

“

# Caracterização e avaliação do talo de girassol e sabugo de milho para produção de gás de síntese

- I Hortência Elucielly Pereira **Santana**  
Universidade Federal de Sergipe - UFS

- I Tammires Lorena Costa **Santana**  
Universidade Federal de Sergipe - UFS

- I Rafael Mota de Aragão **Lima**  
Universidade Federal de Sergipe - UFS

- I Daniel Pereira **Silva**  
Universidade Federal de Sergipe - UFS

- I Isabelli Pereira **Silva**  
Universidade Federal de Sergipe - UFS

- I Denise Santos **Ruzene**  
Universidade Federal de Sergipe - UFS

# RESUMO

A biomassa constitui um dos componentes essenciais na transição do atual sistema energético de elevada emissão de carbono para um com baixa emissão de carbono. Por meio do processo de gaseificação é possível converter biomassa em um combustível gasoso rico em hidrogênio (gás de síntese) alternativo aos derivados fósseis, sendo uma maneira de menor custo e eficiente de aproveitar os abundantes resíduos gerados na agroindústria ao passo que contribui com a formação de um cenário ambiental mais favorável. Entretanto, apesar dessa tecnologia ser muito versátil quanto ao material de alimentação, a composição química vegetal (majoritariamente formado por celulose, hemicelulose e lignina) causa diferentes tipos de influência nos parâmetros operacionais e na formação dos produtos. Objetivo: o estudo teve como objetivo avaliar, em termos de composição química, os potenciais de dois resíduos agroindustriais provenientes das culturas de girassol (talo) e do milho (sabugo), e os possíveis ajustes para uma eficiente conversão em gás de síntese. Métodos: para realizar a caracterização química das biomassas, as amostras *in natura* previamente secas e moídas, foram hidrolisadas em  $H_2SO_4$  72% v/v com o intuito de fracionar os componentes lignocelulósicos, os quais posteriormente foram quantificados por análise gravimétrica, espectrofotometria em UV-Visível e cromatografia líquida de alta eficiência. Resultados: foram obtidos respectivamente para o talo de girassol e sabugo de milho: 33,81% e 26,51% de celulose, 9,93% e 25,82% de hemicelulose e 20,66% e 34,16% de lignina. Conclusão: analisando os dados tem-se que apesar de ambos os materiais possuírem potencial para produzir combustíveis com bons teores de  $H_2$  e CO, podem gerar consideráveis quantidades de alcatrão e, portanto, torna-se necessário um controle adequado de parâmetros de operação, principalmente de temperatura, que baseada em outros trabalhos, se mostrou um dos mais influentes no processo, e também de parâmetros relacionados a mecanismos que auxiliem na redução de formação de impurezas.

**Palavras-chave:** Biomassa Lignocelulósica, Caracterização Química, Gaseificação.

## INTRODUÇÃO

Desde meados do século XX o consumo de combustíveis fósseis para atender a demanda energética mundial aumentou intensamente, com valores em 2017 correspondente a oito vezes maior que o registrado em 1950 (RITCHIE e ROSEN, 2017). Por serem recursos sujeitos a escassez e que acarretam problemas ambientais, principalmente relacionados a emissão de gases do efeito estufa, tem-se a urgência de promover um sistema energético mais sustentável e que possa frear os problemas decorrentes das severas mudanças climáticas (FOSTER e ELZINGA, 2013; IEA, 2020a).

As energias renováveis, tais como solar, eólica, hidrelétrica e biomassa, são as principais alternativas para substituir as fontes tradicionais, pois possuem baixa emissão de carbono, são resilientes e ainda contribuem com a expansão do acesso à energia em países não desenvolvidos (IRENA, 2018; EPE, 2018; IEA, 2020a). Entretanto, apesar dos recentes avanços quanto a sua integração, o potencial dos recursos renováveis ainda não é devidamente aproveitado para que futuramente possa, de fato, alcançar um cenário que supra a necessidade energética da população sem acarretar em prejuízos ao meio ambiente (IRENA, 2018, 2020). Além disso, mais de 60% da energia renovável atual depende de certas circunstâncias de precipitação de chuvas, ventos ou temperaturas, dificultando a geração nos locais que não possuem condições climáticas adequadas (IEA, 2020b). Assim, é evidente a necessidade de ampliar o investimento em políticas, pesquisas e tecnologias que garantam custos mais atrativos e viabilizem a diversificação na implementação das fontes alternativas (IRENA, 2020).

Dentre as energias renováveis, a bioenergia é uma das mais promissoras e com maior potencial de crescimento para os próximos anos, sendo considerada um dos componentes chave na transição do panorama energético global (ANEEL, 2008; IEA, 2020c). De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2020d), a biomassa sozinha consegue contribuir com uma demanda final de energia cinco vezes maior que a solar e eólica juntas, e embora seu uso para esta finalidade não seja uma novidade, foram nas últimas décadas que ocorreram importantes avanços na produção de bioenergia mais eficientemente que a via tradicional por queima direta (WEC, 2013; EPE, 2018). Outro ponto favorável à biomassa é que, por constituir de qualquer matéria orgânica vegetal ou animal, uma vasta variedade de resíduos pode ser utilizada para este propósito, especialmente os agrícolas, florestais e industriais (ANEEL, 2008; SIKARWAR *et al.*, 2016).

