

ESTUDO E ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO A PARTIR DA PIRÓLISE RÁPIDA DO CAROÇO DE AÇAÍ (*EUTERPE OLERACEA*)

Alunos: Alice Kanbara - alicekanbara@gmail.com; Livia Tiemi - liviatu.uemoto@gmail.com; Miguel Angel - miguel.tito94@gmail.com

Luiz Fernando Antunes - luiz.fernando.vca@gmail.com; Mateus Brunelli - mateusmama@gmail.com;

Orientador: Rodrigo Cella - rcella@fei.edu.br

Introdução

Os combustíveis fósseis ainda são os grandes responsáveis pela geração de energia no mundo. Por serem considerados um recurso não renovável, além do fato do aumento da demanda e da preocupação com o meio ambiente, a busca por novas fontes alternativas de energia fez impulsionar tanto o crescimento tecnológico quanto o setor econômico. Neste cenário, a biomassa vem se destacando como alternativa promissora de fonte energética, por ser derivada de materiais biológicos de natureza renovável, com ampla disponibilidade, baixo custo e boa biodegradabilidade.

O Brasil detém um dos maiores repertórios de espécies nativas do mundo. Devido a sua localização geográfica e vasta proporção continental, o país engloba diversas zonas edafoclimáticas como o trópico úmido do Norte, o semiárido do Nordeste e as áreas temperadas do Sul. Dentre as espécies do trópico úmido, destacam-se os frutos de açaí.

A atividade extrativista do açaí garante uma oportunidade de renda extra para os agricultores durante todo o período de safra, sejam eles familiares ou grandes produtores rurais. As etapas do extrativismo vegetal consistem na colheita, seleção, sanitização, destino final e processamento.

Os resíduos agroindustriais gerados pelos processos de beneficiamento possuem suma importância para o reaproveitamento energético, tendo como objetivo a geração de calor, energia ou gás combustível, a partir do uso da matéria orgânica em processos alternativos de conversão, sejam eles térmicos, biológicos, físicos ou mecânicos.

Assim, a nossa proposta constitui no estudo da viabilidade técnica do processo de produção de biocombustíveis via pirólise rápida, estudando o comportamento e a eficiência do material biológico escolhido para produzir o bio-óleo. Ainda, será realizado uma análise da viabilidade econômica, a fim de verificar a aplicabilidade do processo.

Metodologia

O estudo foi realizado com base nas hipóteses simplificadoras abaixo:

- Não haverá perdas energéticas no processo;
- Conversão total da biomassa dentro do reator de pirólise;
- Os efeitos térmicos de radiação dentro do reator serão desprezados;
- Todos os gases e vapores serão considerados ideais;
- O precipitador eletrostático separará completamente o bio-óleo dos gases não condensáveis;
- O caroço do açaí será considerado como um sólido homogêneo e sem fibras;
- As propriedades termodinâmicas e mecânicas do caroço de açaí podem ser aproximadas a outras biomassas lignocelulósicas;
- O processo de secagem reduzirá o teor de umidade para 0%;
- Os rendimentos e os produtos serão os mesmos demonstrados em literatura.

Balanço de massa do processo

A corrente de vapores produzidos é composta por uma mistura de diversas substâncias e, para simplificar a análise macroscópica do processo, sumarizou-se em duas composições majoritárias, o bio-óleo e os gases não condensáveis. Os rendimentos e os produtos serão os mesmos demonstrados em literatura.

Balanço de energia do processo

• Processo de secagem

A operação unitária fará com que os caroços de açaí fiquem expostos ao ar seco a uma temperatura de 110 °C durante um tempo mínimo necessário para garantir a redução completa da umidade interna da biomassa. O calor total foi calculado a partir da soma dos calores sensível e latente.

• Processo de pré aquecimento

Admitiu-se que a biomassa entra no pré aquecedor a uma temperatura de 100 °C e a quantidade de calor foi calculada pela equação fundamental da calorimetria.

