



Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Recursos Naturais da Amazônia

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE PIRÓLISE E
CRAQUEAMENTO TERMO-CATALÍTICO EM ESCALA PILOTO
UTILIZANDO-SE MATERIAL LIGNO-CELULÓSICO, LIPÍDICO, DE ÓLEO
DE PALMA (*Elaeis guineensis*, Jacq) E RESÍDUO DA NEUTRALIZAÇÃO DO
ÓLEO DE PALMA**

Anderson Rocha Amaral

Belém – PA

2022



Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Recursos Naturais da Amazônia

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE PIRÓLISE E
CRAQUEAMENTO TERMO-CATALÍTICO EM ESCALA PILOTO
UTILIZANDO-SE MATERIAL LIGNO-CELULÓSICO, LIPÍDICO, DE ÓLEO
DE PALMA (*Elaeis guineensis*, Jacq) E RESÍDUO DA NEUTRALIZAÇÃO DO
ÓLEO DE PALMA**

Anderson Rocha Amaral

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, PRODERNA/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ing. Nélio Teixeira Machado

Co-orientador: Prof. Dr. Eng. Marcelo Costa Santos

Belém – PA

2022

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE PIRÓLISE E
CRAQUEAMENTO TERMO-CATALÍTICO EM ESCALA PILOTO
UTILIZANDO-SE MATERIAL LIGNO-CELULÓSICO, LIPÍDICO, DE ÓLEO
DE PALMA (*Elaeis guineensis*, Jacq) E RESÍDUO DA NEUTRALIZAÇÃO DO
ÓLEO DE PALMA**

Anderson Rocha Amaral

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA
(PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovada:

Prof. Dr. Ing. Nélio Teixeira Machado
(PRODERNA/ITEC/UFPA-Orientador)

Prof. Dr. Eng. Marcelo Costa Santos
(PPGEQ/ITEC/UFPA – Co-orientador)

Prof. Dr. Eng. Douglas Alberto Rocha de Castro
(CEULM/ULBRA-Membro Externo)

Prof. Dr. Sc. Luiz Eduardo Pizarro Borges
(Seção engenharia Química / IME)

Prof. Dr. Neyson Martins Mendonça
(PPGESA/ITEC/UFPA-Membro Externo)

Prof. Dr. Sc. Raul Nunes de Carvalho Junior
(PPGCTA/UFPA-Membro Interno)

Prof. Dr. Eng. Sílvio Alex Pereira da Motta
(FEMAT/UNIFESSPA-Membro Externo)

BELÉM, PA - BRASIL.

DEZEMBRO DE 2022

AGRADECIMENTOS

A Deus pai onipresente e onipotente, por nos abençoar por tudo que nos cerca e pela graça da vida.

A minha esposa Bianca Emanuely Sampaio Amaral, a qual foi meu suporte e apoio nessa jornada.

Ao prof. Dr. Eng. Nélio Teixeira Machado que depositou em mim sua confiança e suas orientações, paciência e grandes ensinamentos, mesmo em um cenário adverso de pandemia e ao tempo escasso para concluirmos este trabalho.

Aos meus pais Francisco Antônio Amaral, Soely Rocha Amaral e ao meu irmão Francisco Antônio Amaral Junior, os quais sempre me apoiaram ao longo da vida.

A banca pelas significativas contribuições para a versão final do trabalho.

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais. (Dr. Eng.)

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE PIRÓLISE E
CRAQUEAMENTO TERMO-CATALÍTICO EM ESCALA PILOTO
UTILIZANDO-SE MATERIAL LIGNO-CELULÓSICO, LIPÍDICO, DE ÓLEO
DE PALMA (*Elaeis guineensis*, Jacq) E RESÍDUO DA NEUTRALIZAÇÃO DO
ÓLEO DE PALMA**

Anderson Rocha Amaral

Dezembro/2022

Orientador: Dr. Ing. Nélio Teixeira Machado

Área de Concentração: Uso e Transformação de Recursos Naturais.

Neste trabalho, é apresentado um estudo de avaliação técnico-econômica da produção de bio-óleo, coque e gases, via o processo termo-catalítico de pirólise em batelada, seguido da destilação do bio-óleo para a produção de biocombustíveis. As matérias primas foram os resíduos de material base-lipídica (gordura/óleo de fritura residual das caixas de retenção de gordura do restaurante universitário da Universidade Federal do Pará – UFPA), material ligno-celulósico de sementes de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart), óleo de palma e resíduo da neutralização do óleo de palma. A partir da literatura, são apresentados os rendimentos de produção do bio-óleo para cada experimento de pirólise e destilação e comparados com a literatura. Assim como, são apresentados os dados das características físico-químicas das matérias primas, do bio-óleo e da composição dos biocombustíveis produzidos (biogasolina, bioquerosenem diesel leve e diesel pesado). Os indicadores econômicos para a avaliação do projeto mais viável e pirólise seguida da destilação foram: a) o critério de payback simples, b) payback descontado, c) valor presente líquido (VPL), d) taxa interna de retorno (TIR) e índice de lucratividade (IL). A análise dos indicadores mostrou a viabilidade do material base lipídica, inviabilidade da matéria prima semente de açaí, viabilidade do óleo de palma e

viabilidade do resíduo de neutralização do óleo de palma. O mínimo preço de venda do combustível (MFSP) obtido foi de 1,34 US\$ / L para todos os projetos viáveis, com exceção do projeto utilizando-se o óleo de palma que foi de 1,59 US\$/L. A análise de sensibilidade demonstrou que os rendimentos da pirólise e da destilação são os fatores mais importantes que afetam o MFSP.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D. Eng.).

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE PIRÓLISE E
CRAQUEAMENTO TERMO-CATALÍTICO EM ESCALA PILOTO
UTILIZANDO-SE MATERIAL LIGNO-CELULÓSICO, LIPÍDICO, DE ÓLEO
DE PALMA (*Elaeis guineensis*, Jacq) E RESÍDUO DA NEUTRALIZAÇÃO DO
ÓLEO DE PALMA**

Anderson Rocha Amaral

December/2022

Advisor: Dr. Ing. Nélio Teixeira Machado

Research Area: Use and Transformation of Natural Resources

In this work, it is accomplished a techno-economic assessment of the production of bio-oil, coke and gas, via thermos-catalytic pyrolysis followed by distillation. The raw materials were: lipid-base material (residual fat/scum from fat retention box of the University Restaurant at the Federal University of Pará - UFPA), lignin-cellulosic material Açaí seed (*Euterpe oleracea*. Mart), palm oil and neutralizing sludge palm oil. From the literature is made a review of the physic-chemical analysis of the raw materials, of the bio-oil and of chemical composition of the biofuels produced (biogasoline, bioquerosene, light-diesel and heavy-diesel). Are also presented the bio-oil yields for each experiment of pyrolysis and distillation and compared with the literature. The economic indicators demonstrated feasibility of the all projects, with exception with the use of açaí seeds. The indicators used to analysis the projects were: a) simple payback criterion, b) discounted payback, c) net present value (NPV), d) internal rate of return (IRR), and e) index of profitability (IP). The minimum fuel selling price (MFSP) obtained in this work for the biofuels was of 1.34 US\$/L for all projects, with exception to the palm oil, which was 1,59 US\$/L. The sensibility analysis demonstrated that the pyrolysis and distillation yields are the most important variables to affect the minimum fuel selling price (MFSP).

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	12
1.0 - OBJETIVOS	21
1.1 - OBJETIVO GERAL	21
1.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.3 – ESTRUTURA DA TESE	22
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS	23
2.1 – PIRÓLISE DA BIOMASSA	23
2.1.1 A biomassa do caroço de açaí (<i>Euterpe oleracea</i> , Mart)	25
2.2 - CRAQUEAMENTO TERMO-CATALÍTICO DE ÓLEOS VEGETAIS	27
2.3 – O ESTADO DA ARTE	28
2.4 – TÉCNICAS DE ANÁLISE ECONÔMICA	33
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	36
3.1 – INDICADORES E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROCESSO DE PIRÓLISE E CRAQUEAMENTO	36
3.1.1 – Payback Simples	36
3.1.2 – Payback Descontado	37
3.1.3 – Valor Presente Líquido (VPL)	38
3.1.4 – Taxa Interna de Retorno (TIR)	40
3.1.5 – Índice de Lucratividade (IL)	41
3.1.6 – Cálculo do Ponto de Equilíbrio (“ <i>Breakeven point</i> ”)	42
3.1.7 – Análise de Sensibilidade	42
3.1.8 – Mínimo preço de venda do biocombustível (<i>minimum fuel sale price</i> –MFSP)	42
3.2 – METODOLOGIA DE CÁLCULO	43
3.2.1 Taxa de alimentação	46
3.2.2. Fluxo de Produto Líquido Orgânico – PLO (Bio-óleo)	46
3.2.3 Fluxo de Produto Sólido (Coque)	46
3.2.4 Fluxo do Produto Gasoso	47
3.2.5 Fluxo do Biocombustível destilado	47
3.2.6. Custo da Matéria Prima	47
3.2.7 Custo do Catalisador	47
3.2.8 Custo do Gás Liquefeito de Petróleo	48
3.2.9. Custo da Mão de Obra	48
3.2.10 Custo da Destilação (Aquecimento)	48

3.2.11 Taxa	48
3.2.12 Lucro total por dia	49
3.2.13 Homogeneização	49
3.2.14 Desidratação	49
3.2.15 Decantação	49
3.2.16 Disponibilidade	50
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS	51
4.1 - Sugestões de Trabalhos Futuros	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXO	
Memorial de Cálculo	62
Artigo 1: “Economic feasibility assessment of the thermal catalytic process of wastes: Açaí seeds (<i>Euterpe Oleracea</i>) and Scum from grease traps”.	
Artigo 2: Economic analysis of thermal catalytic process of Palm oil (<i>Elaeis guineensis</i> , Jacq) and soap phase residue of neutralization process of Palm oil (<i>Elaeis guineensis</i> , Jacq).	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Preço do barril de petróleo no mercado internacional	12
Figura 2.1 – Rotas de decomposição da celulose	23
Figura 2.2 – Curva TG e DTG da celulose D microcristalina comercial (SANTOS, 2011)	25
Figura 2.3 – Curva TG e DTG para lignina (SANTOS, 2011)	25
Figura 2.4 – Fontes de Biomassa (CORTEZ et al., 2011)	26
Figura 2.5 – Reação de formação de triglicerídeos de óleos e gorduras (Kato et al. 1998)	27
Figure 2.6 - Metodologia utilizada para realizar a avaliação econômica	33
Figura 2.7 – Esquema de obtenção de biocombustíveis a partir do material base lipídica	34
Figura 2.8 – Esquema de obtenção de biocombustíveis a partir da semente de açaí ..	34
Figura 2.9 – Esquema de obtenção de biocombustíveis a partir do óleo de palma	35
Figura 2.10 – Esquema de obtenção de biocombustíveis a partir do resíduo de neutralização do óleo de palma	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para os cálculos de custos utilizando-se material lipídico e caroço de açaí como matérias primas.	43
Tabela 2 – Parâmetros utilizados para os cálculos de custos utilizando-se óleo de palma e resíduo da neutralização do óleo de palma	44

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Mais de 8,1 milhões de pessoas ao redor do mundo são, atualmente, empregados na indústria de energias renováveis – um aumento de 5% desde o último ano – de acordo com um relatório elaborado pela Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), durante o 11th Encontro do Conselho. Os países com maior número de empregos em energias renováveis em 2015 são: China, Brasil, Estados Unidos, Índia, Japão e Alemanha. Dentro do setor de energias renováveis, o segmento de energia fotovoltaico é o que mais emprega no mundo, com 2,8 milhões de trabalhadores (contando a manufatura, instalação, operação e manutenção). O aumento está sendo impulsionado pela simplificação tecnológica, custos e políticas governamentais mais favoráveis. Os biocombustíveis líquidos são o segundo maior empregador, ao redor do mundo, com 1,7 milhões de empregos [1].

De acordo com o relatório publicado recentemente pela Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA), aproximadamente metade de todos os trabalhos gerados pela indústria de biocombustíveis no mundo, estão no Brasil. A indústria de etanol e biodiesel empregam um total de 845.000,00 trabalhadores no último ano [2].

Além da geração de empregos ocasionada pelo uso de energias renováveis, outro aspecto que estimula sua implementação é o fato de que o mundo tem apresentado uma dependência de fontes de energia não-renováveis, principalmente combustíveis fósseis, como por exemplo carvão e combustíveis a base de petróleo (como gás natural, diesel e gasolina), os quais estão relacionados a mudanças climáticas globais [3,4]. Destaca-se ainda, as que as oscilações dos preços do barril de petróleo no mundo podem desencadear processos inflacionários, ou mesmo de recessão ao redor do mundo. Na Figura 1 é apresentado um histórico do preço do barril de petróleo no mercado internacional, referente a aproximadamente os últimos dois anos. Pode-se confirmar valores de 60 US\$ / barril até 120 US\$ / barril.



Figura 1 – Preço do barril de petróleo no mercado internacional [5].

Como um resultado dessa dependência ocorre um aquecimento global, causado pela emissão de gases de efeito estufa, como por exemplo o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido de nitrogênio (N₂O), intensificando as críticas associadas com sua natureza poluidora e pesquisas para novas, mais limpas e fontes de energia mais sustentáveis [3,4].

É estimado como um efeito direto que aproximadamente 150.000 (cento e cinquenta mil) mortes adicionais por ano [6], e um aumento no risco das condições de fome para milhões de pessoas, enchentes e escassez de água, além de um aumento de doenças como a malária [7-9].

A eficiência energética e a diversificação da matriz energética são a chave para o equilíbrio entre a oferta e demanda de energia, assim como, para a minimização de problemas ambientais. Neste contexto, outras formas de energia, principalmente renováveis, devem ser estudadas e desenvolvidas para reduzir ou mesmo eliminar os impactos ambientais causados durante o uso e as etapas de produção de energias, desde as matérias primas até o consumidor final [3,4]. O uso de fontes de energia renováveis contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa, como por exemplo o dióxido de carbono.

Deste modo, o uso de biocombustíveis permite que um ciclo curto de carbono seja completado, no qual o dióxido de carbono é absorvido pelo processo de crescimento das plantas e liberado na combustão de biocombustíveis em motores [3,4].

Biocombustíveis são fontes de energia renováveis produzidas com matérias primas naturais [10]. As preocupações com os aspectos ambientais evidenciam que o uso de tecnologias com biomassa para a produção de energia são as que mais se adequam ao conceito de desenvolvimento sustentável, devido ao seu processo neutro no que se refere as emissões totais de dióxido de carbono [11]. Neste cenário, o uso de biocombustíveis tem sido proposto como uma alternativa tecnológica sustentável em substituição aos combustíveis fósseis. Assim, derivados combustíveis de fontes renováveis, como por exemplo a biomassa, incluindo óleos vegetais, como o óleo de palma, óleo de soja, óleo de girassol, caroço de algodão, além de resíduos de óleos de fritura e mesmo material lipídico de caixas de retenção de gordura, tem sido intensivamente estudados nos recentes anos [12,13].

Biocombustíveis, incluindo bioetanol, biodiesel, biogasolina, biogás e bioquerosene, são definidos como líquido ou combustíveis gasosos, produzidos a partir

de biomassa renovável, em parcial ou total substituição aos combustíveis fósseis [14,15], sendo utilizados principalmente em motores de veículos de combustão interna assim como em motores geradores de energia elétrica [16]. O processo de decomposição térmica de triglicerídeos (na ausência de oxigênio) é denominado de pirólise (ou craqueamento) [14], o qual pode ser realizado na presença ou ausência de catalisador, resultando em uma mistura de hidrocarbonetos, consistindo principalmente de moléculas de cadeia linear, ricas em frações similares a gasolina, querosene e diesel de origem fóssil [15,16].

Devido as características das moléculas de triglicerídeos presentes nos óleos vegetais ou gorduras animais, o processo de pirólise ocorre em duas etapas sucessivas: no primeiro estágio ocorre a formação de ácidos graxos, e em uma segunda etapa ocorre a formação de hidrocarbonetos [17,18].

Os óleos e gorduras utilizados em processos de frituras alimentares geram uma considerável quantidade de resíduos [19]. É conhecido que um litro de óleo de fritura lançado em um sistema de esgoto, ou liberado em um “corpo d’água”, tem a propriedade de contaminar seu tratamento, sendo o problema agravado com o aumento da população em áreas urbanas, sendo necessário o aumento da demanda por água potável, o qual, é um produto considerado de alta necessidade para os seres humanos [20]. Em estabelecimentos comerciais (restaurantes, cafeterias, shoppings, supermercados, etc.), assim como em residências, os óleos residuais e gorduras de frituras são coletados em caixas de gordura, sendo geralmente dispostos em aterros sanitários, gerando volumes significativos de resíduos. Neste sentido, esses resíduos, ricos em material lipídico e de baixo custo, tem sido investigados como matérias primas para a produção de biocombustíveis [21], viabilizando a obtenção de biocombustíveis a partir de resíduos lipídicos de caixas de retenção de gordura, assim como a redução da quantidade e volume de resíduos dispostos em aterros sanitários [22].

Neste contexto, o presente trabalho investiga a viabilidade econômica da produção de frações de biocombustíveis similares, ao querosene verde, diesel leve e diesel pesado via craqueamento termo-catalítico de gorduras residuais (material lipídico) provenientes das caixas de retenção de gordura do restaurante universitário da Universidade Federal do Pará (UFPA), utilizando-se carbonato de sódio (Na_2CO_3), na proporção de 10 % (base seca), como catalizador seguida da destilação do produto líquido orgânico (bio-óleo) utilizando-se uma planta piloto de destilação.

