

## PRODUÇÃO DE ÓLEO POR MEIO DE PIRÓLISE CATALÍTICA

Tailane Hauschild<sup>1</sup>  
Tania Maria Basegio<sup>2</sup>  
Genyr Kappler<sup>3</sup>  
Felipe Luiz Bender<sup>4</sup>  
Carlos Pérez Bergmann<sup>5</sup>

### RESUMO

A pirólise catalítica é um processo de conversão termoquímica que tem emergido como uma tecnologia adequada para conversão de uma variedade de matérias-primas, como biomassa e resíduos sólidos (p.e., resíduos urbanos e resíduos do serviço de saúde (RSS), em particular as frações ricas em polímeros orgânicos sintéticos) em vetores energéticos. Entre os vetores energéticos destaca-se a produção de óleo, o qual pode representar um produto intermediário de muito valor para indústria, principalmente para as refinarias, onde pode ser integrado no coprocessamento para a síntese de combustíveis líquidos. Neste contexto, é apresentada uma análise preliminar de uma tecnologia de pirólise desenvolvida no Brasil, e que se encontra em fase de demonstração para produção de óleo a partir de RSS (Classe I). O estudo foi feito em colaboração com a empresa Bender Inovações Tecnológicas LTDA – BEINTEC e apresenta informação sobre o conjunto de operações envolvidas no processo desenvolvido, e que inclui: i) as etapas de pré-tratamento dos resíduos, ii) processo de pirólise catalítica e condições de operação, iii) processamento dos vapores de pirólise para geração dos óleos, e respectivas características do óleo produzido, iv) gestão e valorização das frações sólidas e gases permanentes, v) integração energética do processo, vi) custos e receitas de implantação e operação da unidade de pirólise para produção de óleo e de energia elétrica a partir do óleo. As informações e dados coletados referentes a implantação de um reator em escala piloto da BEINTEC foram comparados com informações obtidas por pesquisa na literatura acerca de processos de pirólise de resíduos para geração de óleos. Os resultados indicam que a tecnologia de pirólise catalítica em desenvolvimento pela BEINTEC apresenta potencial para geração de um óleo combustível, com potencial de ser integrado como matéria-prima para a síntese de combustíveis líquidos derivados do petróleo, por exemplo, gasolina e diesel.

**Palavras-chave:** Óleo, Pirólise Catalítica, Tecnologia Nacional, Polímeros Orgânicos Sintéticos, Combustível Alternativo.

---

<sup>1</sup> Mestranda Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, vinculada ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (PPGE3M/LACER), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS, RS, Brasil [tailaneh86@gmail.com](mailto:tailaneh86@gmail.com);

<sup>2</sup> Doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, vinculada ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (PPGE3M/LACER), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil, [taniabasegio@gmail.com](mailto:taniabasegio@gmail.com);

<sup>3</sup> Doutor em Otimização de processos para a minimização de resíduos pelo Programa de Pós -Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, Rs, Brasil, [genyr.kappler@gmail.com](mailto:genyr.kappler@gmail.com);

<sup>4</sup> CEO Diretor Bender Inovações Tecnológicas Ltda. - BEINTEC, Taquari, RS, Brasil

<sup>5</sup> Professor orientador: Doutor em Engenharia pelo Rheinisch Westfälische Technische Hochschule Aachen, Alemanha. Professor responsável pelo Laboratório de Materiais Cerâmicos LACER/Escola de Engenharia da Universidade federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, RS, Brasil, [bergmann@ufrgs.br](mailto:bergmann@ufrgs.br);

## INTRODUÇÃO

Embora os recursos fósseis continuem representando a principal fonte de combustível e matéria prima para a indústria petroquímica em um médio prazo (MOHR *et al.*, 2015), muitos esforços têm sido aplicados para encontrar fontes alternativas para diminuir a dependência desse recurso de natureza não renovável (LONDOÑO-PULGARIN *et al.*, 2021). O consumo intensivo de combustíveis fósseis necessários para atender a necessidade global de energia, além de acelerar o esgotamento de recursos fósseis, causa diversos efeitos deletérios ao meio ambiente incluindo as mudanças climáticas devido as emissões de gases de efeito estufa (GEE) (SATHRE, 2014) e poluição que pode afetar negativamente a biodiversidade, p. ex., o derramamento de óleo durante o transporte leva a destruição de ambientes marinhos devido a toxicidade do óleo para espécies de plantas e animais aquáticos (CUNHA; MOREIRA; SANTOS, 2015). Ademais, nos últimos anos, a volatilidade dos preços globais do petróleo gerou instabilidades financeiras nos países importadores e exportadores de petróleo, e a previsão é que esta tendência se mantenha nos próximos anos (STEFANSKI, 2014). Portanto, esses e outros aspectos negativos inerentes ao consumo dos derivados do petróleo levam à necessidade em desenvolver combustíveis que utilizam matérias-primas obtidas de fontes alternativas.

Outro contexto que tem apresentado muitos desafios, é o gerenciamento de resíduos críticos, como é o caso dos resíduos do serviço de saúde (RSS). Os RSS compreendem os resíduos hospitalares, laboratoriais, farmacêuticos e resíduos de centros de saúde. Essa tipologia de resíduos carrega traços de agentes infecciosos, portanto, os RSS são classificados como resíduos perigosos (DHARMARAJ *et al.*, 2021) A carência por infraestruturas para gerir e tecnologias para tratar os RSS ficaram ainda mais evidentes a partir da pandemia da SARS-CoV-2 (COVID-19). Em decorrência do aumento repentino na geração de RSS, a maioria dos países não teve tempo suficiente para adaptar a infraestrutura de forma a tratar e destinar adequadamente esses resíduos. Além das dificuldades mencionadas a nível global, no Brasil soma-se também o fato da indústria tratamento de resíduos não ter sido reconhecida como um serviço essencial, causando inclusive o interrompimento das operações de tratamento destes resíduos durante a pandemia (SHARMA *et al.*, 2020).