• Processo de reação

Levando em consideração de que a pirólise é um processo de reações múltiplas e que não se conhece a variação de entalpia no reator, utilizou-se o método do calor de formação para determinar o calor do reator. Este método consiste em cinco etapas majoritárias: escolher um estado de referência para os cálculos de entalpia; fazer uma tabela do balanço material do reator; calcular o Cp de cada composto e adquirir as respectivas entalpias específicas; fazer uma tabela com entradas e saídas das vazões mássicas e entalpias; e calcular o ΔH° do reator.

Cálculos e dimensionamento dos equipamentos

• Moinho de martelo

A Lei de Bond foi utilizada por demonstrar estimativas de consumo mais reais, uma vez que é a única lei que prevê o consumo de máquinas que não foram instaladas. Para seguir as metodologias dessa Lei, considerou-se fragmentação por impacto, circuito aberto, bem como as composições bromatológicas do caroço de açaí para realizar a aproximação do índice de trabalho para a noz da Índia.

• Silos e Tanque de armazenamento

Foi considerado um tempo de reserva de 5 dias e as respectivas densidades médias de cada composto. Conforme descrito na Norma API 650, para realizar o dimensionamento seguro de tanques de estocagem de líquidos maiores que 500 galões, é comumente recomendado deixar um volume vazio equivalente a 10% da capacidade máxima de estocagem.

• Pré aquecedor

Para calcular a energia de gás natural, aproximou-se os dados para o gás metano, sendo também determinado a vazão mássica necessária que entrará no sistema de aquecimento.

• Reator de pirólise (pirolisador)

Dimensionado com base nas metodologias de um sistema de fluidização, além da caracterização (propriedades físicas/químicas) dos componentes no reator.

• Ciclone

Equipamento utilizado para a extrair as partículas sólidas em suspensão de uma corrente gasosa, sendo este dimensionado a partir das relações geométricas da configuração de Lapple demonstradas em literatura. O volume foi calculado pela soma do volume do tronco do cone e o volume do cilindro.

• Precipitador eletrostático (ESP)

O dimensionamento foi realizado com base na metodologia apresentada em literatura e adotou-se a hipótese de que as dimensões obtidas serão o suficiente para que se atinja uma eficiência de 100% na separação gás-líquido.

Engenharia econômica

• Diagrama de fluxo de caixa

O diagrama de fluxo de caixa é a representação gráfica da relação das entradas e saídas que uma companhia honra em um certo período de tempo. No diagrama, o período foi representado por uma reta horizontal, com o tempo zero à esquerda, sendo considerada como data presente.

• Viabilidade econômica

- Para a resolução dos cálculos, não foi considerado a precificação e o tempo das instalações da planta industrial, bem como os custos de compra do terreno;

- Considerou o dólar orçamentário a 5,30 reais (26 de maio de 2021) e adotou um imposto de 40% referente ao imposto de importação, frete marítimo, seguro, despesas portuárias, armazenamento, frete do porto e marinha mercante;

- Para estimar o custo de fabricação foi considerado os custos fixos de capital, os operacionais, os custos de utilidades, insumos e matérias primas;

- O caroço de açaí é uma matéria-prima sem valor comercial, portanto foi considerado apenas o preço de frete para o cenário realista; preços de compra dos insumos foram determinados com base no preço do mercado brasileiro;

- Para estimar o custo de utilidades (energia) foi considerado os principais equipamentos consumidores da planta e utilizou como referência a precificação do estado do Pará, encontrando um valor sem tributos de 0,37855 R\$/kWh;

- O preço do bio-óleo foi estimado em 443 dólares/t, sendo este um valor médio apresentado em literatura; o preço de venda do biocarvão foi estimado a 80 reais/t; e, para o biogás, admitiu-se um preço de venda próximo ao preço do gás natural;

- Para os valores de custo fixo foi considerado os salários dos operários e o frete da matéria prima. Já para os custos variáveis foi somado o custo de compra dos insumos;

- A Taxa Mínima de Atratividade foi determinada sendo igual a 1% ao mês para o ano, obtendo uma TMA de 12%. E, para o imposto de renda, considerou-se o IR + CSLL, assumindo um valor de 35%.

- Para calcular o fator de fluxo adotou-se um tempo operacional de 350 dias/ano;

- A depreciação do patrimônio foi determinada pela razão entre o investimento inicial do projeto e o tempo de 10 anos normalmente estimado para depreciação.

