

Do Resíduo ao Recurso: Despolimerização de PET com ECAT e *Upcycling* Eletrocatalítico de Etilenoglicol para Ácido Fórmico e Hidrogênio com Baixo Consumo Energético.

Luís F. Bordini^{a,b}, Daniela O. Campos^{a,b}, Giullia B. Marçano^{a,b}, Jhonatam P. Mendonça^{b,d}, Israel B. S. Poblete^b, Pedro N. Romano^{b,c*} and João M.A.R. de Almeida^{b,d,*}

^aEscola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil;

^bLIPCAT/IDlab, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro 21941-594, RJ, Brasil.

^cCampus Duque de Caxias, UFRJ, Duque de Caxias, Rio de Janeiro, Brasil;

^dInstituto de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

*pedroromano@eq.ufrj.br (P. N. Romano), *j.monnerat@iq.ufrj.br (J.M.A.R. de Almeida)

Resumo/Abstract

RESUMO - Este trabalho apresenta uma rota sustentável para a reciclagem química de PET, utilizando despolimerização catalítica assistida por micro-ondas com ECAT e *upcycling* eletrocatalítico do etilenoglicol (EG). A abordagem permitiu recuperar ácido tereftálico (TPA) e EG de forma eficiente e com alta pureza. O processo de micro-ondas otimizou a hidrólise, superando limitações de difusão do método convencional. O EG foi valorizado em um processo eletrocatalítico, gerando ácido fórmico e hidrogênio com menor consumo de energia. A análise econômica mostrou que o processo é viável em cenários de retrofit, destacando seu potencial para a economia circular e redução de resíduos plásticos.

ABSTRACT - This work presents a sustainable route for the chemical recycling of PET, using microwave-assisted catalytic depolymerization with ECAT and electrocatalytic *upcycling* of ethylene glycol (EG). The approach enabled the efficient recovery of terephthalic acid (TPA) and EG with high purity. The microwave process optimized hydrolysis, overcoming diffusion limitations of the conventional method. The EG was upgraded through an electrocatalytic process, generating formic acid and hydrogen with lower energy consumption. The economic analysis showed that the process is viable in retrofit scenarios, highlighting its potential for the circular economy and plastic waste reduction.

Introdução

Os polímeros sintéticos são amplamente utilizados em embalagens, tecidos e diversos produtos de consumo. Apesar de sua importância, a baixa reciclabilidade e a persistência no ambiente geram sérias preocupações. O acúmulo desses materiais contribui significativamente para os impactos negativos ambientais globais (1). Entre eles, o PET se destaca pelo alto volume de uso, especialmente em embalagens de alimentos e bebidas. Suas propriedades como leveza e resistência justificam sua ampla aplicação (2).

A reciclagem do PET, embora tecnicamente viável, ainda enfrenta limitações relacionados à eficiência energética, à pureza dos produtos obtidos e à viabilidade econômica de processos convencionais (2). Nesse contexto, estratégias que associam valorização de resíduos com menor impacto ambiental vêm ganhando destaque. Uma dessas abordagens consiste na despolimerização catalítica do PET, que permite a recuperação dos seus monômeros constituintes, possibilitando seu reuso em cadeias produtivas de maior valor agregado (3).

Neste estudo, investigou-se o uso do ECAT, um catalisador de equilíbrio proveniente do processo industrial de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC) como

catalisador heterogêneo para a despolimerização do PET. Este resíduo industrial, com destinos pouco nobres (4), ainda retém propriedades zeolíticas que possibilitam a hidrólise eficaz do polímero sob aquecimento por micro-ondas, em condições mais brandas e com menor agressividade química. A combinação “resíduo + resíduo”, PET pós-consumo e ECAT desativado, representa, assim, uma solução inovadora e sustentável para a valorização de resíduos industriais e urbanos.

