

APLICAÇÃO DA PIRÓLISE EM RESÍDUOS INDUSTRIAIS PARA A PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO COMBUSTÍVEL: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

PYROLYSIS APPLICATION IN INDUSTRIAL WASTE FOR BIO-OIL FUEL GENERATION: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

Kelly Costa Cabral Salazar Ramos Moreira ¹, Thiago Padovani Xavier², Taísa Shimosakai de Lira³;

1. Engenheira Química. Universidade Federal do Espírito Santo - UFES. São Mateus, ES. kelex10@gmail.com
2. Doutor em Engenharia Química. Universidade Federal do Espírito Santo - UFES. São Mateus, ES. thiago.p.xavier@ufes.br
3. Doutora em Engenharia Química. Universidade Federal do Espírito Santo - UFES. São Mateus, ES. taisa.lira@ufes.br.

Recebido em: 11/07/2018 - Aprovado em: 16/07/2018 - Disponibilizado em: 15/08/2018

RESUMO: O crescimento acelerado do consumo energético, aliado ao aumento da produção de resíduos industriais, urbanos e agrícolas, promoveu a busca por fontes alternativas de energia e redução do volume de resíduos destinados a aterros. A pirólise tem se apresentado como um processo promissor no tratamento de resíduos, obtendo como produto um bio-óleo capaz de atuar como combustível alternativo. Sendo assim, este trabalho propôs uma análise bibliométrica acerca da geração de óleo combustível a partir da pirólise de resíduos industriais, com interesse nos resíduos do setor de petróleo. Os resultados obtidos revelaram a escassez de estudos relacionados à aplicação da pirólise nos resíduos petrolíferos, entretanto, diversos resíduos industriais têm sido estudados no intuito de produzir bio-óleo por pirólise. Para isso, a biomassa utilizada deve ser caracterizada assim como o produto, a fim de definir os parâmetros e condições adequados para o máximo rendimento do processo.

PALAVRAS-CHAVE: Pirólise, resíduos industriais, bio-óleo, bibliometria.

ABSTRACT: The energy consumption accelerated growth and the increase of industrial, urban and the agricultural waste have promoted the search for alternative energy sources and the volume reduction of waste destined to landfills. The pyrolysis has been seen as a promising process in waste treatment, obtaining as product a bio-oil capable to be an alternative fuel.

Therefore, this article makes a bibliometric analysis about the bio-oil fuel generation from industrial waste pyrolysis, especially the oil industry waste. The results revealed the lack of studies applying oil industry waste pyrolysis to obtain bio-oil fuel. However, many researches involve industrial waste pyrolysis to bio-oil production. For this, it is necessary to characterize the biomass and the product, to estimate the suitable conditions and parameters for the maximum yield of the process.

KEYWORDS: Pyrolysis. Industrial residues, bio-oil, bibliometric analysis.

INTRODUÇÃO

Dentre os resíduos industriais, os da indústria de exploração, produção e refino de óleo e gás compõem um grande problema por serem extremamente poluentes para o meio ambiente devido à sua toxicidade (IBAMA, 2011). Sua destinação pode ser feita por meio da reutilização em fábricas de cimento e cerâmica, sendo incorporados à massa argilosa, tratamentos térmicos como pirólise, incineração e gaseificação, e rerrefino de óleos, por exemplo, aterrando-os em último caso, após descontaminação do resíduo (SANTOS, 2013).

Neste cenário, a aplicação da pirólise em resíduos da indústria de petróleo para a obtenção de bio-óleo a ser utilizado como biocombustível, tornou-se motivação para o desenvolvimento de uma análise bibliométrica.

Pesquisas têm sido feitas com o intuito de solucionar tantos os problemas de destinação de resíduos, quanto os causados pela emissão de gases poluentes a partir da queima de combustíveis não renováveis. A pirólise tem se destacado no tratamento de resíduos e potenciais caminho para a produção de um bio-óleo precursor de biocombustíveis.

A pirólise é um processo de decomposição térmica de biomassa em baixa ou nenhuma oxigenação e pode ser aplicada no tratamento de resíduos, reduzindo em até 90% o volume dos mesmos. À baixas temperaturas o produto da pirólise tende estar no estado sólido, composto por carvão, cinzas e constituintes não degradados. À moderadas e altas temperaturas o produto tende a ser líquido (bio-óleo) ou gasoso respectivamente. Tais produtos podem ser aproveitados como insumos energéticos, por exemplo, (BRIDGWATER, 2012).

O bio-óleo obtido pode ser utilizado como precursor de biocombustíveis ou produtos químicos finos dependendo de suas características físico-químicas (KABIR; HAMEED, 2017). Sua combustão, quando comparados aos combustíveis fósseis, gera menores emissões de óxidos de nitrogênio e enxofre, gases que agravam o efeito estufa (MURRAY *et al.*, 2014).

Por meio da análise bibliométrica é possível traçar uma estratégia para a pesquisa científica, de forma que tal pesquisa seja delimitada, tornando-se relevante (LACERDA *et al.*, 2012). Para tanto, analisa-se as referências bibliográficas, mensurando as repercussões e impactos de determinados autores e publicações. Além disso, tal análise permite a visualização dos avanços científicos e tecnológicos já realizados.

Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo realizar um levantamento dos artigos de maior relevância relacionados à aplicação da pirólise nos resíduos industriais, analisando-os bibliometricamente e identificando os impactos das publicações selecionadas, os avanços e tendências na área e o potencial de viabilidade deste processo.

METODOLOGIA

Para a realização da revisão bibliométrica, adotou-se como fonte de dados a plataforma *Web of Science*®. Inicialmente, fez-se uma pesquisa de caráter exploratório para obtenção de uma massa inicial de artigos, que consistiu na busca de títulos que contivessem a palavra-chave “*pyrolysis*” no período de 1945 a 2018, o espaço temporal compreendido pela base.

O banco de artigos bruto foi refinado com os termos “*industrial residues*” e “*bio-oil*” como chaves de pesquisa, no período relativamente recente de 2010 a 2018. Dentre os trabalhos encontrados, foram selecionados os internacionais cujo formato é de artigo. Os títulos dos artigos encontrados foram lidos, a fim de obter maior alinhamento desses com a presente pesquisa. A Figura 1 mostra o fluxograma do processo de seleção dos artigos.