As tecnologias de desinfecção comumente utilizadas no tratamento dos RSS compreendem a incineração, autoclave, hidroclave, entre outros. Dentre essas tecnologias, a incineração apresenta-se como uma tecnologia eficiente para desinfecção de resíduos dos serviços de saúde (WINDFELD; BROOKS, 2015). No entanto, a incineração dos RSS pode

trazer certos inconvenientes como a liberação de toxinas ao meio ambiente e afetar severamente o sistema imunológico de humanos e animais (WANG *et al.*, 2020). Portanto, há uma necessidade imediata de tecnologias alternativas para o tratamento dos RSS.

Os RSS apresentam em sua composição uma quantidade significativa de resíduos plásticos (RP). Os componentes plásticos (luvas cirúrgicas, máscaras, aventais, seringas descartáveis, entre outros) são constituídos de materiais poliméricos como polietileno (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), tereftalato de polietileno (PET) e náilon (N). O processo termoquímico de pirólise permite a transformação simultânea desses diferentes polímeros e outros resíduos orgânicos, sintéticos ou naturais que possam estar presentes nos RSS, sem requerer separação prévia, podendo originar produtos gasosos, líquidos e sólidos, com valor energético e econômico (UZOEJINWA *et al.*, 2018). Neste contexto, a tecnologia de pirólise é uma técnica que tem sido referida como eficiente na degradação dos resíduos de saúde (DHARMARAJ *et al.*, 2021). A tecnologia de pirólise também é caracterizada por custos de investimento relativamente baixos e alta eficiência energética em comparação com outros processos (GUEDES; LUNA; TORRES, 2018). Consequentemente, a atenção dada à tecnologia de pirólise em novas aplicações como a disposição de resíduos sólidos e para fins de recuperação de energia tem crescido significativamente nos últimos anos (MOHSENI-BANDPEI *et al.*, 2019).

Neste contexto, a pirólise é um processo de conversão termoquímica (PCT) que tem emergido como uma tecnologia adequada para conversão de uma variedade de matérias-primas em vetores energéticos. Por exemplo, produtos orgânicos e biocombustíveis (*biochar*, *charcoal* e bio-óleos) são obtidos a partir da pirólise de matéria biogênica (CUEVAS-CASTILLO *et al.*, 2020; DHYANI; BHASKAR, 2018; MEIER *et al.*, 2013; QURESHI *et al.*, 2018; ROY; DIAS, 2017; UZOEJINWA *et al.*, 2018), enquanto o carvão (*char* em inglês) e o óleo são produtos da pirólise de polímeros orgânicos sintéticos (AL-SALEM *et al.*, 2017; ANUAR SHARUDDIN *et al.*, 2016; GARCIA-NUNEZ *et al.*, 2017).

Define-se como pirólise o processo em que moléculas poliméricas de cadeia longa são decompostas em moléculas menores e menos complexas quando submetidas a um ambiente isento de oxigênio e a alta temperatura (400 a 800 °C). Os três principais produtos são óleo, carvão e gases permanentes. Os rendimentos e propriedades relativas dos produtos dependem da tecnologia, e das condições operacionais, principalmente da taxa de aquecimento, temperatura de processo, tempo de residência, composição da matéria-prima e tamanho das

partículas (KALYANI; PANDEY, 2014; KUMAR; SAMADDER, 2017; LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2015).

O processo de pirólise é dividido em três principais condições de operação, a pirólise lenta (PL), a pirólise intermediária (PI) e a pirólise rápida (PR) (GARCIA-NUNEZ *et al.*, 2017; HU; GHOLIZADEH, 2019; QURESHI *et al.*, 2018; ROY; DIAS, 2017). A PL é principalmente aplicada na produção de carvão para ser usado como combustível ou como *biochar* para aplicações ambientais (QAMBRANI *et al.*, 2017; QIAN *et al.*, 2015) enquanto o PR é usado para gerar óleos, com potencial de aplicação para produtos distintos (GARCIA-NUNEZ *et al.*, 2017; HU; GHOLIZADEH, 2019; MEIER *et al.*, 2013). Para a produção de óleos, os processos de pirólise catalítica de resíduos plásticos ou co-pirólise de biomassa residual e resíduos plásticos têm demonstrado gerar produtos de maior qualidade (ÖZSIN; PÜTÜN, 2018; UZOEJINWA *et al.*, 2018). O óleo produzido é um produto intermediário de muito valor para indústria, principalmente para as refinarias, onde pode ser integrado como matéria-prima para a síntese de combustíveis líquidos, por exemplo, gasolina e diesel (ANUAR SHARUDDIN *et al.*, 2016).

Dessa forma, a co-pirólise de plásticos e demais materiais orgânicos presentes nos RSS assume especial interesse para valorizar resíduos característicos dos serviços de saúde e economia brasileira, originando produtos de alto valor energético, processáveis em refinarias convencionais, e tendo em vista a síntese de combustíveis líquidos ou outros produtos químicos de interesse comercial. No entanto, a viabilidade da pirólise de resíduos plásticos é condicionada pela limitada eficiência e qualidade dos óleos obtidos, sobretudo pela presença de ceras de elevada viscosidade, formação de compostos oxigenados de carácter corrosivo (ácidos carboxílicos) e possivelmente gases corrosivos ( $H_2S$ , HCl) (MOHSENI-BANDPEI *et al.*, 2019). Portanto, é imprescindível explorar tecnologias de pirólise e conceitos de pirólise catalítica, com catalisadores de baixo custo, visando aumentar o rendimento de óleo e suprimir a formação de compostos indesejáveis.

