

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO**

**Coordenação de Engenharia Química/CCET**

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC



**LUCAS YAGO PEREIRA MENDES**

**GASEIFICAÇÃO DE MESOCARPO DE BABAÇU EM  
REATOR DOWNDRAFT: SIMULAÇÃO DE PROCESSO  
USANDO ASPEN PLUS ®**

São Luís

2022

**LUCAS YAGO PEREIRA MENDES**

**GASEIFICAÇÃO DE MESOCARPO DE BABAÇU EM  
REATOR DOWNDRAFT: SIMULAÇÃO DE PROCESSO  
USANDO ASPEN PLUS ®**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Jaiver Efren Jaimes Figueroa

São Luís

2022

Pereira Mendes, Lucas Yago.

GASEIFICAÇÃO DE MESOCARPO DE BABAÇU EM REATOR DOWNDRAFT:  
SIMULAÇÃO DE PROCESSO USANDO ASPEN PLUS ® / Lucas Yago Pereira Mendes. -  
2022. 43 p.

Orientador(a): Prof. Dr. Jaiver Efren Jaimes Figueroa. Monografia (Graduação) - Curso de  
Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - Maranhão, 2022.

1. Biomassa. 2. Gás de Síntese. 3. Simulação ASPEN PLUS.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Jaiver Efren Jaimes Figueroa  
Orientador – DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. Harvery Alexander Villa Velez  
DEEQ/CCET/UFMA

Profa. Dra. Mikele Cândida Sousa de Sant'Anna  
EAER/CCET/UFMA

**Janeiro de 2022**

## **DADOS CURRICULARES**

**Lucas Yago Pereira Mendes**

**NASCIMENTO** 20/11/1994 – SÃO LUIS / MA

**FILIAÇÃO** Alexandre Mendes  
Etelvina Coelho de Sousa Pereira

**2014/2022** Curso de Graduação  
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

## AGRADECIMENTOS

Primeiro de tudo, agradeço primeiro a Deus, que me deu forças e me manteve firme em vários momentos de dúvida e fraqueza. Sem.

À minha família, que sempre me ensinou e mostrou a importância na vida de uma pessoa, em especial, meus pais. Mamãe obrigado por todo esforço e dedicação, nunca mediu esforços para me dar o melhor, muitas vezes abrindo mão daquilo que senhora mais desejava. Pai, muito obrigado pela parceria e pelos conselhos, herdei do senhor o gosto pelos números, apesar da distância, carregue o senhor comigo. Amo vocês.

Aos meus amigos, que sonharam junto comigo ao longo desses anos, e apesar de muitas dúvidas e lutas, nós conseguimos. Em especial aos amigos da Catedral de Louvor Maranata, vocês fizeram parte da minha base, que me ajudou a concluir esse trabalho.

A UFMA e todos os professores, que de alguma forma contribuíram para minha formação. Em especial ao Prof. Jaiver, obrigado pela paciência e insistência ao longo desses anos, e também ao Prof. Romildo, obrigado pela conversa, o senhor me ajudou a concluir esse trabalho.

Por fim, a todos da Catedral de Louvor Maranata, obrigado por me ajudarem a crescer como pessoa e também a crescer na fé. Acima de tudo e em primeiro lugar agradeço a Deus, razão de tudo e de todos nós.

*“Mas, sejam fortes e não desanimem, pois o trabalho de vocês será recompensado” 2 Crônicas 15:7*

## RESUMO

O Maranhão é um dos grandes responsáveis pela produção de Babaçu, podendo ser encontrado também em algumas regiões no norte do país, como no Amazonas e Pará. Os resíduos produzidos por esses materiais, ou seja, a biomassa lignocelulósica, caracterizada por ser um composto de fibras celulósicas, pode ser aproveitada como fonte de químicos de alto valor agregado e/ou energética. Para isso ser possível, uma das rotas, são os processos termoquímicos, dentre eles está o processo de gaseificação, que consiste no processo de conversão de matéria sólida ou líquida em combustível gasoso. Visando avaliar o processo, com o auxílio do simulador comercial ASPEN PLUS, ferramenta que possibilita a simulação do processo através da alteração de variáveis operacionais como temperatura, pressão, vazão e composição da alimentação e agente gaseificante. A simulação do processo realizou-se partindo de rendimentos encontrados na literatura, tanto para a pirólise, etapa inicial do processo, como para a gaseificação propriamente dita. Visando a otimização do processo, e buscando melhorar a produção do gás de síntese, também conhecido como *syngas*, foram avaliados parâmetros importantes para este tipo de processo, como a razão de equivalência (ER), temperatura de operação dos reatores, e a quantidade de vapor no sistema (SB). A melhor condição de operação para o estudo de caso analisado, foi obtida com os seguintes valores para os parâmetros ER, SB e temperatura, respectivamente: 0,4; 0; 1000°C.