As culturas agrícolas são responsáveis pelo acúmulo de toneladas de resíduos, como palhas, cascas e talos que são deixados após as colheitas, e que historicamente são apenas usados para a alimentação animal, deixados nos campos ou queimados (CHERUBIN *et al.*, 2018; HOFSTRAND *et al.*, 2019; TERI, 2019). Contudo, por ser uma biomassa de

fácil disponibilidade e baixo custo, existem vias tecnológicas que buscam aproveitar do seu potencial lignocelulósico, como a exemplo, da gaseificação que converte a biomassa em uma mistura gasosa rica em hidrogênio (gás de síntese), a partir da qual se pode produzir diversas formas de energias e combustíveis (WEC, 2013; EPE, 2018).

A gaseificação tem se destacado por ser um processo flexível em vários aspectos: design e escala do reator, tipo de agente oxidante, temperatura, pressão, vazões de entrada e saída, e, principalmente, quanto a origem do material, dado que o conteúdo lignocelulósico não tem frações iguais para todas as espécies (WEC, 2013; TERI, 2019). Todavia, um dos desafios enfrentados na implantação desta rota é que no decorrer do processamento além do produto almejado há também a formação de cinzas e outras impurezas, as quais prejudicam o rendimento, provocam incrustações no equipamento e desativação dos catalisadores. Em razão disto, inúmeros estudos são voltados a analisar o comportamento dos parâmetros de operação conforme as particularidades da alimentação de interesse, para então encontrar a relação ótima e evitar compostos e problemas indesejáveis (RAKESH e DASAPPA, 2018; CAO *et al.*, 2020).

Assim, dada a necessidade de impulsionar a integração das energias renováveis e a abundância de biomassa vegetal subaproveitada, especialmente no Brasil com resíduos decorrentes dos seus mais de 60 milhões de hectares de área cultivada, este estudo tem como ponto de partida a caracterização de componentes lignocelulósicos de importantes resíduos agroindustriais, para que por meio da sua composição química possa avaliar seus potenciais e possíveis comportamentos durante a conversão em gás de síntese (MIRANDA, 2018). As biomassas selecionadas foram, o sabugo de milho, uma vez que o milho é a segunda maior safra de grãos do Brasil e a primeira no ranking mundial, chegando a uma produção de aproximadamente 1 bilhão de toneladas por ano, do qual estima-se que a cada 100 kg de espigas produzidas em média 13 kg são de sabugo (HALVORSON e JOHNSON, 2009; USDA, 2020), e o talo de girassol, que embora conte com uma produção menos expressiva, está entre as três maiores culturas de oleaginosas do globo, e possui uma razão consideravelmente elevada (2,2 – 3,2) de resíduo gerado por semente produzida, significando que para os seus quase 55 milhões de toneladas de sementes colhidas mundialmente em 2019/20, cerca de 175 milhões de toneladas de resíduos podem ter sido produzidos em conjunto (SCARLAT; MARTINOV; DALLEMAND, 2010; USDA, 2020).

## OBJETIVO

Avaliar a composição química lignocelulósica dos resíduos de talo de girassol e sabugo de milho, ambos *in natura*, quanto ao potencial para produção de gás de síntese.

# METODOLOGIA

## Materiais

Para realizar as análises propostas nesse trabalho foram utilizadas amostras *in natura* obtidas em áreas rurais do estado de Sergipe (Brasil).

Como preparo inicial, o sabugo de milho foi seco a 45°C em estufa de ar circulante por 24h, com umidade máxima de 10%; enquanto o talo de girassol foi seco a temperatura ambiente até atingir cerca de 8% de umidade. As amostras foram cortadas em pequenos pedaços, moídas em moinhos de facas, separadas por granulometria em uma série de peneiras -20/+80 mesh e seguidamente estocadas em pequenas porções.

### Caracterização sabugo de milho

A caracterização química do sabugo de milho foi realizada com base no procedimento modificado de Klason (ASTM, 1956) e reportado por Gouveia, Nascimento e Souto-Maior (2009). Primeiramente, amostras de 2,0 g foram tratadas com 10 mL de ácido sulfúrico 72% a 45°C por 1 h, em seguida, autoclavadas a 121°C por 30 min, para completa hidrólise dos oligômeros. Após retirados da autoclave, os frascos foram resfriados à temperatura ambiente, filtrados, completados com água destilada em um balão volumétrico de 500 mL e guardados para as posteriores análises.

A quantidade de lignina insolúvel foi determinada pelo material retido no papel de filtro, depois de lavado com água destilada e seco em estufa a 110°C. A lignina solúvel em meio ácido foi determinada pela medida da absorbância a 280 nm em espectrofotômetro UV/Visível. A soma das duas ligninas equivale a fração total.