Assim, realizou a análise econômica utilizando os indicadores fundamentalistas (VPL, TIR e *payback* descontado) para verificar a aplicabilidade do processo.

ESTUDO E ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO A PARTIR DA PIRÓLISE RÁPIDA DO CAROÇO DE AÇAÍ (*EUTERPE OLERACEA*)

Alunos: Alice Kanbara - alice.kanbara@gmail.com; Livia Tiemi - liviati.uemoto@gmail.com; Miguel Angel - miguel.tito94@gmail.com

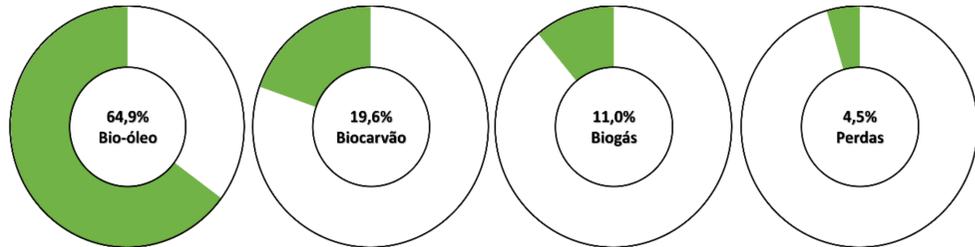
Luiz Fernando Antunes - luiz.fernando.vca@gmail.com; Mateus Brunelli - mateusmama@gmail.com;

Orientador: Rodrigo Cella - rcella@fei.edu.br

Resultados e Discussões

Balço de massa do processo

Figura 1: Rendimentos do processo de pirólise rápida.



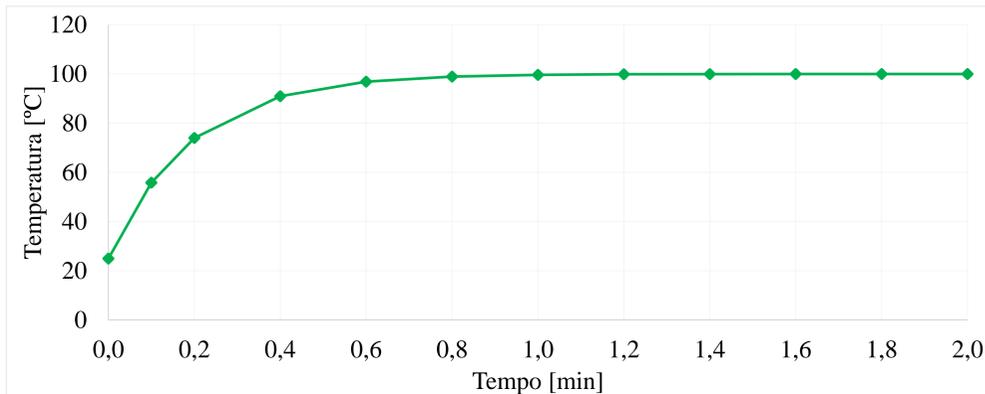
A unidade projetada possui uma capacidade de processamento de 900 kg/h de biomassa úmida, produzindo cerca de 500 kg/h de bio-óleo, além de outros produtos comercializáveis. De acordo com a literatura, a quantidade de perdas no processo está relacionada com gases permanentes não identificáveis e indetectáveis pela cromatografia gasosa.

O biocombustível possui aplicações em resinas fenólicas, na formulação de pesticidas, além da possibilidade de misturá-lo com frações de óleo diesel para obtenção do diesel renovável.

Balço de energia do processo

Para o processo de secagem, a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura da biomassa até a temperatura de vaporização da água é de 23 kW, em um tempo de 2 minutos, conforme Figura 2. Já para vaporizar toda umidade interna da biomassa, tem-se um calor de 87 kW, totalizando um calor final de secagem de 110 kW.

Figura 2: Tempo de aquecimento das partículas até a vaporização da água.



Para o pré aquecedor tem-se uma energia de operação de 104 kW.