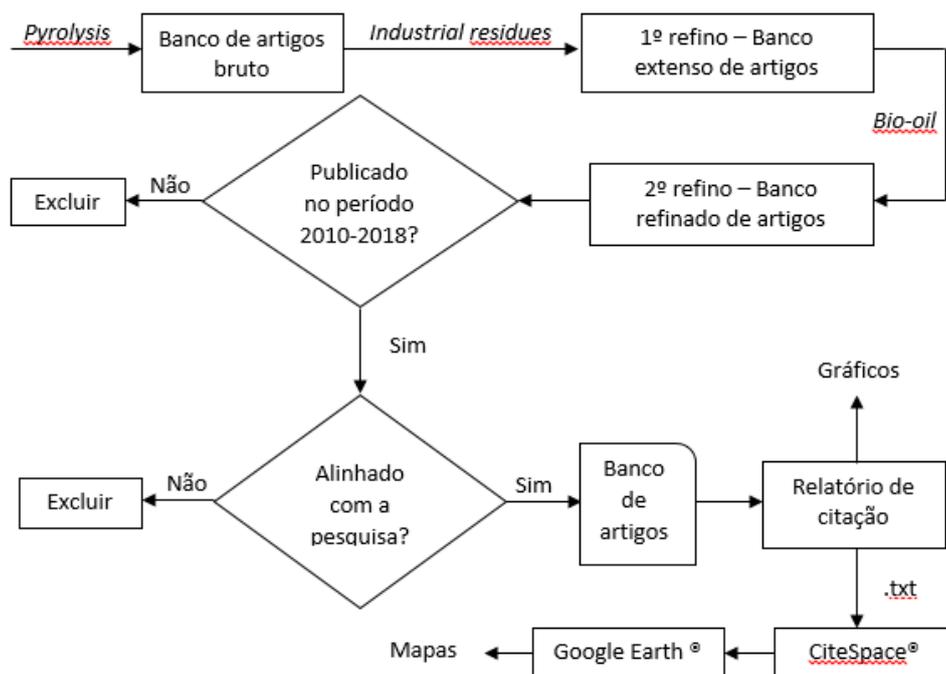


Figura 1 – Fluxograma do processo de seleção de artigos para o banco de dados específico.

Fonte – Elaborado pelo autor.

Os artigos selecionados foram analisados quanto ao seu reconhecimento científico. Para isso, obtiveram-se dados relativos aos números de publicações por ano, por países, contribuição nas diferentes áreas de pesquisa, índice *h-index* e o número de citações por ano.

O auxílio do software *CiteSpace V*® permitiu a geração de mapas de relações entre autores. Para isso, os arquivos obtidos na base *Web of Science*® foram salvos em extensão de arquivo “.txt” e aplicados no software. A ferramenta “*geographical*” possibilitou a criação de mapas no *Google Earth*®, nos quais estão as localizações dos autores e suas relações.

Após os procedimentos descritos, realizou-se leitura dos 10 artigos mais citados a fim de extrair os principais resultados obtidos. Fez-se então, uma matriz SWOT (“*Strenghts*”, “*Weakness*”, “*Opportunities and Threats*”), evidenciando os pontos fortes e fracos –fatores internos–, e as oportunidades e ameaças –fatores externos– da aplicação da pirólise em resíduos industriais para obtenção de bio-óleo, contribuindo para a elaboração do projeto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa na plataforma *Web of Science*® com o termo “*pyrolysis*” no período abrangido pela base resultou em 25.310 publicações com a palavra-chave no título, conforme a Figura 2. O primeiro artigo publicado ocorreu no ano de 1945 pela revista *Industrial and Engineering*

Chemistry nos Estados Unidos da América (USA), cujos autores são BERG, L.; SUMNER, G. L.; MONTGOMERY, C. W. e COULL, J. Considera-se esse país pioneiro no assunto.

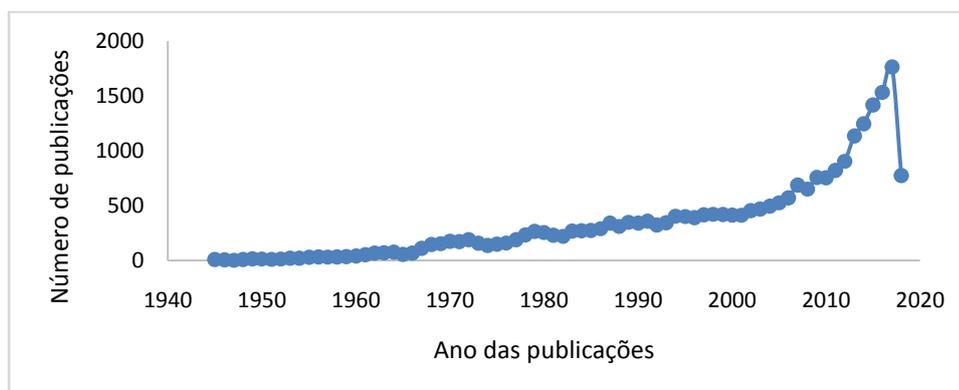


Figura 2 – Projeção do número de publicações com a chave “*pyrolysis*” em função do ano.

Fonte – Elaborado pelos autores.

Na Figura 2, desde sua publicação, o número de artigos relacionados à pirólise tem crescido, especialmente a partir de 2006, com ápice em 2017. Muitos países têm pesquisado e publicado artigos no tema pirólise. Os 20 países que mais se destacam pelo número de publicações são expostos na Figura 3.

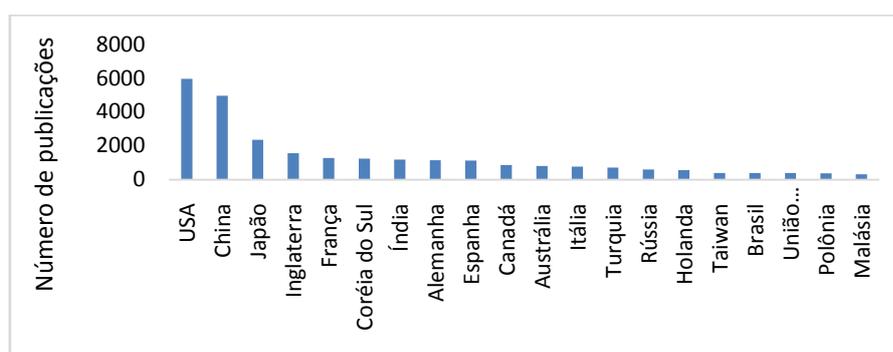


Figura 3 – Projeção do número de publicações com a chave “*pyrolysis*” em função dos países.

Fonte – Elaborado pelos autores.

O país com o maior número de publicações é os USA, que possui uma política de investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D) cada vez mais forte e incentivado pelo governo (AAAS, 2018). Em seguida está a China, com o segundo maior número de

publicações. A China enfrenta sérios problemas energéticos relacionados às emissões de gases poluentes e produção de energia elétrica (ZHAO *et al.*, 2014), e na tentativa de encontrar soluções e fontes alternativas de energia, tem investido no setor P&D, destacando-se pela quantidade de publicações em proporção mundial.

