disponível em um kg de madeira $[\frac{kJ}{kg_{madeira}}]$.

3.2.2.4.1 Normalização da equação de transferência de calor

Normalizou-se a equação de taxa de transferência de calor para que se obtivessem as taxas de transferência de calor para diferentes temperaturas no processo (Equação 18).

$$\dot{q} = 0,6753 \times T_{processo} + 20,535$$

Equação 18

Finalizando-se a metodologia para obtenção do custo de energia envolvida no processo, avaliou-se o custo de valor de mercado do combustível do reator químico a madeira, $E_{madeira}$ [kJ/m³] obteve-se através de adaptação de Quirino *et al.* (2005). (Equação 19).

$$CE = Q' \times VM_{madeira}$$

Equação 19

$$Q = [(m_{\text{álcool}} \times 2,5062 + m_{\text{ácido}} \times 1,4025 + m_{\text{gordura}} \times 1,51) \times (T_{\text{processo}} - 20)] + 60 \\ \times 0,6753 \times T_{\text{processo}} + 20,535 \times t$$

Equação 20

$$Q' = \frac{[(m_{\text{álcool}} \times 2,5062 + m_{\text{ácido}} \times 1,4025 + m_{\text{gordura}} \times 1,51) \times (T_{\text{processo}} - 20)] + 60 \times 0,6753 \times T_{\text{processo}} + 20,535 \times t}{18932,6}$$

Equação 21

$$CE = \frac{[2,5062 \times m_{\text{álcool}} \times T_{\text{processo}} + 1,4025 \times m_{\text{ácido}} \times T_{\text{processo}} + 1,51 \times m_{\text{gordura}} \times T_{\text{processo}}]}{18932,6}$$

Equação 22

$$CE = \frac{-[20 \times 2,5062 \times m_{\text{álcool}} + 20 \times 1,4025 \times m_{\text{ácido}} + 20 \times 1,51 \times m_{\text{gordura}}]}{18932,6}$$

Equação 23

$$CE = \frac{40,518 \times T_{\text{processo}} + 20,535 \times t}{18932,6}$$

Equação 24

$$CE = 1,3237 \times 10^{-4} \times m_{\text{álcool}} \times T_{\text{processo}} + 7,4080 \times 10^{-5} \times m_{\text{ácido}} \times T_{\text{processo}} + 7,9756 \times 10^{-5} \\ \times m_{\text{gordura}} \times T_{\text{processo}}$$

Equação 25

$$CE = -2,6474 \times 10^{-3} \times m_{\text{álcool}} - 1,4815 \times 10^{-3} \times m_{\text{ácido}} - 1,5951 \times 10^{-3} \times m_{\text{gordura}}$$

Equação 26

$$CE = 2,1401 \times 10^{-3} \times T_{\text{processo}} + 1,0846 \times 10^{-3} \times t$$

Equação 27

CE = Custo da energia [R\$].

VM = valor de mercado de 1 kg de madeira [R\$/kg].

d = densidade [kg/m³] ou [kg/mL].

m = massa [kg].

v = volume [m³] ou [mL].

3.2.2.5 Custo de mão-de-obra

No cálculo do custo de mão-de-obra da fabricação do biodiesel de gordura suína comercial, utilizou-se o salário base médio de um Operador de Caldeira da região Oeste do Paraná (Tabela 02).

Tabela 2 – Salário em reais de um operador de caldeira

Salário [R\$]	Descontos/Custeio	Custo mensal [R\$]	Dias trabalhados	Horas trabalhadas
1.200,00	INSS – 8%	96,00	22	8
1.200,00	Férias e 13 ^o – 33%	396,00		
TOTAL		1.692,00	76,90 ao dia	9,61 a hora

Fonte: Escritório Contábil Juarez (2013)

Definiu-se um custo de 0,16 [R\$/min] trabalhado, considerando o tempo de operação do reator baseado em minutos (Equação 28).

$$CM = 0,16 \times t$$

Equação 28

CM = Custo de Mão-de-Obra [R\$].

t = tempo [min].

3.2.2.6 Custo da Matéria-Prima

O cálculo do custo de matéria-prima calculou-se através do desconto de 20% de seu valor comercial.

Tabela 3 – Custo da gordura suína comercial

Tipo de produto	Custo [R\$/kg]
Gordura suína	1,75

Fonte: Globoaves São Paulo Agro avícola Ltda. (2013)

A Equação 29 demonstra o valor do custo de matéria-prima.

$$CMP = m_{gordura} \times 1,4$$

Equação 29

CMP = Custo da Matéria-Prima [R\$].

