

RESSALVA

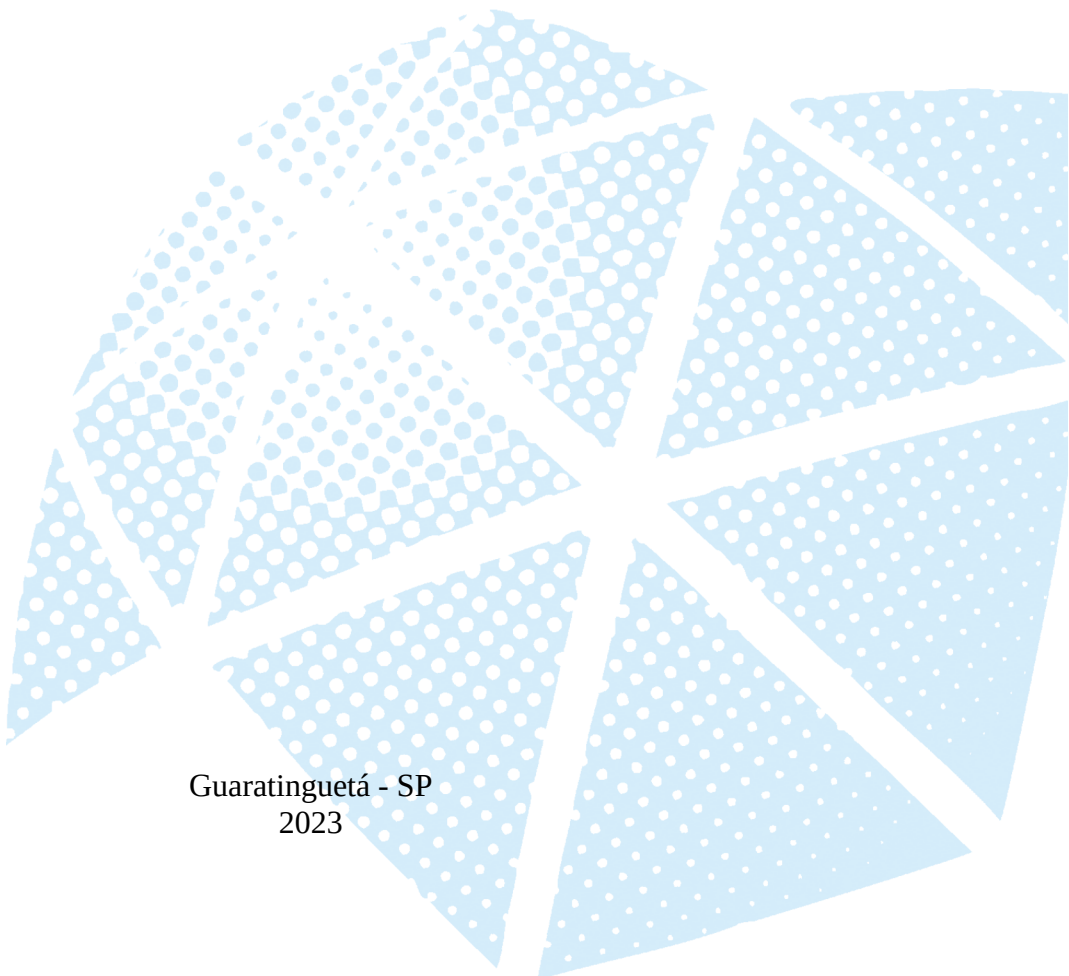
Atendendo solicitação da autora,
o texto completo desta dissertação
será disponibilizado somente a partir
de 15/12/2025.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá - Campus de
Guaratinguetá.

ANA HELENA DE CAMPOS PEREIRA

PIRÓLISE LENTA CATALÍTICA *IN-SITU* DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
USANDO CATALISADORES ALCALINOS

Guaratinguetá - SP
2023



Ana Helena de Campos Pereira

**PIRÓLISE LENTA CATALÍTICA IN-SITU DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR
USANDO CATALISADORES ALCALINOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna
Coorientador: Profa. Dra. Ivonete Ávila

Guaratinguetá - SP
2023

P436p	Pereira, Ana Helena de Campos Pirólise catalítica in-situ do bagaço de cana-de-açúcar usando catalisadores alcalinos / Ana Helena de Campos Pereira – Guaratinguetá, 2023. 73 : il. Bibliografia: f. 70-73 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024. Orientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna Coorientadora: Profª. Drª. Ivonete Ávila 1. Energia - Fontes alternativas. 2. Óxido de cálcio. 3. Biocombustíveis. I. Título. CDU 620.91(043)
-------	--