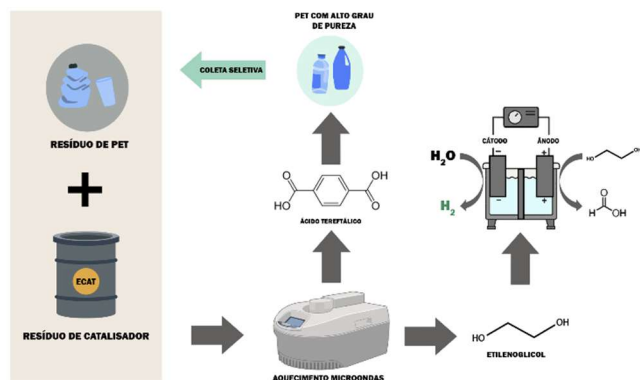
O processo permite a recuperação seletiva dos monômeros originais do PET: o ácido tereftálico (TPA) e o etilenoglicol (EG). O TPA obtido apresenta elevado grau de pureza, tornando possível sua reutilização na síntese de novo PET com qualidade compatível com os padrões exigidos pela indústria alimentícia (5). Por outro lado, o EG, muitas vezes considerado apenas coproduto da despolimerização, é aqui reposicionado como uma plataforma química estratégica.

O etilenoglicol (EG) obtido na despolimerização do PET foi valorizado por meio de um processo de *upcycling* eletrocatalítico, no qual é convertido em ácido fórmico, produto de maior valor agregado, simultaneamente à geração de hidrogênio (H₂). Foi utilizado um eletrodo de Pd-Ni(OH)₂ depositados em espuma de níquel, uma vez que catalisadores a base de paládio são conhecidos por sua alta

atividade e seletividade em reações de oxidação parcial, e quando combinados com $\text{Ni}(\text{OH})_2$, há a formação de um ambiente favorável a eletrocatalise em condições alcalina. Essa abordagem, realizada em célula eletroquímica com baixo consumo energético (*energy-saving*), promove não apenas a produção eficiente de reagentes sustentáveis, mas também contorna limitações da eletrólise convencional, que exige alta energia devido à lenta cinética da reação de evolução de oxigênio (OER). Ao substituir a OER pela oxidação seletiva do EG, termodinamicamente mais favorável, viabiliza-se uma rota integrada para a produção de H_2 verde e compostos químicos renováveis, alinhando eficiência energética e valorização de resíduos (6,7)

Além das etapas experimentais, este trabalho inclui uma avaliação econômica preliminar da rota integrada, considerando os custos de insumos, operação e potencial de valorização dos produtos gerados. A análise demonstrou que a estratégia proposta possui viabilidade técnica e econômica promissora com premissas específicas, especialmente quando comparada a processos convencionais.

Dessa forma, o estudo propõe uma rota integrada e sustentável de valorização do PET, combinando despolimerização catalítica com reaproveitamento de resíduos industriais e conversão eletroquímica de alta eficiência, contribuindo com soluções inovadoras para a economia circular e a transição energética (Figura 1).



Experimental

Hidrólise do PET

O resíduo de politereftalato de etileno (PET) foi previamente lavado com água deionizada, seco em estufa a 60 °C por 12 h e, em seguida, moído em moinho de facas. O material foi peneirado para obtenção de partículas com tamanho inferior a 4 mm. A depolimerização foi conduzida utilizando uma razão mássica de 1:0,5:10 entre PET, catalisador e água deionizada, respectivamente. Três condições catalíticas foram avaliadas: (i) com catalisador ECAT (catalisador de craqueamento catalítico em fim de vida), (ii) sem adição de catalisador, e (iii) utilizando solução aquosa de HCl ajustada para pH 3 como catalisador. O catalisador ECAT foi previamente caracterizado por difração de raios X (DRX), fissorção de N_2 , fluorescência

de raios X (FRX), espectroscopia de absorção atômica (AAS), dessorção programada de amônia (TPD- NH_3) e dessorção de isopropilamina (TPD- iPrNH_2), com o objetivo de avaliar suas propriedades estruturais, texturais e ácido-catalíticas.

Os experimentos foram realizados sob duas diferentes condições de aquecimento. No método convencional, as misturas reacionais foram inseridas em reator tipo autoclave de aço inoxidável, aquecido até 200 °C e mantido nesta temperatura por diferentes tempos de reação, sob agitação contínua (900 rpm). No método assistido por micro-ondas (MW), as mesmas formulações foram submetidas a aquecimento em um reator de micro-ondas de bancada, com controle de temperatura, agitação e potência, operando também a 200 °C por diferentes tempos de residência.