Para a determinação de carboidratos e ácidos orgânicos, o hidrolisado ácido foi analisado em um cromatógrafo líquido de alta eficiência (CLAE) com detector de índice de refração e utilizando para análise uma coluna Biorad Aminex HPX-87H, equipada com uma pré-coluna. Como fase móvel foi utilizado  $H_2SO_4$  0,005 mol/L com fluxo de 0,6 mL/min, a 45°C. As concentrações foram definidas a partir das curvas de calibração obtidas com as soluções padrões dos compostos puros em diferentes concentrações (GOUVEIA; NASCIMENTO; SOUTO-MAIOR, 2009).

### Caracterização talo de girassol

Nas análises das amostras dos talos de girassol foram utilizados os procedimentos desenvolvidos pelo National Renewable Energy Laboratory – NREL (SLUITER *et al.*, 2012). Amostras de 0,3 g dos materiais foram colocadas em tubos de ensaio juntamente com 3 mL

de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  72%, que foram imersos em banho termostático a 30°C por 60 min. Em seguida, o conteúdo dos tubos foi transferido para *Elermeyers*, onde adicionou-se água destilada com finalidade de reduzir a concentração de ácido para 4%, e levados para autoclave por 1 h a 121°C. Após o procedimento, os tubos foram resfriados à temperatura ambiente e a mistura filtrada e armazenada.

A lignina insolúvel foi determinada pela massa do material retido na filtração após ser lavado com água destilada e seco 105°C por 24 h. Imediatamente após a hidrólise, a lignina solúvel foi aferida pela medida de absorbância em espectrofotômetro UV/Visível, salientando-se que cada amostra foi diluída para assegurar um valor de absorbância entre 0,7 e 1,0.

Para a quantificação dos carboidratos e ácidos orgânicos, alíquotas do conteúdo hidrolisado, após neutralizadas com carbonato de cálcio a pH entre 5-6, foram injetadas em um cromatógrafo líquido de alta eficiência (CLAE) equipado com detector de índice de refração com uma coluna Supelcogel – Pb, 30 cm x 7,8 mm, partícula 9 µm, e pré-coluna. A fase móvel empregada foi água deionizada com fluxo de 0,5 mL/min, a 85°C.

## RESULTADOS

Os resultados da caracterização química das biomassas lignocelulósicas estão destacados na Tabela 1. As composições foram determinadas em termos de celulose (correspondendo a glicose); hemicelulose (como a soma da xilose, galactose, arabinose, manose e grupo acetil); e lignina total (como soma das porções insolúveis e solúveis em ácido).

**Tabela 1.** Composição química do sabugo de milho e talo de girassol *in natura*.

Composição	Talo de girassol	Sabugo de milho
Celulose (%)	33,81 ± 1,1	26,51 ± 0,7
Hemicelulose (%)	9,93 ± 0,4	25,82 ± 0,5
Lignina total (%)	20,66 ± 1,3	34,16 ± 1,2
Lignina Insolúvel em ácido (%)	20,48 ± 1,2	23,35 ± 1,1
Lignina Solúvel em ácido (%)	0,18 ± 0,1	10,84 ± 0,8
Total	64,41	86,52

Assim, tem-se que no talo de girassol os sólidos relacionados a fração lignocelulósica correspondem a 64,41% da massa, sendo a maior fração a de celulose com 33,81 ± 1,1 %, seguido da lignina com 20,66 ± 1,3 %. Para o sabugo de milho, os sólidos relacionados a fração lignocelulósica correspondente as amostras utilizadas representam cerca de 86,52% e a relação dos componentes é invertida, com o teor de lignina (34,16 ± 1,2 %) superior ao de celulose (26,51 ± 0,7 %). Ambas as biomassas lignocelulósicas apresentaram menor concentração de hemicelulose, de 25,82 ± 0,5 % e 9,93 ± 0,4 %, para o sabugo de milho e talo de girassol, respectivamente.

Os valores obtidos nesse estudo corroboram com a média geral dos teores de lignina (10-25%), hemicelulose (15-35%) e celulose (30-45%) reportados na literatura para os resíduos lignocelulósicos, com exceção do teor de hemicelulose ( $9,93 \pm 0,4\%$ ) no talo de girassol e de lignina ( $34,16 \pm 1,2\%$ ) no sabugo de milho (ANWAR; GULFRAZ; IRSHAD, 2014; BARUAH *et al.*, 2018; PASSOTH e SANDGREN, 2019; AWOYALE; LOKHAT; ELOKA-EBOKA, 2019). Esta última também destoa das concentrações encontradas para a mesma biomassa em outros trabalhos publicados, cuja variação está entre 11,9% - 22,1% (RAJ *et al.* 2015; TAKADA *et al.*, 2018; AWOYALE; LOKHAT; ELOKA-EBOKA, 2019; KUCHARSKA *et al.*, 2020; MAFA *et al.*, 2020). Tais diferenças podem ser explicadas pelas diferentes regiões e condições de cultivo (PEREIRA *et al.*, 2016).