No âmbito da implantação de inovações tecnológicas como alternativa para recuperação energética e tratamento de resíduos sólidos no Brasil, foi publicada a Portaria Interministerial N° 274, de 30 de abril de 2019, a qual disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos referida no § 1° do art. 9° da Lei n° 12.305, de 2010 (BRASIL, 2019). De forma geral, ainda que, os combustíveis derivados de conversão termoquímica tenham recebido mais atenção nos últimos anos, devido especialmente aos benefícios ambientais, existem poucos estudos que examinaram o potencial tecnoeconômico de pirólise dos resíduos sólidos, particularmente, dos

RSS. Desse modo, avaliações preliminares das características e qualidade dos produtos obtidos, da viabilidade técnica do processo e dos custos gerais, na perspectiva da implantação da tecnologia de pirólise de RSS, são importantes para analisar o processo de pirólise como um método de geração de vetores energéticos. Além do mais, considerando se tratar de uma tecnologia de processamento de resíduos ainda pouco difundida no país, a análise do desenvolvimento e da implantação de tecnologias de pirólise pode servir como base para o aperfeiçoamento dos processos análogos, com vistas à obtenção de vetores energéticos, nomeadamente, os óleos. Dessa forma, com o objetivo de verificar o potencial do processo de produção de um óleo combustível alternativo aos derivados do petróleo, o presente estudo de caso faz uma análise preliminar da tecnologia de pirólise com tratamentos catalíticos desenvolvidos pela empresa Bender Inovações Tecnológicas Ltda – BEINTEC e que está em fase de implantação.

## **METODOLOGIA**

Este estudo de caso foi realizado em colaboração com a empresa BEINTEC. São apresentadas as informações do conjunto de operações relativo ao processo de produção de óleo por pirólise catalítica dos RSS, desenvolvido pela BEINTEC, que inclui: i) as etapas de pré-tratamento dos resíduos, ii) processo de pirólise catalítica e condições de operação, iii) processamento dos vapores de pirólise para geração dos óleos, e respectivas características do óleo produzido, iv) gestão e valorização das frações sólidas (carbonizado) e gases permanentes, v) integração energética do processo, vi) custos gerais de implantação e operação da unidade de pirólise.

Relativamente ao item vi) custos gerais de implantação e operação da unidade de pirólise, esses custos foram determinados pela BEINTEC. O custo total de investimento (CTI) consiste em custos diretos com equipamentos instalados, custos indiretos (por exemplo, engenharia e supervisão), imposto e capital de giro. Os custos de operação compreendem os custos de energia, arrendamento, mão de obra, manutenção, administração e reposição de peças. Os resultados foram expressos por unidade de óleo produzido (Cenário I) e unidade de energia elétrica produzida (Cenário II) de modo que os valores possam servir de comparativo aos demais cenários ou mesmo às tecnologias análogas para geração de energia.

Todas as informações e dados deste estudo de caso são apresentados na seção Resultados e Discussão, e foram comparados com informações da literatura acerca de processos de pirólise térmica e pirólise catalítica de resíduos (p.e., resíduos urbanos e RSS, em particular

as frações ricas em polímeros orgânicos sintéticos) para geração de óleos. Neste contexto, visto a grande necessidade por combustíveis alternativos, foi analisado com mais detalhe os dados referentes a algumas características do óleo produzido pelo processo de pirólise catalítica da BEINTEC.

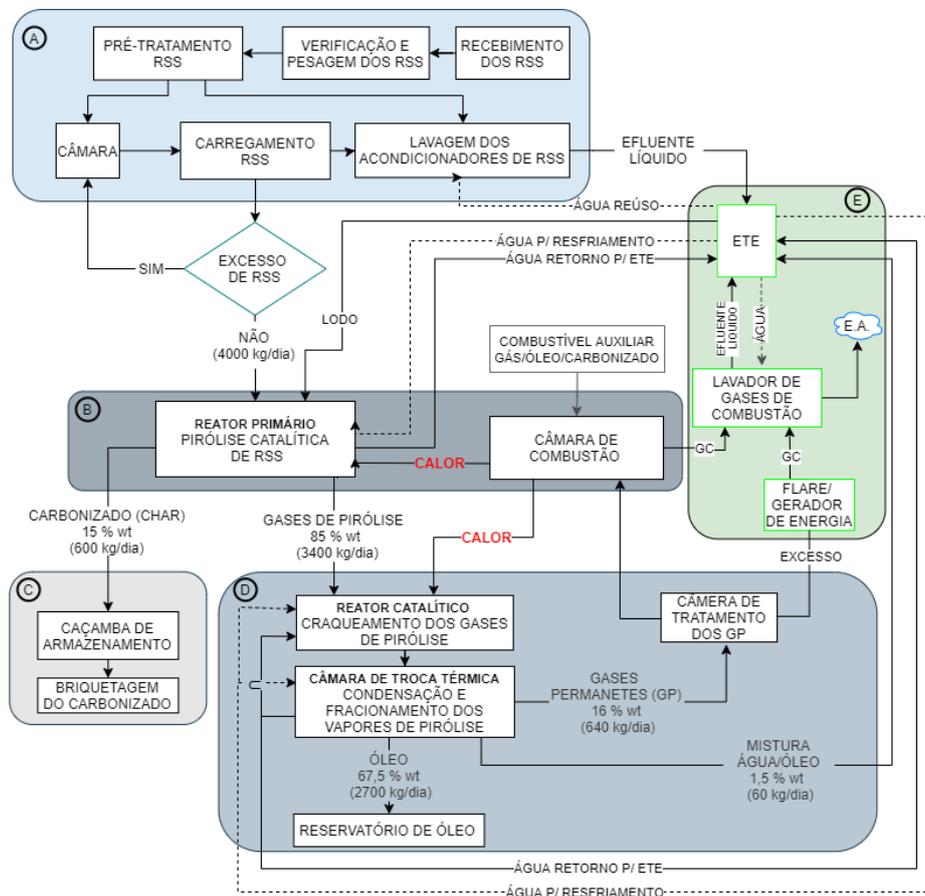
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados e discutidos nesta seção o fluxograma da unidade de pirólise com a descrição dos conjuntos de operações do processo. Para além da descrição do processo de pirólise, são apresentadas algumas características do óleo gerado pela pirólise dos RSS. E, por último, é apresentada uma análise econômica dos custos operacionais e receitas referentes a implantação e operação da tecnologia desenvolvida pela BEINTEC.