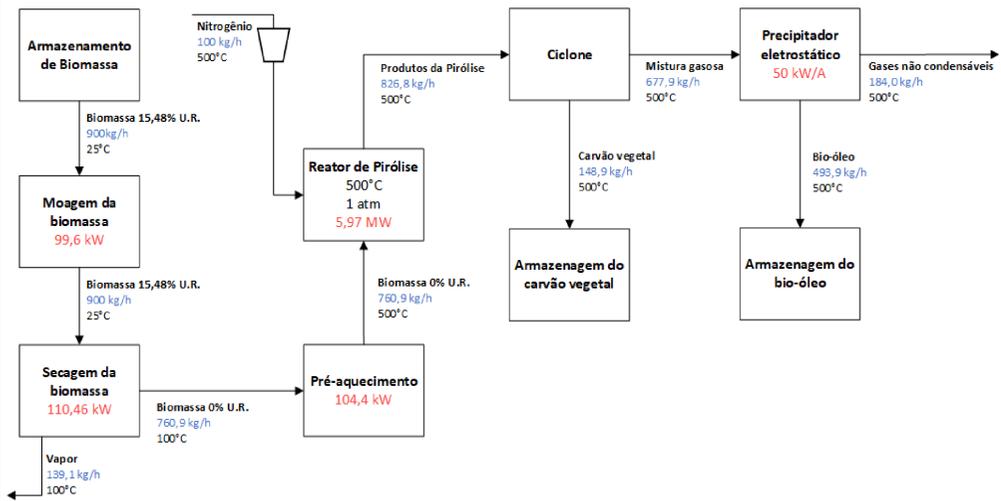
Para o balanço de energia no reator, adotou-se $C(s)$, $H_2(g)$, e $O_2(g)$ como referência das espécies elementais que constituem tanto os reagentes quanto os produtos, além de $N_2(g)$ que constitui a espécie não reativa.

Figura 3: Vazões mássicas e entalpias de cada substância na entrada e saída do reator.

Substância	MM	Vazão (kg/s)	Fração mássica	m_{in} (kg/s)	\hat{h}_{in} (J/kg)	m_{out} (kg/s)	\hat{h}_{out} (J/kg)
Biogás	H ₂	2,016	0,0036	-	-	8,40E-05	6,898E+06
	CH ₄	16,04	0,0408	-	-	9,52E-04	3,205E+06
	CO	28,01	0,3053	-	-	7,12E-03	3,435E+06
	CO ₂	44,01	0,6268	-	-	1,46E-02	8,454E+06
	C ₂ H ₄	28,05	0,0082	-	-	1,91E-04	2,967E+06
	C ₂ H ₆	30,07	0,0073	-	-	1,70E-04	1,510E+06
	C ₃ H ₆	42,08	0,0063	-	-	1,47E-04	1,586E+06
	C ₃ H ₈	44,09	0,0018	-	-	4,20E-05	1,120E+06
Bio-óleo	CH ₂ O ₂	46,03	0,5106	-	-	7,00E-02	8,145E+06
	C ₇ H ₈	92,14	0,3320	-	-	4,55E-02	1,450E+06
	C ₈ H ₈ O ₂	136,15	0,0764	-	-	1,05E-02	1,380E+06
	C ₈ H ₆ O ₄	166,13	0,0810	-	-	1,11E-02	3,720E+06
Biomassa Biocarvão	C(s)	12,01	0,0414	1,0	-	4,14E-02	-
	C _x H _y O _z		0,2114	1,0	0,2114	2,674E+07	-

A quantidade de calor que deverá ser fornecida para o reator é cerca de 6 MW, sendo este suprido através de um encamisamento com gás natural, cuja vazão mássica necessária é de 79 g/s.