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O potencial de valorização do bio-óleo obtido da pirólise lenta do bagaço de cana-de-açúcar utilizando catalisadores alcalinos de baixo custo e disponíveis pode ter impacto regional e nacional, já que a cana-de-açúcar está muito presente no país, principalmente no estado de São Paulo, promovendo assim uma maior disponibilidade de biocombustíveis.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The potential for valorizing bio-oil obtained from the slow pyrolysis of sugarcane bagasse using low-cost and available alkaline catalysts can have a regional and national impact, since sugarcane is very present in the country, mainly in the state of São Paulo, thus promoting greater availability of biofuels.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ANA HELENA DE CAMPOS PEREIRA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA”

PROGRAMA: ENGENHARIA
CURSO: MESTRADO

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Documento assinado digitalmente
 MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
Data: 23/01/2024 14:45:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 CARLOS MANUEL ROMERO LUNA
Data: 12/01/2024 18:35:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. CARLOS MANUEL ROMERO LUNA
Orientador - UNESP

Gustavo
Ventorim:99559323768

Assinado de forma digital por
Gustavo Ventorim:99559323768
Dados: 2024.01.17 10:33:03 -03'00'

Prof. Dr. GUSTAVO VENTORIM
UNESP

Documento assinado digitalmente
 ANA MAURA ARAUJO ROCHA
Data: 12/01/2024 18:59:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. ANA MAURA ARAUJO ROCHA
UFOP

DEZEMBRO de 2023

DADOS CURRICULARES

ANA HELENA DE CAMPOS PEREIRA

NASCIMENTO	28/11/1991 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Nelson Pereira Filho Oroziana Theodoro de Campos Pereira
2012/2016	Engenharia Química/Engenharia Química Faculdade de Roseira - FARO
2007/2010	Ensino médio e Técnico em Web Design/Técnica em web design Escola Everardo Passos - ETEP

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço por minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna que jamais deixou de me incentivar e me apoiar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais Nelson Pereira Filho e Oroziana Theodoro de Campos Pereira, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

às minhas irmãs Ana Maria e Ana Luísa pelo companheirismo, amizade e apoio;

ao meu companheiro pelo apoio e força em todos os momentos difíceis;

ao CNPq pelo apoio financeiro à minha pesquisa a qual foi crucial para realização do estudo;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia dos Campus de Guaratinguetá e de Itapeva pela dedicação, cordialidade, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos alunos de intercâmbio que agregaram muito na minha experiência e deixaram esta caminhada melhor ainda.

Meus sinceros agradecimentos a todos vocês!

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processo 156171/2021-0

“Todo grande sonho começa com um sonhador. Lembre-se sempre, você tem dentro de você a força, a paciência e a paixão para alcançar as estrelas para mudar o mundo”.

Harriet Tubman ;

RESUMO

A biomassa é atualmente usada como fonte de energia renovável. O aproveitamento da biomassa através da pirólise tem o potencial de produzir biocombustíveis com alta densidade energética. A pirólise de biomassa é o processo de decomposição térmica da biomassa em meio inerte, gerando três produtos distintos, sendo: um sólido (biochar), um líquido (bio-óleo) e um gás (gás pirolítico). Existem alguns tipos de pirólise, entre eles a pirólise rápida e a pirólise lenta. A pirólise lenta é voltada para a produção de biochar, porém produz uma quantidade significativa de bio-óleo. O bio-óleo produzido pelo processo de pirólise lenta apresenta uma série de desvantagens tais como, o elevado teor de água, a acidez e a composição química muito variável, fatores que dificultam o seu uso e sua comercialização como um biocombustível, tornando-o um resíduo neste processo. Assim, foi proposto o uso de catalisadores durante a pirólise como uma tentativa de resolver ou minimizar estes problemas. Existem duas configurações possíveis no processo de pirólise catalítica, a configuração Ex-Situ, a qual o catalisador não tem contato direto com a biomassa e a In-situ, que consiste na mistura direta da biomassa com o catalisador, situação que deixa o processo mais simples. A literatura recente apresenta diversos trabalhos sobre pirólise catalítica, porém há pouca referência quanto ao uso de catalisadores alcalinos na pirólise lenta. No contexto brasileiro, a aplicação da pirólise catalítica do bagaço de cana-de-açúcar mostra-se relevante, devido à grande produção de etanol oriunda da cana-de-açúcar e à possibilidade de se produzir biocombustíveis além de se valorizar o bio-óleo produzido por pirólise lenta que normalmente é descartado como resíduo. Dessa forma, este projeto de mestrado propõe um estudo da pirólise lenta catalítica do bagaço de cana-de-açúcar usando catalisadores alcalinos, visando a melhora da qualidade do bio-óleo, assim como, dos outros produtos derivados da pirólise.