$m_{gordura}$ = Massa de gordura usada no processo [kg].

3.2.2.7 Custo de insumos

O custo de insumos foi calculado baseado no valor de compra de produtos como segue a Tabela 04.

Tabela 4 – Preço de insumos	
Tipo de produto	Custo [R\$/kg]
Ácido Sulfúrico P.A.	40,6
Álcool Etílico P.A. (99,5%)	7,9542

Fonte: Valor médio de três empresas do setor químico (2013)

Obteve-se a Equação 30 que permitiu relacionar as variáveis de custos dos insumos com as massas utilizadas na produção de biodiesel de gordura suína comercial.

$$CI = 40,6019 \times m_{ácido} + 7,9542 \times m_{álcool}$$

Equação 30

CI = Custo de insumos [R\$].

$m_{álcool}$ = massa de álcool usada no processo [kg].

$m_{ácido}$ = massa de ácido sulfúrico usado no processo [kg].

3.2.2.8 Rendimentos

Segundo Alves *et al.* (2012) foi-se utilizada a matriz de delineamento composto central de quatro fatores (2^k) em número de 16 ensaios (2^4) fatoriais em níveis (-1, 0, 1) para elaboração do experimento científico, corroborando para elaboração da equação de cálculo de rendimento (Tabela 05).

Tabela 5 – Preço de insumos

Parâmetros	1	0	-1
Razão Molar gordura:álcool (A)	1:8,5	1:8	1:7,5
Percentual de ácido em relação à massa de gordura (B)	27,6	25	22,4
Tempo reacional (C)	187,5	165	142,5
Temperatura (D)	65	60	55

A Tabela 06 apresenta os valores utilizados em cada amostra para a realização do experimento.

Tabela 6 – Matriz de delineamento experimental

(continua)

Amostra	Razão Molar gordura:álcool (A)	Percentual de ácido [%] (B)	Tempo [min] (C)	Temperatura [°C] (D)
T11	1:8,5	27,6	187,5	65
T04	1:8,5	27,6	187,5	55
T18	1:8,5	27,6	142,5	65
T13	1:8,5	27,6	142,5	55
T21	1:8,5	22,4	187,5	65
T07	1:8,5	22,4	187,5	55
T22	1:8,5	22,4	142,5	65
T01	1:8,5	22,4	142,5	55
T20	1:7,5	27,6	187,5	65
T12	1:7,5	27,6	187,5	55
T17	1:7,5	27,6	142,5	65
T08	1:7,5	27,6	142,5	55
T23	1:7,5	22,4	187,5	65

T25	1:7,5	22,4	187,5	55
T06	1:7,5	22,4	142,5	65
T14	1:7,5	22,4	142,5	55
T19	1:8	25	165	60
T09	1:8	25	165	60
T16	1:8	25	165	60

Fonte: Adaptado de Alves *et al.* (2012)

Segundo Alves *et al.* (2012) para este experimento científico observa-se que os valores mais significativos são as variáveis: Ácido (B) com *p-valor* de $7,79 \times 10^{-5}$ e Ácido (B):Temperatura (D) com *p-valor* de 0,041401.

3.2.2.8.1 Normalização de códigos de delineamento composto central

a) Normalização do fator razão molar gordura:álcool

Utilizou-se da normalização dos valores codificados em valores reais aplicáveis às condições de elaboração da função lucro. O Gráfico 01 representa o comportamento da variável ácida em relação aos códigos de realização do experimento.

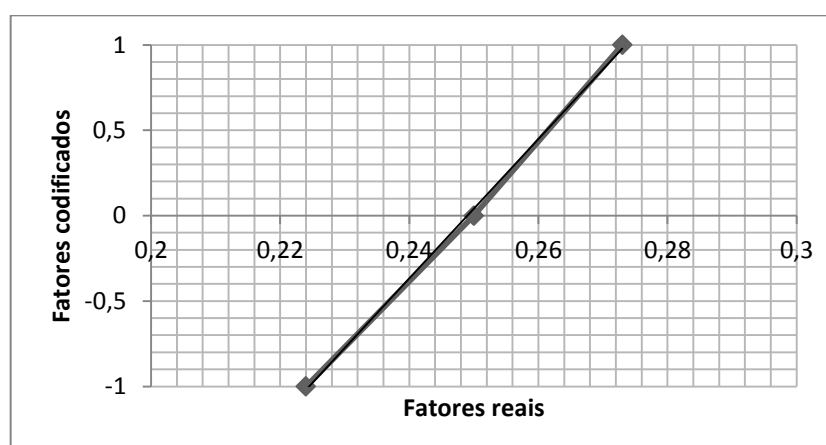


Gráfico 1 – Fator real *versus* Fator codificado para percentual de ácido

A Equação 31 representa a normalização dos códigos para valores reais da variável ácida.

$$b = 0,4347 \times B - 10,87$$

Equação 31

b = Valor do código

B = Valor real da variável ácida [%].