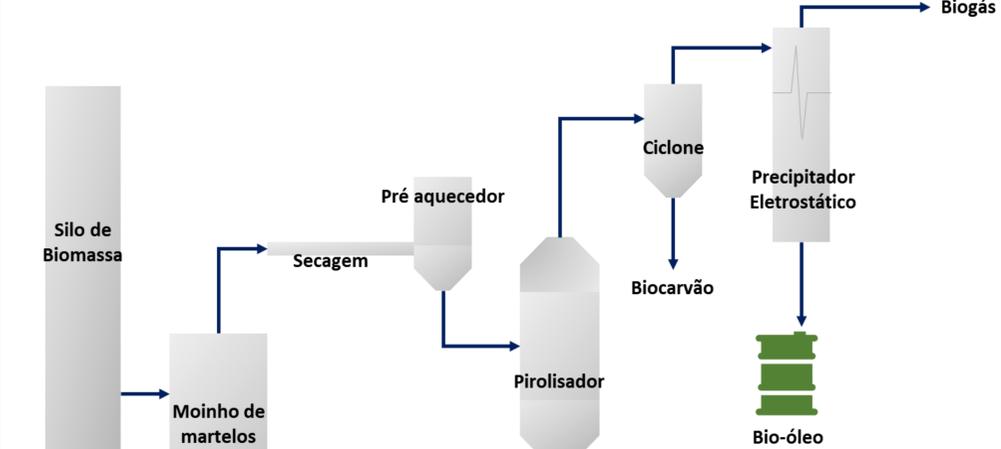
Figura 4: Diagrama de blocos com o balanço de massa e energia do processo.



Dimensionamento dos equipamentos industriais

A planta de pirólise rápida foi desenvolvida para maximizar a produção de bio-óleo, sendo caracterizada por um sistema integrado de moagem, secagem, pré aquecimento, pirolisador, separadores, silos e o tanque de armazenamento.

Figura 5: Sistema integrado dos equipamentos da planta industrial.



Moinho de martelo

Figura 6: Dados obtidos para o moinho de martelo.

Índice de trabalho (kWh/t)	780
Diâmetro inicial (cm)	1,50
Diâmetro final (cm)	0,20
Potência (kW)	99,6
Energia requerida (kWh/kg biomassa)	0,11

Os resultados mostraram a necessidade de um moinho de martelo com uma potência requerida de 99,6 kW e, quantificando a energia para moer 1 kg de biomassa, obtém-se 0,110 kWh/kg.

Silos e Tanque de armazenamento

- O volume do silo da biomassa é de 228 m³;
- O volume do silo do biocarvão é de 28 m³.
- Utilizando Tabela A.1a das Normas API 650, as dimensões para o tanque de bio-óleo são: $h_{TQ,oil} = 3,6$ m, $d_{TQ,oil} = 4,5$ m, $V_{TQ,oil} = 57$ m³ e número de anéis de 1800 mm de largura = 2.

Pré aquecedor

Observa-se que a energia trocada de gás natural é de 75,3 MJ/kg e a vazão mássica necessária para aquecer a biomassa é de 1,4 g/s.

Reator de pirólise (pirolisador)

O pirolisador opera a uma temperatura de 500 °C e pressão de 1 atm. A areia sílica tem uma ocupação de 85% do volume do leito e foi estimado a velocidade de fluidização em 0,14 m/s. Com isso, realizando os demais cálculos, obteve-se as dimensões hidráulicas, sendo a altura = 0,58 metros e um volume de 18,2 L.

ESTUDO E ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO A PARTIR DA PIRÓLISE RÁPIDA DO CAROÇO DE AÇAÍ (*EUTERPE OLERACEA*)

Alunos: Alice Kanbara - alice.kanbara@gmail.com; Livia Tiemi - liviati.uemoto@gmail.com; Miguel Angel - miguel.tito94@gmail.com

Luiz Fernando Antunes - luiz.fernando.vca@gmail.com; Mateus Brunelli - mateusmama@gmail.com;

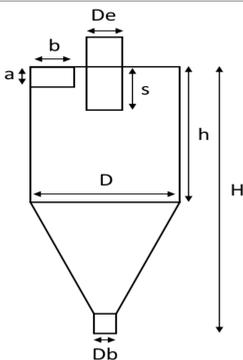
Orientador: Rodrigo Cella - rcella@fei.edu.br

Resultados e Discussões

Ciclone

Figura 7: Dimensões do ciclone.