PALAVRAS-CHAVE: Energia renovável; Bio-óleo; Óxido de cálcio; Óxido de magnésio; Calcário calcítico; Calcário dolomítico.

ABSTRACT

Biomass is currently used as a renewable energy source. The use of biomass through pyrolysis has the potential to produce biofuels with high energy density. Biomass pyrolysis is the process of thermal decomposition of biomass in an inert medium, generating three distinct products, namely: a solid (biochar), a liquid (bio-oil) and a gas (pyrolytic gas). There are some types of pyrolysis, including fast pyrolysis and slow pyrolysis. Slow pyrolysis is aimed at the production of biochar, but it produces a significant amount of bio-oil. Bio-oil produced by the slow pyrolysis process presents a series of disadvantages such as high water content, acidity and very variable chemical composition, factors that hinder its use and commercialization as a biofuel, making it a residue in this case. process. Thus, the use of catalysts during pyrolysis has been proposed as an attempt to solve or minimize these problems. There are two possible configurations in the catalytic pyrolysis process, the Ex-Situ configuration, in which the catalyst does not have direct contact with the biomass, and the In-situ configuration, which consists of direct mixing of the biomass with the catalyst, a situation that makes the process more simple. Recent literature presents several works on catalytic pyrolysis, but there is little reference regarding the use of alkaline catalysts in slow pyrolysis. In the Brazilian context, the application of catalytic pyrolysis of sugarcane bagasse is relevant, due to the large production of ethanol from sugarcane and the possibility of producing biofuels in addition to valuing bio-oil. produced by slow pyrolysis that is normally discarded as waste. Therefore, this master's project proposes a study of the catalytic slow pyrolysis of sugarcane bagasse using alkaline catalysts, aiming to improve the quality of bio-oil, as well as other products derived from pyrolysis.

KEYWORDS: Renewable energy; Bio-oil; Calcium oxide; Magnesium oxide; Calcitic limestone; Dolomitic limestone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diferentes tipos de biomassa usadas para produção de biocombustíveis.....	18
Figura 2 – Distribuição em peso nas partes da estrutura.....	20
Figura 3 – Estruturas da celulose	22
Figura 4 – Estrutura química dos principais componentes da hemicelulose.....	23
Figura 5 – Estruturas da lignina	24
Figura 6 – Lignina (a) Guaiacol, (b) Siringol e (c) Hidroquinona	25
Figura 7 – Balanço de massa e energia da cana-de-açúcar.....	26
Figura 8 – Plantio de cana-de-açúcar.....	27
Figura 9 – Bagaço de cana-de-açúcar.....	27
Figura 10 – Processos de conversão termoquímica de biomassa, seus produtos e aplicações.....	29
Figura 11 – Produtos do processo de pirólise de biomassa e algumas aplicações.....	31
Figura 12 – Bio-óleo obtido na pirólise de biomassa.	33
Figura 13 – Configurações da pirólise catalítica IN-SITU e EX-SITU.....	39
Figura 14 – Organograma de análises e caracterizações realizados	44
Figura 15 – Bagaço de cana-de-açúcar.....	45
Figura 16 – Catalisadores alcalinos (a) CaO; (b) MgO.....	45
Figura 17 – Esquema da bancada experimental.....	46
Figura 18 – Equipamentos (a) Moinho; (b) Agitador de peneiras.....	47
Figura 19 – Forno mufla MA 385.....	48
Figura 20 – Medidor de pH AK 151.....	49
Figura 21 – Calorímetro IKA C5000.....	50
Figura 22 – Termobalança SDT Q-600.....	51
Figura 23 – Espectrofotômetro de infravermelho.....	52
Figura 24 – BCA (a) <i>in natura</i> ; (b) granulometria inferior a 250µm.	53
Figura 25 – Mistura resultante entre o BCA e CaO.....	54
Figura 26 – Curva TG/DTG do BCA em atmosfera inerte.....	56
Figura 27 – Rendimento mássico dos produtos da pirólise térmica.....	57
Figura 28 – Rendimento dos produtos da pirólise catalítica - CaO 5%.....	58
Figura 29 – Rendimento dos produtos da pirólise catalítica - CaO 10%.....	59
Figura 30 – Rendimento dos produtos da pirólise catalítica - MgO 5%.....	60
Figura 31 – Rendimento dos produtos da pirólise catalítica - MgO 10%.....	61