A base de porcentagem de catalisador foi ajustada para que os fatores pudessem ser representados como valores codificados na Equação 32.

$$Catalisador = \frac{m_{\acute{a}cido}}{m_{gordura} \times 100000}$$

Equação 32

A Equação 33 representa a normalização dos códigos para valores reais de temperatura.

$$d = 0,2 \times D - 12$$

Equação 33

d = Valor do código

D = Valor real da variável temperatura [°C].

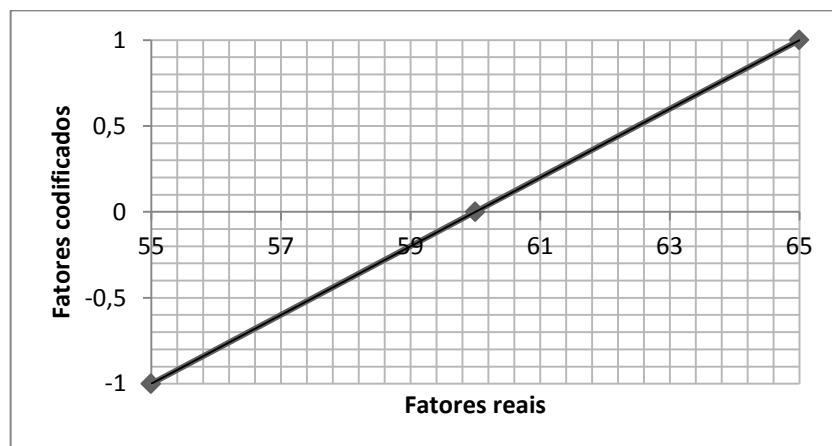


Gráfico 5 – Fator real *versus* Fator codificado para temperatura

3.2.2.8.2 Variáveis de apoio ao cálculo do rendimento

O rendimento liga-se intrinsecamente ao resultado que se obteve da aplicação do método Simplex na função Lucro, as variáveis mais aptas a utilizar-se no cálculo do rendimento apresentam-se na faixa de valores máximos e mínimos apresentados em Tabela 09.

A metodologia para o cálculo do rendimento (Equação 34) baseou-se em trabalho científico de Alves *et al.* (2012) (Tabela 07).

Tabela 7 – Coeficientes de parâmetros de modelo baseado em Delineamento Composto Central

Variáveis	Valores
Rendimento médio	23,016
$\alpha_2 \times B$	-0,458
$\alpha_4 \times D$	9,319
$\alpha_8 \times B \times D$	-2,895

$$RE = 23,0163 - (0,4856 \times m_{\text{ácido}}) - (9,3192 \times T_{\text{processo}}) - (2,8952 \times m_{\text{ácido}} \times T_{\text{processo}})$$

Equação 34

3.2.2.9 Receita

Considerou-se para o cálculo da receita o Rendimento obtido através da Equação 34, a média de custos de diesel apresentada na Tabela 08 e a quantidade em massa de biodiesel obtida da reação.

Tabela 8 – Preço de combustível diesel praticado em Cascavel-PR

Posto de combustível	Preço [R\$]
1	2,259
2	2,290
3	2,290
4	2,360
5	2,399
6	2,380
7	2,398

8	2,290
9	2,390
Média	2,3396

A Equação 35 apresenta a função receita a ser gerada considerando-se o rendimento derivado da equação de experimento científico de Alves *et al.* (2012).

$$R = RE \times m_{biodiesel} \times Diesel$$

Equação 35

$$R = 0,28 \times m_{biodiesel} \times 2,339 = 0,65492 \times m_{biodiesel}$$

Equação 36

R = Receita [R\$].

RE = Rendimento [%].

$m_{biodiesel}$ = Massa do biodiesel [kg].

$Diesel$ = Preço de combustível diesel [R\$].

3.2.2.10 Função Lucro

A Equação 36 define-se como o Lucro obtido com a produção de biodiesel de gordura comercial suína.

$$L = R - CE - CMP - CMO - CI$$

Equação 36

L = Lucro [R\$].