A composição do talo de girassol foi similar as relatadas por He *et al.* (2016) para a lignina (23,1%) e celulose (35,8%), e inferior à de hemicelulose (21,8%). Entretanto, é próxima ao teor de 9,7% encontrado por YANIK *et al.* (2008) e BALLICE *et al.* (2020).

## DISCUSSÃO

O gás de síntese, objeto de interesse da gaseificação, é uma mistura gasosa idealmente constituída em grande parte por CO e H<sub>2</sub>, e em menor quantidade por CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Entretanto, ao final do processo de conversão da biomassa também há a formação de compostos, sobretudo hidrocarbonetos complexos, que são considerados impurezas e cuja quantidade e espécie tem relação direta com a composição da alimentação (HANCHATE *et al.*, 2020).

De acordo com a literatura científica, cerca de 90% da matéria seca da biomassa é composta por celulose, hemicelulose e lignina, e o restante são cinzas e extractivos (NANDA *et al.*, 2014). Contudo, a proporção em que ocorre a composição química não é fixa e varia a depender de fatores como a origem do vegetal, a fase de crescimento da planta, condições de cultivo e até mesmo das diferentes partes da mesma matéria (NANDA *et al.*, 2014; SITUMORANGE *et al.*, 2020). Essa variação é um dos aspectos que mais causam impacto no processo de gaseificação, isso porque cada componente lignocelulósico possui estabilidade térmica diferente, e estruturas com ligações químicas e grupos funcionais característicos que são responsáveis pelos diversos tipos de influência durante as reações e composição final dos produtos (SIVANSANGAR *et al.*, 2015; KUMAR; UPADHYAY; MISHRA, 2019; ZHANG e PANG, 2019).

A celulose é um polímero de cadeia longa formado por ligações  $\beta$ -1,4-glicosídicas, com estrutura fibrosa e diversas ligações de hidrogênio que fazem desse componente insolúvel na maioria dos solventes (NANDA *et al.*, 2014). Devido às ligações C-O proveniente da presença dos grupos carboxil e carbonil, a celulose tem uma tendência a formar gás de síntese com maior teor de CO e CO<sub>2</sub> (ZHANG e PANG, 2019). A hemicelulose, por sua vez, é uma

mistura de polissacarídeos (pentoses e hexoses) de estrutura amorfa, e com massa molar e grau de polimerização menores que a celulose e lignina (NANDA *et al.*, 2014). Portanto, são mais facilmente hidrolisadas e requerem condições menos intensas na gaseificação (OKOLIE *et al.*, 2020). Em relação a lignina, esta é uma macromolécula de elevada massa molar composta principalmente por unidades de fenilpropano, possuindo uma estrutura amorfa e com inúmeras ligações do tipo C-O-C e C-C, que a torna difícil de decompor, necessitando de elevadas temperaturas e mais tempo de residência (PRASAD; SUBBARAO; SUBRAHMANYAM, 2015; ZHANG e PANG, 2019).

Durante a gaseificação a celulose e a hemicelulose se decompõem em açúcares simples como glicose e frutose, enquanto a lignina dissocia-se em compostos fenólicos, formaldeídos e grupos funcionais que se interligam para formar longas cadeias poliméricas. O caráter aromático desta última é apontado como principal responsável pelo alcatrão, que por sua estrutura complexa e difícil remoção, é considerado um produto indesejável e um dos maiores empecilhos na produção de gás de síntese, pois não só interfere na qualidade do combustível como também causa problemas durante a operação (SIKARWAR *et al.*, 2016; REN *et al.*, 2020).

Nos experimentos desenvolvidos por Zhou *et al.* (2018) e Zhang e Pang (2019) foi observado que a presença de moléculas oxigenadas (como cetonas e hetetocíclicos) no alcatrão são resultantes da celulose, ao passo que os mais complexos (fenóis, tolueno, nafataleno e benzeno) derivam principalmente da lignina. Também foi observado que o alcatrão tende a aumentar significativamente em quantidade e alterar sua estrutura como resposta da elevação até certa temperatura, promovendo a conversão dos compostos primários em secundário e terciários (hidrocarbonetos aromáticos policíclicos). Desta forma, fica evidente que apesar de todos os componentes lignocelulósicos contribuírem para formação de alcatrão, bem como a interferência de outros parâmetros, a lignina é a responsável em propiciar uma fração maior além de seu produto decorrente ser mais termoestável e com maior teor de aromáticos (YU *et al.*, 2014; KUMAR; UPADHYAY; MISHRA, 2019; ZHANG e PANG, 2019).