Ao final de cada ensaio, o sistema foi resfriado naturalmente à temperatura ambiente e, em seguida, alcalinizado com solução de NaOH, promovendo a solubilização do ácido tereftálico (PTA) formado. A mistura alcalina foi então submetida à filtração para remoção do catalisador ECAT e do PET não reagido. O sobrenadante resultante foi acidificado com solução de HCl até pH ácido, favorecendo a precipitação do PTA, que foi recuperado por nova filtração e posteriormente seco em estufa a 60 °C. O PTA obtido foi caracterizado por espectroscopia no infravermelho (FTIR) e análise termogravimétrica (TG). A fase líquida remanescente, contendo etilenoglicol (EG) e água, foi destinada à etapa subsequente de eletrólise, sendo o EG quantificado por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC).

Preparação de $\text{Pd-Ni}(\text{OH})_2\text{-NF}$, $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NF}$ e Pd/C-NF .

O eletrodo $\text{Pd-Ni}(\text{OH})_2\text{-NF}$ foi sintetizado por meio de um método hidrotérmico em uma única etapa, adaptado de Liu et al. (2023) (6). Inicialmente, a espuma de níquel (NF) com dimensões de 1 cm × 1 cm foi limpa por sonicação sequencial em etanol, HCl 0,1 M e água deionizada, cada uma por 10 minutos. Paralelamente, 15 mg de PdCl_2 foram dissolvidos em uma quantidade mínima de HCl concentrado para formar H_2PdCl_4 , que foi posteriormente diluído em 20 mL de água deionizada sob agitação constante por 20 minutos, obtendo-se uma solução homogênea. Essa solução foi transferida para uma autoclave de aço inoxidável revestido internamente com Teflon (50 mL), contendo a NF previamente tratada. A reação hidrotérmica foi conduzida a 100 °C por 2 horas, seguida de resfriamento natural até a temperatura ambiente. O eletrodo $\text{Pd-Ni}(\text{OH})_2\text{-NF}$ resultante foi removido, lavado abundantemente com água deionizada e seco a 60 °C durante a noite.

O eletrodo controle $\text{Ni}(\text{OH})_2\text{-NF}$ foi preparado utilizando o mesmo procedimento, porém sem a adição dos sais de paládio. O pH da solução precursora foi ajustado para 10–11 com KOH antes da etapa hidrotérmica, a fim de favorecer a formação de $\text{Ni}(\text{OH})_2$.

Para fins de comparação, o eletrodo Pd/C-NF foi preparado dispersando-se 12 mg de Pd/C comercial (10% em peso) em uma mistura de etanol, água deionizada e

Nafion (5% em peso), sob sonicação, para formar uma tinta catalítica. Essa tinta foi depositada (drop-cast) sobre a superfície da NF previamente limpa e seca em condições ambiente.

Medidas Eletroquímicas.

Experimentos eletroquímicos foram realizados usando uma configuração padrão de três eletrodos em um AUT302N. Potenciostato FRA32M (Metrohm, Herisau, Suíça) com software de processamento NOVA 2.7. O eletrodo Pd-Ni (OH)₂ / NF serviu como eletrodo de trabalho, uma folha de platina como contra-eletrodo e um eletrodo Ag / AgCl (sat. KCl) como referência. Todos os potenciais foram convertidos para a escala de eletrodo de hidrogênio reversível (RHE) usando a equação:

$$E_{RHE} = E_{Ag/AgCl} + 0,197 \text{ V} + 0,0591 \times \text{pH}$$

O eletrólito consiste em KOH 1,0 M contendo etilenoglicol derivado de PET ou solução de hidrolisado. A voltametria de varredura linear (LSV) foi realizada em uma taxa de varredura de 5 mV·s⁻¹. A voltametria cíclica (CV) foi realizada para estimar a área de superfície eletroquímica (ECSA) medindo a capacitância de camada dupla (C_{dl}).