Figura 32 – Bio-óleo do BCA (a) sem catalisador (b) com catalisador.....62

Figura 33 – Biochar obtido da pirólise catalítica do BCA com CaO como catalisador (a) P. térmica 300°C; (b) P. térmica 400°C; (c) P. térmica 500°C; (d) P. catalítica 300°C; (e) P. catalítica 400°C e (f) P. catalítica 500°C.....65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teor de hemicelulose, celulose e lignina do BCA.....	28
Tabela 2 – Produtos típicos obtidos para diversos tipos de pirólise.....	32
Tabela 3 – Componentes do bio-óleo obtido da pirólise catalítica da casca de arroz.....	34
Tabela 4 – Propriedades do bio-óleo e do óleo combustível.....	36
Tabela 5 – Análise composicional e imediata do BCA.....	55
Tabela 6 – Poder calorífico superior do bio-óleo térmico e catalítico (MJ/kg).....	63
Tabela 7 – Valores de pH para os bio-óleos do BCA obtido com CaO	64
Tabela 8 – Poder calorífico superior do biochar térmico e catalítico.....	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.1.1	Objetivo geral.....	17
1.1.2	Objetivo específicos.....	17
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	18
2.1	BIOMASSA.....	18
2.1.1	Composição da biomassa lignocelulósica.....	19
2.1.1.1	Celulose.....	21
2.1.1.2	Hemicelulose.....	22
2.1.1.3	Lignina.....	23
2.1.1.4	Minerais.....	24
2.2	CANA-DE-AÇÚCAR.....	24
2.2.1	Bagaço de cana-de-açúcar.....	26
2.3	PROCESSOS DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA DE BIOMASSA.....	27
2.4	PIRÓLISE DE BIOMASSA.....	29
2.4.1	Bio-óleo.....	32
2.5	PIRÓLISE CATALÍTICA.....	35
2.5.1	Tipos de pirólises catalíticas configurações <i>In-Situ e Ex- Situ</i>.....	37
2.5.2	Catalisadores usados na pirólise catalítica.....	39
2.5.3	Pirólise catalítica In-Situ de biomassa usando catalisador alcalino.....	40
2.5.4	Pirólise catalítica In-Situ do bagaço de cana-de-açúcar usando catalisadores alcalinos.....	42
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1.	MATERIAIS.....	45
3.1.1	Bagaço de cana-de-açúcar.....	45
3.1.2	Catalisadores alcalinos.....	45
3.1.3	Bancada experimental de pirólise catalítica in-situ.....	46
3.2	MÉTODOS.....	47
3.2.1	Técnicas de caracterização física e química.....	47
3.2.1.1	Preparação do BCA.....	47
3.2.1.2	Análise imediata.....	48
3.2.1.3	Análise composicional.....	49

3.2.1.4	Determinação do pH.....	50
3.2.1.5	Poder calorífico superior (PCS).....	50
3.2.1.6	Análise elementar	51
3.2.1.7	Porosimetria por adsorção de nitrogênio.....	51
3.2.1.8	Análise térmica (TG/DTG)	51
3.2.1.9	Espectrometria de infravermelho (FTIR).....	52
3.2.1.10	Cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massa (GC-MS).....	53
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1.	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	54
4.1.1	Preparação do BCA.....	54
4.1.2	Análise imediata e composicional do BCA.....	55
4.1.3	Análise termogravimétrica(TG/DTG).....	56
4.2	RENDIMENTOS DA PIRÓLISE LENTA TÉRMICA E CATALÍTICA.....	57
4.2.1	Pirólise térmica do BCA.....	57
4.2.2	Pirólise catalítica do BCA usando CaO 5%.....	58
4.2.3	Pirólise catalítica do BCA usando CaO 10%.....	59
4.2.4	Pirólise catalítica do BCA usando MgO 5%.....	60
4.2.5	Pirólise catalítica do BCA usando MgO 10%.....	61
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DA PIRÓLISE CATALÍTICA.....	62
4.3.1	Bio-óleo.....	63
4.3.1.1	Poder calorífico superior (PCS) do bio-óleo.....	64
4.3.1.2	Potencial de hidrogênio.....	65
4.3.2	Biochar.....	66
4.3.2.1	Poder calorífico superior (PCS) do biochar.....	67
5	CONCLUSÃO.....	68
6	TRABALHOS FUTUROS.....	69
	REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, para satisfazer a grande demanda de energia visando a redução das emissões de gases efeito estufa (GEE), principalmente do dióxido de carbono (CO_2), foram propostas diversos tipos de energias renováveis (energia solar, energia eólica...) dentre elas o uso de biomassa. No mundo, a biomassa é a quarta fonte de energia e tem sido apontada como uma fonte de energia renovável capaz de resolver os problemas da demanda de energia e reduzir as emissões de GEE (SAIDUR et al., 2011; TINWALA et al., 2015; KIM et al., 2017). O aproveitamento da biomassa pode ser realizado através dos processos de conversão bioquímica e termoquímica. Entretanto, a conversão termoquímica tem recebido maior atenção devido à sua rapidez e maior eficiência quando comparado com a conversão bioquímica (TRIPATHI et al., 2016).