### Unidade de tratamento termoquímico por pirólise catalítica

O fluxo do processo de produção de óleo por meio da pirólise catalítica de RSS desenvolvido pela BEINTEC, compreende o conjunto de operações (A, B, C, D, E) apresentado, de forma resumida, na Figura 1 e descritos nos parágrafos subsequentes.

Figura 1- Fluxograma da unidade de tratamento termoquímico de RSS da BEINTEC



**(A) Recebimento e pré-tratamento dos Resíduos Sólidos:** Nesta etapa os RSS (Classe I) são recebidos, classificados, pesados e pré-tratados para o processamento. O pré-tratamento consiste basicamente na redução de tamanho com vistas a aumentar a massa volumétrica para uma média de  $500 \text{ kg/m}^3$  e, se necessário, é realizado o processo de secagem para garantir que a umidade fique abaixo de 20% em massa. Posteriormente, os RSS, são armazenados na câmara de recebimento de resíduos, em forma de duto cônico com abertura e fechamento superior sincronizado, não permitindo a passagem direta do calor ou gases. Nesta etapa, o RSS sofre uma pré-secagem enquanto aguarda o processo de transferência do volume de resíduos por rosca-transportadora, em volumes adequados, para ao reator catalítico. O pré-tratamento segue as etapas comuns ao processo de preparação da matéria prima para a decomposição térmica (WONGKHORSUB; CHINDAPRASERT, 2013a).

**(B) Processo de pirólise catalítica e condições de operação:** A unidade experimental de pirólise em desenvolvimento para a produção de óleo a partir de RSS integra um reator de leito fixo e opera no modo batelada, e tem capacidade de processar 2 toneladas por ciclo de 8 horas. Por dia podem ser realizados dois ciclos. O reator catalítico, de leito fixo, possui pás giratórias que homogeneizam a mistura de resíduos e material catalítico, com vistas a melhorar as taxas de reação. Para iniciar o aquecimento do reator de pirólise catalítica, que se encontra dentro da câmara de combustão, é realizada a queima de um combustível auxiliar (gás, óleo ou carvão). O combustível auxiliar é mantido até que o processo de pirólise se estabilize e forneça combustível (gás permanente) suficiente para manter o processo. Nesta etapa, os RSS pré-tratados são transferidos para o reator termoquímico catalítico, onde as moléculas de polímeros de cadeias longas são quebradas em moléculas orgânicas menores ou monômeros pela ação do calor em temperaturas que variam de 280 a 370 °C, em atmosfera livre de oxigênio. No reator, os resíduos são adicionados juntamente com catalisadores comerciais com o objetivo de favorecer reações específicas durante a pirólise e obter maiores rendimentos de produtos líquidos. Park et al. (2008) e Siddiqui e Redhwi (2009) obtiveram bons resultados no aumento do rendimento e na qualidade do óleo ao utilizarem catalisadores no reator.

**(C) Gestão e valorização das frações sólidas (carbonizado):** A fração sólida gerada (carbonizado com Poder Calorífico Inferior (PCI) de 18,8 MJ/kg) é coletada diretamente do reator em uma caçamba de armazenagem. O carbonizado pode ser briquetado para ser utilizado como combustível em processos de geração de energia. Este combustível sólido também pode

ser comercializado como matéria prima para indústria e queima direta em caldeira ou gaseificadores.

**(D) Processamento do gás de pirólise para geração dos óleos:** O gás de pirólise é coletado por pressão negativa e conduzido através de um reator catalítico. Nesse reator, que é preenchido com catalisador (heterogêneo desenvolvido pela BEINTEC) (Figura 1, (D) REATOR CATALÍTICO), ocorre o craqueamento termo catalítico dos gases sob uma temperatura controlada (entre 350 e 400°C). Após o craqueamento catalítico o gás de pirólise segue por trocadores de calor com temperatura entre 27 e 38°C (Figura 1, (D) CÂMARA DE TROCA TÉRMICA) onde ocorre a separação deste em duas fases, uma fração de gases permanentes (GP, compostos que estão na fase gasosa à temperatura e pressão ambiente, p.e. CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>) e uma fração de líquidos (óleo). A fração de óleo consiste em uma mistura líquida de hidrocarbonetos leves e pesados. Esse óleo é armazenado em reservatório (Figura 1, (D) RESERVATÓRIO DE ÓLEO) para posterior filtragem, purificação (desnitrogenização, descloração e dessulfurização) e fracionamento ou craqueamento catalítico (processo encontra-se em fase de desenvolvimento, ou seja, não consta no fluxograma). Os gases permanentes passam por tratamento de limpeza (Figura 1, (D) CÂMARA DE TRATAMENTO DO GP) em uma cama catalítica com KOH e NaOH para desnitrogenização, descloração e dessulfurização. Depois de tratado, o GP é queimado na câmara de combustão para fornecer energia térmica para aquecer o reator primário catalítico e o reator catalítico dos gases de pirólise. Se houver excedente, este gás pode ser queimado em uma flare, ou ainda, ser comprimido para posterior uso como combustível em geradores de energia elétrica, por exemplo.