Avaliação econômica

A análise econômica seguiu a metodologia proposta por Turton et al. (2016) (8) para a estimativa do Investimento Fixo de Capital (FCI, MMUSD), do Custo de Fabricação (COM, MMUSD/ano) e do Valor Presente Líquido (NPV, MMUSD), conforme as equações econômicas apresentadas - Eq.(1) - (8). O software CAPCOST foi utilizado para a estimativa dos custos dos módulos dos equipamentos (C_{BM}), corrigidos por fatores de pressão, tipo material, dimensão e atualizados pelo Chemical Engineering Plant Cost Index.

$$FCI = 1,18 \sum_{j=1}^{N_{Eq}} C_{BM}(j). \quad \text{Eq. (1)}$$

$$\frac{C_{BM}}{C_{BM}^{Lim}} = \frac{CEPCI^{Atual}}{CEPCI^{Base}} \cdot (Capacidade/Capacidade^{Lim})^{0,6} \quad \text{Eq. (2)}$$

$$COM = 0,18FCI + 1,23CRM \quad \text{Eq. (3)}$$

$$GAP = REV - COM \quad \text{Eq. (4)}$$

$$AP = \begin{cases} GAP - (GAP - DEPR) \cdot \frac{ITR}{100} & \text{se } GAP > DEPR \\ GAP & \text{se } GAP \leq DEPR \end{cases} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$NPV = - \left(0,4 + \frac{0,6}{1 + \frac{ITR}{100}} \right) FCI + \sum_{k=2}^{k=2} AP \cdot \left(1 + \frac{ITR}{100} \right)^k \quad \text{Eq. (6)}$$

A Tabela 1 apresenta as premissas utilizadas para a estimativa de outras variáveis econômicas, como receitas (REV, MMUSD/ano), custo de matérias-primas (CRM, MMUSD/ano), custo de mão de obra (COL, MMUSD/ano), custo de utilidades (CUT, MMUSD/ano), depreciação anual

(DEPR, MMUSD/ano), lucro bruto anual (GAP, MMUSD/ano) e lucro anual (AP, MMUSD/ano).

Tabela 1. Premissas econômicas

Descrição	Premissas
Tempo de Projeto	Construção: 1 ano Operação: 30 anos
Depreciação	10%
Impostos	34%
Juros	14%
Disponibilidade	8400 h/ano
Mão de Obra (COL)	Negligenciado
Matéria-primas	E-CAT = 0 USD* PET residual = 0,083 USD/kg
Produtos	TPA = 1,01 USD/kg EG = 0,49 USD/kg
Insumos	NaOH = 0,32 USD/kg HCl = 0,145 USD/kg
Crédito de Carbono	100 USD/t
CEPCI	812 (Ano base: 2022)

Os créditos de carbono foram estimados com base na precificação de Carbono do World Bank (2025), considerando o potencial de redução de CO₂ emitido pela substituição dos produtos (ácido tereftálico e etileno glicol) da rota petroquímica pela rota sustentável de reciclagem do PET.

Resultados e Discussão

Caracterização ECAT

A Tabela 2 apresenta a caracterização físico-química do catalisador ECAT, evidenciando sua composição rica em Al₂O₃ (55,85%) e SiO₂ (38,49%), o que confirma sua natureza baseada em alumina, argilas e zeólitas, componentes estruturais fundamentais em catalisadores de FCC. A presença de 3,42% de óxidos de terras raras (como o lantânio, 0,96%) confere maior estabilidade térmica e hidrotérmica ao material, favorecendo sua durabilidade durante múltiplos ciclos catalíticos. Além disso, a presença dos contaminantes metálicos Fe (0,42%), Ni (0,30%) e V (0,24%) está associada ao acúmulo de metais pesados oriundos das cargas de petróleo processadas industrialmente, que podem afetar negativamente o desempenho catalítico ao induzir reações paralelas ou desativar sítios ativos.

A análise textural por fisisorção de N₂ revelou uma área superficial específica de 200 m²/g, com volume de mesoporos de 0,08 cm³/g e de microporos de 0,03 cm³/g. Essa distribuição bimodal de porosidade é típica de catalisadores de FCC, nos quais os microporos derivam da estrutura zeolítica (essencial para reações seletivas em fase gasosa ou líquida), enquanto os mesoporos, associados à matriz de alumina, favorecem a difusão de moléculas maiores, como o PET parcialmente hidrolisado, até os sítios ativos internos.