No estado do Pará (Brasil), o fruto do açaí é um dos produtos mais consumidos da região norte do país, sendo seu resíduo a semente de açaí (“caroço de açaí”), o qual é um

passivo ambiental, principalmente na cidade de Belém-Pará. A produção do fruto de açaí é 1.072,740 (um milhão e setenta e duas mil e setecentos e quarenta) toneladas por ano, o qual faz do estado do Pará o maior produtor nacional. As sementes, ainda não apresentam uma destinação economicamente adequada, sendo descartadas em rios e lixões [20]. Devido a isso, a vasta quantidade de resíduos sólidos geradas em Belém do Pará torna o estudo de produção de biocombustíveis a partir da semente do açaí uma alternativa promissora, considerando a quantidade de matéria prima disponível, viabilizando o reuso desse resíduo para a geração de energia renovável [3,4].

Neste contexto, este trabalho propõe investigar o processo de produção de biocombustíveis, via a pirólise da semente de açaí impregnada com hidróxido de sódio (NaOH) em uma planta de escala piloto, avaliando a quantidade e o rendimento de reação dos produtos líquidos obtidos a 450 °C, seguidos da destilação fracionada do produto líquido orgânico (bio-óleo) para a produção de bioquerosene e diesel leve utilizando-se uma planta piloto. A composição desses produtos e os rendimentos também são apresentados [3,4]. Entre as alternativas maduras de fontes de energia renovável para serem usadas comercialmente, somente a biomassa tem sido identificada com de alta eficiência tecnológica [24]. A biomassa tem a flexibilidade de gerar energia elétrica e combustíveis para transporte [24]. Além das matérias primas mencionadas, é realizado o estudo de viabilidade econômica do processo de pirólise do óleo de palma e do resíduo de neutralização do óleo de palma (borra de neutralização).

O estudo de viabilidade econômica de cada matéria prima foi realizado utilizando-se os indicadores: payback simples, payback descontado, valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e índice de lucratividade (IL). Para avaliar quais os maiores impactos das etapas ou matérias primas de cada experimento sobre o mínimo preço de venda dos combustíveis (“*minimum fuel sale price – MFSP*”), foi realizada a análise de sensibilidade (para cada matéria prima), assim como, o ponto de equilíbrio (“*braeak even point*”) do projeto (para cada matéria prima) também foi obtido.

O presente trabalho tem como referência os estudos do grupo de pesquisa localizado no Laboratório de Engenharia Sanitária e Meio Ambiente (LAESA), do Instituto de Tecnologia (ITEC), da Universidade Federal do Pará (UFPA), o qual desenvolve trabalhos a aproximadamente 10 anos na área de transformação de biomassa (caroço de açaí, óleos vegetais, sebo bovino) resíduos (como por exemplo pneus descartados) para produção de biocombustíveis, por meio do processo de pirólise e craqueamento termo-catalítico seguido da destilação do bio-óleo para a produção de

biocombustíveis. Um resumo dos principais trabalhos será apresentado a seguir, os quais, foram a base para a elaboração desse estudo de viabilidade econômica, o qual, vem suprir uma necessidade e demanda de amadurecimento das discussões e da tecnologia para a implementação de bio-refinarias de produção de biocombustíveis, biocarvão e gases de cogeração.

Mota et al. [18] apresentou o estudo de craqueamento termo-catalítico em diferentes escalas de produção (bancada, semi-piloto e piloto), onde os produtos obtidos (bio-óleos) foram destilados em coluna de destilação em escala de bancada com uma coluna do tipo vigreux e em escala piloto com uma coluna do tipo empacotamento. Nas reações de craqueamento térmico e termocatalítico verificou-se a eficiência da utilização de catalisadores, avaliou-se diferentes tipos de catalisadores (Na_2CO_3 , CaCO_3 , HZSM-5, $\text{SiO}_2/\text{H}_3\text{PO}_4$, Lama Vermelha), além de diferentes tipos de matérias primas (óleo de palma, buriti, andiroba, girassol, soja residual e sebo bovino). Quanto ao craqueamento em escala piloto seguido da etapa de destilação, onde se utilizou óleo de palma e Na_2CO_3 como catalisador, os produtos obtidos foram submetidos a análise de GCMs, tendo como resultado à confirmação da obtenção hidrocarbonetos na faixa da gasolina, do querosene e do diesel, apresentando compostos parafínicos, olefínicos, naftênicos e traços de aromáticos em suas composições.

Almeida et al. [19] apresentou o estudo de obtenção de biocombustíveis a partir do processo de Craqueamento Térmico-Catalítico em escala piloto, a partir da gordura residual removida das caixas de gordura do restaurante universitário da Universidade Federal do Pará (RU-UFPA). A gordura residual foi coletada e tratada por peneiramento, desidratação e decantação. Foram utilizados como catalisadores o carbonato de sódio e a lama vermelha ativada termicamente a $1000\text{ }^\circ\text{C}$, material rejeito da produção de alumina da empresa Hydro-Alunorte, que também se trata de um passivo ambiental. Após o craqueamento, o bio-óleo obtido foi caracterizado e destilado em escalas de laboratório e piloto, obtendo-se biocombustíveis na faixa do bioquerosene, biogasolina, diesel leve e pesado. O maior rendimento em PLO, em torno de 82 %, foi obtido com 15% de catalisador carbonato de sódio. O índice de acidez do PLO (14,97 mg KOH/g) apresentou um valor considerado baixo e bastante satisfatório quando comparado a valores obtidos na literatura. Os resultados cromatográficos do experimento com 10% de carbonato de sódio apresentaram elevado teor de hidrocarbonetos PLO (78,98%), querosene verde (92,64% de hidrocarbonetos) e o diesel leve (90,21% de hidrocarbonetos). Os resultados

obtidos denotam viabilidade técnica para a produção dos biocombustíveis, a partir da gordura residual tratada das caixas de gordura.

Santos et al. [20] apresentou o estudo do uso da borra de neutralização do óleo de palma como uma matéria prima alternativa, sob o ponto de vista, econômico e ambiental para o processo de craqueamento térmico-catalítico. Inicialmente foram realizados experimentos de craqueamento térmico e catalítico da borra de neutralização e do óleo de palma (em escala de bancada, semi-piloto e piloto) utilizando-se diversos tipos de catalisadores (Na_2CO_3 , CaCO_3 , alumina ativada, Zeólita HY, HZSM-5 e FCC). O produto líquido orgânico (PLO) obtido e as frações obtidas da destilação em escala de bancada e piloto foram caracterizados e comparados com a norma vigente. Os resultados obtidos em escala de bancada mostraram que o catalisador alumina ativada providenciou o maior rendimento em base úmida (83,70%), tendo o óleo de palma como matéria prima, no entanto, o biocombustível obtido com Na_2CO_3 apresentou melhor qualidade quanto às características físico-químicas. Na escala semi-piloto, o maior rendimento foi o experimento térmico da borra (78,36%), seguido pelo experimento com 5% de alumina ativada (71,47%), porém o uso do Na_2CO_3 apresentou melhor qualidade quanto às características físico-químicas. Os experimentos na escala piloto mostraram o maior rendimento (71%) obtido com 15% de Na_2CO_3 na temperatura de 440 °C. Os resultados obtidos das análises cromatográficas dos PLOs obtidos nesta escala confirmaram que o aumento no percentual de catalisador possibilitou a formação de um PLO rico em hidrocarbonetos (91,22%) contendo alifáticos, olefínicos, naftênicos e aromáticos e baixos teores de compostos oxigenados (8,78%). Enquanto a destilação do PLO do Experimento 5 possibilitou a obtenção de frações ricas em hidrocarbonetos e ausentes de compostos oxigenados.

Pereira et al. [21] apresentou o estudo da utilização do sebo bovino como matéria-prima para a produção de biocombustível através do processo de reação de craqueamento térmico catalítico. Para o desenvolvimento deste estudo foram realizados três experimentos de craqueamento térmico catalítico em um reator de 143 litros, operando em modo descontínuo a 450 °C a pressão atmosférica, utilizando como catalisador o carbonato de sódio (Na_2CO_3). Dois experimentos foram realizados com o sebo bovino bruto (5 e 10 % de Na_2CO_3 – m/m) e um com o sabão de sebo bovino (5 % de Na_2CO_3 – m/m). Os produtos líquidos orgânicos obtidos das reações foram analisados através de análises físico-químicas e de composição química. Nestes produtos também foram realizadas a destilação fracionada com o intuito de obter frações de gasolina,

querosene e diesel leve semelhantes ao do petróleo. Os resultados obtidos mostram uma tendência em obter rendimentos maiores em produto líquido orgânico (PLO) com o uso de catalisador em maiores quantidades com a amostra bruta. A identificação química mostrou a quantidade de hidrocarbonetos presentes (parafinas e olefinas) variando de 89,28 a 92,23 % e os oxigenados (cetonas) de 7,77 a 10,72 %. Após as destilações verificou-se uma predominância na fração referente ao diesel (235 – 305 °C) enquanto que as frações de gasolina e querosene foram mais baixas, esse comportamento repetiu-se em todos os experimentos. Em relação as amostras coletadas ao longo do tempo das reações são possíveis verificar um aumento no índice de acidez e formação de oxigenados até em 60/70 minutos indicando a ocorrência do craqueamento primário e em seguida, até o final da reação, um decréscimo nestes valores evidenciando o craqueamento secundário.

Castro et al. [22] investigou a produção de biocombustíveis via pirólise, em escala de laboratório, semi-piloto e piloto, de sementes de açaí (*Euterpe oleracea*) in natura (SAIN) e impregnadas com solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) 2 mol.L⁻¹ (SANAHO). Os experimentos foram realizados a 350, 400 e 450 °C, a 1,0 atm, utilizando-se unidades de produção com capacidades de 100 g, 1 kg e 143 kg. Os aparatos experimentais de laboratório e semi-piloto constituídos de um reator de borosilicato e de aço inoxidável, respectivamente, ambos com fonte de aquecimento via resistência elétrica. A unidade piloto de Craqueamento Térmico constituída de um reator de aço inoxidável encamisado, sendo a fonte de aquecimento térmico via queima de gás GLP alimentado em um queimador. As reações produziram gases não condensáveis, produto líquido orgânico (bio-óleo + fase aquosa) e uma fase sólida (biocarvão). Os produtos apresentaram rendimentos médios 5,91% (m/m), 33,45% (m/m), 23,55% (m/m) e 37,08% (m/m) para as fases bio-óleo, aquosa, gasosa e sólida, respectivamente, para as sementes SAIN, e 11,03% (m/m), 17,49% (m/m), 31,62% (m/m) e 39,84% (m/m) para as fases bio-óleo, aquosa, gasosa e sólida, respectivamente, para as sementes SANAHO. Observou-se que o rendimento de bio-óleo aumentou e o rendimento da fase aquosa diminuiu com a aplicação de processo de impregnação nas temperaturas investigadas, verificou-se ainda que os rendimentos de biocombustíveis foram superiores para menores temperatura em relação aos experimentos com SAIN, em todas as escalas de produção. Com os resultados encontrados para o índice de acidez e para a viscosidade cinemática do bio-óleo obtido a partir das SANAHO constatou-se uma redução máxima de aproximadamente 78% e 66%, respectivamente, em relação ao bio-óleo obtido das SAIN.

As análises de FT-IR indicaram ligações químicas referentes à hidrocarbonetos, oxigenados e contaminantes da biomassa. A análise morfológica do biocarvão através do DRX demonstrou a existência de estruturas amorfas (SAIN) e cristalinas (SANA OH) (fase mineralógica), enquanto o MEV e o EDS identificaram no interior dos poros da estrutura carbonácea cristais de sódio. O FRX corroborou as análises anteriores, demonstrando percentuais de sódio de até 32% (m/m) na composição estrutural dos biocarvões. O FT-IR indicaram a presença grupos funcionais comumente encontrados em biomassas de material lignocelulósico. O BET apresentou uma área superficial menor que $10 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$. A Destilação Fracionada, em escala de laboratório, produziu frações líquidas na faixa da gasolina, querosene e diesel leve, demonstrando maiores rendimentos (acima de 20% m/m) para fase bioquerosene e o percentual máximo em área de hidrocarbonetos para fração biogolina estimado em 97,782%.

Santos et al. [23] investigou o processo pirólise de pneus inservíveis em escala de bancada e piloto. Na escala menor, foi avaliado a variação de temperatura, o tipo de catalisador obtido comercialmente (CaCO_3 , Na_2CO_3 e $\text{Ca}(\text{OH})_2$), o tipo de catalisador sintetizado/tratado a partir de rejeitos industriais (LV 1M HCl, LV 2M HCl e zeólita de caulim de enchimento) e a concentração da solução de NaOH impregnado no pneu (0,5; 1 e 2M) nos rendimentos e composições do óleo de pirolise de pneus (OPP). Na maior escala foi avaliado a evolução das propriedades físico-químicas e composicionais dos OPP's durante o processo de craqueamento térmico ($T=400^\circ\text{C}$, $T=450^\circ\text{C}$ e $T=500^\circ\text{C}$), visando obter um produto líquido com características de combustíveis fosseis e/ou compostos de elevado valor comercial. Os resultados mostraram que os rendimentos dos OPP's são influenciados pelo aumento da temperatura do processo, pelo tipo de catalisador e pelo tratamento químico na matéria prima. Sendo o processo à 500°C e com zeólita de caulim de enchimento como catalisador o que mais otimizou o processo quanto ao rendimento e produção de compostos alifáticos no OPP. O uso de catalisadores propiciou a redução dos compostos aromáticos e de compostos com enxofre na fração líquida. Ainda na menor escala, o comportamento dos compostos alifáticos nos processos térmicos, termocatalítico e com impregnação química da matéria prima, foi fortemente influenciado pela composição do d-limoneno nos óleos de pirólise de pneus. Os resultados da escala piloto permitiram concluir que houve variações das propriedades físico-químicas e reológicas durante o processo de craqueamento, mas tendem a se estabilizar em 65 minutos de processo, apresentando baixa acidez e a baixa viscosidade. As principais substâncias identificadas durante todo o processo foram o d-limoneno, o

BTX (benzeno, tolueno e xilenos) e os cimenos. No fracionamento dos OPP's, a fração da gasolina (C8 a C10) e do querosene (C8 a C17) são constituídas essencialmente por hidrocarbonetos, enquanto o diesel leve (C15 a C21) e diesel pesado (C17 a C23) por heteroaromáticos. Conclui-se, ainda, que os compostos com enxofre e com halogênios tendem a ser separados a partir da faixa do diesel leve.

Os trabalhos apresentados pelo grupo de estudo do LAESA/ITEC/UFPA estão em consonância com os objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), os quais, são uma agenda mundial adotada durante a reunião de Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, ocorrida em Setembro de 2015, composta por 17 objetivos e 169 metas a serem atingidas até 2030. A ODS 6 – Água potável e Saneamento visa assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento par todos. A meta 6.3 (ODS 6) para o Brasil, afirma que até 2030, o país deve melhorar a qualidade da água nos corpos hídricos, reduzindo a poluição, eliminando despejos e minimizando o lançamento de materiais e substâncias perigosas, reduzindo pela metade a proporção do lançamento de efluentes não tratados e aumentando substancialmente o reciclo e reuso seguro localmente [24].

Destaca-se que o presente estudo de viabilidade econômica foi direcionado ao processo de pirólise em batelada e craqueamento termo-catalítico de diferentes materiais primas seguido da destilação do bio-óleo. Uma conotação mais abrangente, referente ao termo “avaliação do projeto” não foi contemplada. Destaca-se ainda, que as materiais primas utilizadas, como o material lipídico do RU-UFPA e a semente de açaí apresentam sazonalidades, enquanto o óleo de palma e o resíduo da neutralização do óleo de palma apresentam como vantagem terem um fornecimento mais seguro e regular.

1. OBJETIVOS

1.1 – OBJETIVO GERAL

Realizar os estudos de viabilidade econômica do processo de craqueamento (pirólise em batelada) termo-catalítico seguido da destilação, utilizando-se as matérias primas do caroço do açaí (*Euterpe oleracea*, Mart) *in natura*, material lipídico da caixa de gordura do restaurante universitário da Universidade Federal do Pará (UFPA), óleo de palma e resíduo da neutralização do óleo de palma.

1.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar os resultados de rendimento do processo de craqueamento termo-catalítico e destilação em planta piloto das matérias primas da biomassa de caroço de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart) *in natura* e material lipídico da caixa de gordura, de acordo com a literatura;

- Apresentar os resultados das caracterizações químicas e físico-químicas das matérias primas utilizadas, dos produtos líquidos orgânicos (bio-oléos) obtidos do processo de craqueamento (pirólise) em escala piloto e dos biocombustíveis obtidos após o processo de destilação em escala piloto, de acordo com a literatura;

- Calcular o fluxo de caixa descontado da produção de biocombustíveis a partir das biomassas das matérias primas mencionadas;

- A partir dos resultados de rendimento dos processos de craqueamento termo catalítico e destilação das matérias primas mencionadas, realizar o estudo de viabilidade econômica avaliando-se os seguintes indicadores: payback simples, payback descontado, valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), índice de lucratividade (IL);

- Obter o resultado de mínimo valor do preço de venda (“minimum fuel sale price – MFSP”) dos biocombustíveis considerando-se cada matéria prima mencionada e comparar os MFSP dos biocombustíveis obtidos com a literatura;

- Realizar a análise de sensibilidade de cada experimento com sua respectiva matéria prima, avaliando-se qual aspecto (matéria prima, etapas, etc) apresentam maiores impactos sobre o de mínimo valor do preço de venda (“*minimum fuel sale price* – MFSP”), comparando-os com os resultados da literatura.

1.3 - ESTRUTURA DA TESE

Este trabalho é dividido em quatro capítulos, a saber:

Capítulo 1 – É apresentada a introdução contextualizando-se o estudo e a motivação do trabalho. São destacados os trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa (LAESA/ITEC/PRODERNA/UFPA) utilizados como referência para a realização do estudo de viabilidade apresentado nesse trabalho. Além disso, são apresentados os objetivos gerais e específicos.