**(E) Controle e tratamento de efluentes líquidos e gasosos:** De acordo com a BEINTEC, os gases de combustão (provenientes da câmara de combustão de suporte ao reator de pirólise e da flare) são direcionados para uma unidade de lavador de gases. Todo efluente líquido gerado no processo, incluindo a água contida nos produtos e a água proveniente da torre de lavagem de gases, é tratado e redirecionado para reuso no sistema. O lodo da ETE é misturado aos RSS no reator de pirólise.

### **Óleo produzido: suas características e aplicações**

A pirólise catalítica de RSS é realizada com vistas a converter esta tipologia de resíduos em produtos de maior valor. O processo desenvolvido pela BEINTEC visa obter como principal produto o óleo, enquanto os gases não condensáveis (GP) e o carbonizado são subprodutos. Na Tabela 1 estão apresentados os valores em percentual de massa (% wt, do inglês weight) dos

produtos gerados no processo realizado no reator na BEINTEC. Por exemplo, a geração de óleo está na gama de 55 a 80 % wt. Estes valores comparam-se com os 80% wt de óleo gerado por meio da pirólise de resíduos plásticos referidos por Kyong-Hwan (2009) (LEE, 2009).

Tabela 1- rendimento em percentual de massa dos produtos de pirólise de RSS do processo da BEINTEC

wt %	Óleo	Gás	Carvão	Água
Mínimo	55	12	10	1
Médio	67,5	16	15	1,5
Máximo	80	20	20	2

Na Tabela 2 são apresentadas algumas das características do óleo produzido por pirólise catalítica de RSS no processo da BEINTEC e a sua comparação com o óleo obtido em outros estudos. A Agência Nacional de Petróleo (ANP) define, por meio das Resoluções N.º048/2007 e 3/2016, as características necessárias para comercialização do óleo combustível (p. ex., viscosidade e teor de enxofre.) (NACIONAL; PETR, 2007, 2016). Relativamente aos parâmetros definidos pela ANP, os resultados sobre a composição do óleo da BEINTEC apresentados nesta tabela estão de acordo com as características exigidas para comercialização.

Tabela 2 - Características do óleo produzido a partir de RSS comparado aos óleos de plásticos obtido por outros autores

	Unid.	BEINTEC Com catalisador	Syamsiro et al. 2014 (SYAMSI RO <i>et al.</i> , 2014)	Syamsiroe t al, 2014 (SYAMSI RO <i>et al.</i> , 2014)	(SONAWANE; SHINDIKAR; KHALADKAR, 2015) (LEE, 2009).	(CHO; JUNG; KIM, 2010; MANI; NAGARAJAN; SAMPATH, 2011). (WONGKHOR SUB; CHINDAPRAS ERT, 2013b) (DESAI, 2015)
			Sem catalisador	Com catalisado r	Sem catalisador/ com catalisador	
Rendimento da produção de óleo	% wt	67,5			80,82 / 86,41	45
Poder calorífico inferior PCI óleo	MJ/kg	45,6	46,74	46,67 – 45,58		40,5 a 46,1
Densidade	mm <sup>2</sup> /s					0,78
Densidade a 15 °C	g/cm <sup>3</sup>		0,872	0,824 – 0,868		
Densidade a 20 °C	g/cm <sup>3</sup>	0,786 – 0,847				0,840
Viscosidade a 25°C	mm <sup>2</sup> /s					5,56
Viscosidade a 40 °C	mm <sup>2</sup> /s		1,999	1,838 – 2,191		
Viscosidade 50°C	mm <sup>2</sup> /s	2,318				
Viscosidade 100°C	mm <sup>2</sup> /s	1,085				
Teor de enxofre	mg/kg	1,785				28
Conteúdo de água	%wt	1 a 2	0,5	traços		

O óleo produzido no reator da empresa BEINTEC possui PCI de 45,6 MJ/kg. Este valor é mais alto comparativamente ao PCI citados por outros autores, que estão na faixa de 40,5MJ/kg a 44,4 MJ/kg (CHO; JUNG; KIM, 2010; MANI; NAGARAJAN; SAMPATH, 2011). Contudo, o valor do PCI do óleo da BEINTEC é muito próximo ao valor de 46,1 MJ/kg citado por Wongkhorsub and Chindaprasert (2013) e com o valor de 46,67 MJ/kg publicado por Syamsiro et al. (2014). Kyong-Hwan Lee (2009) justifica que o valor do poder calorífico do óleo de pirólise é mais alto comparativamente ao dos óleos comerciais devido a relação hidrogênio/carbono ser mais alta. Além disso, a variação nos valores de PCI nos óleos citados na literatura, pode ser justificada pelo tipo de processo (com ou sem catalisador) e, particularmente, o PCI está associado à diferença na composição das matérias-primas utilizadas.

### **Produção de óleo, análise econômica: custos e receitas de implantação e operação da unidade de pirólise catalítica**

A pirólise catalítica para geração de óleo, se, equipada com um sistema com motores de combustão interna, parece ser uma opção para geração de energia elétrica. Dessa forma, neste trabalho foi realizada uma análise econômica do processo da BEINTEC para dois cenários, sendo que o Cenário I consiste em uma unidade de pirólise para produção e venda de óleo e o Cenário II é composto por uma unidade de pirólise de produção de óleo com sistema integrado para produção e venda de energia elétrica.

A análise econômica integra o custo total de investimento (CTI) em R\$/MW<sub>e</sub> de potência elétrica instalada e em R\$/MW<sub>Fuel</sub> de potência térmica instalada no pirolisador (com base na produção e poder calorífico inferior do óleo), o custo operacional (CO) em R\$/MWh<sub>e</sub> de energia elétrica produzida e R\$/MWh<sub>Fuel</sub> de energia produzida (com base na produção e poder calorífico inferior do óleo), as receitas de comercialização do óleo, da energia elétrica, e do tratamento dos RSS. Na Tabela 3 são apresentados os valores determinados com base em informação fornecida pela BEINTEC.