R = Receita [R\$].

CE = Custo de energia [R\$].

CMP = Custo de matéria-prima [R\$].

CMO = Custo de mão-de-obra [R\$].

CI = custo de insumos [R\$].

3.2.2.11 Método Simplex

Como parte integrante do cálculo da equação Lucro está à otimização desta através da utilização de ferramenta Solver do software Excel®.

$$\begin{aligned} \text{máx } L = & (RE \times m_{biodiesel} \times 2,339) - (Q' \times 0,01) - (1,4 \times m_{gordura}) - (0,16 \times t) \\ & - (40,6019 \times m_{ácido} + 7,9542 \times m_{álcool}) \end{aligned}$$

Equação 37

$$\begin{aligned} \text{máx } L = & 0,65492 \times m_{biodiesel} - 1,3237 \times 10^{-4} \times m_{álcool} \times T_{processo} - 7,4080 \times 10^{-5} \times m_{ácido} \times T_{processo} \\ & - 7,9756 \times 10^{-5} \times m_{gordura} \times T_{processo} + 2,6474 \times 10^{-3} \times m_{álcool} + 1,4815 \times 10^{-3} \\ & \times m_{ácido} + 1,5951 \times 10^{-3} \times m_{gordura} - 2,1401 \times 10^{-3} \times T_{processo} - 1,0846 \times 10^{-3} \times t \\ & - 0,16 \times t - 1,4 \times m_{gordura} - 40,6019 \times m_{ácido} + 7,9542 \times m_{álcool} \end{aligned}$$

Equação 38

Para o método ser validado aplicou-se as restrições máximas e mínimas do experimento científico apresentado por Alves *et al.* (2012) (Tabela 09). Utilizou-se o valor de referência para a $m_{biodiesel}$ de 100 kg.

Tabela 9 – Restrições de experimento científico

Restrições	Máximo	Mínimo
$m_{álcool}$	61,671955	69,947425
$m_{ácido}$	11,11239	13,58181
$T_{processo}$	55	65
t	142,5	187,5

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 TAXAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Tabela 10 – Taxas de transferência de calor

Temperaturas [°C]	\dot{q} [W]
55	50,947
60	58,625
65	65,748

4.1.1 Coeficientes de condutividade térmica

Tabela 11 – Coeficientes de condutividade térmica

Coeficientes [W/m.K]

$$k_A = 0,0283831$$

$$k_B = 0,0287531$$

$$k_B = 0,0291231$$

4.1.2 Resistências de reator químico

Tabela 12 – Resistência de reator

$R_{\text{convecção}}$ [K.m/W]	$R_{\text{condução}}$ [K.m/W]	Temperatura [°C]
0,0704	0,163	55
0,0657	0,152	60
0,0679	0,0018	65

4.1.2 Coeficiente médio de transmissão de calor por convecção

Tabela 13 – Coeficiente médio de transmissão de calor

\bar{h} [W/m ² .K]	Temperatura [°C]
3,70	55
3,81	60
3,92	65

4.2 RENDIMENTO

A função Lucro (Equação 36) gerou coeficientes apresentados na Tabela 14, que foram usados como coeficientes da função objetivo para obtenção da maximização do Lucro.

Tabela 14 – Coeficientes da função objetivo

Coeficientes	Valores
$m_{biodiesel} \times RE$	12,643
$m_{gordura} \times T_{processo}$	$7,98 \times 10^{-7}$
$t \times T_{processo}$	$6,78 \times 10^{-6}$
$m_{álcool} \times T_{processo}$	$1,32 \times 10^{-6}$
$m_{álcool}$	7,954
t	$2,23 \times 10^{-5}$
$m_{ácido} \times T_{processo}$	$7,41 \times 10^{-7}$
$m_{gordura}$	69,998
$m_{ácido}$	40,602

Após o tratamento matemático realizado pela ferramenta Solver obteve-se as variáveis ideais a serem utilizados na obtenção do melhor resultado na produção de biodiesel de gordura suína comercial (Tabela 15).

Tabela 15 – Coeficientes da função objetivo

Coeficientes	Valores
$m_{álcool}$	69,947
t	187,5
$T_{processo}$	65
$m_{ácido}$	13,581

4.2.1 Maximização da função Lucro

A maximização da função Lucro resultou em valor negativo, ou despesa de R\$ – 1.142,72, assertiva que se reflete na dificuldade em se obter lucro da utilização de um subproduto como a gordura comercial suína para produção de biodiesel.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho considerou fatores como: energia gasta no processo, insumos, mão-de-obra, rendimento, para a maximização dos lucros na produção. Sendo assim, o resultado obtido para a produção deste biocombustível, considerando todas as variáveis envolvidas no processo foi de despesa de R\$ – 1.142,72 para a produção de 100 kg de biodiesel de gordura suína.