Lapple	Dimensões	(m)
-	D	0,232
a/D	a	0,116
b/D	b	0,058
s/D	s	0,145
D _e /D	D _e	0,116
h/D	h	0,464
H/D	H	0,928
D _b /D	D _b	0,058



O ciclone tem uma vazão volumétrica de entrada de 369 m³/h e um diâmetro interno do cilindro no valor de 0,232 m, sendo possível determinar as demais dimensões do ciclone conforme apresentado na Figura 7 acima. Assim, tem-se o volume do ciclone de 26,6 L, com tempo de residência de 3,77 s.

Precipitador eletrostático (ESP)

Figura 8: Dimensões do precipitador.

Área total coleta	5,54	m ²	O volume do precipitador eletrostático é igual a 1,69 m ³ , com um tempo de residência das partículas líquidas de 13,4 segundos e a intensidade do campo é 400 kV/m.
Altura (H)	0,75	m	
Comprimento (L)	1,13	m	
Largura (W)	1,63	m	
Área de uma placa	1,69	m ²	
Volume ESP	1,37	m ³	
Nº de placas	3,28	placas	
Nº sessões	4,28	sessões	
Espaçamento (w)	0,25	m	
Área total corrigida	6,75	m ²	
Tempo de residência	13,38	s	
Voltagem aplicada	50,0	kV	
Intensidade campo (E)	400	kV/m	
SCA	15,0	m ² /1000 m ³ /h	

Engenharia econômica

A planta industrial possui 9 equipamentos, sendo necessário 13 operadores por turno.

Figura 9: Custo dos equipamentos.

TAG	Equipamento	Preço sem impostos	Preço com impostos
Z-100	Silo da Biomassa	R\$ 79.650,00	R\$ 111.510,00
Z-200	Moinho de Martelos	R\$ 169.860,00	R\$ 137.804,00
Z-300	Secador	R\$ 53.000,00	R\$ 74.200,00
Z-400	Pré Aquecedor	R\$ 36.108,00	R\$ 50.551,20
Z-500	Reator	R\$ 59.307,00	R\$ 83.029,80
Z-600	Ciclone	R\$ 36.108,00	R\$ 50.551,20
Z-700	Precipitador Eletrostático	R\$ 18.585,00	R\$ 26.019,00
Z-800	Tanque de Armazenamento	R\$ 106.200,00	R\$ 148.680,00
Z-900	Silo do Biocarvão	R\$ 5.973,75	R\$ 8.363,25
		R\$	790.708,45

Figura 10: Custo de utilidades (energia).

TAG	Equipamento	Consumo (kW)	Preço (R\$/kWh)	Custo anual
Z-100	Silo da Biomassa	-	-	R\$ -
Z-200	Moinho de Martelos	99,6	0,37855	R\$ 316.710,00
Z-300	Secador	110,5	0,37855	R\$ 351.370,00
Z-400	Pré Aquecedor	-	-	R\$ -
Z-500	Reator	-	-	R\$ -
Z-600	Ciclone	-	-	R\$ -
Z-700	Precipitador Eletrostático	50	0,37855	R\$ 158.991,00
Z-800	Tanque de Armazenamento	-	-	R\$ -
Z-900	Silo do Biocarvão	-	-	R\$ -
				R\$ 827.071,00

Figura 11: Custo de matéria prima e insumos.

Material	Classificação	Unid.	Preço (R\$/Unid)	Vazão (kg/h)	Custo Anual
Gás Natural	Insumo	m ³	R\$ 2,57	289,39	R\$ 9.507.080,00
Nitrogênio	Insumo	kg	R\$ 0,46	100,00	R\$ 388.511,05
Transporte Carvão	Matéria-prima	kg	R\$ 0,43	900,00	R\$ 3.250.800,00

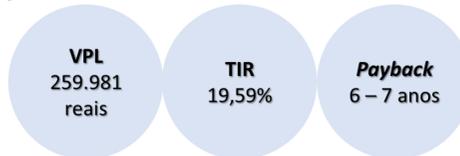
Figura 12: Precificação dos produtos.