A pirólise de biomassa é um processo termoquímico que segundo a literatura tem potencial para a produção de biocombustíveis. A pirólise consiste na decomposição térmica da biomassa, numa determinada temperatura e tempo em um ambiente ausente de gás oxigênio (O_2) (SUALI, 2012; PAN et al, 2010; ANAND et al, 2017). Como produto temos um líquido (bio-óleo) de coloração escura e cheiro forte característico, um sólido (biochar) e um gás (gás pirolítico). Os rendimentos e características são diretamente influenciados pelas condições operacionais envolvidas (BRIDGWATER, 2003).

O biochar pode ter diversas aplicações, tais como na agricultura, tratamento de água, processos químicos catalíticos, entre outros (TAN et al., 2015; LEE et al., 2017). Na pirólise lenta, o biochar é a fração de produto dominante, no entanto, também são produzidas frações significativas de bio-óleo e uma menor de gás pirolítico. Na pirólise lenta, o bio-óleo produzido apresenta um considerável teor de componentes oxigenados, portanto, recebe menos atenção (devido ao baixo poder calorífico) sendo descartado como resíduo (KABIR e HAMEED, 2017).

Entretanto, diversos estudos apontam que as frações de bio-óleo e do gás pirolítico produzidas na pirólise lenta podem ser utilizadas como fonte de calor no próprio processo, reduzindo o custo de processamento (PARK et al., 2014; DUNNINGAN et al., 2018). Por outro lado, baseado na experiência obtida na produção de bio-óleo através da pirólise rápida catalítica, há um grande interesse no uso de catalisadores para serem utilizados na pirólise lenta de biomassa, uma vez que poderia aumentar o rendimento do biochar, e melhorar a qualidade do bio-óleo produzido. Dessa forma, ambos os produtos (biochar e bio-óleo)

poderiam ser usados como fonte de energia ou como base química para a síntese de outros produtos, melhorando o rendimento deste processo (RUSSELL et al., 2017).

A literatura apresenta diversos trabalhos que abordam o estudo da pirólise térmica lenta de diversas biomassas, porém, há poucos estudos sobre o efeito do uso de catalisadores no processo de pirólise lenta de biomassa. Além disso, vários tipos de catalisadores têm sido estudados, entretanto, o uso de catalisadores alcalinos (óxido de cálcio - CaO e óxido de magnésio - MgO) na pirólise de biomassa apresentam poucos trabalhos na literatura (CASE et al., 2015; CHEN et al., 2017; KABIR e HAMMED 2017). Alguns estudos investigaram o efeito do CaO, e verificaram uma atividade desoxigenante, a qual poderia melhorar as características do bio-óleo, além disso, não sofre desativação por formação de coque, ou seja não perde as características catalíticas, como no caso das zeólitas (CASE et al., 2015; CHEN et al., 2017).

O Brasil apresenta uma matriz energética onde a cana-de-açúcar tem uma participação de 16,4% (ano base 2021) (EPE 2022), este percentual deveria aumentar devido ao melhoramento na sua produtividade. Esta participação alta da cana-de-açúcar na matriz energética brasileira se deve ao grande cultivo, principalmente no estado de São Paulo, para produção do biocombustível etanol. De acordo com o CONAB 2023, a produção de cana-de-açúcar estimada para a safra 2023/24 é de 677,60 milhões de toneladas, um novo recorde, considerando que a moagem de 1 tonelada de cana gera aproximadamente 250 kg de bagaço, haveria uma disponibilidade de 169,40 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar.

O bagaço de cana-de-açúcar gerado nas usinas sucroalcooleiras é aproveitado mediante a combustão direta para cogeração de energia, porém exibe baixos rendimentos (ao redor de 26%) (ADENIYI et al. 2019). Nas usinas sucroalcooleiras não processam todo o bagaço produzido, resultando em problemas no gerenciamento do bagaço de cana-de-açúcar, o qual promove perdas de até 15% da massa devido à deterioração provocada pela ação microbiana, isso prejudica a sua queima (LIMA 2018).