Nos resíduos avaliados nesse estudo, o sabugo de milho obteve a lignina como componente predominante e com quantidade relativamente alta (34,16%) em comparação a média geral dos materiais lignocelulósicos (10-25%), no entanto é um resultado esperado devido a sua rigidez (REDDY e VINU, 2018). Este alto teor de lignina é propenso a formar um gás com mais CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>, como também contribuir com produção e acúmulo de hidrocarbonetos condensáveis e com elevada massa molar (alcatrão e resíduos de carbono) (ZHANG e PANG, 2019). Essa tendência foi observada durante os processos de gaseificação realizados por Tian *et al.* (2017), Liu *et al.* (2018), Yu, Wu e Chen (2018), Cabuk *et al.* (2020) e Valin *et al.* (2020), em que biomassas ricas em lignina foram as principais responsáveis pelos resíduos

sólidos, como também alcançaram as maiores frações de hidrogênio em comparação a outras ricas em celulose e/ou hemicelulose. Vale ressaltar que os experimentos foram conduzidos em temperaturas acima de 800°C, uma vez que em trabalhos realizados com temperaturas entre 350°C-600°C os resíduos de lignina tiveram um menor rendimento de produto gassoso e de conversão de carbono (MANDENOGLU *et al.*, 2016; OKOLIE *et al.*, 2020; SUN *et al.*, 2020). O sabugo de milho também contém uma porção significativa de hemicelulose (25,82%), que segundo evidenciado por Gökkaya *et al.* (2020) e Okolie *et al.* (2020) tende a ter bons rendimentos de gás com poucos traços de contaminantes.

No talo de girassol os componentes decresceram na ordem celulose > lignina > hemicelulose. Conforme anteriormente mencionado, devido a maior concentração de celulose, o gás de síntese desse resíduo poderá ter um caráter mais oxigenado. Barneto *et al.* (2010) ao compararem a composição final do gás proveniente da gaseificação de diferentes biomassas constataram que as amostras com maior teor de celulose também tiveram maior fração de CO e CO<sub>2</sub>. Essa mesma observação foi vista mais recentemente por Okolie *et al.* (2020) ao compararem o produto final da conversão da lignina, celulose e hemicelulose.

Assim como no sabugo de milho, pode-se esperar que o combustível do talo de girassol contenha uma quantidade considerável de impurezas, uma vez que os dois principais componentes (celulose e lignina) que influenciam na formação do alcatrão representam 54,47% de um total de 75,13% de matéria seca lignocelulósica. Entretanto, ainda que as proporções dos componentes lignocelulósicos sejam cruciais para definir a estrutura e quantidade de substâncias indesejadas, há outros parâmetros de operação (temperatura, pressão, fluxo de agente oxidante, tempo de residência e umidade inicial) que podem ser ajustados a determinada matéria-prima para que a operação seja otimizada e, consequentemente, reduza os sólidos gerados e obtenha-se bom aproveitamento do potencial energético dos resíduos.

Dentre os parâmetros citados, a temperatura requer uma maior atenção durante o processo, visto que demonstrou ser determinante no efeito que a composição da biomassa provoca no gás de síntese. Baseado no conhecimento que a decomposição da hemicelulose ocorre entre 200-450°C, da celulose 300-500°C e da lignina com pico máximo entre 500-800°C, nas matérias-primas com predominância de lignina e celulose (como as desse estudo) se o processo ocorrer em baixas temperaturas possivelmente terá um rendimento baixo de gás, por outro lado, temperaturas muito altas ocasionam em alcatrão com estruturas mais complexas de difícil separação (MONIR *et al.*, 2018; NAM *et al.*, 2019; KUMAR; UPADHYAY; MISHRA, 2019; ZONG *et al.*, 2020).

Em publicações recentes na literatura científica autores investigaram métodos eficientes para amenizar esses inconvenientes, como por exemplo o uso de resíduo sólido de carbono da madeira como catalisador testado por Fuentes-Cano *et al.* (2020), que ao contrário dos

tradicionais são resistentes a formação de substâncias indesejáveis, mais baratos e converte principalmente os compostos mais pesados. Ou ainda procedimentos que tratam o gás após produção, como Dafiqurrohman *et al.* (2020) que removeram boa parte de alcatrão utilizando um condensador combinado com filtro em leito fixo com casca de arroz.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base na caracterização das biomassas desse estudo e no comportamento dos componentes lignocelulósicos discutidos com base nas observações publicadas na literatura científica, entende-se que os resíduos selecionados (talo de girassol e sabugo de milho) possuem bom potencial como matéria-prima para produção de gás de síntese via gaseificação, sobretudo considerando-se que são originados de duas das maiores *commodities* agrícolas do mundo, e, portanto, disponíveis em larga escala. Porém deve-se ressaltar que, devido a presença de lignina e celulose em predominância, o controle na temperatura de processo é fundamental para otimizar o rendimento da fração gasosa e não favorecer a produção de alcatrão e sólidos durante a decomposição desses componentes.