O Brasil está na 16^a posição, ocupando um lugar de destaque nas pesquisas sobre pirólise. Entretanto, a elaboração e implementação de maiores políticas de incentivo às pesquisas e desenvolvimento, como por exemplo, em relação às estruturas universitárias, poderia melhorar a posição do país quanto ao número de publicações (ARBIX; MIRANDA, 2017).

A pirólise tem sido investigada por diversas áreas de pesquisa. As 10 áreas com os maiores números de publicações são apresentadas na Figura 4.

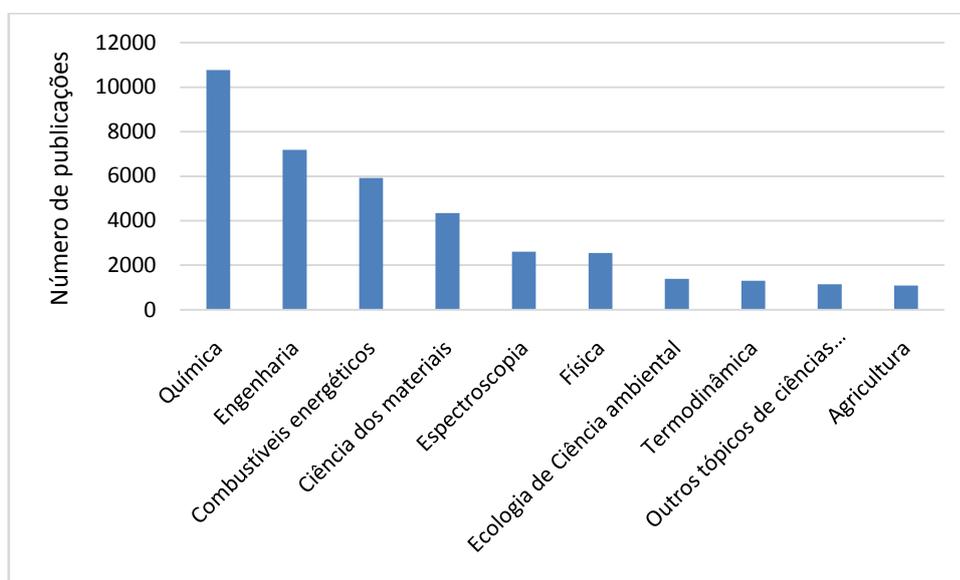


Figura 4 – Projeção do número de publicações com a chave “*pyrolysis*” em função das áreas de pesquisa.

Fonte – Elaborado pelos autores.

Observa-se que as áreas de foco estão concentradas em química, já que a pirólise se trata de um processo químico, engenharia e combustíveis energéticos, o que pode ser justificado pelo seu potencial na produção de fontes alternativas de energia.

Dentre os registros encontrados de títulos contendo o termo “*pyrolysis*”, foram selecionados os 10 artigos mais citados entre 2010 e 2018 para uma análise qualitativa, consistindo na leitura e compreensão dos trabalhos. Os títulos dos artigos e seus respectivos autores estão dispostos na Tabela 1, por ordem decrescente de citação.

Tabela 1. Artigos com o termo “*pyrolysis*” obtidos pela *Web of Science*.

TÍTULO	AUTORES
Renewable chemical commodity feedstocks from integrated catalytic processing or pyrolysis oils	Vispute <i>et al.</i> (2010)
Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility	Van Zwieten, <i>et al.</i> (2010)
Simple pyrolysis of urea into graphitic carbon nitride with recyclable adsorption and photocatalytic activity	Liu <i>et al.</i> (2011)
Facile synthesis of nitrogen-doped graphene via pyrolysis of graphene oxide and urea, and its electrocatalytic activity toward the oxygen-reduction reaction	Lin <i>et al.</i> (2012)
Highly luminescent carbon nanodots by microwave-assisted pyrolysis	Zhai <i>et al.</i> (2012)
Catalytic pyrolysis of biomass for biofuels production	French e Czernik (2010)
Influence of inorganic salts on the primary pyrolysis products of cellulose	Patwardhan <i>et al.</i> (2010)
Impact of pyrolysis temperature and manure source on physiochemical characteristics of biochar	Cantrell <i>et al.</i> (2012)
Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution	Chen <i>et al.</i> (2011)
Production of green aromatics and olefins by catalytic fast pyrolysis of wood sawdust	Carlson <i>et al.</i> (2011)

Fonte – Elaborado pelos autores.

Os 10 artigos selecionados são estudos da aplicação da pirólise e seus produtos. Van Zwieten *et al.* (2010) estudaram a aplicação agrícola do carvão natural –“*biochar*”– da pirólise lenta de resíduos de moinho de papel. Houve melhoria da qualidade do solo e do desempenho da colheita, porém, em alguns tipos de solo o efeito foi negativo, devendo-se avaliar a composição do solo antes alterá-lo. Cantrell *et al.* (2012) produziram “*biochar*” pela pirólise de esterco e estudaram seu potencial agrícola, sendo este um produto estável e rico em minerais inorgânicos, benéficos para o solo.

Chen *et al.* (2011) se dedicaram ao estudo do “*biochar*” produzido pela pirólise de madeira dura e palha de milho, investigando-os como adsorventes para a remoção de Cu(II) e Zn (II)

de soluções aquosas. Os resultados indicaram que o produto pode atuar como sorvente eficaz, mas sua capacidade de tratar fluxos mistos de resíduos deve ser avaliada individualmente.

Vispute *et al.* (2010) estudaram a conversão de óleos produzidos pela pirólise de biomassa lignocelulósica em matérias-primas químicas de commodities industriais, combinando hidroprocessamento com zeólita como catalisador. Os produtos obtidos foram aromáticos e olefinas, utilizados para aumentar o rendimento econômico de insumos petroquímicos. Já French e Czernik (2010) avaliaram o uso de catalisadores comerciais e sintetizados em laboratório para a produção de hidrocarbonetos combustíveis a partir da pirólise de celulose, lignina e madeira. Os melhores resultados foram obtidos utilizando os catalisadores do grupo ZSM-5.

Liu *et al.* (2011) utilizaram a ureia para a síntese de grafitos de nitreto de carbono por pirólise sob pressão ambiente, apresentando uma alternativa simples, de baixo custo e fácil para a produção em larga escala. Já Lin *et al.* (2012) desenvolveram um método simples para *doping* de átomos de N na rede de grafeno por pirólise de óxido de grafeno com ureia.