Em virtude da disponibilidade de bagaço de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, um estudo sobre o potencial para produção de biocombustíveis através da sua pirólise mostra-se relevante. Como descrito anteriormente, diversos estudos verificaram que o uso de catalisadores alcalinos na pirólise de biomassa melhora a qualidade do bio-óleo. Referente ao bagaço de cana-de-açúcar, a literatura apresenta alguns estudos sobre pirólise catalítica, porém são escassos os estudos sobre o uso de catalisadores alcalinos. Desta forma, este

trabalho estuda os efeitos dos catalisadores alcalinos nos produtos da pirólise de bagaço de cana de açúcar.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Estudar os efeitos dos catalisadores alcalinos, óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO) sobre os produtos obtidos a partir do processo de pirólise lenta catalítica do bagaço cana-de-açúcar.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização físico-química do bagaço de cana-de-açúcar;
- Executar ensaios de pirólise lenta térmica do bagaço de cana-de-açúcar em diferentes temperaturas;
- Executar ensaios de pirólise lenta catalítica do bagaço de cana-de-açúcar com as diferentes temperaturas e os diferentes catalisadores propostos neste trabalho.
- Avaliar o efeito dos parâmetros do processo (temperatura e teor de catalisador) no rendimento e qualidade dos produtos da pirólise lenta catalítica.
- Caracterizar os produtos obtidos na pirólise lenta térmica e catalítica.

5 CONCLUSÃO

CaO e MgO são catalisadores baratos e de fácil acesso, se comparado aos demais catalisadores, e por meio destes é possível melhorar as propriedades do bio-óleo, o que pode ser visto qualitativamente, por meio da clarificação da cor, para ser utilizado como um biocombustível.

Pode-se observar que os catalisadores têm influência significativa e positiva no bio-óleo, com a ação do catalisador consegue-se aumentar os valores de PCS em todas as condições. O aumento do PCS pode ser devido às reações químicas dos catalisadores em contato com o BCA como a reação de desoxigenação, que retira compostos oxigenados, a reação de desidrogenação, que reduz o hidrogênio, aumentando assim o pH. Sendo o catalisador MgO, em ambas as porcentagens, mais eficiente no quesito poder calorífico. A condição mais vantajosa é a condição catalítica MgO 5% em 300°C, pois o valor obtido tem uma diferença insignificante em relação às outras condições. O valor do pH aumenta mas não significativamente em todas as condições catalíticas, ficando em torno de 2-3, o que não contribui para se utilizar em motores convencionais, por problemas como corrosão. No biochar os catalisadores diminuem o poder calorífico superior.

Já o biochar obtido da condição catalítica não é eficiente para geração de energia, pois possui valores de PCS baixo em relação à condição térmica, porém, poderia ser aproveitado para outras finalidades, devido a este ter alguns componentes do catalisador como o cálcio, permitindo ser utilizado no solo como corretor ou adubo, na fabricação de asfaltos e cimentos, entre outras aplicações. O gás pirolítico tem uma redução muito significativa, isso pode ser devido à maior condensação do bio-óleo e uma menor decomposição da biomassa, o que aumenta o biochar e reduz os gases. O teste de combustão realizado demonstra que o gás pirolítico obtido pode ser utilizado para geração de energia, o que pode tornar o processo menos custoso.

Desta forma, pode-se afirmar que a utilização do catalisador MgO é mais eficiente do que o CaO, em ambas as porcentagens mássicas, a adição desse catalisador aumenta o poder calorífico do bio-óleo, porém não tem efeito significativo no pH do bio-óleo.