A metodologia utilizada neste trabalho buscou encontrar a quantidade real de energia, materiais e mão-de-obra gastas no processo de produção através de cálculos de engenharia de processos como: taxas de transferência de calor de um reator químico, energias cedidas ao processo por combustível lenhoso, calores reacionais dos materiais como ácido sulfúrico, álcool e gordura suína, entre outros. Os custos encontrados foram baseados em aplicações reais como custos de mão-de-obra e insumos, praticados na região Oeste do Paraná.

A análise realizada neste trabalho foi feita por uma estimativa da viabilidade econômica e necessita-se agregar a ela outros fatores de análise econômica como, por exemplo, o investimento inicial para produção de biodiesel, taxa de retorno de capital e outras ferramentas de engenharia econômica. Frisa-se não obstante a necessidade de se ajustar um novo modelo empírico que possa fornecer um maior rendimento, buscando obter resultados mais promissores. Através destes resultados existe a necessidade de alterações nas condições de produção do biodiesel de gordura suína.

Em contexto geral, resultados mais seguros para a produção de biodiesel seriam encontrados em uma unidade produtiva em escala piloto, onde os custos de investimentos e insumos (matérias-primas, energias, entre outras) são empreendidos com melhor precisão, garantindo-se assim sua reprodutibilidade em escala industrial.

REFERÊNCIAS

ALVES, G. A.; SCARAVONATTI, R. M.; EYNG, E.; FRARE, L. M. **Modelagem empírica de produção de biodiesel a partir de gordura suína**. Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. XVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica de UTFPR. Curitiba, 2012. 8p.

CAMARGO, B. C. C.; BORENSTEIN R. C. **O setor elétrico no Brasil: dos desafios do passado às alternativas do futuro**. 1ª ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997. 318p.

CARDOSO, A. A.; ROSA, H. A.; ROCHA, C. J. **Introdução à química ambiental**. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 256p.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Guia técnico ambiental de frigoríficos – Industrialização de carne (bovina e suína) – Série P+L**. São Paulo: CETESB, 2008. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em 28/03/2012.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Guia técnico ambiental – Industrialização bijuterias – Série P+L**. São Paulo: CETESB, 2005. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em 28/03/2012.

COSTA NETO *et. al.* **Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras**. Química Nova, vol. 23, n. 4, p.531-537, 2000.

FERREIRA, *et. al.* **Algumas experiências simples envolvendo o princípio de Le Chatelier**. Química Nova na Escola, n. 5, maio, p. 28-31, 1997.

FERRARI, *et. al.* **Biodiesel de soja – taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia**. Química Nova, vol. 28, n. 1, p.19-23, 2005.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2001. 235p.

LEUNG, D. Y. C; XUAN W.; LEUNG M. K. H. **A review on biodiesel production using catalyzed trans esterification**. Department of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, Applied Energy, vol. 87, n. 4, p. 1083-1095, 2009.

MTETWA, D. K. J. **Linear Programming**. Disponível em: www.hdl.handle.net/123456789/17. Acesso em 09/04/2012.

NEVES, C. **Análise de Investimentos: Projetos Industriais e Engenharia Econômica**. Rio de Janeiro: Zahar, 1981. 223p.

PELIZER, *et. al.* **Utilização de resíduos agroindustriais em processos biotecnológicos como perspectiva de redução de impactos ambientais.** *Jornal da Gestão da Tecnologia e Inovação*, vol. 2, n. 1, p.118-127, 2007.

ROSSETTI, J. P. **Introdução à economia.** 20^a ed. 6^a reimpressão. São Paulo: Atlas, 2009. 928p.

QUIRINO, *et. al.* **Poder calorífico da madeira e de materiais lígneo-celulósicos.** *Revista da Madeira*, n. 89, p. 100-106, 2005.

SANTOS, N. H.; RAGGI, A. L.; ROCHA N. M. **INF-280 – Pesquisa Operacional: Programação Linear, Programação em Redes.** Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Informática, Viçosa, 2005. Disponível em: <http://www.ecnsoft.net/wp-content/plugins/downloads-manager/upload/Apostila%20INF280%20-%20Pesquisa%20Operacional%20-%20UFVicos%20-%20127pg.pdf>. Acesso em 11/04/2012.