A acidez total do material, determinada em 227 μmol/g, está diretamente relacionada à sua atividade catalítica,

especialmente em reações de hidrólise, como ocorre na depolimerização do PET. A razão Brønsted/Lewis de 8,1 indica predominância de sítios ácidos do tipo Brønsted. Essa elevada razão também sugere que o ECAT ainda retém funcionalidade zeolítica significativa, mesmo após o uso industrial.

Tabela 2. Propriedades químicas, texturais e ácido-catalíticas do ECAT.

Composição Química	
Al ₂ O ₃ ^a	55,85
SiO ₂ ^a	38,49
Óxidos de terras raras ^a	3,42
La ^b	0,96
Fe ^b	0,42
Ni ^b	0,30
V ^b	0,24
Propriedades Texturais	
Área específica ^c (m ² /g)	200
Vol. mesoporos ^c (cm ³ /g)	0,08
Vol. microporos ^c (cm ³ /g)	0,03
Propriedades Ácidas	
Acidez ^d (μmol/g)	227
Razão Brønsted/Lewis ^d	8,1

Hidrólise do PET

O mecanismo proposto para a despolimerização do politereftalato de etileno (PET), ilustrado na Figura (2), envolve a ativação da carbonila pela ação de sítios ácidos presentes na zeólita. Nesse processo, a zeólita desempenha um papel fundamental ao promover a hidrólise da água, gerando íons hidrônio (H₃O⁺). Esses íons, por sua vez, são os responsáveis pela ativação da carbonila das cadeias de PET, facilitando o ataque nucleofílico da água e promovendo a quebra das ligações éster, etapa chave para a despolimerização do polímero.

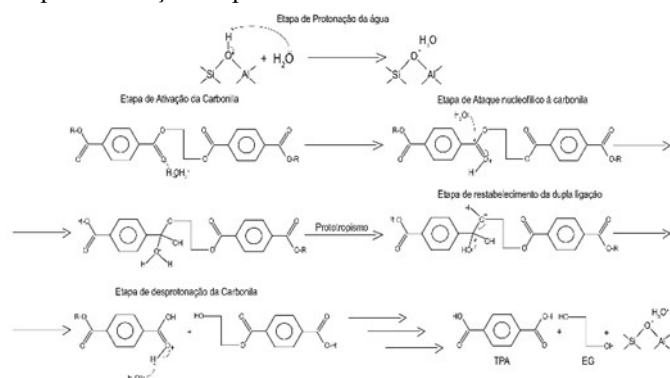


Figura 2. Esquema reacional

No entanto, quando a reação é conduzida sob aquecimento convencional a 200 °C (Figura 3), não foi observada diferença significativa na conversão entre o

sistema catalisado e o não catalisado. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, a essa temperatura, o PET ainda se encontra abaixo do seu ponto de fusão (250 °C), permanecendo em fase sólida (9). Nessa condição, a difusão das longas cadeias poliméricas até os sítios catalíticos da zeólita é severamente limitada, restringindo a interação efetiva entre o substrato e o catalisador poroso.

Por outro lado, sob aquecimento assistido por micro-ondas (MW), foi observada uma diferença significativa no desempenho catalítico da zeólita. Esse efeito pode ser atribuído à capacidade das micro-ondas de promover hidrólise do PET a oligômeros mesmo em temperaturas abaixo do ponto de fusão. Esses intermediários, devido ao seu tamanho reduzido, conseguem acessar os poros da zeólita.

Dentro da estrutura microporosa da zeólita, os íons hidrônio em confinamento encontram-se menos solvatados em relação ao meio homogêneo, o que aumenta sua reatividade (10,11,12). Esse ambiente confinado favorece a ativação da carbonila dos oligômeros, facilitando o ataque nucleofílico da água e promovendo de forma mais eficiente a despolimerização até os monômeros constituintes: o ácido tereftálico purificado (TPA) e o etilenoglicol (EG). Assim, o uso combinado de micro-ondas e catalisadores zeolíticos permite superar as limitações impostas pela fase sólida do PET, potencializando a ação catalítica por meio da sinergia entre oligomerização, difusão e reatividade aumentada dos hidrônios confinados.