A potência elétrica instalada (MW<sub>e</sub>), a potência instalada (MW<sub>Fuel</sub>) referida à capacidade de produção de óleo (com base na energia química do óleo), a energia associada ao óleo produzido por tonelada de RSS (MWh<sub>Fuel</sub>/ton<sub>RSS</sub>) e a energia elétrica gerada (MWh<sub>e</sub>/ton<sub>RSS</sub>), foram calculadas com base no rendimento médio de produção do óleo, PCI, densidade média do óleo, rendimento de produção de energia eléctrica por combustão do óleo no motor, e que constam na Tabela 3. Para a geração de energia elétrica no motor de combustão interna utilizando o óleo foi utilizado o rácio 205 L/MWh<sub>e</sub> (valor repassado pela BEINTEC), ou seja,

44,03 MWh<sub>e</sub>/ton<sub>RSS</sub>, considerando uma eficiência de produção de óleo igual a 826,70 L<sub>óleo</sub>/ton<sub>RSS</sub>.

Com base no custo operacional anual (COA) para cada um dos dois cenários, foram calculados os CO por tonelada de RSS tratado (R\$/ton<sub>RSS</sub>), os CO por unidade de energia elétrica produzida (R\$/MWh<sub>e</sub>), e os CO por unidade de energia no óleo produzido (R\$/MWh<sub>Fuel</sub>), e os CO por tonelada de óleo produzido (R\$/ton<sub>óleo</sub>). Dos resultados obtidos verifica-se que por tonelada de RSS processado o Cenário II apresenta o CO aproximadamente 9 % mais elevado do que o Cenário I. Este resultado indica que a comercialização de óleo pode ser mais rentável do que a comercialização de energia elétrica produzida por combustão do óleo na própria instalação.

Tabela 03 – Demonstrativos gerais do custo total de investimento (CTI), custos operacionais (CO) e receitas total (RT) para venda de óleo (Cenário I) e venda de energia elétrica (Cenário II).

<b>Parâmetros gerais</b>				
Ano de análise	2021			
Tempo de vida útil da planta	15 - 20	anos		
Tratamento de RSS	1.442.880	kg/ano		
Rendimento de conversão de RSS em óleo	67,5	% wt		
Produção de óleo	826,70	L/ton <sub>RSS</sub>		
Poder calorífico inferior (PCI) do óleo	46,1	MJ/kg <sub>óleo</sub>		
Densidade média do óleo	0,8165	kg/L <sub>óleo</sub>		
Valores de venda de energia elétrica <sup>a</sup>	292,00	R\$/MWh <sub>e</sub>		
Valores de venda de óleo <sup>b</sup>	2,20	R\$/L <sub>óleo</sub>		
	<b>Cenário I</b>		<b>Cenário II</b>	
	<b>Venda de óleo</b>		<b>Venda de energia elétrica</b>	
Custo total de investimento (CTI) - planta 4 ton/dia <sup>a</sup>	3.327.818,91	R\$	4.125.350,80	R\$
Potência instalada – planta 4 ton/dia	1,43	MW <sub>Fuel</sub>	0,67	MW <sub>e</sub>
Produção de energia: óleo ou eletricidade	8,57	MWh <sub>Fuel</sub> /ton <sub>RSS</sub>	4,03	MWh <sub>e</sub> /ton <sub>RSS</sub>
	12,70	MWh <sub>Fuel</sub> /ton <sub>óleo</sub>	5,97	MWh <sub>e</sub> /ton <sub>óleo</sub>
<b>Custos operacionais (CO)</b>	1.209.540,00	R\$/ano	1.330.494,00	R\$/ano
	839,95	R\$/ton <sub>RSS</sub>	922,11	R\$/ton <sub>RSS</sub>
	96,63	R\$/MWh <sub>óleo</sub>	240,69	R\$/MWh <sub>e</sub>
	1.244,37	R\$/ton <sub>óleo</sub>	1.366,09	R\$/ton <sub>óleo</sub>
<b>Receitas geradas</b>				
Vendas de óleo ou da energia elétrica	1.818,74	R\$/ton <sub>RSS</sub>	1.613,07	R\$/ton <sub>RSS</sub>
	2.694,43	R\$/ton <sub>óleo</sub>	2.389,74	R\$/ton <sub>óleo</sub>
Tratamento dos RSS	1.700,00	R\$/ton <sub>RSS</sub>	1700,00	R\$/ton <sub>RSS</sub>
	2.518,52	R\$/ton <sub>óleo</sub>	2518,52	R\$/ton <sub>óleo</sub>
<b>(+) Receita total (RT)</b>	3.518,74	R\$/ton <sub>RSS</sub>	2.877,54	R\$/ton <sub>RSS</sub>
	5.212,95	R\$/ton <sub>óleo</sub>	4.263,03	R\$/ton <sub>óleo</sub>
<b>Saldo por tonelada de óleo produzido</b>	2.678,79	R\$/ton <sub>RSS</sub>	1955,43	R\$/ton <sub>RSS</sub>
	3968,58	R\$/ton <sub>óleo</sub>	2.896,94	R\$/ton <sub>óleo</sub>

a: Fonte: (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019)

b: Fonte: Energia Brasil, Comercializadora de óleo combustível, sediada no Brasil, comunicação pessoal (2020)