Capítulo 2 – É apresentado os fundamentos do trabalho. Nesse caso, destacou-se o processo de pirólise da biomassa assim como os fundamentos do processo de craqueamento termo-catalítico de óleos vegetais. Uma vasta revisão da literatura é apresentada a respeito dos processos de pirólise para a produção de biocombustíveis no tópico estado da arte. Por fim, são apresentadas as técnicas e metodologias de análise econômica para a tomada de decisão de viabilidade ou não dos projetos (neste trabalho, trata-se do estudo do processo de pirólise e craqueamento termo-catalítico).

Capítulo 3 - Neste capítulo são detalhados os indicadores e critérios de avaliação econômica de projetos. Assim como, são apresentados em detalhes toda a metodologia de cálculo para a obtenção de receitas e despesas, e consequente elaboração dos fluxos de caixa dos projetos.

Capítulo 4 – É indicada e anexado os artigos publicados na revista *Energies* (Qualis A1- CAPES), no qual são apresentados e discutidos todos os resultados desse trabalho. Os artigos são “Economic feasibility assessment of the thermal catalytic process of wastes: Açai seeds (*Euterpe Oleracea*) and Scum from grease traps” e “Economic analysis of thermal catalytic process of Palm oil (*Elaeis guineensis*, Jacq) and soap phase residue of neutralization process of Palm oil (*Elaeis guineensis*, Jacq)”.

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS

2.1 – PIRÓLISE DA BIOMASSA

A celulose é o constituinte de maior abundância na biomassa (40-50%), o que indica a necessidade de caracterizar a rota de decomposição da mesma para o entendimento da obtenção de biocombustíveis a partir de biomassa lignocelulósica. Apesar de diferentes rotas de decomposição associadas a celulose, é comumente aceito que a levoglucosana é o principal composto produzido no processo via reação primária, posteriormente a mesma é decomposta em voláteis leves como furfural, hidroxiacetaldeídos, hidroxialdeídos, entre outros [22]. As rotas de decomposição da celulose, estão dispostas nas **Figura 2.1**.

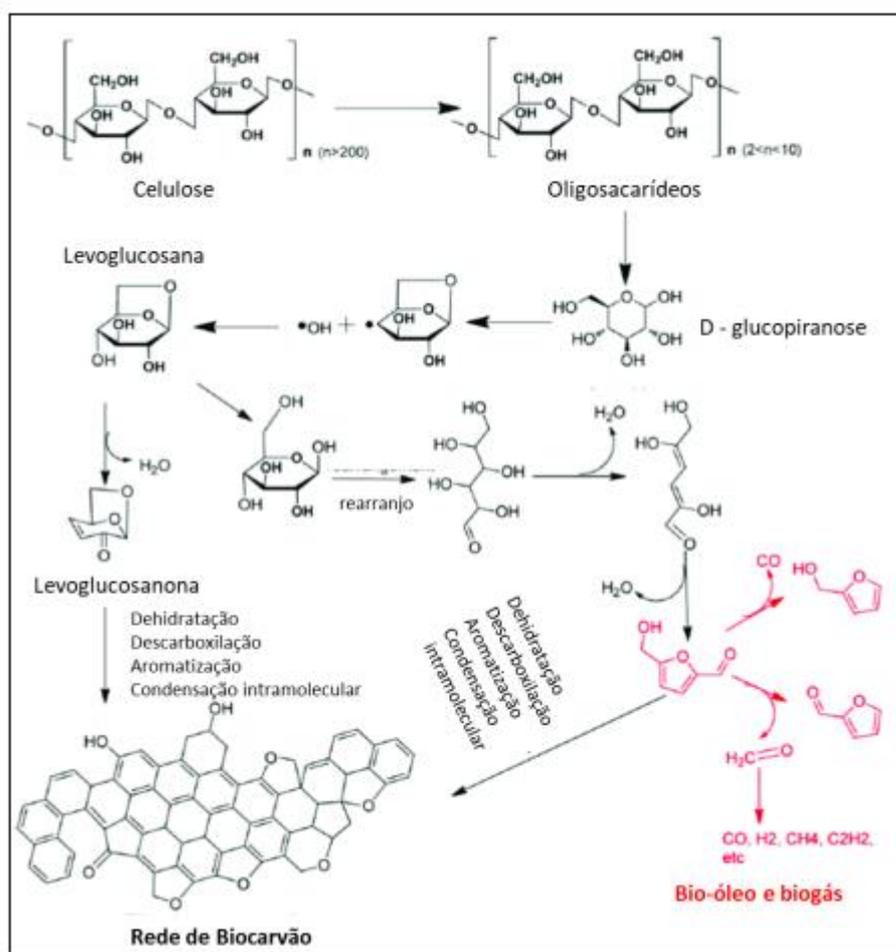


Figura 2.1 – Rotas de decomposição da celulose [22].

A hemicelulose por ser um composto com menor estabilidade inicia seu processo de desidratação em temperaturas inferiores a 280°C. A partir desse constituinte são formados fragmentos de anidridos solúveis em água, carvão e gás. O aumento da temperatura ocasiona despolimerização do mesmo, havendo a formação de orgânicos voláteis como levoglucosana, anidro-hexoses e furanos [31].

A decomposição da lignina ocorre em maiores temperaturas, comportamento que se deve a alta estabilidade térmica deste constituinte. Os produtos resultantes de sua decomposição estão presentes principalmente no carvão e em voláteis de baixo peso molecular como os compostos fenólicos. A formação dos produtos se dá a partir de reações primárias e secundárias, tendo guaiacol como intermediário chave para formação de catecol, p-cresol e fenol [22]. Dessa forma, o conhecimento dos mecanismos reacionais de síntese são etapas essenciais requeridas para melhorar a qualidade dos produtos biocombustíveis e otimizar os parâmetros operacionais da pirólise [32].

De acordo com o relatado por [22] a celulose, hemicelulose e lignina apresentam comportamentos térmicos e rotas de decomposição bastante distintas. A hemicelulose é a substância de maior reatividade, com isso sua decomposição ocorre de forma mais significativa entre as temperaturas de 220 e 315 °C. Através de estudos de TGA, os mesmos observaram que a taxa máxima de perda em massa foi de 0,95 % m/m °C⁻¹ a 268 °C, restando ainda 20 % m/m de resíduos sólidos a 900 °C. No entanto, para a pirólise da celulose, os autores notaram que a mesma ocorre em uma faixa de temperatura mais elevada (315 – 400 °C) devido à sua estrutura parcialmente cristalina, com taxa máxima de perda de massa de 2,84 % m/m °C⁻¹ a 355 °C. Verificaram ainda que em temperaturas acima de 400 °C quase toda celulose já se encontra pirolisada, restando apenas 6,5 % m/m de resíduos sólidos. Dentre os três componentes, a lignina é o que apresenta maior faixa de degradação térmica, pois sua decomposição ocorre lentamente entre as temperaturas de 160 e 900 °C e com uma taxa muito baixa de perda de massa, sendo próxima de 0,14 % m/m °C⁻¹. Em seus estudos [33], obtiveram as curvas TG e DTG da celulose D microcristalina e da lignina em atmosfera de ar com razão de aquecimento 10 °C/min, conforme observado na **Figura 2.2** e **2.3**, respectivamente.

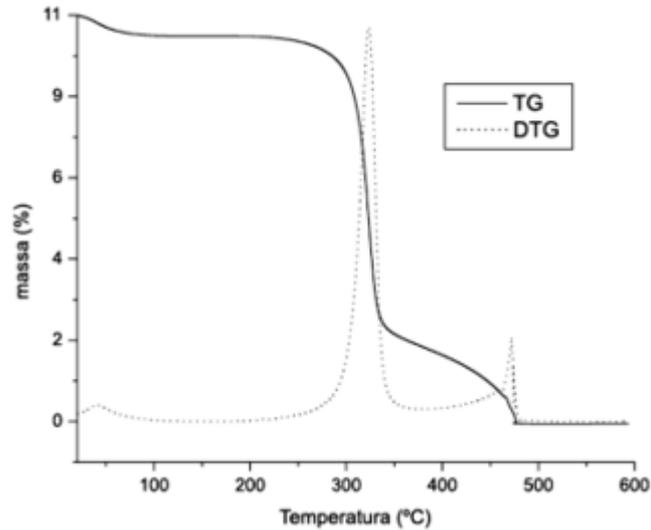


Figura 2.2 – Curva TG e DTG da celulose D microcristalina comercial [25][33].

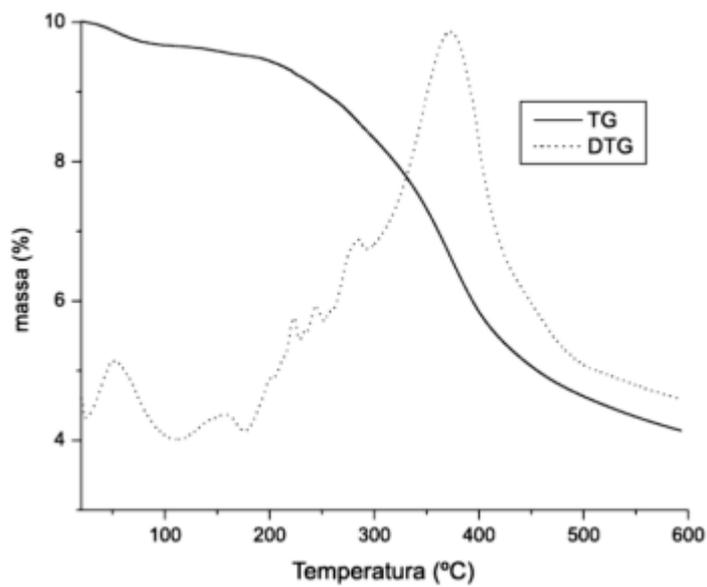


Figura 2.3 – Curva TG e DTG para lignina [25].

2.1.1 A biomassa do caroço de açai (*Euterpe oleracea*, Mart)

A biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, de vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e seus resíduos, e também de resíduos orgânicos, os quais encontramos os resíduos agrícolas, urbanos e industriais. Assim como também se pode obter biomassa dos biofluidos, como óleos vegetais [34]. A **Figura 2.4** mostra um esquema das fontes de biomassa.

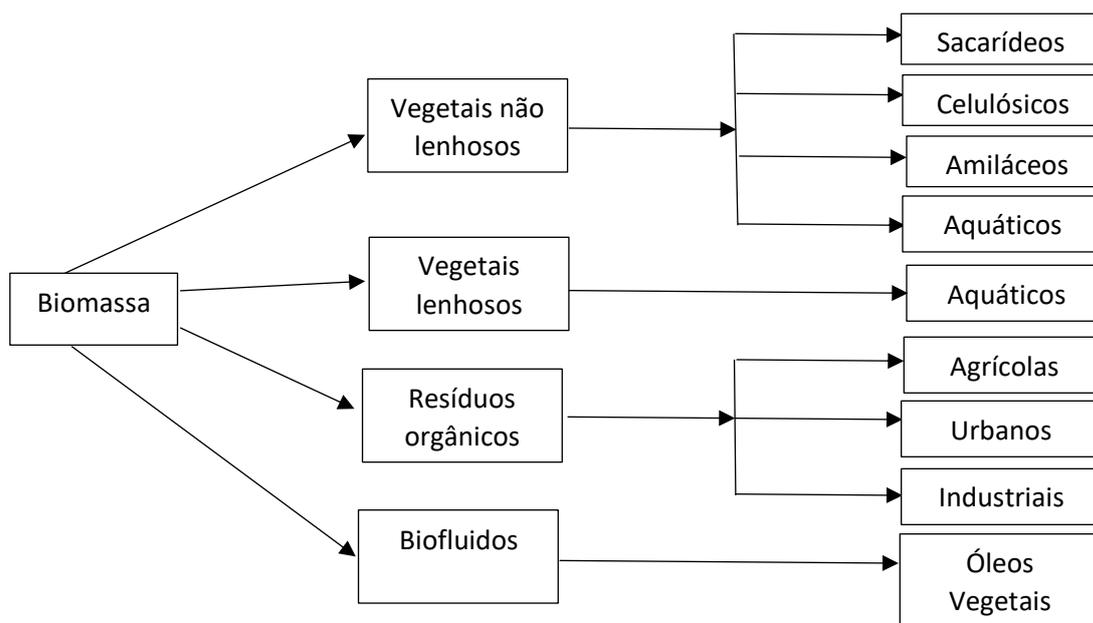


Figura 2.4 – Fontes de Biomassa [34].

A obtenção de produtos químicos a partir de resíduos e coprodutos de biomassa é de grande importância para agregar valor às cadeias produtivas de biomassa, pois pode servir de insumos a outras diversas indústrias como petroquímica, farmacêutica, construção civil, agronegócio, entre outros [22].

A biomassa pode ser utilizada de forma direta pela queima ou indiretamente após a sua conversão, através de processos físicos, bioquímicos e termoquímicos, em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, para uso em sistemas motores automotivos ou estacionários, sendo esses processos de conversão objeto de vários estudos [35-38].

O açaí (*Euterpe oleracea*, Mart) pertencente à família Arecaceae, que engloba, aproximadamente, 200 gêneros e cerca de 2600 espécies, cuja distribuição é predominantemente nas áreas tropicais e subtropicais [30]. Existem duas espécies de açaí *Euterpe oleracea* e *Euterpe precatória*, encontradas nas áreas alagadas dos rios da bacia do Amazônica, essa palmeira possui um dos frutos mais tradicionais na alimentação da população regional. Essas são espécies abundantes em estados como Pará e Amazonas, havendo também incidência do açaizeiro em países que fazem fronteira com o Brasil, como Peru, Bolívia, Venezuela e Colômbia [39].

Apesar da incidência de açaizeiros em todo o território Amazônico, o maior produtor de açaí do país é o estado do Pará. A capital do estado, Belém, é a região que mais consome açaí no país. Apresenta um consumo diário de 440 toneladas do fruto, com aproximadamente 365 toneladas por dia de lixo orgânico [22].

2.2 – CRAQUEAMENTO TERMO-CATALÍTICO DE ÓLEOS VEGETAIS

Os óleos vegetais são definidos como substâncias líquidas à temperatura ambiente e as gorduras caracterizam-se como substâncias sólidas e ou plásticas [40]. Os óleos e gorduras são formados principalmente por ésteres completos (denominados de triglicerídeos, triacilgliceróis ou ácidos graxos esterificados), resultantes da combinação entre três moléculas de ácidos carboxílicos (ácidos graxos) e uma molécula de glicerol (poliol), de acordo como mostrado na **Figura 2.5**, onde R_n é a cadeia de hidrocarbonetos, podendo ser iguais ou diferentes. Os ácidos graxos livres e parcial glicerídeos (mono e di-glicerídeos) também resultam de reações de hidrólise dos triglicerídeos de óleos vegetais, devido a presença de umidade [41,42].

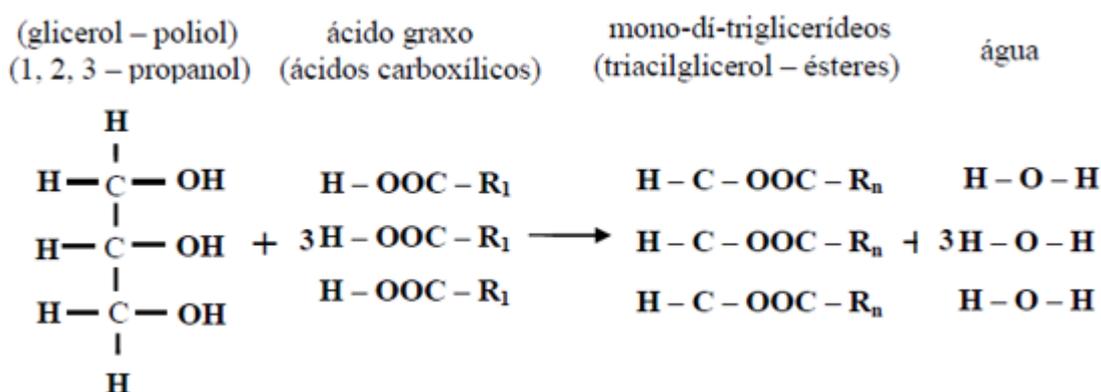


Figura 2.5 – Reação de formação de triglicerídeos de óleos e gorduras [43].

No craqueamento ou pirólise de óleos vegetais ou gorduras animais, com ou sem a presença de catalisador, as moléculas dos triacilglicerídeos decompõem-se em ácidos graxos, sendo que o subsequente craqueamento destes resulta em uma mistura de hidrocarbonetos com características físico-químicas similares aos derivados do petróleo [18].

Estudos realizados sobre o craqueamento revelaram que a reação de craqueamento pode ocorrer em duas etapas distintas e consecutivas. Na primeira etapa chamada de craqueamento primário, são formados principalmente ácidos carboxílicos decorrentes do rompimento da ligação C-O da parte glicerídica e o resto da cadeia do óleo ou gordura e na segunda etapa, chamada de craqueamento secundário, ocorre à desoxigenação dos produtos formados no craqueamento primário [18].

Os autores [44] relatam que o uso do produto líquido orgânico (produto líquido craqueado, bio-óleo) direto nos motores é visto como uma desvantagem do óleo derivado do craqueamento térmico devido ao elevado índice de acidez. Isto ocorre por razão da

presença de ácidos graxos de cadeia curta. Neste contexto, demanda-se o uso de catalisadores a busca de implementar condições operacionais adequadas para garantir a redução do teor de ácidos para os níveis aceitáveis de qualidade destes biocombustíveis. A pirólise consiste na degradação térmica da matéria na ausência de oxigênio [18]. Os produtos provenientes deste processo são o carvão e um gás, que contém vapores condensáveis, a partir do qual um líquido, chamado bio-óleo, pode ser recuperado. As proporções dos produtos dependem do tipo de pirólise empregada que, por sua vez, varia de acordo com as variáveis operacionais de processo empregadas tais como a temperatura de reação, taxa de aquecimento e o tempo de residência dos vapores dentro do reator [18].