## ■ REFERÊNCIAS

1. ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica, 3<sup>a</sup> ed. Parte II – Fontes Renováveis, 2008. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par2\\_cap4.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf). Acesso em: dezembro de 2020.
2. ANWAR, Zahid; GULFRAZ, Muhammad; IRSYAD, Muhammad. Agro-industrial lignocellulosic biomass a key to unlock the future bio-energy: a brief review. **Journal of Radiation Research and Applied Sciences**, v. 7, n. 2, p. 163-173, 2014. Doi: 10.1016/j.jrras.2014.02.003
3. ASTM, Methods. Standard test methods for lignin in wood, D 271-48, 1956.
4. AWOYALE, A. A.; LOKHAT, D.; ELOKA-EBOKA, A. C. Experimental characterization of selected Nigerian lignocellulosic biomasses in bioethanol production. **International Journal of Ambient Energy**, p. 1-9, 2019. Doi: 10.1080/01430750.2019.1594375
5. BALLICE, Levent *et al.* Determination of Pyrolysis Kinetics of Cellulose and Lignin Fractions Isolated from Selected Turkish Biomasses. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 2020. Doi: 10.1007/s13369-020-04594-4
6. BARUAH, Julie *et al.* Recent trends in the pretreatment of lignocellulosic biomass for value-added products. **Frontiers in Energy Research**, v. 6, p. 141, 2018. Doi: 10.3389/fenrg.2018.00141
7. BARNETO, Agustín García *et al.* Kinetic study on the thermal degradation of a biomass and its compost: Composting effect on hydrogen production. **Fuel**, v. 89, n. 2, p. 462-473, 2010. Doi: 10.1016/j.fuel.2009.09.024

8. CABUK, Busra *et al.* Effect of fuel blend composition on hydrogen yield in co-gasification of coal and non-woody biomass. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 5, p. 3435-3443, 2020. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.02.130
9. CAO, Leichang *et al.* Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects. **Environmental Research**, p. 109547, 2020. Doi: 10.1016/j.envres.2020.109547
10. CHERUBIN, Maurício Roberto *et al.* Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. **Scientia Agricola**, v. 75, n. 3, p. 255-272, 2018. Doi: 10.1590/1678-992X-2016-0459
11. DAFIQUROHMAN, Hafif *et al.* Tar reduction using an indirect water condenser and rice straw filter after biomass gasification. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 21, p. 100696, 2020. Doi: 10.1016/j.csite.2020.100696
12. EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Papel da Biomassa na Expansão da Geração de Energia Elétrica. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Biomassa>. Acesso em: dezembro de 2020.
13. FOSTER, Scott; ELZINGA, David. The role of fossil fuels in a sustainable energy system. **UN Chronicle**, v. 52, n. 3, p. 17-19, 2013. Disponível em: <https://www.un-ilibrary.org/content/journals/15643913/52/3/6/read>. Acesso em: dezembro de 2020.
14. FUENTES-CANO, D. *et al.* Tar conversion of biomass syngas in a downstream char bed. **Fuel processing technology**, v. 199, p. 106271, 2020. Doi: 10.1016/j.fuproc.2019.106271
15. GÖKKAYA, Dilek Selvi *et al.* Hydrothermal Gasification of the Isolated Hemicellulose and Sawdust of the White Poplar (*Populus alba L.*). **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 162, p. 104846, 2020. Doi: 10.1016/j.supflu.2020.104846
16. GOUVEIA, Ester Ribeiro; NASCIMENTO, Renata Trajano; SOUTO-MAIOR, Ana Maria. Validação de metodologia para a caracterização química de bagaço de cana-de-açúcar. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 1500-1503, 2009. Disponível em: [http://static.sites.sq.org.br/quimicanova.sq.org.br/pdf/Vol32No6\\_1500\\_25-AR08401.pdf](http://static.sites.sq.org.br/quimicanova.sq.org.br/pdf/Vol32No6_1500_25-AR08401.pdf). Acesso em: dezembro de 2020.
17. HALVORSON, Ardell D.; JOHNSON, Jane MF. Corn cob characteristics in irrigated central Great Plains studies. **Agronomy Journal**, v. 101, n. 2, p. 390-399, 2009. Doi: 10.2134/agronj2008.0142x
18. HANCHATE, Naresh *et al.* Biomass Gasification using Dual Fluidized Bed Gasification Systems: A Review. **Journal of Cleaner Production**, v. 280, n. part 1, p. 123-148, 2020. Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123148
19. HE, Xin-fu *et al.* Characterization and pyrolysis behaviors of sunflower stalk and its hydrolysis residue. **Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering**, v. 11, n. 5, p. 803-811, 2016. Doi: 10.1002/apj.2015
20. HOFSTRAND, D. Crop residue—a valuable resource. **AgMRC Renewable Energy Newsletter**. 2019. Disponível em: [https://www.agmrc.org/media/newsletters/AgMRC\\_Oct\\_2009PDF\\_6D54018AD757E\\_F400F8A4F4C17.pdf](https://www.agmrc.org/media/newsletters/AgMRC_Oct_2009PDF_6D54018AD757E_F400F8A4F4C17.pdf). Acesso em: dezembro de 2020.