Zhai *et al.* (2012) sintetizaram “*nanodots*” de carbono altamente luminiscentes pela pirólise de ácido cítrico na presença de várias moléculas de amina, obtendo um produto potencial para aplicações biomédicas.

Patwardhan *et al.* (2010) observaram o efeito de sais minerais no processamento de bio-óleo obtido por pirólise rápida da celulose. Em altas temperaturas foram formadas espécies de baixo peso molecular, o que sugere o controle da concentração de minerais e da temperatura.

Por fim, Carlson *et al.* (2011) estudaram a pirólise de serragem de madeira de pinho catalisada por ZSM-5 para a produção de aromáticos e olefinas, obtendo resultados positivos com uma alta conversão em reatores de leito fixo e fluidizado.

A fim de refinar o banco de artigos revisados, conforme a metodologia proposta, foi utilizado o termo “*industrial residues*”, a partir do qual foram obtidas 65 publicações no período de 2010 à 2018. O gráfico da Figura 5 mostra a relação do número de registros contendo os termos utilizados com os anos nos quais foram publicados.



Figura 5 – Projeção do número de publicações com as chaves “*pyrolysis*” e “*industrial residues*” em função do ano.

Fonte – Elaborado pelos autores.

A partir da Figura 5, observa-se que o número de publicações envolvendo o processo de pirólise aplicado aos resíduos industriais vem aumentando nos últimos anos, com o maior número de publicações realizado em 2017. É possível ainda relacionar os artigos aos países onde foram publicados, conforme a Figura 6, na qual são apresentados os 10 países de maior destaque em pesquisas nesta abordagem.

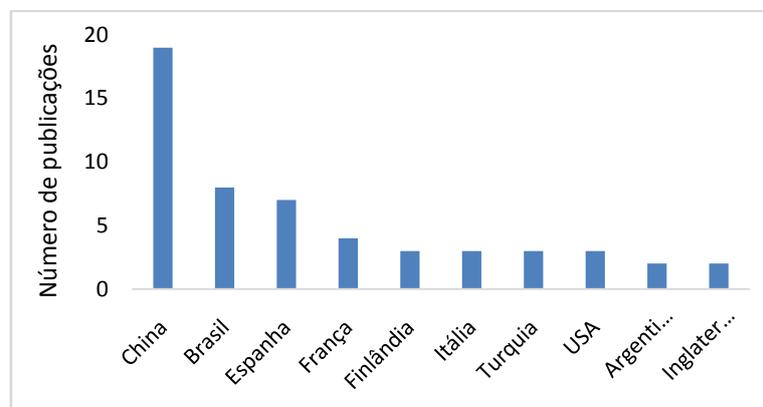


Figura 6 – Projeção do número de publicações com as chaves “*pyrolysis*” e “*industrial residues*” em função dos países.

Fonte – Elaborado pelos autores.

A China lidera o número de publicações, evidenciando o esforço do país no investimento de pesquisas. Em seguida está o Brasil, o que revela o empenho científico do país.

Dentre as 10 áreas de mais destaque, a de Engenharia lidera, sendo seguida por Combustíveis Energéticos (Figura 7), apontando a potencial produção de combustíveis por pirólise.

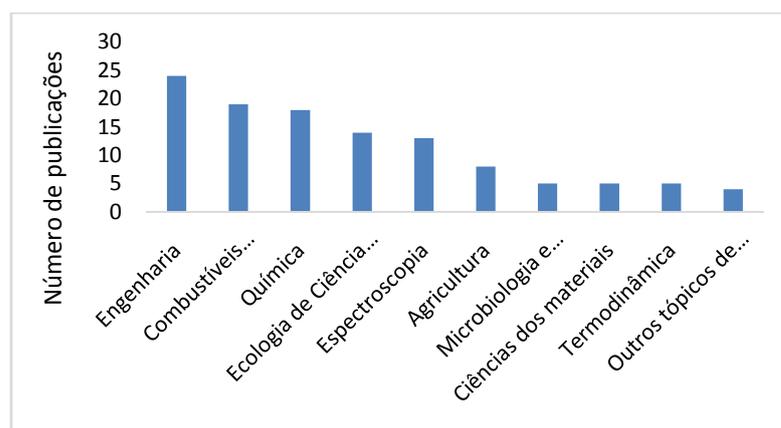


Figura 7 – Projeção do número de publicações com as chaves “*pyrolysis*” e “*industrial residues*” em função das áreas de pesquisa.

Fonte – Elaborado pelos autores.

Os 65 artigos encontrados foram dispostos em ordem decrescente de citações, selecionando-se os 10 registros mais citados para leitura. Os títulos e respectivos autores estão na Tabela 2.

Tabela 2. Artigos com os termos “*pyrolysis*” e “*industrial residues*” obtidos pela *Web of Science*.

TÍTULO	AUTORES
Fast pyrolysis bio-oils from wood and agricultural residues	Oasmaa <i>et al.</i> (2010)
The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis	Burhenne <i>et al.</i> (2013)
The effects of temperature and catalysts on the pyrolysis of industrial wastes (herb residue)	Wang <i>et al.</i> (2010)
Biomass oxidative flash pyrolysis: Autothermal operation, yields and product properties	Amutio <i>et al.</i> (2012)
Heat capacity measurements of various biomass types and pyrolysis residues	Dupont <i>et al.</i> (2014)
Microwave pyrolysis of polymeric materials: Waste tires treatment and characterization of the value-added products	Undri <i>et al.</i> (2013)
Qualitative analysis of bio oils of agricultural residues obtained through pyrolysis using comprehensive two dimensional gas chromatography with time-of-flight mass spectrometric detector	Aranda <i>et al.</i> (2012)
Energy resource utilization of deinking sludge pyrolysis	Lou <i>et al.</i> (2012)
Influence of alcohol addition on properties of bio-oil produced	Pidtasang <i>et al.</i> (2013)

from fast pyrolysis of eucalyptus bark in a free-fall reactor	
Production of adsorbents by pyrolysis of paper mill sludge and application on the removal of citalopram from water	Calisto <i>et al.</i> (2014)

Fonte – Elaborado pelos autores.

Os artigos com os termos “*pyrolysis*” e “*industrial residues*” são trabalhos cujo foco em sua maioria é a produção de bio-óleos. Oasmaa *et al.* (2010) sintetizaram bio-óleo a partir da pirólise rápida de madeira e de resíduos agrícolas como um combustível alternativo, obtendo resultados melhores com rendimento de 62% em massa e composição homogênea do bio-óleo quando utilizada a madeira. Os resíduos agrícolas, em contrapartida, apresentaram rendimentos na faixa de 46 à 55 % em massa e composições complexas.