2.2.1 – Material Lipídico da *Caixa de Gordura*

Os óleos e gorduras usados no processo de fritura de alimentos geram uma quantidade considerável de resíduos. Sabe-se que um litro de óleo de fritura lançado na rede de esgoto, ou lançado em algum corpo d'água, tem a propriedade de contaminar até um milhão de litros de água, gerando um transtorno para seu tratamento, pois em razão do aumento populacional na área urbana se faz necessário aumentar a demanda por água potável, sendo este um produto considerado de alta necessidade para o ser humano [19]. Em estabelecimentos comerciais (restaurantes, lanchonetes etc.), agroindustriais, assim como residências, os óleos e as gorduras residuais das frituras são coletados em Caixas de Gorduras, sendo, em geral, dispostos em Aterros Sanitários, gerando volumes significativos de resíduos. Neste sentido, a utilização destes resíduos, ricos em material lipídico e de baixo custo vem sendo investigada como matéria prima para a produção de biocombustíveis [19], possibilitando a obtenção de biocombustíveis a partir de resíduos lipídicos de Caixas de Gorduras, assim como a redução da quantidade e o volume de dejetos depositados em Aterros Sanitários [19].

2.3 – O ESTADO DA ARTE

Nos anos recentes, diversos trabalhos tem sido realizados estudando a viabilidade econômica para a produção de biocombustíveis a partir da biomassa e resíduos de frituras, por meio dos processos de pirolise seguido do processo de destilação. Um resumo dos estudos mais recentes reportados na literatura de avaliação técnico-econômica são apresentados sinteticamente como segue:

Wright et al. [45] apresentou um estudo para a produção de bio-óleo por meio da pirólise rápida, utilizando-se palha de milho como matéria prima, obtendo-se como biocombustíveis nafta e diesel. A produção considerada para a planta foi de 2.000 (duas mil) toneladas secas por dia, produzindo hidrogênio a partir do bio-óleo. O valor do produto combustível foi de 0,82 US\$/kg. O valor do produto considerando-se a construção de um processo de pirólise rápida e de uma bio-refinaria foi de US\$ 1,73 por litro.

Brown et al. [46] apresentou em 2010, um estudo de produção de biocombustíveis e hydro-processamento utilizando-se biomassa como matéria prima. A análise de viabilidade econômica resultou em um mínimo valor do preço de venda do biocombustível (“*minimum fuel sale price – MFSP*”) em 0,56 US\$ por litro. Em 2013, os mesmos autores obtiveram um MFSP de 0,69 US\$ por litro, considerando-se uma planta com capacidade de 2.000 (dois mil) toneladas por dia de palha de milho como matéria prima. Nesse estudo, os biocombustíveis biogolina e biodiesel foram obtidos. Em outro estudo realizado para a produção de combustíveis para transportes (biogolina e biodiesel), monossacarídeos e hidrogênio via pirólise rápida e “upgrades”, utilizando-se o software Aspen Plus. Como resultado, uma taxa interna de retorno (TIR) de 11,4 % foi obtida baseada em preços de mercado da gasolina de US\$ 0,64 por litro, 3,33 US\$ por kg de hidrogênio e 0,77 US\$ por litro de diesel.

No processo de pirólise, resultados de 50-75 % de bio-óleo são apresentados na literatura (muito embora rendimentos acima ou abaixo desta faixa não sejam incomuns, dependendo das condições operacionais, tipo de matéria prima e reator utilizado [41,47], alguns resultados como por exemplo de 15-25 % de carvão (m/m) e 10-20% de gás também são apresentados [48,49].

Mota et al. [18] apresentou resultados de produção de bio-óleo via craqueamento térmico e craqueamento termo-catalítico do óleo de palma em diferentes escalas de produção. Parte do bio-óleo obtido foi destilado em uma coluna de destilação Vigreux e uma coluna em escala piloto utilizando-se anéis de rasching. O autor investigou o efeito de diferentes tipos de catalisador e o teor de catalisadores sobre o produto líquido orgânico (bio-óleo). Resultados de rendimentos de bio-óleo, coque e gás reportados foram de 63,6 % (m/m), 8 % (m/m) e 28,4 % (m/m), respectivamente.

Thihakarathme et al. [50] apresentou um estudo de produção de biocombustíveis (base hidrocarbonetos) via pirólise catalítica suave e “upgrading” parcial dos compostos oxigenados. A matéria prima utilizada foi a madeira (biomassa). O estudo de viabilidade

econômica resultou em um MFSP de 0,98 US\$ por litro, assumindo uma taxa interna de retorno de 10 %. O resultado em termos de rendimento de biocombustíveis foi de 17,7 % (m/m).

Jaronenhasemmesuk et al. [51] menciona que o processo de pirólise rápida para a produção de bio-óleo tem um grande potencial para tornar-se uma das principais fontes de energia renovável. Uma planta de 20-30 dm³ por dia de produção de bio-óleo foi utilizada, onde os balanços de massa e energia foram aplicados para avaliar a performance e melhorias de projeto. O estudo demonstrou que o custo de produção do bio-óleo foi em torno de THB 30-35 por dm³.

Vasalos et al. [52] investigou a produção de bio-óleo via a pirólise termo-catalítica a 482 °C utilizando-se o catalisador ZSM-5 disponível comercialmente, em um reator de leito fluidizado (CFB). A matéria prima utilizada foi a biomassa de madeira (“madeira de faia”) e foi considerada a escala comercial de produção de 180.000 (cento e oitenta mil) toneladas por ano com 90 % de fator de operação. Uma análise de sensibilidade demonstrou que o preço do bio-óleo varia de 22-31 US\$ por GJ. Em base equivalente de energia de óleo cru, o custo do bio-óleo obtido foi na faixa de 36-49 US\$ por GJ.

Wang e Jan [53] apresentou um estudo de produção de bio-óleo a 400-450 °C utilizando-se casca de arroz como matéria prima, em um processo de pirólise rápida em leito fluidizado. Os resultados evidenciaram que os principais componentes do bio-óleo foram o ácido n-hexadecanóico, ácido octadecaóico, ácido 9-octadecaóico e o ácido decanóico. As análises de GC-MS/FID e GC-TCD mostraram que os maiores componentes dos gases não condensáveis foram CO, CO₂, H₂, CH₄ e N₂. Os resultados de análise técnico-econômica evidenciaram um valor de MFSP de US\$ 0,55 por litro, para uma planta de tamanho de 1.000 toneladas por dia.

Im-Orb et al. [54], apresentou um estudo de produção de gás de síntese e bio-óleo via o processo de gaseificação e pirólise de biomassa integrada (IBPG) onde a palha de arroz foi utilizada como matéria prima. O software Aspen foi utilizado para as simulações. O processo de IBPG em temperaturas de 700 °C evidenciou a melhor performance técnica. A análise indicou que o processo de IBPG com a pirólise a 400-500 °C e a gaseificação convencional de biomassa é uma técnica viável. O estudo de viabilidade econômica demonstrou que o processo de pirólise a 500 °C fornece gás de síntese e produção de bio-óleo a taxas de 1,185 e 0,2044 kmol h⁻¹, respectivamente, e uma eficiência energética de 68,86 %.

Xia et al. [55], investigou o processo de pirólise utilizando-se castanha chinesa (CNS) e “jatropha” (JCS), para determinar a temperatura ótima de operação. A baixas temperaturas (250-450 °C), CO₂ foi o principal componente dos gases de pirolise, e um óleo com elevada acidez foi obtido. Quando se estudou o aumento de temperatura para 550-650 °C, óleo de fenol enriquecido e elevado poder calorífico de bio-carvão (aprox. 26 MJ / kg) foi obtido; os rendimentos de H₂ e CO aumentaram. A altas temperaturas (750-950 °C), óleo pesado e alto poder calorífico do gás de pirólise (aprox. 15 MJ / m³) foi obtido. Bio-carvões de CNS e JCS mostraram diferentes tendências no que se refere a evolução de sua estrutura.

Martins et al. [56], apresentou um estudo de produção de biocombustíveis dos resíduos de palma, utilizando-se em para as simulações Aspen Plus v. 1.0, onde a pirólise, a gaseificação e a fermentação foram investigas. A base de cálculo utilizada foi de 1 tonelada de biomassa de alimentação. Os resultados foram de produção de 56 kg de hidrogênio e 233 kg de etanol (fermentação). O consumo de energia líquido na pirólise foi de 37 KJ / tonelada de biomassa de alimentação. Outros resultados também evidenciaram que o preço do bio-etanol foi de 1,85 US\$ / litro. Os resultados de análise econômica mostraram que a pirólise e a gaseificação são economicamente mais viáveis do que a fermentação.

Badger et al. [57], destacou que a biomassa é definida como um material orgânico que é renovável e biodegradável. A biomassa pode ser convertida tanto para etano como bio-óleo. Pirólise é a decomposição química de material orgânico em torno de 500 °C na ausência de oxigênio [58]. Depois de resfriado e condensado, um líquido marrom escuro (bio-óleo) é formado. O processo de pirólise produz três principais componentes: um líquido orgânico (bio-óleo), coque e gás [18, 20].

Cheng et al. [59], apresentou um estudo de produção de bio-carvão por meio da pirólise lenta utilizando uma abordagem de linguagem de máquina (“machine learning”), avaliação do ciclo de vida (“life cycle assessment – LCA”) e análise econômica. Os resultados demonstraram três importantes métricas: retorno do investimento com base energética (EROI), potencial de aquecimento global líquido (“net global warming potential – GWP”), e mínimo preço de venda do produto (“minimum product selling price – MPSP”). A pirólise lenta de resíduos de colheita e resíduos lenhosos tendem a produzir tecnologias de emissões negativas, com valores de EROI de 1,90 a 3,60 (sem substituição) e 2,40 a 4,30 (com substituição) e 770 kg de CO₂ eq / ton a 1.050 kg de CO₂ eq / t (com substituição). O MPSP obtido foi de 774 a 1.256 US\$ / ton, de acordo com a temperatura

e com a matéria prima. A avaliação técnico-econômica, avaliação do ciclo de vida e da tecnologia disponível também são apresentadas por Sorunmu et al. [60].

Lan et al. [61], apresentou um estudo de viabilidade econômica para a produção de biocombustíveis por meio da pirólise rápida, alimentada com blend de resíduos de pinho e mudas de grama. O MFSP do biocombustível obtido foi de 3,92 a 4,33 galões de gasolina equivalente (GGE), enquanto o MFSP de uma biorefinaria centralizada varia de 3,75 a 4,02 US\$ / GGE. A análise de cenários indicou a redução do MFSP com o aumento da capacidade da refinaria.

Diversos autores tem apresentado estudos de avaliação econômica da produção de bio-óleo por meio do processo de pirólise [48,49,62]. Os incentivos para produzir com tecnologia de pirólise termo-catalítica são [63,64]: (1) elevada estabilidade de estocagem e no transporte e (2) elevado teor energético (28-30 MJ/Kg) [58,62], e (3) alguns produtos apresentam baixa acidez e possuem como resultado menor corrosão. Devido a esses aspectos, é importante estimar o custo de produção do bio-óleo e seu uso em aplicações comerciais tanto como combustíveis para transporte ou químicos. Um estudo de avaliação econômica é realizado neste trabalho, com base em uma planta piloto de pirólise, utilizando-se um catalisador comercial (Na_2CO_3). Energia a partir de biomassa pode ser produzida por meio do craqueamento termo-catalítico seguido de destilação [18]. A pirólise de biomassa, como a do óleo de palma (*Elaeis guineenses*, Jacq) pode produzir biocombustíveis. Depois da destilação, as frações do destilado (biocombustíveis) são similares a gasolina, queorosene e diesel de origem fóssil [16]. Muito embora diversos estudos tenham sido apresentados na literatura, no que se refere ao estudo de viabilidade técnico-econômica para a produção de biocombustíveis, a inovação deste trabalho está relacionada a avaliação econômica da produção de biocombustíveis de duas matérias primas: material lipídico e sementes de açaí. Além disso, é destacado neste trabalho análise de viabilidade econômica dessas duas matérias primas com base nos seguintes indicadores de avaliação de projetos: critério de payback simples, payback descontado, valor presente líquido (NPV), taxa interna de retorno (TIR) e índice de lucratividade. Para avaliar as diversas influências sobre o MFSP, uma análise de sensibilidade foi realizada. Além disso, foi calculado o ponto de equilíbrio do projeto (“*breakeven-point*”).

Destaca-se que diversos trabalhos mencionados na literatura apresentam escalas de produção elevadas, favorecendo o “ganho de escala” (MFSP mais baixos). Os resultados de MFSP da literatura apresentam, em alguns casos, menores do que os obtidos nesse trabalho, devido a esse fato.

2.4 – TÉCNICAS DE ANÁLISE ECONÔMICA

Objetivando realizar o estudo de viabilidade econômica dos processos de pirólise seguido da destilação do material base lipídica e do material lignina-celulósica de sementes de açaí, uma clássica metodologia foi aplicada (use de indicadores de viabilidade econômica [47]). Associado com essa avaliação, uma análise de sensibilidade [60][65] foi realizada, assim como o “*breakeven-point*” e o “*minimum fuel sale price – MFSP*” [45,46,47,53,56,61] foram calculados. A metodologia aplicada pode ser vista na **Figura 2.6**.

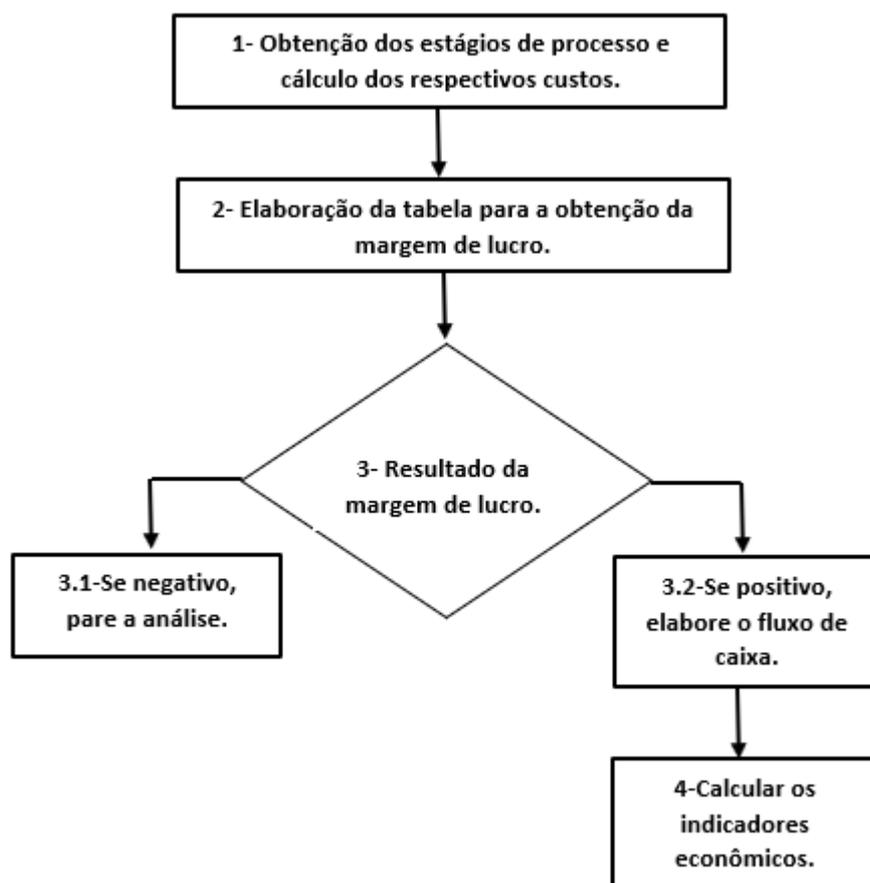


Figure 2.6 - Metodologia utilizada para realizar a avaliação econômica.

A **Figura 2.7** apresenta o esquema utilizado por [7-9] para a conversão do material base lipídica em produto líquido orgânico (bio-óleo), coque e gás por meio do processo de pirólise em batelada utilizando-se 10 % (m/m) de catalisador e carbonato de sódio (Na_2CO_3) a 440 °C, seguida da destilação para a obtenção de biocombustíveis (querosene verde, diesel leve e diesel pesado).

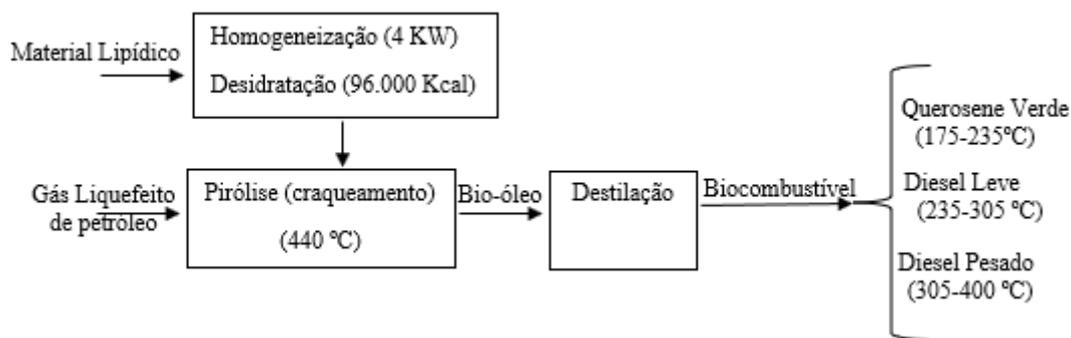


Figura 2.7 – Esquema de obtenção de biocombustíveis a partir do material base lipídica.