REFERÊNCIAS

- ABBASI A. E.; YOZGATLILGIL, A. A study on the effects of catalysts on pyrolysis and combustion characteristics of Turkish lignite in oxy-fuel conditions. **Fuel**, Guildford, v.115, p.841-849, 2014.
- ADENIYI, A. G.; IGHALO, J. O.; ABDULSALAM, A. Modeling of integrated processes for the recovery of the energetic content of sugarcane bagasse. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, Chichester ,v.13, p.1057-1067, 2019.
- BONASSA, G.; SCHNEIDER, L.T.; CANEVER, V. B.; CREMONEZ, P. A.; FRIGO, E.P.; DIETER, J.; TELEKEN, J.G. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v.82, p. 2365-2378, 2018.
- BRIDGWATER, A.V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, V.38, p.68-74, 2012.
- CARVALHO, W.; S. OLIVEIRA, T. J.; CARDOSO, C.; ATAÍDE, C. H. Thermogravimetric analysis and analytical pyrolysis of a variety of lignocellulosic sorghum. **Chemical Engineering Research and Design**, Rugby, v.95, p.337- 345, 2015.
- CASE, P. A.; TRUONG, C.; WHEELER, M. C.; DESISTO, W. J. Calcium-catalyzed pyrolysis of lignocellulosic biomass components. **Bioresource Technology**, Essex, v.192,p.247-252, 2015.
- CHARUSIRI, W.; VITIDSANT, T. Biofuel production via the pyrolysis of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) leaves: characterization of the optimal conditions. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, Lüneburg, v. 10, p. 71-78, 2018.
- CHEN, X.; CHEN, Y.; YANG, H.; CHEN, W.; WANG, X.; CHEN, H. Fast pyrolysis of cotton stalk biomass using calcium oxide. **Bioresource Technology**, Essex, v.233, p.15- 20, 2017.
- CHEN, X.; LI, S.; LIU, Z.; CHEN, Y.; YANG, H.; WANG, X.; CHE, Q.; CHEN, W.; CHEN, H. Pyrolysis characteristics of lignocellulosic biomass components in the presence of CaO. **Bioresource Technology**, Essex, v.287, p.121493, 2019.
- CHIRESHE, F.; COLLARD, F. X; GORGENS, J. F. Production of an upgraded bio- oil with minimal water content by catalytic pyrolysis: optimization and comparison of CaO and MgO performances. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Dalian, v.145, p.104751, 2020.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, 2019.
- DAHAL, R. K.; NOROUZI O. N.; CAMERON. J.; PANDIAN, A.; SHRESTHA, A.; ACHARYA, B.; PK, S.; DUTTA, A. A study on potential recovery of energy and

value-added chemicals from in-situ pyrolysis of bambusa balcooa over basic metal oxides. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Dalian, v.32, p. 623-638, 2020.

DEMIRAL, İ.; ŞENSÖZ, S. Fixed-bed pyrolysis of hazelnut (*Corylus Avellana* L.) bagasse: influence of pyrolysis parameters on product yields energy sources, **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, Philadelphia, v.28, p.1149–1158, 2006.

DICKERSON, T; SORIA J. Catalytic fast pyrolysis: a review, **Energies**, Paris, v. 6, no. 1, p. 514–538, 2013.

DUNNINGAN, L.; ASHMAN, P. J.; ZHANG, X.; KWONG, C.W. Production of biochar from rice husk: particulate emissions from the combustion of raw pyrolysis volatiles. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v.172, p.1639-1645, 2018.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco energético nacional**: relatório ano base 2017-2018. Rio de Janeiro, 2018.

FERREIRA, V.F.; ROCHA, D.R.; SILVA, F.C. Potencialidades e oportunidades na química da sacarose e outros açúcares. **Química Nova**, São Paulo, v.32, p. 623-638, 2009.

FENGEL, D.; WEGENER, G.; Wood and cellulosic chemistry. **New York**, New York, p.189-200, 1991.

GOES, T. **A energia que vem da cana-de-açúcar**. Embrapa, 2009. Disponível em <http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/>. Acesso em: 12 Jan 2014.

GOLLAkota, A.R.K.; KISHORE, N.; GU, S. A review on hydrothermal liquefaction of biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 81, n. 5, p. 1378–1392, 2019. .

HASSAN, H. J; LIM K; HAMEED B. H. Recent progress on biomass co-pyrolysis conversion into high-quality bio-oil. **Bioresour. Technol**, Essex, v. 221, p. 645–655, 2016.

HUBER, G.W.; CORMA, A. Synergies between bio and oil refineries for the production of fuels from biomass. **Angewandte Chemie International Edition**, Weinheim, V.46, p.7184-7201, 2007.

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**, Golden, v.70, p.946-967, 2017.

KIM, E.; GIL, H.; PARK, S.; PARK, J. Bio-oil production from pyrolysis of waste sawdust with catalyst ZSM-5. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Seoul, v.19, p.423-431, 2017.

LEE, J.; KWON, E. E.; PARK, Y. K. Recent advances in the catalytic pyrolysis of microalgae. **Catalysis Today**, Amsterdam, in press 2019.

LEMOS, J.L.S. Estudo da produção de xilanases por *aspergillus awamori* em bagaço de cana. 2001. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

LI, B.; YANG, H.; LIU, B.; WEI, L.; SHAO, J.; CHEN, H. Influence of addition of a high amount of calcium oxide on the yields of pyrolysis products and noncondensable gas evolving during corn stalk pyrolysis. **Energy & Fuels**, Washington, v.31, p.13705-13712, 2017.