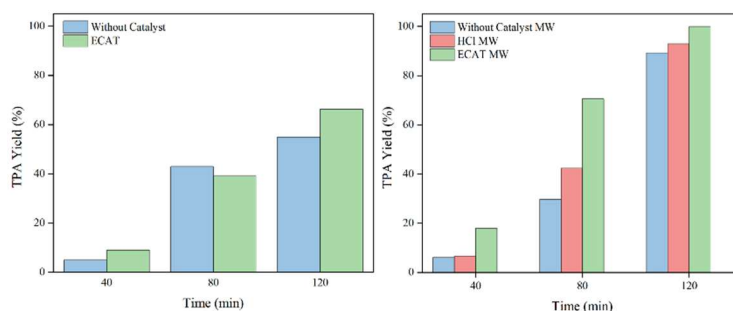


Figura 3. Resultados catalíticos

Medidas Eletroquímicas.

A Figura 4 (a) apresenta curvas de voltametria linear (LSV) obtidas para o eletrocatalisador Pt-Ni(OH)₂ em eletrólitos de 1 M KOH e contendo 0,1 M de etilenoglicol (EG), revelando um desempenho significativamente superior na presença do substrato orgânico. A corrente de 10 mA cm⁻² é atingida a 1,37 V no meio com EG, enquanto no KOH puro o mesmo valor de corrente requer 1,55 V, indicando uma economia energética de 180 mV. Da mesma forma, para 100 mA cm⁻², a economia é de 60 mV (1,68 V vs 1,74 V). Essa redução de sobrepotencial se dá pela substituição da reação de evolução de oxigênio (OER) para uma reação termodinamicamente mais favorável: a reação de oxidação do etilenoglicol (EGOR).

A Figura 4 (b) mostra as curvas de Tafel correspondentes, nas quais o sistema contendo apenas KOH exibe uma inclinação de 112 mV dec^{-1} , compatível com mecanismos limitados por transferência de carga, típicos de catalisadores baseados em metais de transição. Por outro lado, o sistema com EG apresenta uma inclinação mais elevada (541 mV dec^{-1}), sugerindo uma cinética mais complexa, influenciada por múltiplas etapas envolvendo adsorção e oxidação de intermediários orgânicos como aldeídos e ácidos carboxílicos. Apesar da cinética mais lenta da EGOR em comparação com a OER, a significativa economia energética obtida torna o sistema atrativo para aplicações em eletrólise acoplada à valorização de substratos orgânicos. Essa estratégia tem sido amplamente explorada como alternativa promissora para a produção simultânea de hidrogênio verde e compostos de alto valor agregado a partir de resíduos orgânicos e plásticos. Estudos recentes demonstram a eficácia de eletrocatalisadores baseados em Ni, Co, Pd e suas combinações (por exemplo, Co-Ni-P, NiTe, Pd-Ni(OH)₂) na oxidação de etilenoglicol e outros álcoois de baixo peso molecular, permitindo a redução de até 300 mV no potencial de operação da célula eletrolítica em comparação com a eletrólise da água convencional (7,6).

Embora até o momento tenhamos utilizado EG puro como modelo, os próximos passos visam substituir este meio por eletrólitos reais obtidos via hidrólise de resíduos plásticos PET assistida por micro-ondas, processo que gera misturas de EG e ácido tereftálico (TPA) como mostrado na seção anterior. O uso dessas soluções complexas de origem renovável e de baixo custo permitirá avaliar a aplicabilidade prática da eletrooxidação direta de resíduos, promovendo simultaneamente a reciclagem química do PET e a produção de hidrogênio verde.

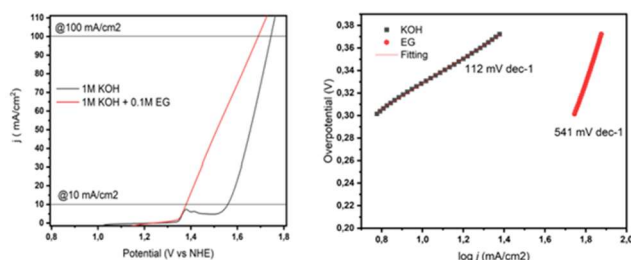


Figura 4 - (a) Curvas de voltametria linear (LSV) do eletrocatalisador Pt-Ni(OH)₂ em 1 M KOH (preto) e 1 M KOH + 0,1 M EG (vermelho). (b) Curvas de Tafel derivadas dos dados da Figura 1a, indicando inclinações de 112 mV dec^{-1} para KOH e 541 mV dec^{-1} para o meio contendo EG.