A **Figura 2.8** ilustra o esquema utilizado por [3,4] no processo de conversão das sementes de açaí em produto líquido orgânico (bio-óleo), coque e gás por meio do processo de pirólise em batelada a 450 °C, seguido da destilação para a obtenção de biocombustíveis (bioquerosene e diesel verde leve).

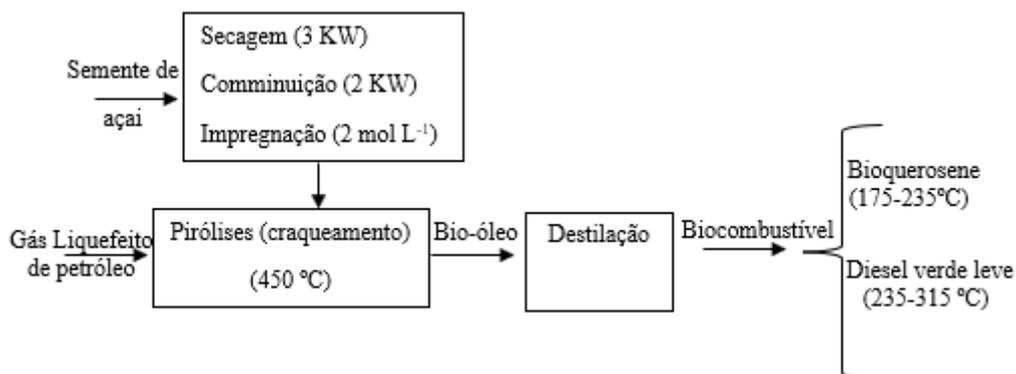


Figura 2.8 – Esquema de obtenção de biocombustíveis a partir da semente de açaí.

A **Figura 2.9** apresenta o esquema utilizado por Mota et al. [18] para a conversão de óleo de palma em produto líquido orgânico (bio-óleo), coque e gás por meio do processo de pirólise em batelada utilizando-se 10 % (m/m) de catalisador e carbonato de sódio (Na_2CO_3) a 450 °C, seguida da destilação para a obtenção de biocombustíveis (biogasolina, bioquerosene, diesel verde, diesel pesado).

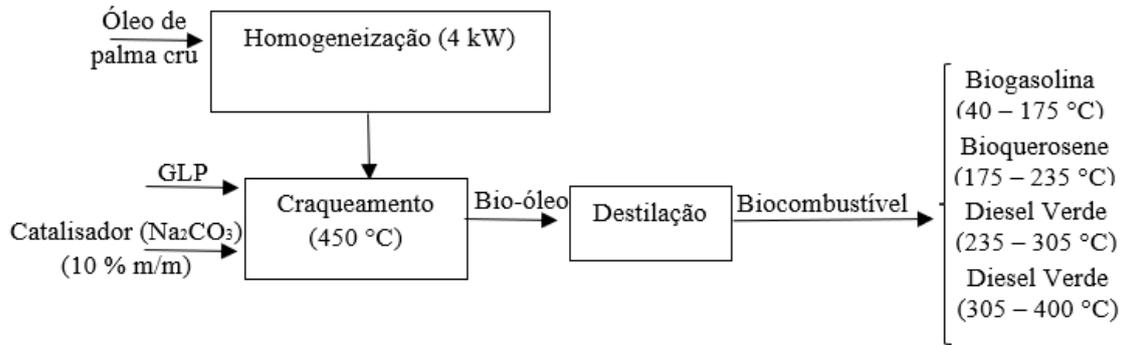


Figura 2.9 – Esquema de obtenção de biocombustíveis a partir do óleo de palma.

A **Figura 2.10** apresenta o esquema utilizado por Santos et al. [20] para a conversão do resíduo de neutralização do óleo de palma em produto líquido orgânico (bio-óleo), coque e gás por meio do processo de pirólise em batelada utilizando-se 15 % (m/m) de catalisador e carbonato de sódio (Na_2CO_3) a 450 °C, seguida da destilação para a obtenção de biocombustíveis (biogasolina, bioquerosene, diesel verde, diesel pesado).

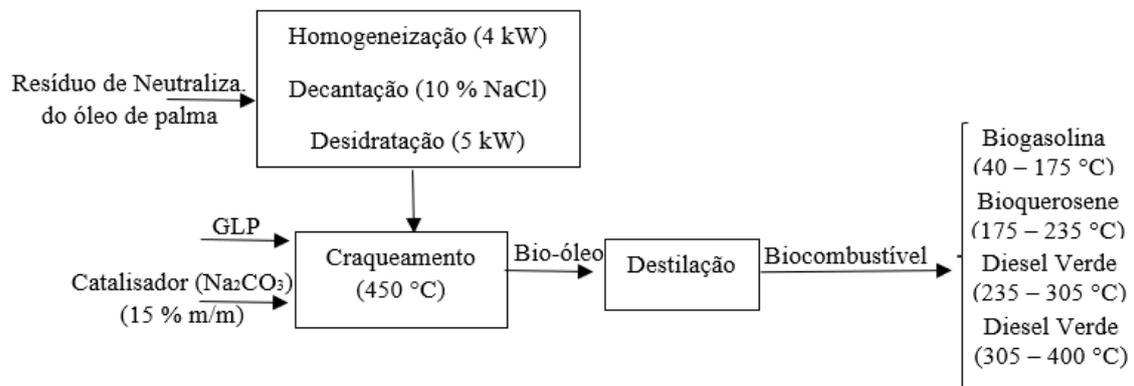


Figura 2.10 – Esquema de obtenção de biocombustíveis a partir do resíduo de neutralização do óleo de palma.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

3.1 INDICADORES E CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE PIRÓLISE E CRAQUEAMENTO

A descrição dos indicadores de viabilidade econômica e seus respectivos critérios de viabilidade econômica serão descritos a partir de agora. A decisão do orçamento de capital é uma típica atribuição de investimentos de uma empresa. Diversas companhias perderam sua identidade ou liquidez devido a decisões erradas de orçamento de capital, as quais, tomaram em um determinado momento. Com base nesses problemas predominantes na indústria e no efeito da globalização sobre as indústrias, é importante usar um método eficaz para a análise de investimentos. O orçamento de capital é extremamente importante pois a decisão tomada envolve o futuro e crescimento da companhia [66].

3.1.1 Payback simples

Payback simples é o tempo requerido para que o investimento realizado no projeto seja totalmente recuperado. O investidor estabelece o máximo tempo como um critério para considerar a viabilidade do projeto. O payback simples possui as seguintes características:

- Não considera o valor do dinheiro no tempo, o qual contraria o princípio básico de que uma unidade monetária hoje vale menos do que a mesma unidade monetária amanhã;
- No fluxo de caixa do projeto, o valor descontado é considerado histórico (fixo);
- Todas as quantidades presentes no fluxo de caixa que estão posicionadas depois do payback simples não são consideradas na análise de julgamento (comparação entre o tempo definido pelo investidor para o retorno do investimento e o tempo de retorno obtido no estudo de payback) [67].

O método do período payback simples é utilizado para avaliar projetos de capital e calcular o retorno por ano, a partir do início do projeto até o retorno acumulado igual ao custo do investimento, no qual o tempo do investimento foi definido como critério de retorno. A regra de decisão para o investimento ser realizado deve ter o tempo de retorno (payback) menor do que aquele definido pela administração. Diz-se que o critério payback simples enfatiza a preocupação da administração com a liquidez e a necessidade

de minimizar o risco por meio de uma rápida recuperação do investimento inicial [68]. Embora o uso do critério payback simples como critério único para análise de investimentos tenha diminuído ao longo do tempo, seu uso como medida secundária tem aumentado ao longo do tempo [69], apesar de não incluir o fluxo de caixa futuro e não medir a rentabilidade [66].

Em relação ao período para retorno do investimento (payback simples), utiliza-se na prática, como máximo período de retorno aceitável um valor fixo, por exemplo, de três anos e em alguns casos, o valor limite do período de retorno está relacionado à vida econômica do investimento, por exemplo, um período de retorno inferior a metade da vida econômica do projeto [66].

Um estudo de caso de aplicação do indicador payback simples para a avaliação de viabilidade de projetos, é o desenvolvimento de sistemas de isolamento transparentes (TIM) em substituição aos materiais de isolamento opacos padrões. O TIM não apenas desempenha funções semelhantes ao isolamento opaco, reduzindo as perdas de calor e controlando as temperaturas internas, mas permite uma transmitância solar superior a 50 %. Com espessura inferior a 20 cm, pode proporcionar retorno financeiro aos ocupantes dos edifícios, maximizando os espaços ocupáveis e vendáveis em áreas urbanas, sem comprometer o conforto térmico dentro dos edifícios. Os cálculos de payback simples indicam retornos de 5 a 8 anos para o estudo de caso específico. Conclui-se que o cálculo do payback simples pode ser usado para estudos de viabilidade para indicar o tempo necessário para recuperar o investimento ao instalar sistemas TIM em edificações [70].

3.1.2. Payback descontado

O método do payback descontado é similar ao payback simples, exceto que considera a atratividade ou taxa desconto. Considera o valor do dinheiro no tempo adicionando o custo de capital da companhia ao payback simples. Todos os elementos do fluxo de caixa são descontados a uma taxa definida, a qual é usualmente o valor corrente na data igual a zero [67]. O período do payback descontado é o investimento descontado no tempo a uma taxa de interesse. Esse critério é próximo do critério do valor presente líquido (VPL).

Esse critério também pode ser utilizado como um filtro de análise secundária, como uma medida do risco de liquidez ou pode ser generalizado como um grau de risco do projeto. Além disso, as incertezas associadas ao projeto, como previsões de receitas e custos correspondentes, tendem a aumentar, e com isto, o risco associado.

O critério do payback descontado é, em outras palavras, simplesmente o período durante o qual o valor presente líquido acumulado de um projeto é igual a zero. Um projeto é considerado viável se o payback descontado for menor do que sua vida econômica ou algum período pré-determinado [71]. O autor [72] examinou a utilidade do critério payback descontado sob padrões convencionais de fluxo de caixa. Desde então, a maioria dos livros didáticos de finanças incluiu o esse critério no capítulo de orçamento de capital.

Uma aplicação do critério de payback descontado para a avaliação de viabilidade de projetos é o estudo do uso extensivo de fontes de energia renováveis na rede elétrica. Entre as fontes de energia renovável, a energia fotovoltaica (PVs) vem ganhando popularidade e é considerada uma alternativa a futuras crises de energia elétrica. Apesar dos benefícios técnicos da energia solar fotovoltaica, uma análise de viabilidade econômica é fundamental para avaliar um projeto de energia solar de longo prazo. No trabalho mencionado, é realizada a comparação entre os critérios de viabilidade de projeto, payback simples e payback descontado, assim como as melhores medidas de eficiência energética, como a substituição de lâmpadas fluorescentes compactas por LEDs, para reduzir os custos operacionais e o consumo de energia, resultando em benefícios monetários diretos [73].

3.1.3 Valor Presente Líquido (VPL)

Este critério considera o valor do dinheiro no tempo. Possui dois princípios básicos:

- Uma unidade monetária hoje vale menos do que uma unidade monetária no futuro;
- Uma moeda segura é melhor do que uma moeda insegura.

O critério VPL trabalha com o fluxo de caixa inteiro através de um período de tempo. Os valores pertencentes ao fluxo de caixa são: 1. Investimento fixo; 2. Investimento de capital de giro; 3. Receita operacional bruta; 4. Custos operacionais totais; 5. Tempo de análise do projeto. Juntos são denominados valores endógenos. As equações abaixo são utilizadas para elaborar o fluxo de caixa no critério valor presente líquido:

$$\text{Receita de Venda} = \text{Preço de Venda} \times \text{Quantidade} \quad (1)$$

$$\text{Custo Total} = \text{Custo Total Unitário} \times \text{Quantidade} \quad (2)$$

$$\text{Custo Total Unitário} = \text{Custo Fixo Unitário} \times \text{Custo variável unitário} \quad (3)$$

A taxa de desconto efetiva é utilizada no VPL como uma medida exógena pois é uma medida obtida do mercado financeiro. Este valor inclui um prêmio para a decisão de se implantar o projeto de uma indústria química, a qual apresenta determinado risco.

Por definição, o VPL é a diferença entre o valor presente líquido do fluxo de caixa ($VP_{F,C}$) e o valor do investimento (INV) realizado no projeto, de acordo com a equação (4):

$$\text{VPL} = \text{INV} + \text{VP}_{F,C} \quad (4)$$

O valor presente líquido do fluo de caixa ($VP_{F,C}$) é o resultado da movimentação de todos os valores registrados em cada período, a uma certa taxa mínima de atratividade [67].

Dentre todos os índices de decisão de orçamento de capital, o critério do valor presente líquido (VPL) é considerado superior a todos os outros. No entanto, baseia-se nos pressupostos de mercados perfeitos, certeza de vida do projeto, ausência de capital de racionamento, etc. A maioria dessas suposições não é válida na vida real. No mundo real, uma variedade de riscos fatores e ineficiências de mercado exigem que os gerentes se concentrem tanto na lucratividade quanto na liquidez dos investimentos de capital. A regra de VPL garante rentabilidade, mas não liquidez. O payback simples garante liquidez, porém não garante lucratividade. O critério que satisfaz ambos é o payback descontado [71,72].

Um estudo de caso que pode ser mencionado relacionado a aplicação do indicador de viabilidade de projeto, valor presente líquido, é o estudo que explora o uso de hidrogênio verde como fonte de energia na mineração de cobre. O refino de minérios de cobre envolve várias etapas, como cominuição, flotação e fundição. Este último produz a maior concentração de cobre por meio da transformação química de minérios de sulfeto de cobre. O estudo mencionado, realiza a análise técnico-econômica para a produção de metano a partir do uso de hidrogênio verde como agente redutor para a etapa de fundição. A metodologia envolveu a avaliação do projeto com base no cálculo do valor presente líquido e uma análise de sensibilidade. Os principais resultados mostram um retorno financeiro de 5,459 MUS\$ em um período de 11,8 anos [74].

Critérios de Decisão do Método VPL

O projeto é considerado viável se o VPL for maior do que zero, pois garante que o valor presente do fluxo de caixa (VP_{FC}) é maior do que o valor do investimento, por isso, pode ser definido como segue: 1. Recupera totalmente o valor do investimento; 2. Um determinado valor é adicionado a companhia, equivalente ao resultado obtido do VPL.

Se o VPL for igual a zero, então a companhia está em uma situação de incerteza e pode ou não investir no projeto. A decisão final dependerá de outras considerações.

Se o VPL for negativo, então o investimento não deverá ser realizado devido o valor do investimento ser maior do que o valor presente do fluxo de caixa. Nesta situação, o investimento não é inteiramente recuperado.

O critério VPL trabalha com desconto do fluxo de caixa, o que significa que os valores futuros do fluxo de caixa, quando transportados, sofrem uma perda de valor devido a taxa de desconto.

3.1.4 Taxa Interna de Retorno (TIR)

O critério da taxa interna de retorno representa o valor da taxa que pertence ao projeto. Isto significa que o critério é uma medida endógena, pois não é necessário, como no caso do critério VPL, utilizar uma taxa de atratividade para mover os valores futuros do fluo de caixa para o ponto zero.

Este critério é bastante utilizado porque seu resultado, o qual é dado em um valor percentual, é fácil de se entender e interpretar. Este critério trabalha com o fluxo de caixa inteiro e considera o valor do dinheiro no tempo. A TIR é específica de cada projeto e sua definição pode ser dada como: “É uma taxa que faz com que o VPL seja igual a zero”. O ponto no qual o VPL torna-se zero corresponde a TIR do projeto [67].

Uma aplicação prática do uso do critério TIR é na tendência de redução contínua nos custos fotovoltaicos, juntamente com uma ampla variedade de medidas de suporte, as quais, transformaram os sistemas fotovoltaicos conectados à rede (PVGCS) em um investimento lucrativo quando algumas condições econômicas são atendidas. A taxa interna de retorno é um parâmetro significativo para potenciais proprietários desses sistemas fotovoltaicos. No entanto, este parâmetro deve ser estimado por meio de métodos não analíticos. No artigo mencionado, são apresentadas tabelas para se obter as TIR's, evitando cálculos complicados, o que é um recurso atraente para os proprietários, profissionais de marketing e designers [75].

O critério de Taxa Interna de Retorno

Esse critério pode ser resumido da seguinte maneira:

1. Se o custo de capital $<$ TIR, o critério deve ser aceito ($VPL > 0$);
2. Se o custo de capital $=$ TIR, então o investimento no projeto pode ou não ser aceito ($VPL = 0$);
3. Se o custo de capital $>$ TIR, o projeto deve ser rejeitado ($VPL < 0$).

3.1.5 Índice de Lucratividade (IL)

Esse critério envolve características similares aos critérios anteriores, o qual também considera o valor do dinheiro no tempo e também considera todo o fluxo de caixa. Este critério está próximo ao critério VPL, o qual é definido como segue:

O índice de lucratividade é a razão do VPL mais o investimento dividido pelo investimento, de acordo como apresentado na equação seguinte [67].

$$IL = \frac{VPL+INV}{INV} \quad (5)$$

Critérios do índice de Lucratividade (IL)

Um projeto será viável se o valor do IL for maior do que 1, o que significa que investimento foi recuperado e algum valor foi adicionado a companhia.

Se o IL for igual a 1, a decisão de investir ou não dependerá de outros aspectos, pois o somente o valor do investimento é garantido como retorno.

Para resultados em que o IL é menor do que 1, o projeto não é viável, devido ao investimento não ser totalmente recuperado.