21. IEA – International Energy Agency. Renewables 2020 - Analysis and forecast to 2025. 2020a. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/4234>. Acesso em: dezembro de 2020.
22. IEA – International Energy Agency. Global Energy Review 2020: The impacts of the Covid-19 crisis on global energy demand and CO<sub>2</sub> emissions. 2020b. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/2995>. Acesso em: dezembro de 2020.
23. IEA – International Energy Agency. Technology Roadmap Delivering Sustainable Bioenergy. 2020c. Disponível em: <https://webstore.iea.org/download/direct/4234>. Acesso em: dezembro de 2020.
24. IEA – International Energy Agency. Bioenergy. 2020d. Disponível em: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/bioenergy>. Acesso em: dezembro de 2020.
25. IRENA. International Renewable Energy Agency. Power system flexibility for the energy transition Part 1: overview for policy makers. 2018. Disponível em: [file:///C:/Users/ajsc0/Downloads/IRENA\\_Power\\_system\\_flexibility\\_1\\_2018.pdf](file:///C:/Users/ajsc0/Downloads/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf) Acesso em: dezembro de 2020.
26. IRENA - International Renewable Energy Agency. Reduce: Non-bio renewables. 2020. Disponível em: [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/CCC\\_02\\_Non-bio\\_Renewables\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/CCC_02_Non-bio_Renewables_2020.pdf) Acesso em: dezembro de 2020.
27. KUCHARSKA, Karolina *et al.* Influence of alkaline and oxidative pre-treatment of waste corn cobs on biohydrogen generation efficiency via dark fermentation. **Biomass and Bioenergy**, v. 141, p. 105691, 2020. Doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105691
28. KUMAR, Mohit; UPADHYAY, S. N.; MISHRA, P. K. A comparative study of thermochemical characteristics of lignocellulosic biomasses. **Bioresource Technology Reports**, v. 8, p. 100186, 2019. Doi: 10.1016/j.biteb.2019.100186
29. LIU, Junxu *et al.* Production of high-pure hydrogen by an integrated catalytic process: Comparison of different lignocellulosic biomasses and three major components. **Fuel**, v. 226, p. 322-330, 2018. Doi: 10.1016/j.fuel.2018.04.026
30. MADENOĞLU, Tülay Güngören *et al.* Hydrothermal gasification of biomass model compounds (cellulose and lignin alkali) and model mixtures. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 115, p. 79-85, 2016. Doi: 10.1016/j.supflu.2016.04.017
31. MAFA, Mpho *et al.* The effects of alkaline pretreatment on agricultural biomasses (corn cob and sweet sorghum bagasse) and their hydrolysis by a termite-derived enzyme cocktail. **Agronomy**, v. 10, n. 8, p. 1211, 2020. Doi: 10.3390/agronomy10081211
32. MIRANDA, E. E. de. Potência agrícola e ambiental: áreas cultivadas no Brasil e no mundo. **Rev. Agroanalysis**. São Paulo – SP, v. 38, n. 2, p. 25 – 27, 2018. Disponível em: <http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/agroanalysis/article/download/77453/74223>. Acesso em: dezembro de 2020.
33. MONIR, Minhaj Uddin *et al.* Gasification of lignocellulosic biomass to produce syngas in a 50 kW downdraft reactor. **Biomass and Bioenergy**, v. 119, p. 335-345, 2018. Doi: 10.1016/j.biombioe.2018.10.006
34. NAM, Hoseok *et al.* Biomass gasification with high temperature heat and economic assessment of fusion-biomass hybrid system. **Fusion Engineering and Design**, v. 146, p. 1838-1842, 2019. Doi: 10.1016/j.fusengdes.2019.03.047

35. NANDA, Sonil *et al.* Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels. **Bio-mass Conversion and Biorefinery**, v. 4, n. 2, p. 157-191, 2014. Doi: 10.1007/s13399-013-0097-z
36. OKOLIE, Jude A. *et al.* Optimization and modeling of process parameters during hydrothermal gasification of biomass model compounds to generate hydrogen-rich gas products. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 45, n. 36, p. 18275-18288, 2020. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.05.132
37. PASSOTH, Volkmar; SANDGREN, Mats. Biofuel production from straw hydrolysates: current achievements and perspectives. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 103, n. 13, p. 5105-5116, 2019. Doi: 10.1007/s00253-019-09863-3
38. PRASAD, Lalta; SUBBARAO, P. M. V.; SUBRAHMANYAM, J. P. Experimental investigation on gasification characteristic of high lignin biomass (Pongamia shells). **Renewable Energy**, v. 80, p. 415-423, 2015. Doi: 10.1016/j.renene.2015.02.024
39. PEREIRA, Lucas Lemos *et al.* Produção e avaliação dos produtos da pirólise de sabugo de milho e caule de girassol. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2, 2016. **Anais** [...]. Campina Grande: Realize Editora, 2016. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/27036>. Acesso em: dezembro de 2020.
40. RAKESH, N.; DASAPPA, S. A critical assessment of tar generated during biomass gasification-Formation, evaluation, issues and mitigation strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 91, p. 1045-1064, 2018. Doi: 10.1016/j.rser.2018.04.017
41. RAJ, Tirath *et al.* Physical and chemical characterization of various Indian agriculture residues for biofuels production. **Energy & Fuels**, v. 29, n. 5, p. 3111-3118, 2015. Doi: 10.1021/ef5027373
42. REDDY, B. Rajasekhar; VINU, R. Feedstock characterization for pyrolysis and gasification. In: **Coal and Biomass Gasification**. Springer, Singapore, 2018. p. 3-36. Doi: 10.1007/978-981-10-7335-9\_1
43. REN, Jie *et al.* Biomass thermochemical conversion: A review on tar elimination from biomass catalytic gasification. **Journal of the Energy Institute**, v. 93, n. 3, p. 1083-1098, 2020. Doi: 10.1016/j.joei.2019.10.003
44. RITCHIE, Hannah; ROSEN, Max. Fossil fuels. **Our World in Data**, 2017. Disponível em: <https://ourworldindata.org/fossil-fuels>. Acesso em: dezembro de 2020.
45. SCARLAT, Nicolae; MARTINOV, Milan; DALLEMAND, Jean-François. Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: potential and limitations for bioenergy use. **Waste management**, v. 30, n. 10, p. 1889-1897, 2010. Doi: 10.1016/j.wasman.2010.04.016
46. SLUITER, A. *et al.* **Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass**. National Renewable Energy Laboratory (NREL), p. 1-16, 2012. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/gen/fy11/42618.pdf>. Acesso em: dezembro de 2020.
47. SIKARWAR, V. S. *et al.* An overview of advances in biomass gasification. **Energy and Environmental Science**, v. 9, n. 10, p. 2939–2977, 2016. Doi: 10.1039/C6EE00935B.