LIMA, C. J. M. Análise de propriedades térmicas de briquetes de bagaço de cana- de-açúcar. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2018.

LIU, C.; WANG, H.; KARIM, A. M.; SUN, J.; WANG, Y. Catalytic fast pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Chemical Society Reviews**, London, v. 43, p. 7466-7468, 2014.

LUO, G.; RESENDE, F. L. P. In-situ and ex-situ upgrading of pyrolysis vapors from beetle-killed trees. **Fuel**, Guildford, v. 166, p. 367–375, 2016.

MIRANDA, N. T; MOTTA I. L; MACIEL R. F; MACIEL M. R. W. Sugarcane bagasse pyrolysis: a review of operating conditions and products properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 149, p. 111394, 2021.

NAVARRO, R. M.; GUIL-LOPEZ, R.; FIERRO, J. L. G.; MOTA, N.; JIMÉNEZ, S.; PIZARRO, P.; CORONADO, J. M.; SERRANO, D. P. Catalytic fast pyrolysis of biomass over Mg-Al mixed oxides derived from hydrotalcite-like precursors: Influence of Mg/Al ratio. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Dalian, v. 134, p. 362–370, 2018.

OUEDRAOGO, A. S; BHOI, P. R; GERDMANN, C; PATIL, V; ADHIKARI, S. Improving hydrocarbons and phenols in bio-oil through catalytic pyrolysis of pine sawdust. **Journal of the Energy Institute**, London, v. 99, pages 9-20, 2021.

PENG, Y.; WU, S. Fast pyrolysis characteristics of sugarcane bagasse hemicelluloses cellulose. **Chemistry and Technology**, New York, V.45, p.606-612, 2011.

RUSSELL, S. H.; TURRION-GOMES, J. L.; MEREDITH, W.; LANGSTON, P.; SNAPE, C.E. Increased charcoal yield and production of lighter oils from the slow pyrolysis of biomass. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Dalian, v.124, p.536-541, 2017.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E.A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v.15, p.2262–2289, 2011.

SANTOS, K. G.; LIRA, T. S.; GIANESELLA, M.; LOBATO, F. S.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. Bagasse pyrolysis: a comparative study of kinetic models. **Chemical Engineering Communications**, Philadelphia, v. 199, n. 1, p. 109–121, 2012.

SALIBA, E.O.S.; RODRIGUEZ, N.M.; MORAIS, S.A.L.; PILÓ-VELOSO, D. Ligninas- métodos de obtenção e caracterização química. **Ciência Rural**, Santa Maria, V.31, p.917-928, 2001.

SELS, B.F.; De VOS, D.E.; JACOBS, P. A. Hydrotalcite-like anionic clays in catalytic organic reactions. **Catalysis Reviews - Science and Engineering**, New York, V.43, p.443-488, 2001.

SILVA, V.S.; GARCIA, C.A.; SILVA, C.M. O destino do bagaço da cana-de-açúcar: um estudo a partir das agroindústrias sucroalcooleiras do Paraná. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, Maringá, V.3, p.59-76, 2010.

STOCKER, M. Biofuels and biomass-to-liquid fuels in the biorefinery: Catalytic conversion of lignocellulosic biomass using porous materials. **Angewandte Chemie International Edition**, Weinheim, v. 47, no. 48, p. 9200–9211, 2008.

TAN, X.; LIU, Y.; ZENG, G.; WANG, X.; HUA, X.; GU, Y.; YANG, Z. Application of biochar for the removal of pollutants from aqueous solutions. **Chemosphere**, Oxford, v.125, p.70-85, 2015.

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**, Essex, v.188, p.258-264, 2015.

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v.55, p.467-481, 2016.

XIU, S.; SHAHBAZI, A. Bio-oil production and upgrading research: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 16, no. 7, p. 4406–4414, 2012.

YANG, Z.; KUMAR, A.; APBLET, A. Integration of biomass catalytic pyrolysis and methane aromatization over Mo/HZSM-5 catalysts. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Dalian, v. 120, p.484–492, 2016.

YILDIZ, G.; RONSSE, F.; DUREN, V. R.; PRINS, W. Challenges in the design and operation of process for catalytic fast pyrolysis of woody biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 57, p. 1596–1610, 2016.

WILSON, F.; TREMAIN, P.; MOGHTADERI, B. Characterization of biochars derived from pyrolysis of biomass and calcium oxide mixtures. **Energy & Fuels**, Washington, v.31, p.4167-4177, 2018.