A avaliação econômico-financeira de projetos de investimento industrial em países desenvolvidos com economia de mercado baseia-se no uso combinado de métodos tradicionais e modernos, racionais, caracterizados pela cientificidade e confiabilidade. Nesse artigo, o autor apresenta o indicador de avaliação econômica de projetos industriais, índice de rentabilidade, o método de cálculo, bem como as vantagens e desvantagens de sua utilização por meio de um estudo de caso. O trabalho mostra uma análise na situação de várias variantes na resolução de problemas no caso da existência de variantes de projetos industriais e sua modelagem relacionada em termos lineares. O índice de lucratividade é um indicador significativo na avaliação de desempenho

econômico-financeiro de um projeto, para uma análise interna de uma empresa quanto para testes de diagnóstico solicitados por parceiros externos.

3.16 Cálculo do Ponto de Equilíbrio

O ponto de equilíbrio do projeto é aquele no qual os custos totais e receitas totais são iguais, o que significa que há um balanço entre lucros e perdas [76]. Neste trabalho, foram utilizadas tabelas em EXCEL para obtenção do breakeven-point. São estimados valores de preço de venda do produto até que o equilíbrio, no quinto ano do projeto, seja alcançado.

Nos mercados atuais, marcados com o aumento da competitividade e a complexidade de um sistema de gerenciamento, percebemos a grande dificuldade que pequenas empresas têm em se manterem no mercado, e muitas vezes isso acontece devido ao descontrole administrativo e a falta de conhecimento de ferramentas que servem de apoio para gerenciar o negócio. Através desse estudo é apresentado um importante instrumento de análise financeira que é o Ponto de Equilíbrio. O Ponto de Equilíbrio nada mais é que o ponto onde a empresa se equilibra; sua finalidade é mostrar ao gestor qual seria o faturamento que a empresa deveria atingir para operar sem prejuízos. O autor, menciona o estudo de três apurações, usando dados reais de uma empresa de pequeno porte [77].

3.17 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é realizada após a conclusão de toda a metodologia de cálculo apresentada neste trabalho, onde se obtém o preço de venda do produto. A análise de sensibilidade consiste em variar um dos parâmetros do projeto (como por exemplo, preço da matéria prima, investimento, rendimentos, etc) e avaliar de maneira independente qual o novo valor de MFSP a ser obtido. É uma técnica de análise que busca prever o resultado gerado por alterações nos parâmetros ou nas atividades em um processo. Um exemplo de aplicação da técnica de análise de sensibilidade em processos de pirólise para a produção de biocombustíveis é apresentado por [65].

3.18 Mínimo preço de Venda do Biocombustível (“*Minimum fuel sale price* – MFSP”)

Diversos autores apresentam resultados de MFSP na literatura a respeito do processo de pirólise [45,46,47,53,56,61]. Neste trabalho, o MFSP é obtido após a elaboração de toda a metodologia de análise de investimento do projeto. Foram utilizadas planilhas em

EXCEL, onde o MFSP é simulado analisando-se o horizonte de análise do projeto (no caso, 5 anos) de maneira a se garantir uma taxa interna de retorno constante, de 10% a.a. A partir da obtenção do MFSP são calculados e obtidos os demais indicadores de avaliação de viabilidade do projeto.

3.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO

Os cálculos, a partir da seção 2.4.1 até a seção 2.4.16, são utilizados para obtermos as receitas e despesas utilizando-se o material lipídico e a semente de açaí (*Euterpe oleracea*, Mart) como alimentação do reator de pirólise em batelada. Na **Tabela 1** são apresentados os parâmetros usados nas equações abaixo. A taxa de câmbio estimada foi de 5,12 R\$ / US\$.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados para os cálculos de custos utilizando-se material lipídico e caroço de açaí como matérias primas.

Parâmetros de Processo	Referência	Valores	Unidades
M é a massa de material lipídico	[19]	145	Kg
M é a massa de semente de açaí	[22]	150	Kg
N _{sh} é o número de turnos por dia	Autor	3	-
N _{bat} é o número de bateladas por turno utilizando-se material lipídico	Autor	5	-
N _{bat} é o número de bateladas por turno utilizando-se semente de açaí	Autor	3	-
d é a densidade de material lipídico	[19]	0,98	Kg / L
d é a densidade da semente de açaí	[22]	1,49	Kg / L
Y _{óleo} é o rendimento do processo de pirólise para a produção de bio-óleo a partir do material lipídico	[19]	68,73	%
Y _{óleo} é o rendimento do processo de pirólise para a produção de bio-óleo a partir da semente de açaí	[22]	11,03	%
Y _{coq} é o rendimento de produção da pirólise para produção de coque a partir do material lipídico	[19]	5,03	%
Y _{coq} é o rendimento de produção da pirólise para produção de coque a partir da semente de açaí	[22]	39,84	%
P _{coq} é o preço do coque	[78]	0,30	US\$/Kg
d _{coq} é a densidade do coque	[78]	1	Kg/L
Y _{gas} é o rendimento da pirólise para a produção de gás a partir do material lipídico	[19]	26,24	%

Y_{gas} é o rendimento da pirólise para a produção de gás a partir da semente de açaí	[22]	31,62	%
P_{GLP} é o preço do gás liquefeito de petróleo	[79]	0,503	US\$/L
d_{gas} é a densidade do gás metano	[80]	0,72	Kg/L
Y_{bio} é o rendimento da destilação para a produção de biocombustível a partir do material lipídico	[19]	15,07	%
Y_{bio} é o rendimento da destilação para a produção de biocombustível a partir da semente de açaí	[22]	73	%
P_{MP} é o preço da matéria prima de material lipídico (foi considerado um valor de 10% do preço do óleo de soja)	[81]	0,1295	US\$/Kg
P_{MP} é o preço da matéria prima da semente de açaí	[82]	0,027	US\$/Kg
P_{cat} é o preço do catalisador	[83]	0,52	US\$/Kg
C_m é o custo de mão de obra em trinta dias	Autor	1.562,5	US\$/mês
N_{bat} é o número de bateladas por dia considerando-se a destilação e o material lipídico	Autor	16	-
N_{bat} é o número de bateladas por dia considerando-se a destilação e a semente de açaí	Autor	3	-
P_{KW} é a potência da coluna de destilação	Autor	5	KW
t é o tempo de operação da coluna de destilação por dia	Autor	24	h
P_{cald} é a potência da caldeira	[19]	$96 * 10^6$	cal
f_{KWh} é o fator de conversão de calorías (cal) para KWh	[84]	$11,62 * 10^7$	KWh/cal
t_{des} é o tempo de desidratação por batelada	Autor	2	h
N_{des} é o número de bateladas de desidratação por dia	Autor	3	-
P_{sec} é a potência do equipamento de secagem	Autor	3	KW
t_{sec} é o tempo de secagem por dia	Autor	24	h
N_{sec} é o número de bateladas de secagem por dia	Autor	12	-
P_{com} é a potência do equipamento de cominuição	Autor	3	KW
t_{com} é o tempo de cominuição por batelada	[22]	1	h
N_{com} é o número de bateladas de cominuição por dia	Autor	24	-
P_{NaOH} é o preço do hidróxido de sódio	[85]	3,67	US\$/L
N_{mol} é o número de moles	[22]	2	Moles/L
M_{mol} é a massa molecular de hidróxido de sódio	[22]	40	Kg/Kgmol
V_{NaOH} é o volume de solução de hidróxido de sódio	[22]	1	L

Tabela 2 – Parâmetros utilizados para os cálculos de custos utilizando-se material óleo de palma e resíduo da neutralização do óleo de palma.

Parâmetros de Processo	Referência	Valores	Unidades
M é a massa de óleo de palma	[18]	145,5	Kg

M é a massa do resíduo de neutralização do óleo de palma	[20]	145,5	Kg
N_{sh} é o número de turnos por dia	Autor	3	-
N_{bat} é o número de bateladas por turno utilizando-se óleo de palma	Autor	2	-
N_{bat} é o número de bateladas por turno utilizando-se resíduo da neutralização do óleo de palma	Autor	1	-
d é a densidade do óleo de palma	[18]	0,97	Kg / L
d é a densidade do resíduo de neutralização do óleo de palma	[20]	0,97	Kg / L
$Y_{óleo}$ é o rendimento do processo de pirólise para a produção de bio-óleo a partir do óleo de palma	[18]	63,6	%
$Y_{óleo}$ é o rendimento do processo de pirólise para a produção de bio-óleo a partir do resíduo de neutralização do óleo de palma	[20]	71,37	%
Y_{coq} é o rendimento de produção da pirólise para produção de coque a partir do resíduo de neutralização do óleo de palma	[18]	8	%
Y_{coq} é o rendimento de produção da pirólise para produção de coque a partir do resíduo de neutralização do óleo de palma	[20]	23,55	%
P_{coq} é o preço do coque	[78]	0,30	US\$/Kg
d_{coq} é a densidade do coque	[78]	1	Kg/L
Y_{gas} é o rendimento da pirólise para a produção de gás a partir do óleo de palma	[18]	28,4	%
Y_{gas} é o rendimento da pirólise para a produção de gás a partir do resíduo de neutralização do óleo de palma	[20]	0,48	%
P_{GLP} é o preço do gás liquefeito de petróleo	[79]	0,503	US\$/L
d_{gas} é a densidade do gás metano	[80]	0,97	Kg/L
Y_{bio} é o rendimento da destilação para a produção de biocombustível a partir do óleo de palma	[18]	60	%
Y_{bio} é o rendimento da destilação para a produção de biocombustível a partir do resíduo de neutralização do óleo de palma	[20]	73	%
P_{MP} é o preço da matéria prima do óleo de palma	[86]	1,144	US\$/Kg
P_{MP} é o preço da matéria prima do resíduo de neutralização do óleo de palma (foi considerado 5% do preço do óleo de palma)	[86]	0,057	US\$/Kg
P_{cat} é o preço do catalisador	[83]	1,32	US\$/Kg
C_m é o custo de mão de obra em trinta dias	Autor	1562,5	US\$/mês
N_{bat} é o número de bateladas por dia considerando-se a destilação do óleo de palma	Autor	5	-
N_{bat} é o número de bateladas por dia considerando-se a destilação do resíduo de neutralização do óleo de palma	Autor	3	-

P_{KW} é a potência da coluna de destilação	Autor	5	kW
t é o tempo de operação da coluna de destilação por dia	Autor	24	h
SP_{bio} é o preço de venda obtido com o preço de venda do biocombustível produzido com o óleo de palma	Autor	1,59	US\$/L
SP_{bio} é o preço de venda obtido com o preço de venda do biocombustível produzido com o resíduo de neutralização	Autor	1,34	US\$/L
%NaCl de cloreto de sódio em m/m	[20]	10	%
P_{NaCl} é o preço do cloreto de sódio	[20]	0,005	US\$/L
P_{deh} é a potência do equipamento de desidratação	Autor	5	kW
t_{deh} é o tempo de desidratação	[20]	1	h

3.2.1 Taxa de alimentação

A taxa de alimentação do equipamento de pirólise é dada conforme a equação abaixo:

$$Q = \frac{M \cdot N_{sh} \cdot N_{bat}}{d} \quad (6)$$

Onde Q é o fluxo volumétrico do material lipídico, da semente de açaí, do óleo de palma e do resíduo da neutralização do óleo de palma [L/dia]; M é a massa de material lipídico, semente de açaí, do óleo de palma ou do resíduo da neutralização do óleo de palma, por batelada em [Kg]; N_{sh} é o número de turnos por dia [-]; N_{bat} é o número de bateladas por turno utilizando-se material lipídico, semente de açaí, óleo de palma ou resíduo da neutralização do óleo de palma [-]; d é a densidade do material lipídico, semente de açaí, óleo de palma ou resíduo da neutralização do óleo de palma [Kg/L].

3.2.2. Fluxo de Produto Líquido Orgânico – PLO (Bio-óleo)

$$Q_{bio} = (Y_{oleo} * Q)/100 \quad (7)$$

Q_{bio} é o fluxo de produto líquido orgânico (bio-óleo) em [L/dia]; Y_{oleo} é o rendimento do processo de pirólise a partir do material lipídico, semente de açaí, óleo de palma ou resíduo da neutralização do óleo de palma [%].

3.2.3 Fluxo de Produto Sólido (Coque)

$$m_{coq} = \frac{Q \cdot Y_{coq} \cdot P_{coq}}{100 \cdot d_{coq}} \quad (8)$$

Onde a m_{coq} é o fluxo de coque em [US\$/dia]; Y_{coq} é o rendimento do processo de pirólise para a produção de coque a partir do material lipídico, semente de açaí, óleo

de palma e resíduo da neutralização do óleo de palma [%]; P_{coq} é o preço do coque em [US\$/Kg] e d_{coq} é a densidade do coque em [Kg/L].

3.2.4 Fluxo do Produto Gasoso

$$m_{\text{gas}} = \frac{Q * Y_{\text{gas}} * P_{\text{GLP}} * f_1 * f_2}{100 * d_{\text{coq}}} \quad (9)$$

Onde $m_{\text{gás}}$ é o fluxo de gás metano [US\$/dia]; $Y_{\text{gás}}$ é o rendimento do processo de pirólise para a produção de gás [%]; P_{GLP} é preço do gás liquefeito de petróleo [US\$/Kg]; f_1 foi considerado que o fluxo de gás metano era 10% do rendimento total de gás Y_{gas} ; f_2 foi considerado que o preço do gás metano era de 50% do preço do gás liquefeito de petróleo P_{GLP} e $d_{\text{gás}}$ é a densidade do gás metano [Kg/L].

3.2.5 Fluxo do Biocombustível destilado

$$D_{\text{bio}} = \frac{Y_{\text{bio}} * Q_{\text{bio}}}{100} \quad (10)$$

Onde D_{bio} é o fluxo de biocombustível destilado [L/dia]; Y_{bio} é o rendimento do processo de destilação utilizando-se material lipídico, semente de açaí, óleo de palma ou resíduo de neutralização do óleo de palma [%].

3.2.6. Custo da Matéria Prima

$$C_{\text{MP}} = \frac{P_{\text{MP}} * Q}{d_{\text{MP}} * (D_{\text{bio}} + m_{\text{coq}} + m_{\text{gás}})} \quad (11)$$

Onde o C_{MP} é o custo da matéria prima sendo o material lipídico, semente de açaí, óleo de palma ou resíduo da neutralização do óleo de palma [US\$/L]; P_{MP} é o preço da matéria prima, podendo ser o material lipídico (foi considerado 10% do preço do óleo de soja), semente de açaí, óleo de palma ou resíduo de neutralização do óleo de palma [US\$/Kg]; d_{MP} é a densidade da matéria prima, sendo o material lipídico, semente de açaí, óleo de palma ou resíduo da neutralização do óleo de palma em [Kg/L].

3.2.7 Custo do Catalisador

$$C_{\text{cat}} = \frac{P_{\text{cat}} * Q * m_{\text{cat}}}{d_{\text{cat}} * (D_{\text{bio}} + m_{\text{coq}} + m_{\text{gás}})} \quad (12)$$

Onde C_{cat} é o custo do catalisador carbonato de sódio Na_2CO_3 [US\$/L]; P_{cat} é o preço do catalisador [US\$/Kg]; m_{cat} é o percentual de catalisador em relação a taxa de matéria prima de alimentação (10% para material lipídico e óleo de palma e 15% para semente de açaí e resíduo de neutralização do óleo de palma).

3.2.8 Custo do Gás Liquefeito de Petróleo

$$C_{GLP} = \frac{P_{GLP} * Q * m_{GLP}}{(D_{bio} + m_{coq} + m_{gás})} \quad (13)$$

Onde C_{GLP} é o custo do gás liquefeito de petróleo [US\$/L]; P_{GLP} é o preço do gás liquefeito de petróleo [US\$/L] e m_{GLP} é o percentual de gás liquefeito de petróleo em relação a taxa de alimentação de matéria prima em [%].

3.2.9. Custo da Mão de Obra

$$C_{MP} = \frac{C_m}{30 * (D_{bio} + m_{coq} + m_{gás})} \quad (14)$$

Onde C_{MP} é o custo da mão de obra em [US\$/L]; C_m é o custo da mão de obra por mês [US\$/mês].

3.2.10 Custo da Destilação (Aquecimento)

O número de colunas de destilação depende da produção de bio-óleo produzida em cada batelada do processo de pirólise. Foi considerado uma coluna de destilação de 120 Kg para o material lipídico e de óleo palma; e de 50 Kg para a unidade de semente de açaí e resíduo de neutralização do óleo de palma.

$$D_c = \frac{N_{bat} * P_{KW} * t * P_{KWh}}{(D_{bio} + m_{coq} + m_{gás})} \quad (15)$$

Onde D_c é o custo da destilação em [US\$/L]; N_{bat} é o número de bateladas da destilação do material lipídico ou semente de açaí [-]; P_{KW} é a potência da coluna de destilação em [KW]; t é o tempo de operação da coluna de destilação por dia em horas [h] e P_{KWh} é o preço do KWh [US\$/KWh].

3.2.11 Taxa

Destaca-se que um valor de 10 % de impostos foi considerado na análise de viabilidade do projeto.

$$T = \frac{\%T * SP}{100} \quad (16)$$

Onde T é a taxa de imposto em [US\$/L]; %T é o percentual da taxa de imposto em [%] e SP é o preço de venda do biocombustível utilizando-se material lipídico, semente de açaí, óleo de palma ou resíduo de neutralização do óleo de palma em [US\$/L].

3.2.12 Lucro total por dia

$$TP = D_{bio} * (SP - TE) + m_{coq} + m_{gas} \quad (17)$$

Onde TP é o lucro total por dia [US\$/dia]; D_{bio} é fluxo de biocombustível destilado por dia [L/dia]; SP é o preço de venda do biocombustível em [US\$/L] e TE são as despesas totais em [US\$/L].

3.2.13 Homogeneização

$$H_c = \frac{N_{bat} * P_{KW} * t * P_{KWh}}{(D_{bio} + m_{coq} + m_{gás})} \quad (18)$$

Onde H_c é o custo de homogeneização em [US\$/L]; N_{bat} é o número de bateladas para homogeneização do material lipídico, semente de açaí, óleo de palma ou resíduo de neutralização do óleo de palma [-]; P_{KW} é a potência do sistema de homogeneização em [KW]; t é o tempo de operação do sistema de homogeneização por batelada em horas [h] e P_{KWh} é o preço do KWh [US\$/KWh].