Burhenne *et al.* (2013) identificaram diferentes características no comportamento da pirólise de biomassas com diferentes frações de celulose, hemicelulose e lignina, obtendo um modelo de pirólise para a otimização do desempenho em leito fixo. Concluíram que um maior teor de lignina provoca decomposição mais lenta com menor rendimento e que os modelos teóricos descrevem curvas de devolatilização com precisão suficiente para processos industriais.

Wang *et al.* (2010) determinaram os efeitos da temperatura de pirólise e dos catalisadores na qualidade do bio-óleo produzido pela pirólise de resíduos da indústria farmacêutica. A alumina ativada cujo volume de poro é $0.32 \text{ cm}^3/\text{g}$ foi o catalisador mais eficaz dentre os estudados, numa temperatura de 450°C .

Amutio *et al.* (2012) estudaram a operação autotérmica, rendimentos e propriedades dos bio-óleos obtidos pela pirólise oxidativa de resíduos de madeira de pinho. O produto e suas propriedades variaram com o volume de oxigênio utilizado, possuindo característica de combustíveis quando em baixas concentrações de oxigênio, próximas de 2.7% em volume.

Dupont *et al.* (2014) mediram a capacidade de calor de vários tipos de biomassa e dos produtos obtidos pelas respectivas pirólises utilizando modelos de conversão térmica. O estudo revelou um aumento linear da capacidade com a temperatura entre 313K e 353K, as diferenças de capacidade foram significativas a depender do tipo de biomassa.

Undri *et al.* (2013) apresentaram a pirólise de resíduos de pneus para a produção de um bio-óleo de valor agregado. Foi utilizada a irradiação de micro-ondas em um forno com um total de 8 kW de potência para o aquecimento da pirólise, concluindo ser esta uma forma vantajosa

para o tratamento destes resíduos. Pelas análises, o bio-óleo pode ser utilizado com combustível após processo de hidrossulfuração.

Aranda *et al.* (2012) realizaram uma análise qualitativa dos bio-óleos produzidos pela pirólise dos resíduos agrícolas casca de arroz e pessegueiro. Sua caracterização apontou-os como potencialmente úteis para a produção de produtos químicos.

Lou *et al.* (2012) aplicaram a técnica de conversão termoquímica para remoção de iodo da indústria de papel e celulose e para induzir a utilização de biomassa de iodo em energia por meio da pirólise de iodo destintante. Os produtos foram analisados por termogravimetria, revelando uma composição majoritária de aromáticos hidrocarbonetos. O bio-óleo produzido pode ser usado no campo de combustíveis e produtos químicos finos.

Pidtasang *et al.* (2013) fizeram pirólise rápida de casca de eucalipto, com temperaturas de 400°C à 550°C para produzir bio-óleo, carvão e gás. A máxima produção de bio-óleo ocorreu em 500°C, com rendimento de 64,65%. Além disso, adicionando-se etanol e metanol ao bio-óleo, a viscosidade inicial, a estabilidade e o valor de aquecimento foram melhorados.

Calisto *et al.* (2014) produziram adsorventes alternativos pela pirólise de resíduos industriais e sua aplicação na remoção do fármaco citalopram da água. A caracterização físico-química revelou produtos aromáticos, obtendo um carvão microporoso eficaz na remoção do antidepressivo.

Utilizando o termo “*bio-oil*”, alinharam-se os artigos com a linha de pesquisa. O banco diminuiu para 25 artigos com um índice h-index médio de 9, indicando que os registros refinados são relevantes. A relação das publicações por ano está exposta na Figura 8.

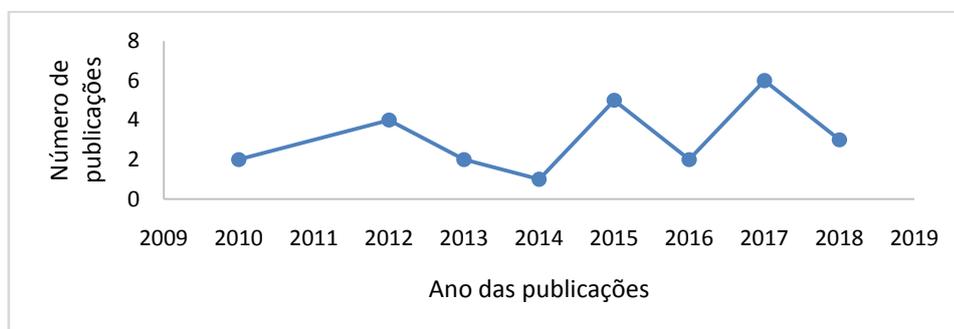


Figura 8 – Projeção do número de publicações com as chaves “*pyrolysis*”, “*industrial residues*” e “*bio-oil*” em função dos anos de publicação.

Fonte – Elaborado pelos autores.

Pelo gráfico da Figura 8, as maiores quantidades de publicações ocorreram em 2017, com um crescimento tímido desde 2010. A relação entre os 10 países de maior destaque e seus respectivos registros encontra-se na Figura 9.

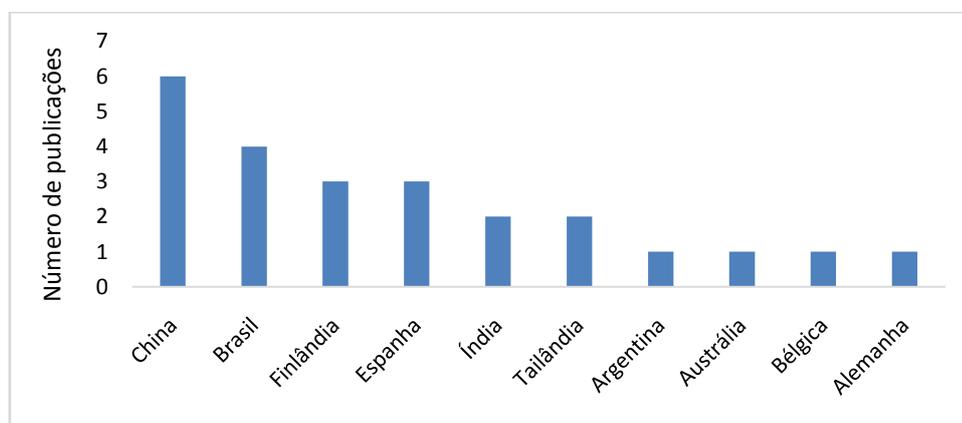


Figura 9 – Projeção do número de publicações com as chaves “*pyrolysis*”, “*industrial residues*” e “*bio-oil*” em função dos países.