Avaliação econômica

A planta foi projetada para alcançar uma capacidade de reciclagem química de 100 kg de PET por dia, equivalente a aproximadamente 35 toneladas por ano. Com base no balanço de massa do processo e na correlação experimental

de 4 g de PET processado por litro de volume do reator, uma capacidade de 2,08 m³ de PET demanda um volume de reator de cerca de 2,08 m³, o que é inviável para aplicações com aquecimento por micro-ondas. Portanto, foi proposto um sistema composto por 17 reatores operando em paralelo, cada um com diâmetro interno de 0,40 m e comprimento de 1,00 m, resultando em volume útil de 0,13 m³ e volume total interno de 0,19 m³. Cada reator foi equipado com três unidades micro-ondas com gerador independentes, garantindo a distribuição uniforme da energia de micro-ondas.

O investimento total estimado foi de 1,36 MMSUD, onde o sistema de reatores como principal contribuinte ($\approx 32\%$ FCI). Em seguida, destacam-se os custos combinados das unidades de micro-ondas e geradores (23% do FCI). A Tabela 3 apresenta a discriminação detalhada do FCI por equipamento.

Tabela 3. Estimativas de FCI dos equipamentos.

Equipamento	TAG	Design	Unid.	Quant.	FCI (MMUSD)
Reator	R-10/1-17	0,19	m³	17	0,44
1º Filtro	Fr-102	0,10	m²	1	0,25
2º Filtro	Fr-103	0,20	m²	1	0,25
Secador	Dy-104	0,28	m²	1	0,12
Microondas	MW-105	100	W	51	0,31
Total					1,36

O desempenho econômico foi avaliado em termos de FCI, COM, REV e NPV, para um horizonte de projeto de 30 anos, conforme apresentado no diagrama de fluxo de caixa ilustrado da 5. Foram analisados três cenários econômicos: (i) Caso A: investimento total do FCI, incluindo todos os equipamentos listados na Tabela 2; (ii) Caso B: considerando o investimento de apenas do conjunto MW+geradores; e (iii) Caso C: investimento de apenas o conjunto MW+geradores combinado com a precificação dos produtos (TPA e EG) com valores de mercado quatro vezes aos apresentados na Tabela 1. O único caso com VPL positivo (0,21MMUSD) é o Caso C, resultando em um *payback* de 6 anos.

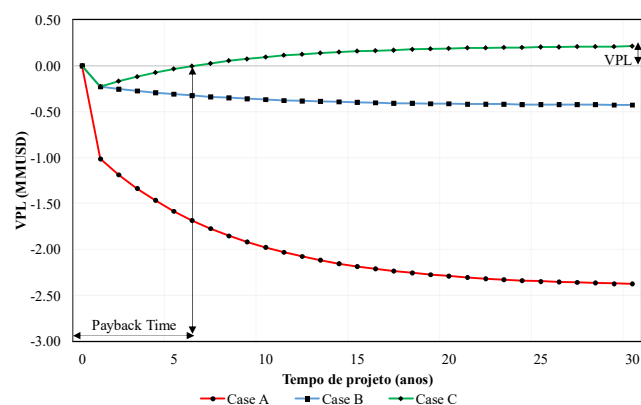


Figura 5. Fluxo de caixa para três cenários avaliados.

A viabilidade econômica do processo é fortemente dependente da precificação dos produtos e do custo da matéria-prima (PET reciclado). Assim, foi realizada uma análise de sensibilidade econômica para o Caso C. A Figura 6 apresenta três planos que ilustram as regiões de viabilidade ($VPL > 0$). Observa-se que valores de venda do TPA inferiores a 3,00 USD/kg tornam o projeto economicamente inviável.

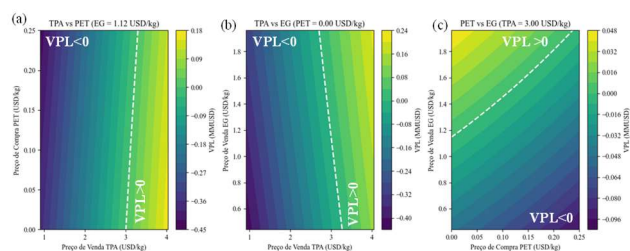


Figura 6. Análise de sensibilidade econômica: (a) Preço fixo de venda de EG em 1,12 USD/kg; (b) Preço fixo de compra de PET em 0,00 USD/kg; (c) Preço fixo de venda de TPA em 3,00 USD/kg.