Relativamente aos dados utilizados para calcular as receitas nos dois cenários, o preço do litro de óleo para comercialização (Cenário I) foi obtido em uma empresa comercializadora de óleos combustíveis. Enquanto, para o Cenário II, considerou-se o valor de venda de energia elétrica produzida numa termoelétrica a biomassa (e.g., bagaço de cana-de-açúcar) como valor de referência (ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2019). Para cada um dos cenários, as receitas geradas compreendem os valores de venda de energia elétrica, comercialização de óleo e o subsídio do tratamento de resíduos (taxa cobrada para tratamento dos RSS). De acordo com a BEINTEC, os valores da taxa de cobrança para tratamento do RSS ficam entre R\$ 1.700,00 e R\$ 3.500,00/ton<sub>RSS</sub>; de modo a garantir uma maior margem de segurança, foi adotado o valor mínimo (R\$ 1.700,00/ton<sub>RSS</sub>). Para cada cenário, os valores de cada uma das componentes da receita foram convertidos numa receita total (RT), referida a uma base de produção de óleo (R\$/ton<sub>óleo</sub>) ou a uma base de RSS processado (R\$/ton<sub>RSS</sub>).

Analisando os valores calculados para a RT dos dois cenários, observa-se que, o Cenário I apresenta um valor de R\$ 641,20/ton<sub>RSS</sub> (correspondente a R\$ 695,31/ton<sub>óleo</sub>) acima do valor de RT do Cenário II, indicando assim, uma maior atratividade econômica para a venda de óleo do que para venda de energia elétrica.

O balanço econômico final resultou em um saldo positivo para os dois cenários, R\$ 2.678,79/ton<sub>RSS</sub> (correspondente a R\$ 3.968,58/ton<sub>óleo</sub>) e R\$ 1.955,43/ton<sub>RSS</sub> (correspondente a R\$ 2.896,94/ton<sub>óleo</sub>) para venda do óleo (Cenário I) e venda de energia elétrica (Cenário II), respectivamente. Portanto, o cenário com a venda do óleo, que apresentou um saldo de R\$ 723,43/ton<sub>RSS</sub> (correspondente a R\$1.071,64/ton<sub>óleo</sub>) superior ao obtido para a energia elétrica, é economicamente mais atrativo.

## CONCLUSÃO

O tratamento térmico de RSS por meio da pirólise catalítica apresentou um rendimento 67,5 % wt na produção de óleo, com PCI de 45,6 MJ/kg<sub>óleo</sub>, baixo teor de enxofre (<1,8 mg/kg), densidade de 0,82 kg/L e viscosidade de 2,318 mm<sup>2</sup>/s. Estas características permitem sua aplicação como combustível em processos térmicos ou para gerar energia elétrica em motores de combustão interna. Além disso, o óleo pode ser integrado como matéria-prima em biorrefinarias para produção de combustíveis para o sector de transportes. Os produtos gasosos e sólidos podem ser queimados para fornecer energia térmica para os reatores de pirólise e catalítico. De acordo com a BEINTEC, antes da queima, os gases permanentes passam por filtração para remoção de compostos como nitrogênio, cloro e enxofre. O resultado monetário

da produção foi verificado com o balanço econômico que compara duas alternativas de geração de receita, i.e., a venda do óleo bruto (Cenário I) e a venda de energia elétrica produzida a partir da combustão do óleo (Cenário II). O saldo final (resultado das receitas subtraindo os custos operacionais) com a venda do óleo foi estimada em R\$ 3.968,58/t<sub>óleo</sub> (correspondente a R\$ 2.678,79/ton<sub>RSS</sub>). Já a receita com a venda de energia elétrica foi calculada com referência ao valor de venda do MWh<sub>e</sub> de energia elétrica gerada a partir de uma fonte renovável (combustão de bagaço de cana-de-açúcar). Neste caso, a receita com a venda de energia elétrica foi estimada em R\$2.896,94/ton<sub>óleo</sub> (correspondente a R\$ 1.955,43/ton<sub>RSS</sub>). Portanto, a venda do óleo é economicamente mais atraente que a venda da energia elétrica, pois gerou receita no valor de R\$1.071,64/ton<sub>óleo</sub>, ou seja, R\$723,36/ton<sub>RSS</sub> superior ao da venda de energia elétrica, além de exigir um CTI menor.

## AGRADECIMENTOS

Pelo apoio financeiro à Financiadora de Estudos e Projetos - Finep, convênio ANP - PRH 13.1 UFRGS, processo nº 042319, do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH - ANP, projeto “Novas tecnologias ensino à eficiência energética no setor de petróleo, gás e bicomcombustíveis”. Pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho e nas pesquisas como pesquisador colaborador do PRH 13.1 UFRGS ao Professor Dr Luís António da Cruz Tarelho, professor associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro (DAO – UA) e Coordenador do Grupo de Investigação Avaliação da Circularidade de Recursos e Tecnologia (RCAT), no laboratório Associado Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM).

## REFERÊNCIAS

- AL-SALEM, S. M. *et al.* A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 197, p. 177–198, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **LEILÃO DE GERAÇÃO ANEEL Nº 004/2019**. [s. l.], 2019. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais\\_geracao/documentos\\_editais.cfm?IdProgramaEdital=181](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_geracao/documentos_editais.cfm?IdProgramaEdital=181). Acesso em: 6 maio 2021.
- ANUAR SHARUDDIN, S. D. *et al.* A review on pyrolysis of plastic wastes. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 115, p. 308–326, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- BRASIL. Diário Oficial da União. **Diário Oficial da União**, [s. l.], v. 83, n. 02/05/2019, p. 57, 2019. Disponível em: <https://doi.org/1677-7042>