Fonte – Elaborado pelos autores.

A China e o Brasil lideram o número de publicações, respectivamente, ratificando o empenho científico de ambos. Quanto às áreas de pesquisa, a de maior destaque é a de Combustíveis Energéticos, como apresentado na Figura 10.

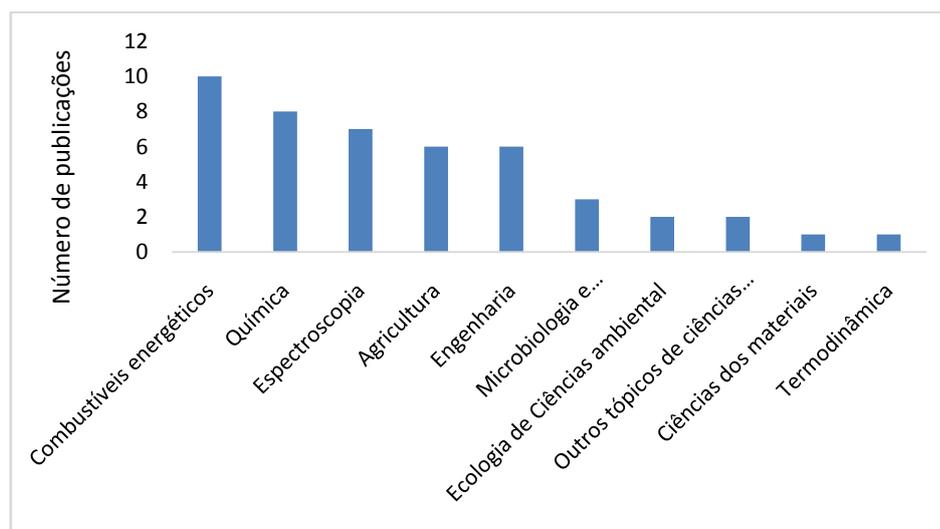


Figura 10 – Projeção do número de publicações com as chaves “*pyrolysis*”, “*industrial residues*” e “*bio-oil*” em função das áreas de pesquisa.

Fonte – Elaborado pelos autores.

Os mapas de localização gerados apresentaram relação de citação entre autores brasileiros de Porto Alegre e Aracajú apenas. A Figura 11 mostra essa relação e a localização dos demais autores, destacando-se o continente europeu e América do Sul.

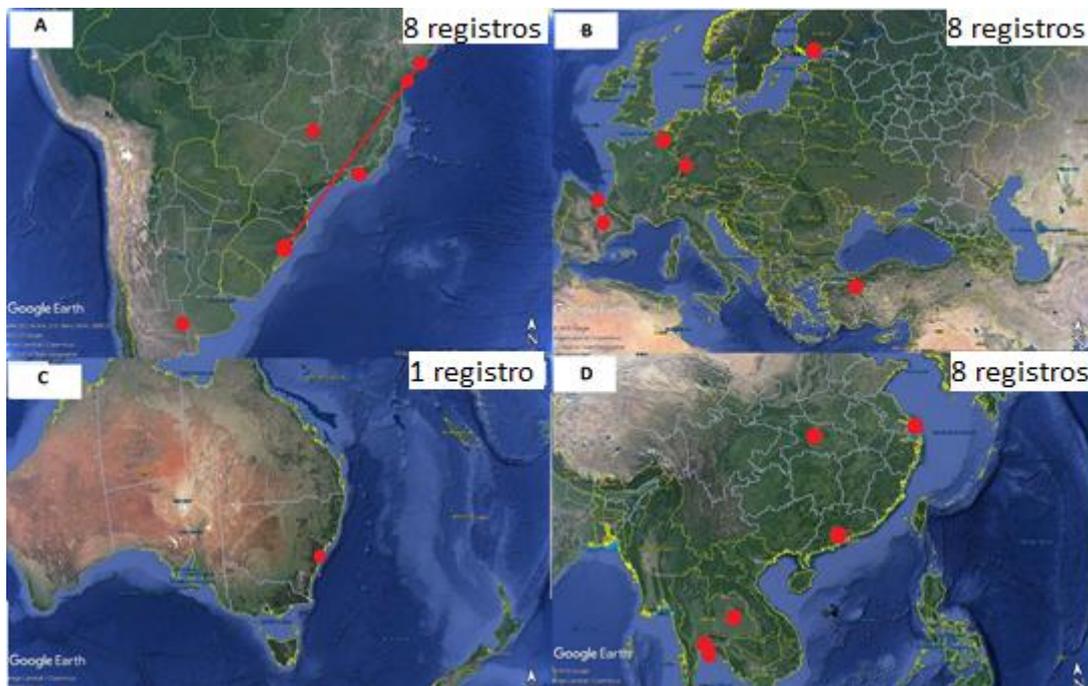


Figura 11 – Mapas de localização dos autores dos artigos selecionados e suas relações.

Fonte – Elaborado pelos autores.

Os 10 registros mais citados dentre os 25 encontrados possuem seus títulos e respectivos autores expostos na Tabela 3.

Tabela 3. Artigos com os termos “*pyrolysis*”, “*industrial residues*” e “*bio-oil*” obtidos pela *Web of Science*.

TÍTULO	AUTORES
Fast pyrolysis bio-oils from wood and agricultural residues	Oasmaa <i>et al.</i> (2010)
The effects of temperature and catalyst on the pyrolysis of industrial wastes (herb residue)	Wang <i>et al.</i> (2010)
Biomass oxidative flash pyrolysis: Autothermal operation, yields and product properties	Amutio <i>et al.</i> (2012)
Qualitative analysis of bio oils of agricultural residues obtained through pyrolysis using comprehensive two dimensional gas chromatography with time-of-flight mass spectrometric detector	Aranda <i>et al.</i> (2012)

Energy and resource utilization of deinking sludge pyrolysis	Lou <i>et al.</i> (2012)
Influence of alcohol addition on properties of bio-oil produced from fast pyrolysis of eucalyptus bark in a free-fall reactor	Pidtasang <i>et al.</i> (2013)
Intermediate pyrolysis of agro-industrial biomasses in bench-scale pyrolyser: Product yields and its characterization	Tinwala <i>et al.</i> (2015)
Upgrading of pyrolysis vapours from biomass carbonization	Adrados <i>et al.</i> (2012)
Valorization of raspberry seed cake by flash and slow pyrolysis: Product yield and characterization of the liquid and solid fraction	Smets <i>et al.</i> (2014)
Process simulation development of fast pyrolysis of wood using aspen plus	Onarheim <i>et al.</i> (2015)

Fonte – Elaborado pelos autores.