Material	Classificação	Preço (R\$/kg)	Vazão (kg/h)	Precificação Anual
Bio-óleo	Produto	R\$ 2,35	493,8	R\$ 9.738.060,96
Biocarvão	Produto	R\$ 0,08	148,9	R\$ 100.037,33
Biogás	Produto	R\$ 3,00	184,0	R\$ 4.636.272,61

O fator de fluxo obtido foi de 0,96, sendo possível afirmar que a planta industrial é confiável e que apresenta operação com capacidade projetada na maior parte do tempo solar anual.

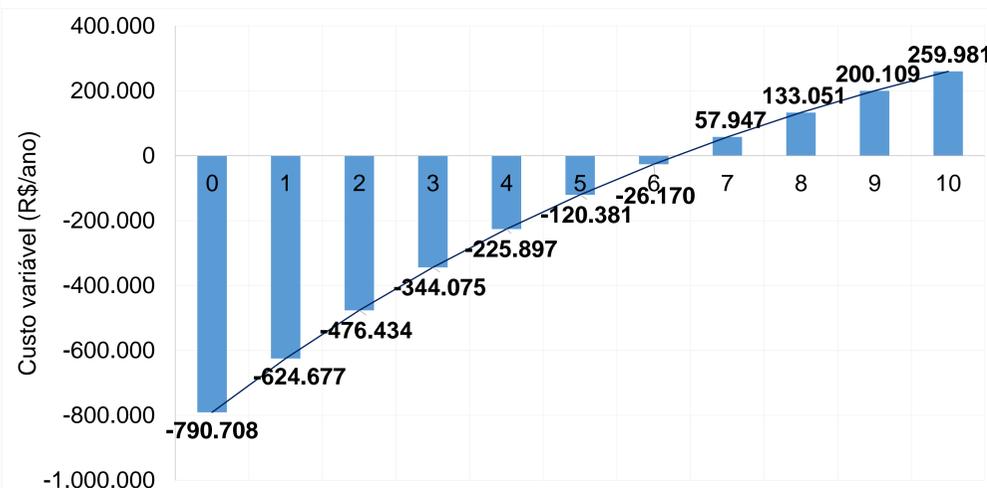
Já a depreciação do patrimônio ficou em torno de 79 mil reais por ano.

Figura 13: Resultados da viabilidade econômica.



A viabilidade e a aplicabilidade do processo é positiva, apresentando um VPL de quase 260 mil reais, TIR de 19,59% e um período de *payback* entre 6 e 7 anos.

Figura 14: Diagrama do fluxo de caixa.



Conclusões

A planta desenvolvida possui uma capacidade de processamento de 900 kg/h de biomassa úmida, obtendo produções de 493,8 kg/h de bio-óleo, 148,9 kg/h de biocarvão e 84 kg/h de biogás. Ressalta-se que, conforme dados demonstrados na literatura, foi mantida a porcentagem de perdas de 4,48%, equivalente a 31,4 kg/h, uma vez que nenhum processo químico é ideal.

Quanto aos balanços de energia, verifica-se que há um grande consumo de energia no processo, sendo a maior parte apresentada no reator, já que a reação de pirólise é endotérmica.

Aos cálculos e dimensionamentos dos equipamentos realizados, observa-se que apresentaram características de uma escala piloto de produção.

Os resultados econômicos mostraram que a viabilidade da planta é positiva e que depende da sua capacidade de alimentação. Percebe-se que a TIR do projeto apresenta características de uma unidade industrial de baixo risco, porém sendo também maior que a TMA adotada, mostrando a sua boa aplicabilidade. Ainda, devido à complexidade de operacionalização da unidade é válido realizar uma análise mais detalhada dos custos não apresentados no trabalho para aproximar de maneira mais precisa os investimentos necessários e garantir que este projeto seja ainda mais rentável para aquele que o executar. Assim como avaliar com maior rigor a possibilidade e os impactos econômicos e ambientais ocasionados pelo reaproveitamento energético do biogás produzido ao processo.

Concluindo, o processo possui uma boa viabilidade econômica, se mostrando sustentável ao utilizar resíduos agroindustriais, que em sua maior parte são descartados inadequadamente, e socialmente justa, ao contribuir com uma atividade extrativista de grande relevância para os produtores rurais nortistas.