3.2.14 Desidratação

$$C_{deh} = \frac{P_{deh} * f_{KWh} * t_{deh} * N_{deh} * P_{KWh}}{(D_{bio} + m_{coq} + m_{gás})} \quad (19)$$

Onde C_{deh} é o custo de desidratação [US\$/L]; P_{deh} é a potência da caldeira em [cal]; f_{KWh} é o fator de conversão de calorias para KWh em [Kcal/cal]; t_{deh} é o tempo de desidratação por batelada por dia [-] e P_{KWh} é o preço do KWh em [US\$/KWh].

3.2.15 Decantação (NaCl – 10%)

Essa equação foi utilizada para o processo utilizando-se o resíduo de neutralização do óleo de palma.

$$C_{NaCl} = \frac{\%NaCl * Q * P_{NaCl}}{(D_{bio} + m_{coke} + m_{gas})} \quad (19)$$

C_{NaCl} é o custo de cloreto de sódio [US\$/L]; $\%NaCl$ é o percentual de cloreto de sódio em m/m [%]; P_{NaCl} é o preço do cloreto de sódio [US\$/L].

3.2.16 – Disponibilidade

A disponibilidade da planta mencionada em todos os estudos de avaliação econômica neste trabalho é definida como:

$$D = (t_{op} / t_{cale}) * 100$$

Onde t_{op} é o tempo de operação do processo, a qual, foi considerada como o tempo reacional em [h]; t_{cale} é o tempo calendário disponível em [h].

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

São apresentados nos artigos intitulados “Economic feasibility assessment of the thermal catalytic process of wastes: Açaí seeds (*Euterpe Oleracea*) and Scum from grease traps” e “Economic analysis of thermal catalytic process of Palm oil (*Elaeis guineensis*, Jacq) and soap phase residue of neutralization process of Palm oil (*Elaeis guineensis*, Jacq), em anexo, todos os resultados referentes a essa tese.

4.1- Sugestões de Trabalhos Futuros.

- A dinâmica das grandes cidades tem gerado grandes porções de resíduos. Nesse sentido, sugere-se a continuidade de trabalhos de estudo de viabilidade econômica para a produção de biocombustíveis a partir de “lixo orgânico”.

- Sugere-se também o estudo de viabilidade econômica dos trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa relacionados ao reaproveitamento de pneus descartados, para a produção de químicos;

- Por fim, algo extremamente importante sob a ótica Ambiental, seria o estudo de viabilidade econômica do reaproveitamento de resíduos plásticos para a produção de biocombustíveis.

- Destaca-se também o estudo de viabilidade econômica de outros resíduos do processo de refino do óleo de palma, como os “cachos” (biomassa) dos frutos frescos, para a produção de biocombustíveis.

- Foi realizado o estudo de viabilidade econômica do processo de pirólise de material ligno-celulósico de caroço de açaí (biomassa) impregnado com hidróxido de sódio $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ neste trabalho, porém, um estudo considerando-se a ausência de impregnação da semente poderia também ser realizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Biomassa e Bioenergia (2023). Energias Renováveis empregam 8,1 milhões de pessoas no mundo. Disponível em: <https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/energias-renovaveis-empregam-81-milhoes-de-pessoas-no-mundo/20160530-095945-G045>. Acesso em: 11 de Dezembro de 2022.
- [2] Novacana (2015). Trabalhadores. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/trabalhadores/biocombustiveis-empregos-mundo-metade-brasil-010615>. Acesso em: 11 de Dezembro de 2022.
- [3] CASTRO, D.A.R.; DA SILVA RIBEIRO, H.J.; HAMOY GUERREIRO, L.H.; PINTO BERNAR, L.; JONATAN BREMER, S.; COSTA SANTO, M.; DA SILVA ALMEIDA, H.; DUVOISIN, S., JR.; PIZARRO BORGES, L.E.; TEIXEIRA MACHADO, N. Production of Fuel-Like Fractions by Fractional Distillation of Bio-Oil from Açai (Euterpe oleracea Mart.) Seeds Pyrolysis. *Energies* 2021, 14, 3713.
- [4] CASTRO, D.A.R.; RIBEIRO, H.J.S.; FERREIRA, C.C.; CORDEIRO, M.A.; GUERREIRO, L.H.H.; PEREIRA, A.M.; SANTOS, W.G.; SANTOS, M.C.; CARVALHO, F.B.; JUNIOR, J.C.S. Fractional Distillation of bio-oil produced by Pyrolysis of açai (Euterpe oleracea) seeds. In *Fractionation*; Intechopen: London, UK, 2019; pp. 1–61.
- [5] Valor e Cotação do Brent (2022). Cotação do Petróleo Brent Hoje. Disponível em: <https://www.ifcmarkets.com.br/market-data/commodities-prices/brent>. Acesso em: 17/12/2022.
- [6] TESKE, S.; SCHAFER, O. Energy Revolution: A Sustainable World Energy Outlook. Available online: <http://www.renewableenergyworld.com/topics/search?q=teske> (accessed on 25 November 2014).
- [7] ALMEIDA, H.S.; CORRÊA, O.A.; RIBEIRO, E.J.G.; CASTRO, D.A.R.; PEREIRA, M.S.; PEREIRA, L.M.; MÂNCIO, A.A.; SANTOS, M.C.; MOTA, S.A.P.; SOUZA, S.J.A. Performance of thermochemical conversion of fat, oils, and grease into kerosene-

like hydrocarbons in different production scales. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2016, 120, 126–143.

[8] ALMEIDA, H.S.; CORRÊA, O.A.; RIBEIRO, E.J.G.; CASTRO, D.A.R.; PEREIRA, M.S.; PEREIRA, L.M.; MÂNCIO, A.A.; SANTOS, M.C.; MOTA, S.A.P.; SOUZA, S.J.A. Production of biofuels by thermal catalytic cracking of scum from grease traps in pilot scale. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2016, 118, 20–33.

[9] ALMEIDA, H.S.; CORRÊA, O.A.; FERREIRA, C.C.; RIBEIRO, H.J.; CASTRO, D.A.R.; PEREIRA, M.S.; MÂNCIO, A.A.; SANTOS, M.C.; MOTA, S.A.P.; SOUZA, J.A. Diesel-like hydrocarbon fuels by catalytic cracking of fat, oils, and grease (FOG) from grease traps. *J. Energy Inst.* 2017, 90, 337–354.

[10] DEMIRBAS, A. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reactions of biomass. *Energy Convers. Manag.* 2000, 41, 633–646.

[11] KATIKANENI, S.P.R.; ADJAYE, R.J.D.; IDEM, O.; BAKHSHI, N. Performance studies of various cracking catalysts in the conversion of canola oil to fuels and chemicals in a fluidized-bed reactor. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 1998, 75, 381–391.

[12] BISWASS, S.; SHARMA, D.K. Studies on cracking of *Jatropha* oil. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 2013, 99, 122–129.

[13] CORRÊA, O.A.; ALMEIDA, H.S.; SANTOS, M.C.; EID, J.G.S.; MOTA, A.P.; SANTOS, J.H.M.; SANTOS, M.L.; MACHADO, N.T. Estudo da Produção de Bioquerosene via Craqueamento Térmico Catalítico de Material Lipídico de Caixas de Gordura do RU-UFGA. In *Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química; Congresso Brasileiro de Engenharia Química: Florianópolis-Santa Catarina, Brasil, 2014.*

[14] SANTOS, A.L.F.; MARTINS, D.U.; IHA, O.K.; RIBEIRO, R.A.M.; QUIRINO, R.L.; SUAREZ, P.A.Z. Agro-industrial residues as low-price feedstock for diesel-like fuel production by thermal cracking. *Bioresour. Technol.* 2010, 101, 6157–6162.

[15] TAMUNAIDU, P.E.; BHATIA, S. Catalytic cracking of palm oil for the production of biofuels: Optimization studies. *Bioresour. Technol.* 2007, 98, 3593–3601.

- [16] ONG, Y.K.; BHATIA, S. The current status and perspectives of biofuel production via catalytic cracking of edible and non-edible oils. *Energy* 2009, 35, 111–119.
- [17] FRÉTY, R.; DA ROCHA, M.G.C.; BRANDÃO, S.T.; PONTES, L.A.M.; PADILHA, J.F.; BORGES, L.E.P.; GONZALEZC, W.A. Cracking and Hydrocracking of Triglycerides for Renewable Liquid Fuels: Alternative Processes to Transesterification. *J. Braz. Chem. Soc.* 2011, 22, 1206–1220.
- [18] MOTA, S. A. P. (2013). **Craqueamento Termo-Catalítico de Óleos Vegetais em Diferentes Escalas de Produção.** [Tese] (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais). Universidade de Federal do Pará (Belém-Pará-Brasil).
- [19] ALMEIDA, H. S. (2015). **Produção de biocombustíveis via craqueamento térmico-catalítico de resíduos sólidos de caixas de gordura com carbonato de sódio e lama vermelha ativada termicamente.** [Tese] (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais). Universidade de Federal do Pará (Belém-Pará-Brasil).
- [20] SANTOS, M.C. (2015). **Estudo do processo de craqueamento termo-catalítico da borra de neutralização do óleo de Palma para produção de biocombustível.** [Tese] (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais). Universidade de Federal do Pará (Belém-Pará-Brasil).
- [21] PEREIRA, A.M. (2017). **Estudo do processo de craqueamento térmico catalítico do sebo bovino para produção de biocombustível.** [Tese] (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais), Universidade de Federal do Pará, Belém, Brasil, 2017.
- [22] CASTRO, D. A. R. (2019). **Estudo do processo de pirólise de sementes de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) para a produção de biocombustíveis.** [Tese] (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais). Universidade de Federal do Pará (Belém-Pará-Brasil).
- [23] SANTOS, W. G. (2019). **Estudo do processo de produção de biocombustíveis via pirólise de resíduos de pneus.** [Tese] (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais). Universidade de Federal do Pará (Belém-Pará-Brasil).
- [24] IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. ODS 6. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/ods6.html>. Acesso em: 17/12/2022.

- [25] BARROS, A.A.C.; WUST, E.; MEIER, H.F. Estudo da viabilidade de técnico-científica da produção de biodiesel a partir de resíduos gordurosos. *Eng. Ambient.* 2008, 13, 255–262.
- [26] FILHO, S.C.S. Aproveitamento dos Óleos de Frituras do Município de Campinas Para Obtenção de Biodiesel. Ph.D. Thesis, UNICAMP Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brazil, 2012.
- [27] RATTON, A.R. Produção de Hidrocarbonetos a Partir do Craqueamento de Resíduos Provenientes de Caixa de Gordura. Master's Thesis, IME-RJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.
- [28] MARCHETTI, J.M.; MIGUEL, V.U.; ERRAZU, A.F. Possible methods for biodiesel production. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2005, 11, 731–736.
- [29] SEDEME—Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Mineração e Energia. Available online: <http://para2030.com.br/caroco-de-acai-pode-virar-fontede-energia> (accessed on 13 April 2018).
- [30] CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. *Biomassa Para Energia*; UNICAMP: São Paulo, Brazil, 2008.
- [31] VAN DE VELDEN M, BAEYENS J, BREMS A, JANSSENS B, DEWIL R. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. *Renew Energy.* 2010, 35: 232–242.
- [32] GREENHALF, C.E., NOWAKOWSKI, D.J., HARMS, A.B., TITLOYE, J.O., BRIDGWATER, A.V. 2012, Sequential pyrolysis of willow SRC at low and high heating rates – Implications for selective pyrolysis, *Fuel*, v. 93, pp. 692-702.
- [33] SANTOS, M. L., LIMA, O. J., NASSAR, CIUFFI, E. J., KATIA J., CALEFI, P. S. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. *Quim. Nova*, Vol. 34, No. 3, 507-511, 2011.
- [34] CORTEZ, L. A. B., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E. O. (2008). **Biomassa para energia** São Paulo: UNICAMP.

- [35] AL-SHEMMERI, T. T.; YEDLA, R.; WARDLE, D. Thermal characteristics of various biomass fuels in a small scale biomass combustor. **Applied Thermal Engineering**, 2015.
- [36] KUMAR, A. A review on biomass energy resources, potential, conversion and policy in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 530–539, 2015.
- [37] KWON, K. C. et al. Catalytic deoxygenation of liquid biomass for hydrocarbon fuels. **Renewable Energy**, v. 36, n. 3, p. 907–915, 2011.
- [38] PEREGO, C.; BOSETTI, A. Biomass to fuels: The role of zeolite and mesoporous materials. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 144, n. 1-3, p. 28–39, 2011.
- [39] BUSSMANN R. W., ZAMBRANA N. Y. P. Facing global markets – usage changes in Western Amazonian plants: the example of *Euterpe precatoria* Mart. and *E. oleracea* Mart. **Acta Societatis Botanicorum Poloniae**. v. 1, p. 1 – 5, 2012.
- [40] GAUTO, M A; ROSA, G, R. **Processos e Operações Unitárias da Indústria Química**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2011.
- [41] GAPOR, M. T; CHONG, C. L. Effects of Moisture and Trace Metals on Oil Quality. In: Proceedings of Workshop on Quality in the Palm Oil Industry. Lumpur, 1985. p. 46-65.
- [42] AMARAL, A. R.; MACHADO, N. T. **Estudo Cinético e das Isotermas de Adsorção dos óleos de Palma (*Elaiis guineensis*, Jacq.) e Andiroba (*Carapa guianensis*, Aubl.) em gama-alumina e Modelagem da Dessorção com Dióxido de Carbono Supercrítico**. 144 f. Tese de Mestrado (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, 2013.
- [43] KATO, O. R.; OLIVEIRA, V. P.; FARIA, L. J. G. Plantas corantes da Amazônia, In: FARIAL, L, G.; COSTA, C, M, L (Coords). Tópicos especiais em tecnologia de produtos naturais. Belém: UFPA/NUMA/POEMA, 1998, p. 41-45.
- [44] BOTTON V.; RIVA D.; SIMIONATTO E.L.; WIGGERS V.D.; ENDER L; MEIER H.F.; BARROS. A.A.C.; 2012. “Craqueamento termo-catalítico da mistura óleo de fritura

usado-lodo de estamparia têxtil para a produção de óleo com baixo índice de acidez”. Química Nova. vol.35 nº.4 São Paulo, 2012.

[45] WRIGHT, M.M.; DAUGGARD, D.E.; SATRIO, J.A.; BROWN, R.C. Techno-economic analysis of biomass fast pyrolysis to transportation fuels. *Fuel* 2010, 89, 52–510.

[46] BROWN, T.R.; THILAKARATNE, R.; BROWN, R.C.; HU, G. Techno-economy analysis of biomass to transportation fuels and electricity via fast pyrolysis and hydroprocessing. *Fuel* 2013, 106, 463–469.

[47] ZHANG, Y.; BROWN, T.R.; HU, G.; BROWN, R.C. Techno-economic analysis of monosaccharide production via fast pyrolysis of lignocellulose. *Bioresour. Technol.* 2013, 127, 358–365.

[48] GREGOIRE, A.; PEACOCKE, G.V. Technoeconomic analysis of the production of biocrude from wood. *Biomass Energy* 1994, 7, 275–283.

[49] MULLANEY, H.; FARAGE, I.H. Technical, Environmental and Economic Feasibility of Bio-Oil in New Hamp-Shire’s North Country; Final Report 95; 2002.

[50] THILAKARATNE, R.; BROWN, T.; LI, Y.; HU, G.; BROWN, R. Mild catalytic pyrolysis of biomass for production of transportation fuel: A techno-economic analysis. *Green Chem.* 2014, 16, 627.

[51] JAROENKHAEMMEESUK, C.; TIPPAYAWONG, N. Technical and Economic Analysis of a Biomass Pyrolysis Plant. *Energy Procedia* 2015, 79, 950–955.

[52] VASALOS, I.A.; LAPPAS, E.P.; KOPALIDOU, E.P.; KALOGIANNIS, K.G. Biomass catalytic pyrolysis: Process design and economic analysis. *WIREs Energy Environ.* 2016, 5, 370–383.

[53] WANG, W.C.; JAN, J.J. From laboratory to pilot: Design concept and techno-economic analyses of the fluidized bed fast pyrolysis of biomass. *Energy* 2018, 155, 139–151.

- [54] IM-ORB, K.; WIYARATN, W. Arpornwichanop, A. Technical and economic assessment of the pyrolysis and gasification integrated process for biomass conversion. *Energy* 2018, 153, 592–603.
- [55] XIA, S.; XIAO, H.; LIU, M.; CHEN, Y.; YANG, H.; CHEN, H. Pyrolysis behavior and economics analysis of the biomass pyrolytic polygeneration of forest farming waste. *Bioresour. Technol.* 2018, 270, 189–197.
- [56] MARTIS, R.; AL-OTHMAN, A.; TAWALBEH, M.; ALKASRAWI, M. Energy and Economic Analysis of Date Palm Biomass Feedstock for Biofuel Production in UAE: Pyrolysis, Gasification and Fermentation. *Energies* 2020, 13, 5877.
- [57] BADGER, P.; BADGER, S.; PUETTMANN; STEELE, P.; COOPER, J. Techno-Economic Analysis: Preliminary Assessment of Pyrolysis Oil Production Costs and Material Energy Balance Associated with a Transportable Fast Pyrolysis System. *BioResources* 2011, 6, 34–47.
- [58] BRIDWATER, A.; CZERNIK, S.; DIEBOLD, J.; MEIER, D.; OASMAA, A.; PEACOCKE, C.; PISKOEZ, J.; RADLEIN, D. *Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook*; CPL Scientific Publishing Group: London, UK, 1999; p. 188.
- [59] CHENG, F.; LUO, H.; COLOSI, L.M. Slow pyrolysis as a platform for negative emissions technology: An integration of machine learning models, life cycle assessment, and economic analysis. *Energy Convers. Manag.* 2020, 223, 113258.
- [60] SORUNMU, Y.; BILLEN, P.; SPATARI, S. A review of thermochemical upgrading of pyrolysis bio-oil: Techno-economic analysis, life cycle assessment, and technology readiness. *GCB Bioenergy* 2019, 12, 4–18.
- [61] LAN, K.; OU, L.; PARK, S.; KELLEY, S.S.; ENGLISH, B.C.; YU, T.E.; LARSON, J.; YAO, Y. Techno-Economic Analysis of decentralized preprocessing systems for fast pyrolysis biorefineries with blended feedstocks in the southeastern United States. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2021, 143, 110881.