Percebeu-se que 6 dos artigos selecionados, já haviam analisados na Tabela 2, o que evidencia que a busca por bio-óleos combustíveis é uma das aplicações da pirólise mais investigadas.

Tinwala *et al.* (2015) realizaram pirólise de biomassa lenhosa, resíduos agrícolas e sementes em reator de leito fixo a 500°C. Quando utilizadas as sementes, o subproduto principal foi bio-óleo, com rendimento de 47,5 %, apresentando características para aplicação como óleo de forno e extração de produtos químicos finos. Para a palha de soja o maior rendimento foi de gás (40,5%), destinado à aplicação térmica, e quando usada a biomassa lenhosa, com menor quantidade de voláteis em sua composição, o rendimento de carvão foi o maior, com 40%, podendo melhorar a fertilidade do solo.

Adrados *et al.* (2012) estudaram o melhoramento dos vapores da pirólise da biomassa de estacas de oliveira para obtenção de coque como potencial agente redutor. Além disso, estudou a melhoria catalítica dos vapores para a redução de alcatrões presentes no bio-óleo. Os resultados mostraram que a pirólise é uma boa opção para a obtenção do coque para aplicação metalúrgica em temperaturas maiores que 750°C e baixas taxas de aquecimento. Já os bio-óleos obtidos em pirólise lenta a alta temperatura são combustíveis de baixa qualidade.

Smets *et al.* (2014) investigaram a valorização do bolo de sementes de framboesa por pirólise rápida e lenta, obtendo melhores rendimentos a 450°C. A pirólise rápida produziu um bio-óleo de rendimento considerável, de alto valor econômico. Já a pirólise lenta, produziu um líquido recolhido em 3 frações, sendo que 2 delas possuíam alto teor de água e a terceira se apresentou como potencial combustível renovável, entretanto o rendimento foi de 12, 1% em peso, considerável baixo, devendo ser investigado quanto aos efeitos econômicos do processo.

Por último, Onarheim *et al.* (2015) apresentaram a integração à uma planta industrial, de um processo de pirólise rápida de resíduos florestais em leito fluidizado produzindo bio-óleo. A avaliação do custo e desempenho mostrou que a integração diminui a necessidade de combustível na caldeira, podendo ser mais lucrativa do que o processo independente.

Através dos dados coletados, foi possível reunir as informações relevantes acerca do tema abordado, identificando os pontos positivos e negativos que têm sido discutidos para o avanço da aplicação do processo de pirólise na produção de bio-óleos combustíveis, por meio da matriz SWOT na Tabela 4. Por meio da matriz, é possível perceber as vantagens e desvantagens de tal procedimento, avaliando-se os riscos e oportunidades no cenário mundial.

Tabela 4. Matriz SWOT elaborada a partir dos dados coletados dos estudos desenvolvidos sobre a produção de bio-óleo a partir da pirólise de resíduos industriais.

POSITIVO	NEGATIVO
Forças	Fraquezas
<ul style="list-style-type: none"> -Fonte alternativa de energia; -Reaproveitamento de resíduos industriais; -As melhores composições de bio-óleo são obtidas por pirólise rápida em temperaturas não muito elevadas; -Quando integrada à planta industrial, diminui a necessidade de combustível em caldeiras, aumentando o lucro. 	<ul style="list-style-type: none"> -Cada biomassa necessita de condições de processos diferentes para produzir bio-óleo de qualidade; -O bio-óleo produzido, na maioria das vezes, precisa de tratamento para atuar como combustível.
Oportunidades	Ameaças
<ul style="list-style-type: none"> -O bio-óleo possui potencial para a produção de produtos químicos; -A viscosidade e estabilidade do bio-óleo pode ser melhorada com a adição de metanol ou etanol. 	<ul style="list-style-type: none"> -O rendimento, que depende do processo e da biomassa, pode inviabilizar o processo; -Carência de estudos específicos da indústria de petróleo.

Fonte – Elaborado pelos autores.

Infere-se, portanto, que o bio-óleo produzido a partir da pirólise de resíduos industriais pode ser aplicado como combustível. A viabilidade de tal aplicação depende, entretanto, das condições do processo, assim como das propriedades da biomassa utilizada, que deve ser

caracterizada para que os parâmetros da conversão termoquímica sejam definidos. A taxa de aquecimento deve ser relativamente pequena para que o óleo possua alta qualidade, sendo utilizadas temperaturas por volta de 500°C.

CONCLUSÃO

A realização da revisão bibliométrica permitiu a constatação do crescimento de registros científicos no tema, possibilitando a comparação entre os artigos acerca da pirólise e suas diversas aplicações.

O refino do banco de dados obtido pela plataforma Web of Science ® possibilitou a obtenção de informações importantes para o planejamento da pesquisa acerca da aplicação de bio-óleo produzido a partir da pirólise de resíduos industriais como combustível.

As publicações encontradas revelaram que o procedimento é possível e sua viabilidade depende primordialmente das condições de temperatura e atmosfera do processo, da biomassa utilizada e da utilização de catalisadores adequados.

Desta forma, antes do processo ocorrer, é necessária a realização de uma caracterização da biomassa a ser utilizada, podendo esta ser feita por meio de técnicas como as cromatográficas e termogravimétricas, a fim de que sejam estabelecidos os parâmetros a serem utilizados no controle do processo. Tais parâmetros são de fundamental importância para atingir o máximo rendimento da reação, diretamente relacionado com a viabilidade do processo.

Após o processo de pirólise, o bio-óleo produzido deve ser analisado quanto à sua estabilidade e propriedades físico-químicas, sendo submetido, quando necessário, a tratamentos específicos para cada composição final, a fim de que possa atuar como combustível.

AGRADECIMENTOS

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Centro Universitário Norte do Espírito Santo (CEUNES), Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGEN) e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES).

REFERÊNCIAS

AAAS – AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE. R&D POLICY PROGRAM. **Guide to the AAAS Federal R&D Budget Dashboard**. Maio, 2018.

AMUTIO, M.; LOPEZ, G.; AGUADO, R.; BILBAO, J. OLAZAR, M. Biomass oxidative flash pyrolysis: Autothermal operation, yields and product properties. *Energy & Fuels*, v. 26, 2012, p. 1353-1362.

ARBIX, G.; MIRANDA, Z. Políticas de inovação em nova chave. *Estudos avançados*, v. 31, n. 90, 2017.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Energy*, v.38, 2012, p. 68-94.

BURHENNE, L.; MESSMER, J.; AICHER, T.; LABORIE, M. P. The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 101, 2013, p.177-184.