- CHO, M.-H.; JUNG, S.-H.; KIM, J.-S. Pyrolysis of Mixed Plastic Wastes for the Recovery of Benzene, Toluene, and Xylene (BTX) Aromatics in a Fluidized Bed and Chlorine Removal by Applying Various Additives. **Energy & Fuels**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 1389–1395, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef901127v>
- CUEVAS-CASTILLO, G. A. *et al.* Advances on the processing of microalgal biomass for energy-driven biorefineries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 125, p. 109606, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109606>
- CUNHA, I.; MOREIRA, S.; SANTOS, M. M. Review on hazardous and noxious substances (HNS) involved in marine spill incidents—An online database. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 285, p. 509–516, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.11.005>
- DESAI, M. S. B. Production and Analysis of Pyrolysis oil from waste plastic in Kolhapur city. [s. l.], v. 3, n. 1, p. 6, 2015.
- DHARMARAJ, S. *et al.* Pyrolysis: An effective technique for degradation of COVID-19 medical wastes. **Chemosphere**, [s. l.], v. 275, p. 130092, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130092>
- DHYANI, V.; BHASKAR, T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 129, 1st International Conference on Bioresource Technology for Bioenergy, Bioproducts & Environmental Sustainability, p. 695–716, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>
- GARCIA-NUNEZ, J. A. *et al.* Historical Developments of Pyrolysis Reactors: A Review. **Energy & Fuels**, [s. l.], v. 31, n. 6, p. 5751–5775, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b00641>
- GUEDES, R. E.; LUNA, A. S.; TORRES, A. R. Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 129, p. 134–149, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.11.019>
- HU, X.; GHOLIZADEH, M. Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. **Journal of Energy Chemistry**, [s. l.], v. 39, p. 109–143, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.024>
- KALYANI, K. A.; PANDEY, K. K. Waste to energy status in India: A short review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 31, p. 113–120, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.020>
- KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste Management**, [s. l.], v. 69, p. 407–422, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2017.08.046>
- LEE, K.-H. Thermal and catalytic degradation of pyrolytic oil from pyrolysis of municipal plastic wastes. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 85, n. 1, p. 372–379, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.032>
- LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. **Waste Management**, [s. l.], v. 37, p. 26–44, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>
- LONDOÑO-PULGARIN, D. *et al.* Fossil or bioenergy? Global fuel market trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 143, p. 110905, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110905>
- MANI, M.; NAGARAJAN, G.; SAMPATH, S. Characterisation and effect of using waste plastic oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. **Energy**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 212–219, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.049>

- MEIER, D. *et al.* State-of-the-art of fast pyrolysis in IEA bioenergy member countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 20, p. 619–641, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.061>
- MOHR, S. H. *et al.* Projection of world fossil fuels by country. **Fuel**, [s. l.], v. 141, p. 120–135, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.030>
- MOHSENI-BANDPEI, A. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) formation during the fast pyrolysis of hazardous health-care waste. **Chemosphere**, [s. l.], v. 227, p. 277–288, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.028>
- NACIONAL, N.; PETR, D. O. Ranp 3 - 2016. [s. l.], 2016.
- NACIONAL, N.; PETR, D. O. Ranp 48 - 2007. [s. l.], v. 1, 2007.
- ÖZSIN, G.; PÜTÜN, A. E. A comparative study on co-pyrolysis of lignocellulosic biomass with polyethylene terephthalate, polystyrene, and polyvinyl chloride: Synergistic effects and product characteristics. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 205, p. 1127–1138, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.134>
- QAMBRANI, N. A. *et al.* Biochar properties and eco-friendly applications for climate change mitigation, waste management, and wastewater treatment: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 79, p. 255–273, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.057>
- QIAN, K. *et al.* Recent advances in utilization of biochar. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 42, p. 1055–1064, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.074>
- QURESHI, K. M. *et al.* A technical review on semi-continuous and continuous pyrolysis process of biomass to bio-oil. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [s. l.], v. 131, p. 52–75, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.02.010>
- ROY, P.; DIAS, G. Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 77, p. 59–69, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.136>
- SATHRE, R. Comparing the heat of combustion of fossil fuels to the heat accumulated by their lifecycle greenhouse gases. **Fuel**, [s. l.], v. 115, p. 674–677, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.07.069>
- SHARMA, H. B. *et al.* Challenges, opportunities, and innovations for effective solid waste management during and post COVID-19 pandemic. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 162, p. 105052, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105052>
- SONAWANE, Y.; SHINDIKAR, M.; KHALADKAR, M. Use of Catalyst in Pyrolysis of Polypropylene Waste into Liquid Fuel. **International Research Journal of Environment Sciences**, [s. l.], v. 4, p. 24–28, 2015.
- STEFANSKI, R. Structural transformation and the oil price. **Review of Economic Dynamics**, [s. l.], v. 17, n. 3, p. 484–504, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.red.2013.09.006>
- SYAMSIRO, M. *et al.* Fuel Oil Production from Municipal Plastic Wastes in Sequential Pyrolysis and Catalytic Reforming Reactors. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 47, Conference and Exhibition Indonesia Renewable Energy & Energy Conservation [Indonesia EBTKE-CONEX 2013], p. 180–188, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.212>
- UZOEJINWA, B. B. *et al.* Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 163, p. 468–492, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.02.004>
- WANG, J. *et al.* Disinfection technology of hospital wastes and wastewater: Suggestions for disinfection strategy during coronavirus Disease 2019 (COVID-19) pandemic in China.

**Environmental Pollution**, [s. l.], v. 262, p. 114665, 2020. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114665>

WINDFELD, E. S.; BROOKS, M. S.-L. Medical waste management – A review. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 163, p. 98–108, 2015. Disponível em:  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.08.013>

WONGKHORSUB, C.; CHINDAPRASERT, N. A Comparison of the Use of Pyrolysis Oils in Diesel Engine. **Energy and Power Engineering**, [s. l.], v. 05, n. 04, p. 350–355, 2013a. Disponível em:  
<https://doi.org/10.4236/epe.2013.54b068>