Conclusões

O estudo apresentou uma rota sustentável e inovadora para a reciclagem química de PET, integrando despolimerização catalítica assistida por micro-ondas com ECAT e upcycling eletrocatalítico do etilenoglicol (EG). A despolimerização catalítica demonstrou alta eficiência na recuperação seletiva de ácido tereftálico (TPA) e etilenoglicol (EG) a partir do PET pós-consumo, utilizando como catalisador o ECAT, um resíduo industrial do processo de craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC). A aplicação de micro-ondas otimizou a hidrólise, superando barreiras difusionais presentes em métodos convencionais, permitindo uma conversão mais rápida e eficiente do polímero. O EG obtido foi então valorizado por meio de um processo de upcycling eletrocatalítico, no qual foi convertido em ácido fórmico e hidrogênio de forma energeticamente eficiente. Essa substituição da reação de evolução de oxigênio (OER) pela oxidação eletrocatalítica do EG possibilitou a produção simultânea de hidrogênio verde e compostos de maior valor agregado, destacando-se como uma alternativa promissora para processos industriais sustentáveis.

No aspecto econômico, a viabilidade do processo está fortemente condicionada ao modelo de negócio adotado. Para um cenário de retrofit de uma planta existente (Caso C), aliado a uma precificação diferenciada dos produtos, é possível tornar a reciclagem química do PET economicamente viável ($VPL > 0$). Dessa forma, a rota proposta representa um caminho promissor para a economia circular, promovendo sustentabilidade e redução de resíduos plásticos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- JIANG, J. et al. From plastic waste to wealth using chemical recycling: A review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 1, 1 fev. 2022.
- BARNARD, E.; ARIAS, J. J. R.; THIELEMANS, W. Chemolytic depolymerisation of PET: a review. **Green Chemistry**, v. 23, n. 11, p. 3765–3789, 2021.
- CAO, F. et al. Research and progress of chemical depolymerization of waste PET and high-value application of its depolymerization products. **RSC Advances**, v. 12, n. 49, p. 31564–31576, 2022.
- MARÇANO, G. B. et al. PP upcycling employing FCC spent catalyst: The role of contaminants, atmosphere and pressure. **Catalysis Today**, v. 442, p. 114950, 1 dez. 2024.
- TSOCHATZIS, E. D.; LOPES, J. A.; CORREDIG, M. Chemical testing of mechanically recycled polyethylene terephthalate for food packaging in the European Union. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 179, p. 106096, 1 abr. 2022.
- LIU, F. et al. Concerted and Selective Electrooxidation of Polyethylene-Terephthalate-Derived Alcohol to Glycolic Acid at an Industry-Level Current Density over a Pd–Ni(OH)₂ Catalyst. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 62, n. 11, p. e202300094, 2023.
- ZHANG, H. et al. Electrocatalytic upcycling of polyethylene terephthalate plastic to formic acid coupled with energy-saving hydrogen production over hierarchical Pd-doped NiTe nanoarrays. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 340, p. 123236, 1 jan. 2024.
- TURTON, R. et al. **Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes**. [s.l.] Pearson Education, 2008.
- CELIK, Y.; SHAMSUYEVA, M.; ENDRES, H. J. Thermal and Mechanical Properties of the Recycled and Virgin PET—Part I. **Polymers**, v. 14, n. 7, p. 1326, 24 mar. 2022.
- GRIFONI, E. et al. Confinement effects and acid strength in zeolites. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 2630, 11 maio 2021.
- LIU, Q.; BOKHOVEN, J. A. VAN. Water structures on acidic zeolites and their roles in catalysis. **Chemical Society Reviews**, v. 53, n. 6, p. 3065–3095, 2024.
- CHAI, Y. et al. Confinement in a Zeolite and Zeolite Catalysis. **Accounts of Chemical Research**, v. 54, n. 13, p. 2894–2904, 6 jul. 2021.