- [62] RINGER, M.; PUTSCHE, V.; SCAHILL., J. Large-Scale Pyrolysis Oil Production: A Technology Assessment and Economy Analysis; NREL/TP510-37779; NREL—National Renewable energy Laboratory: Golden, CO, USA, 200.
- [63] LAPPAS, A.A.; KALOGIANNIS, K.G.; ILIOPOULOU, E.F.; TRIANTAFYLLIDIS, K.S.; STEFANIDIS, S.D. Catalytic pyrolysis of bio-mass for transportation fuels. *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.* 2012, 1, 285–297.
- [64] LAPPAS, A.A.; SAMOLADA, M.C.; IATRIDIS, D.K.; VOUTETAKIS, S.S.; VASALOS, I.A. Biomass pyrolysis in a circulating fluid bed reactor for the production of fuels and chemicals. *Fuel* 2002, 81, 2087–2095.
- [65] BROWN, T. R., THILAKARATNE, R., BROWN, R. C., HU, G. (2013). Techno-economy analysis of biomass to transportation fuels and electricity via fast pyrolysis and hydroprocessing. *Fuel*, 106, 463-469.
- [66] AWOMEWE, A. F.; OGUNDELE, O. O.; HEDERSTIERNA, A. (2008). Thesis for the Master's degree in Business Administration. Blekinge Institute of Technology.
- [67] RÊGO, R.B.; PAULO, G.P.; SPRITZER, I.M.P.A.; ZOTES, L.P. Viabilidade Econômico-Financeira; FGV: Rio de Janeiro, Brazil, 2010.
- [68] COOPER, W. D. M. Margart Business Forum (online). Available from http://www.entrepreneur.com/tradejournals/article/116186585_1.html (accessed 19/05/08).
- [69] SEGELOD, E. (1995), *Resource Allocation in Divisionalized Groups*, Ashgate, Avebury.
- [70] WONG, I. L.; EAMES, P. C.; PERERA, R. S. (2007). A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications. *Solar Energy*. vol 81, Issue 9, 1058-1071.
- [71] BHANDARI, S. B. (1989). Discounted payback period-some extensions. Bradley University, Peoria, Illinois. *Proceedings of ASBBS*, Vol. 16, N 1.

[72] BHANDARI, S. B. (1989), "Discounted Payback Period - A Viable Complement to Net Present Value for Projects with Conventional Cash Flows," *The Journal of Cost Analysis*, 43-53.

[73] MOHAN, K. S.; MAHAPATRA, S.; FEBIN, D. J. L.; PERUMAL, T.; RAJ, S.; PRABHAKARAN, P. (2022). Economic Feasibility Studies of Simple and Discounted Payback Periods for 1 MWp Ground Mounted Solar PV Plant at Tirupati Airport. *Smart Grids and Microgrids: Technology Evolution*. <https://doi.org/10.1002/0781119760597.ch3>.

[74] REVES-BOZO, L.; SALAZAR, J. L.; VALDÉS-GONZÁLEZ, H.; YÁÑEZ, M.; VIVANCO-SOFFIA, E.; BILARTELLO, L.; POBLETE, V.; SOTO, A.; URREA, J. M. (2021). Viability analysis for use of methane obtained from green hydrogen as a reducing agent in copper smelters. *Results in Engineering*. Vol. 12, 100286

[75] TALAVERA, D. L.; NOFUENTES, G.; AQUILLERA, M.; FUENTES, M. (2007). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 11, Issue 3, 447-466.

[76] JAROENKHAEMMEESUK, C., TIPPAYAWONG, N. (2015). Technical and Economic Analysis of a Biomass Pyrolysis Plant. *Energy Procedia*. 79. 950-955.

[77] BETIOL, B, M.; TANAHARA, L. R. (2011). Calculo do Ponto de Equilíbrio como uma ferramenta gerencial. *Temas em Administração*. Vol 4, N 1. ISSN 1983-8565.

[78] SANTANA JUNIOR, C. C., BRITO, M. R., BARBOSA, L.N., JACONI, A., RAMBO, M. K. D. RAMBO, M. C. D. (2020). Environmental-economic assessment of lignocellulosic residual from the Legal Amazon for conversion in biochars and bioproducts for biorefineries. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*. vol. 7. Issue-8. <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.78.36>.

[79] Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-ao-consumidor-consolidados-glp>. Acesso em: 18/12/2021.

- [80] Science 19.com. Propriedades do gás metano. Disponível em: <https://pt.science19.com/properties-of-methane-gas-11640>. Acesso em: 18/12/2021.
- [81] Abisa. Cotações 2022. Disponível em: <https://abisa.com.br/cotacoes/cotacoes-2022>. Acesso: 18/12/2021.
- [82] MFRural. Carvão de Açai. Disponível em: <https://www.mfrural.com.br/produtos/3-4658/fertilizantes-organicos-caroco-de-acai#:~:text=Carvão%20de%20Açai%20Carvão%20de%20Açai%20como%20uso,com%20frete%20CIF.Valor%20à%20negociar.%20R%24%20100%2C00%20Tonelada>. Acesso em: 18/12/2021.
- [83] Mercado Livre. Carbonato de Sódio. Disponível em: <https://lista.mercadolivre.com.br/carbonato-de-sodio>. Acesso em: 18/12/2021.
- [84] MACINTYRE, A. J. Ventilação Industrial e Controle de Poluição. 2º ed. Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1990.
- [85] Labimport. Hidróxido de Sódio. Disponível em: <https://www.labimport.com.br/hidroxido-de-sodio>. Acesso em: 18/12/2022.
- [86] Ycharts. Malaysia Palm Oil Price. Disponível em: https://ycharts.com/indicators/malaysia_palm_oil_price. Acesso em: 18/12/2021.

ANEXO – MEMORIAL DE CÁLCULO

O presente memorial de cálculo detalha o passo a passo para a obtenção das receitas (equações de balanço de massa) provenientes da produção de biocombustível, coque e gás e das despesas (equações de consumo energético), das etapas de homogeneização e desidratação da matéria prima, da pirólise em batelada e da destilação do bio-óleo, do processo de produção de biocombustível utilizando-se o resíduo de neutralização do óleo de palma. Além disso, são descritos os cálculos de custo de mão de obra, impostos, catalisador, GLP. Todos os resultados apresentados neste memorial de cálculo são utilizados na **Tabela 10** do artigo “Economic analysis of thermal catalytic process of Palm oil (*Elaeis guineensis*, Jacq) and soap phase residue of neutralization process of Palm oil (*Elaeis guineensis*, Jacq).

1 – Cálculo de Disponibilidade

A disponibilidade da planta mencionada em todos os estudos de avaliação econômica neste trabalho é definida como pela equação (1):

$$D = (t_{op} / t_{cale}) * 100 \quad (1)$$

Onde t_{op} é o tempo de operação do processo, a qual, foi considerada como o tempo reacional em [h]; t_{cale} é o tempo calendário disponível em [h].

O tempo de reação foi de 1h. Considerou-se mais 30 min a cada batelada de 8 h para atividades diversas. Portanto, o tempo de operação por batelada de 8h foi de:

$$t_{op} = (4 * 60 + 30) = 270 \text{ min}$$

O tempo calendário disponível, por turno, é de:

$$t_{cale} = (8 * 60) = 480 \text{ min}$$

Da definição de disponibilidade, temos:

$$D = \left(\frac{270}{480}\right) * 100 = 56,25 \%$$

2 - Taxa de alimentação

A taxa de alimentação do equipamento de pirólise é dada conforme a equação abaixo:

$$Q = \frac{M * N_{sh} * N_{bat}}{d} \quad (2)$$

Onde Q é o fluxo volumétrico do resíduo da neutralização do óleo de palma de [L/dia]; M é a massa de 145,5 do resíduo da neutralização do óleo de palma, por batelada

em [Kg]; N_{sh} é o número de turnos por dia 3 [-]; N_{bat} é o número de bateladas por turno utilizando-se o resíduo da neutralização do óleo de palma 1 [-]; d é a densidade do resíduo da neutralização do óleo de palma 0,97 [Kg/L].

$$Q = \frac{145,5*1*3}{0,97} = 450 \text{ L/dia}$$

3 - Fluxo de Produto Líquido Orgânico – PLO (Bio-óleo)

$$Q_{bio} = (Y_{\text{óleo}} * Q)/100 \quad (3)$$

Q_{bio} é o fluxo de produto líquido orgânico (bio-óleo) em [L/dia]; $Y_{\text{óleo}}$ é o rendimento do processo de pirólise a partir do resíduo da neutralização do óleo de palma 71,37 [%].

$$Q_{bio} = \frac{(71,37*450)}{100} = 321,17 \text{ L/dia}$$

4 - Fluxo de Produto Sólido (Coque)

$$m_{coq} = \frac{Q*Y_{coq}*P_{coq}}{100*d_{coq}} \quad (4)$$

Onde a m_{coq} é o fluxo de coque em [US\$/dia]; Y_{coq} é o rendimento do processo de pirólise para a produção de coque a partir do resíduo de neutralização do óleo de palma 23,55 [%]; P_{coq} é o preço do coque em 0,224 [US\$/Kg] e d_{coq} é a densidade do coque em 1 [Kg/L].

$$m_{coq} = \frac{450*23,55*0,224}{100*1} = 23,80 \text{ US$/dia}$$

5 - Fluxo do Produto Gasoso

$$m_{gas} = \frac{Q*Y_{gas}*P_{GLP}*f_1*f_2}{100*d_{coq}} \quad (5)$$

Onde $m_{gás}$ é o fluxo de gás metano [US\$/dia]; $Y_{gás}$ é o rendimento do processo de pirólise para a produção de gás [%]; P_{GLP} é preço do gás liquefeito de petróleo 0,7 [US\$/Kg]; f_1 foi considerado que o fluxo de gás metano era 10% do rendimento total de gás Y_{gas} ; f_2 foi considerado que o preço do gás metano era de 50% do preço do gás liquefeito de petróleo P_{GLP} e $d_{gás}$ é a densidade do gás metano [Kg/L].

$$m_{gas} = \frac{450*23,55*0,70*0,1*0,5}{100*1} = 3,70 \text{ US$/dia}$$

6 - Fluxo do Biocombustível destilado

$$D_{\text{bio}} = \frac{Y_{\text{bio}} * Q_{\text{bio}}}{100} \quad (6)$$

Onde D_{bio} é o fluxo de biocombustível destilado foi de 321,17[L/dia]; Y_{bio} é o rendimento do processo de destilação utilizando-se resíduo de neutralização do óleo de palma foi de 73 [%].

$$D_{\text{bio}} = \frac{73 * 321,17}{100} = 234,5 \text{ L/dia}$$

7 - Custo da Matéria Prima

$$C_{\text{MP}} = \frac{P_{\text{MP}} * Q}{d_{\text{MP}} * (D_{\text{bio}} + m_{\text{coq}} + m_{\text{gás}})} \quad (7)$$

Onde o C_{MP} é o custo da matéria prima de resíduo de neutralização do óleo de palma [US\$/L]; P_{MP} é o preço do resíduo de neutralização do óleo de palma (foi considerado 5 % do preço do óleo de palma de 1,144 [US\$/Kg]; d_{MP} é a densidade do resíduo da neutralização do óleo de palma em [Kg/L].

$$C_{\text{MP}} = \frac{0,05 * 1,144 * 450}{0,97 * (234,5 + 105,9 + 10,5)} = 0,074 \text{ US\$ / L}$$

8 - Custo do Catalisador

$$C_{\text{cat}} = \frac{P_{\text{cat}} * Q * m_{\text{cat}}}{d_{\text{cat}} * (D_{\text{bio}} + m_{\text{coq}} + m_{\text{gás}})} \quad (8)$$

Onde C_{cat} é o custo do catalisador carbonato de sódio Na_2CO_3 [US\$/L]; P_{cat} é o preço do catalisador de 1,32 [US\$/Kg]; m_{cat} é o percentual de catalisador em relação a taxa de matéria prima de alimentação (15% para o resíduo de neutralização do óleo de palma); d_{cat} é a densidade do catalisador em [kg/L].

$$C_{\text{cat}} = \frac{1,32 * 436,5 * 0,15}{2,54 * (234,5 + 105,9 + 10,5)} = 0,098 \text{ US\$/L}$$

9 - Custo do Gás Liquefeito de Petróleo

$$C_{\text{GLP}} = \frac{P_{\text{GLP}} * Q * m_{\text{GLP}}}{(D_{\text{bio}} + m_{\text{coq}} + m_{\text{gás}})} \quad (9)$$

Onde C_{GLP} é o custo do gás liquefeito de petróleo [US\$/L]; P_{GLP} é o preço do gás liquefeito de petróleo de 0,5032 [US\$/L] e m_{GLP} é o percentual de gás liquefeito de petróleo em relação a taxa de alimentação de matéria prima de 10 [%].

$$C_{GLP} = \frac{0,5032 * 450 * 0,1}{(234,5 + 105,9 + 10,5)} = 0,065 \text{ US\$/L}$$

10 - Custo da Mão de Obra

$$C_{MP} = \frac{C_m}{30 * (D_{bio} + m_{coq} + m_{gás})} \quad (10)$$

Onde C_{MP} é o custo da mão de obra em [US\$/L]; C_m é o custo da mão de obra por mês de 1562,5[US\$/mês].

$$C_{MP} = \frac{1562,5}{30 * (234,5 + 105,9 + 10,5)} = 0,148 \text{ US\$/L}$$

11 - Custo da Destilação (Aquecimento)

O número de colunas de destilação depende da produção de bio-óleo produzida em cada batelada do processo de pirólise. Foi considerado uma coluna de destilação de 120 Kg para o material lipídico e de óleo palma; e de 50 Kg para a unidade de semente de açaí e resíduo de neutralização do óleo de palma.

$$D_c = \frac{N_{bat} * P_{KW} * t * P_{KWh}}{(D_{bio} + m_{coq} + m_{gás})} \quad (11)$$

Onde D_c é o custo da destilação em [US\$/L]; N_{bat} é o número de bateladas da destilação para o resíduo de neutralização de 3 [-]; P_{KW} é a potência da coluna de destilação de 5 [KW]; t é o tempo de operação da coluna de destilação por dia em horas de 24 [h] e P_{KWh} é o preço do KWh de 0,2186 [US\$/KWh].

$$D_c = \frac{3 * 5 * 24 * 0,2186}{(234,5 + 105,9 + 10,5)} = 0,224 \text{ US\$/L}$$

12 - Taxa

Destaca-se que um valor de 10 % de impostos foi considerado na análise de viabilidade do projeto.

$$T = \frac{\%T * SP}{100} \quad (12)$$

Onde T é a taxa de imposto em [US\$/L]; %T é o percentual da taxa de imposto em [%] e SP é o preço de venda do biocombustível utilizando-se resíduo de neutralização de 1,34 [US\$/L].

$$T = \frac{10 \cdot 1,34}{100} = 0,134 \text{ US\$/L}$$

13 - Lucro total por dia

$$TP = D_{\text{bio}} * (SP - TE) + m_{\text{coq}} + m_{\text{gas}} \quad (13)$$

Onde TP é o lucro total por dia [US\$/dia]; D_{bio} é fluxo de biocombustível destilado por dia de 234,5 [L/dia]; SP é o preço de venda do biocombustível em [US\$/L] e TE são as despesas totais em [US\$/L].

$$TP = 234,5 * (1,34 - 0,75) + 105,9 + 10,5 = 165,2 \text{ US\$/dia}$$

14 - Desidratação

$$C_{\text{deh}} = \frac{P_{\text{Kw}} * t_{\text{deh}} * N_{\text{deh}} * P_{\text{KWh}}}{(D_{\text{bio}} + m_{\text{coq}} + m_{\text{gas}})} \quad (14)$$

Onde C_{deh} é o custo de desidratação [US\$/L]; P_{kw} é a potência da caldeira de 5 [kW]; t_{deh} é o tempo de desidratação por batelada por dia [-] e P_{KWh} é o preço do KWh em de 0,2186 [US\$/KWh], N_{deh} é o número de bateladas de desidratação [-].

$$C_{\text{deh}} = \frac{5 * 1 * 3 * 0,2186}{(234,5 + 105,98 + 10,59)} = 0,009 \text{ US\$/L}$$

15 - Decantação (NaCl – 10%)

Essa equação foi utilizada para o processo utilizando-se o resíduo de neutralização do óleo de palma.

$$C_{\text{NaCl}} = \frac{\%NaCl * Q * P_{\text{NaCl}}}{(D_{\text{bio}} + m_{\text{coke}} + m_{\text{gas}})} \quad (15)$$

C_{NaCl} é o custo de cloreto de sódio [US\$/L]; %NaCl é o percentual de cloreto de sódio em m/m [%]; P_{NaCl} é o preço do cloreto de sódio de 0,005 [US\$/L].

$$C_{\text{NaCl}} = \frac{0,1 * 450 * 0,005}{(234,5 + 105,98 + 10,59)} = 0,001 \text{ US\$/L}$$