CALISTO, V.; FERREIRA, C. I. A.; SANTOS, S. M.; GIL, M. V.; OTERO, M.; ESTEVES, V. I. Production of adsorbents by pyrolysis of paper mill sludge and application on the removal of citalopram from water. *Bioresource technology*, v. 166, 2014, p. 335-344.

CANTRELL, K. B.; HUNT, P.G.; UCHIMIYA, M.; NOVAK, J.M.; RO, K. S. Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource Technology*, v. 107, 2012, p. 419-428.

CARLSON, T. R.; CHENG, Y. T.; JAE, J.; HUBER, G. W. Production of green aromatics and olefins by catalytic fast pyrolysis of wood sawdust. *Energy & Environmental Science*, v. 4, 2011, p. 145-161.

CHEN, X. C.; CHEN, G. C.; CHEN, L. G.; CHEN, Y. X.; LEHMANN, J.; MCBRIDE, M. B.; HAY, A. G. Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution. *Bioresource Technology*, v. 102, 2011, p. 8877-8884.

DUPONT, C.; CHIRIAC, R.; GAUTHIER, G.; TOCHE, F. Heat capacity measurements of various biomass types and pyrolysis residues. *Fuel*, v. 115, p 644-651, 2014.

FRENCH, R.; CZERNIK, S. Catalytic pyrolysis of biomass for biofuels production. *Fuel Processing Technology*, v. 9, 2010, p. 25-32.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. NOTA TÉCNICA CGPEG/DILIC/IBAMA Nº 07/11. **Resíduos sólidos das atividades de Exploração e Produção de petróleo e gás em bacias sedimentares marítimas do Brasil no ano de 2009** – Consolidação dos resultados da Nota Técnica CGPEG/DILIC/IBAMA nº 08/08. Rio de Janeiro, 2011.

KABIR, G.; HAMEED, B. H. Recent progress on catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass to high-grade bio-oil and bio-chemicals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.70, 2017, p. 945-967.

LACERDA, R. T. de O.; ENSSLIM, L.; ENSSLIN, S. R. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. *Gest. Prod.*, São Carlos, v. 19, n.1, 2012, p.59-78.

LIN, Z. Y.; WALLER, G.; LIU, Y.; LIU, M.; WONG, C. P. Facile synthesis of nitrogen-doped graphene via pyrolysis of graphene oxide and urea, and its electrocatalytic activity toward the oxygen-reduction reaction. *Advanced Energy Materials*, v. 2, 2012, p. 884-888.

LIU, J. H.; ZHANG, T. K.; WANG, Z. C.; DAWSON, G.; CHEN, W. Simple pyrolysis of urea into graphitic carbon nitride with recyclable adsorption and photocatalytic activity. *Journal of Materials Chemistry*, v. 21, 2011, p. 14398-14401.

LOU, R.; WU, S. B.; LV, G. J.; YANG, Q. Energy and resource utilization of deinking sludge pyrolysis. *Applied Energy*, v. 90, 2012, p. 46-50.

MORAES, M. S. A.; MIGLIORINI, M. V.; DAMASCENO, F. C.; GEORGES, F.; ALMEIDA, S.; ZINI, C. A.; JACQUES, R. A.; CARAMAO, E. B. Qualitative analysis of bio oils of agricultural residues obtained through pyrolysis using comprehensive two dimensional gas chromatography with time-of-flight mass spectrometric detector. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 98, 2012, p. 51-64.

MURRAY, T.; RESENDE, F.; LUO, G. Bio-oil: An introduction to fast pyrolysis and its application. Washington State University Extension Fact Sheet, FS140E, 2014.

OASMAA, A.; SOLANTAUSTA, Y.; ARPIAINEN, V.; KUOPPALA, E.; SIPILA, K. Fast pyrolysis bio-oils from wood and agricultural residues. *Energy & Fuels*, v. 24, 2010, p. 1380-1388.

ONARHEIM, K.; SOLANTAUSTA, Y.; LEHTO, J. Process simulation development of fast pyrolysis of wood using aspen plus. *Energy & Fuels*, v. 29, p. 205-217, 2015.

PATWARDHAN, P. R.; SATRIO, J. A.; BROWN, R. C.; SHANKS, B. H. Influence of inorganic salts on the primary pyrolysis products of cellulose. *Bioresource Technology*, v. 101, 2010, p. 4646-4655.

PIDTASANG, B.; UDOMSAP, P.; SUKKASI, S.; CHOLLACOOP, N.; PATTIYA, A. Influence of alcohol addition on properties of bio-oil produced from fast pyrolysis of eucalyptus bark in a free-fall reactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 19, 2013, p. 1851-1857.

SANTOS, G. B. dos. Gerenciamento de resíduos na indústria de exploração e produção de petróleo: Atendimento ao requisito de licenciamento ambiental. *Rev. Gestão sustentável ambiental, Florianópolis*, v.1, n.2, 2013, p. 23-35.

TINWALA, F.; MOHANTY, P.; PARMAR, S.; PATEL, A.; PANT, K. K. Intermediate pyrolysis of agro-industrial biomasses in bench-scale pyrolyser: Product yields and its characterization. *Bioresource Technology*, v.188, 2015, p. 258-264.

UNDRI, A.; MEINI, S.; ROSI, L.; FREDIANI, M.; FREDIANI, P. Microwave pyrolysis of polymeric materials: Waste tires treatment and characterization of the value-added products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 103, 2013, p. 149-158.

VAN ZWIETEN, L.; KIMBER, S.; MORRIS, S.; CHAN, K. Y.; DOWNIE, A.; RUST, J.; JOSEPH, S.; COWIE, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, v. 327, 2010, p. 235-246.

VISPUTE, T. P.; ZHANG, H. Y., SANNA, A.; XIAO, R.; HUBER, G. W. Renewable chemical commodity feedstocks from integrated catalytic processing of pyrolysis oils. *Science*, v.330, 2010, p.1222-1227.

WANG, P.; ZHAN, S. H.; YU, H. B.; XUE, X. F.; HONG, N. The effects of temperature and catalysts on the pyrolysis of industrial wastes (herb residue). *Bioresource Technology*, v. 101, 2010, p. 3236-3241.

ZHAI, X. Y.; ZHANG, P.; LIU, C.J.; BAI, T.; LI, W. C.; DAI, L. M.; LIU, W. G. Highly luminescent carbon nanodots by microwave-assisted pyrolysis. *Chemical Communications*, v. 48, 2012, p. 7955-7957.

ZHAO, Z.; CHANG, R.; ZILLIANTE, G. Challenges for China's energy conservation and emission reduction. *Energy Policy*, v. 74, p. 709-713, 2014, p. 709-713.