48. SITUMORANG, Yohanes Andre *et al.* Small-scale biomass gasification systems for power generation (< 200 kW class): A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 117, p. 109486, 2020. Doi: 10.1016/j.rser.2019.109486
49. SIVASANGAR, S. *et al.* Supercritical water gasification of empty fruit bunches from oil palm for hydrogen production. **Fuel**, v. 143, p. 563-569, 2015. Doi: 10.1016/j.fuel.2014.11.073
50. SUN, Jie *et al.* Subcritical water gasification of lignocellulosic wastes for hydrogen production with Co modified Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalysts. **The Journal of Supercritical Fluids**, p. 104863, 2020. Acesso em: dezembro de 2020. Doi: 10.1016/j.supflu.2020.104863
51. TAKADA, Masatsugu *et al.* Characterization of lignin-derived products from various lignocellulosics as treated by semi-flow hot-compressed water. **Journal of Wood Science**, v. 64, n. 6, p. 802-809, 2018. Doi: 10.1007/s10086-018-1752-6
52. TERI - The Energy and Resources Institute. Crop residue management: solution to achieve better air quality. 2019. Disponível em: <https://www.teriin.org/sites/default/files/2020-01/crop-residue-management.pdf>. Acesso em: dezembro de 2020.
53. TIAN, Tian *et al.* Effects of biochemical composition on hydrogen production by biomass gasification. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 31, p. 19723-19732, 2017. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.174
54. USDA - United States Department of Agriculture. Grain: World Markets and Trade. 2020. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf>. Acesso em: dezembro de 2020.
55. VALIN, Sylvie *et al.* Fluidised Bed Gasification of Diverse Biomass Feedstocks and Blends—An Overall Performance Study. **Energies**, v. 13, n. 14, p. 3706, 2020. Doi: 10.3390/en13143706
56. WEC - World Energy Council. World Energy Resources 2013: Bioenergy. 2013. Disponível em: [https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/10/WER\\_2013\\_7\\_Bioenergy.pdf](https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2013/10/WER_2013_7_Bioenergy.pdf). Acesso em: dezembro de 2020.
57. YANIK, Jale *et al.* Biomass gasification in supercritical water: II. Effect of catalyst. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, n. 17, p. 4520-4526, 2008. Doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.06.024
58. YU, Haimiao *et al.* Characteristics of tar formation during cellulose, hemicellulose and lignin gasification. **Fuel**, v. 118, p. 250-256, 2014. Doi: 10.1016/j.fuel.2013.10.080
59. YU, Haimiao; WU, Zilu; CHEN, Geng. Catalytic gasification characteristics of cellulose, hemicellulose and lignin. **Renewable Energy**, v. 121, p. 559-567, 2018. Doi: 10.1016/j.renene.2018.01.047
60. ZHANG, Ziyin; PANG, Shusheng. Experimental investigation of tar formation and producer gas composition in biomass steam gasification in a 100 kW dual fluidised bed gasifier. **Renewable Energy**, v. 132, p. 416-424, 2019. Doi: 10.1016/j.renene.2018.07.144
61. ZHOU, Bingliang *et al.* Tar formation and evolution during biomass gasification: An experimental and theoretical study. **Fuel**, v. 234, p. 944-953, 2018. Doi: 10.1016/j.fuel.2018.07.105
62. ZONG, Peijie *et al.* Pyrolysis behavior and product distributions of biomass six group components: Starch, cellulose, hemicellulose, lignin, protein and oil. **Energy Conversion and Management**, v. 216, p. 112777, 2020. Doi: 10.1016/j.enconman.2020.112777