**Palavras chave:** Babaçu, gaseificação, biomassa, simulação, gás de síntese.

## ABSTRACT

Maranhão is one of the main responsible for the production of Babaçu, and it can also be found in some regions in the north of the country, such as in Amazonas and Pará. The residues produced by these materials, that is, the lignocellulosic biomass, characterized by being a composite of cellulosic fibers, can be used as an energy source. For this to be possible, one of the routes is the thermochemical processes, among them is the gasification process, which consists of the process of converting solid or liquid matter into gaseous fuel. Aiming to evaluate the process, with the help of the ASPEN Plus program, a tool that allows the simulation of the process through the alteration of operational variables such as temperature, pressure, flow and composition of the feed and gasifying agent, the simulation of the process was carried out, starting from yields found in the literature, both for pyrolysis, the initial step of the process, and for gasification itself. In addition to the impact of optimization on the input of the process, and seeking to improve the production of syngas, other parameters were evaluated, such as the equivalence ratio (ER), operating temperature of the reactors, and the amount of steam in the system (SB). The best operating condition for the analyzed case study was obtained with the following values for the parameters ER, SB and temperature, respectively: 0.5; 0; 1000°C.

**Keywords:** Babassu, gasification, biomass, simulation, synthesis gas

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produtos obtidos a partir do aproveitamento integral do babaçu .....	15
Figura 2 – Fluxograma de todo processo .....	30
Figura 3 - Gráfico Z vs ER; SB = 0.....	39
Figura 4 - Gráfico Z vs ER; SB = 0,5.....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Oferta de energia interna (2013/2014).....	16
Tabela 2 – Oferta de energia interna (2018/2019).....	17
Tabela 3 – Variáveis do processo de pirólise .....	23
Tabela 4 – Cálculo de $\emptyset$ para diferentes tamanhos de partícula.....	29
Tabela 5 – Funções de cada bloco .....	30
Tabela 6 – Rendimento de entrada convencional e otimizado .....	33
Tabela 7 -Análise elementar do açaí e babaçu em base seca (% mássica) – (Costa et al., 2017).....	32
Tabela 8 – Variação da composição dos gases (Kg/hr); SB = 0 .....	35
Tabela 9 - Variação da composição dos gases (Kg/hr); SB = 0,5 .....	35
Tabela 10 - % mássica de <i>syngas</i> ; SB = 0 .....	37
Tabela 11 - %mássica de <i>syngas</i> ; SB = 0,5 .....	37
Tabela 12 - Comparação de Z.....	39
Tabela 13 - Comparação do novo parâmetro Z .....	40

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1.	Objetivo geral .....	15
2.2	Objetivo específico .....	15
<b>3.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
3.1	Matriz energética Brasileira.....	16
3.2	Biomassa.....	18
3.2.1	Hemicelulose .....	19
3.2.2	Lignina.....	19
3.2.3	Celulose .....	19
3.3	Babaçu.....	20
3.3.1	Amêndoa .....	20
3.3.2	Epicarpo e Mesocarpo .....	20
3.3.3	Endocarpo.....	20
3.4	Processamento de biomassa.....	21
3.4.1	Processamento Bioquímico .....	21
3.4.2	Processos Termoquímicos .....	22
3.5	Reatores de Gaseificação.....	24
3.5.1	Downdraft.....	24
3.5.2	Updraft.....	25
3.5.3	Leito Fluidizado .....	25
3.6	Razão de equivalência .....	26
3.7	Simulação de Processos.....	26
3.9	ASPEN PLUS.....	27
<b>4.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
4.1	Material.....	27
4.2	Processamento da Simulação .....	27
4.3.	Reações e Cinética.....	27
4.3.1	Pirólise do Carvão .....	27
4.3.2	Combustão.....	28

4.3.3 Gaseificação .....	28
4.4 Simulação do processo de gaseificação.....	30
4.4.1 Simulação do processo de pirólise: .....	31
4.4.2 Simulação do processo de separação de char e transformação .....	31
4.4.3 Simulação do processo de combustão .....	32
4.4.4 Simulação do processo de gaseificação.....	32
4.5 Dados de entrada do processo .....	32
4.6 Casos de estudo .....	33
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>34</b>
5.1. Avaliação da influência de ER e SB na composição dos gases produzidos.....	34
5.2 Gás de síntese ( <i>Syngas</i> ) .....	37
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>7. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>41</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O Maranhão é um dos maiores responsáveis pela produção de Babaçu no país. Segundo dados do IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), em matéria publicada em 6 de agosto de 2020, o extrativismo da palmeira do Babaçu é a terceira maior força agrícola produtiva do Maranhão, ficando atrás apenas da pecuária e agricultura. A extração da palmeira de babaçu, também contribui para a conservação de um ecossistema que dá origem ao fruto.

Aproximadamente 53% dos babaçuais brasileiros estão localizados na região maranhense, e, em média, 400 mil famílias maranhenses utilizam a atividade de extração do coco do babaçu, como fonte de renda. Boa parte desse trabalho é realizado por mulheres, mais conhecidas como “quebradeiras de coco” (BARBOSA, 2008).

No âmbito energético, 90% do fruto é considerado resíduo, proporcionando uma ampla possibilidade de aplicações industriais, inclusive para fabricação de etanol, metanol e gases combustíveis (TEIXEIRA, 2019).

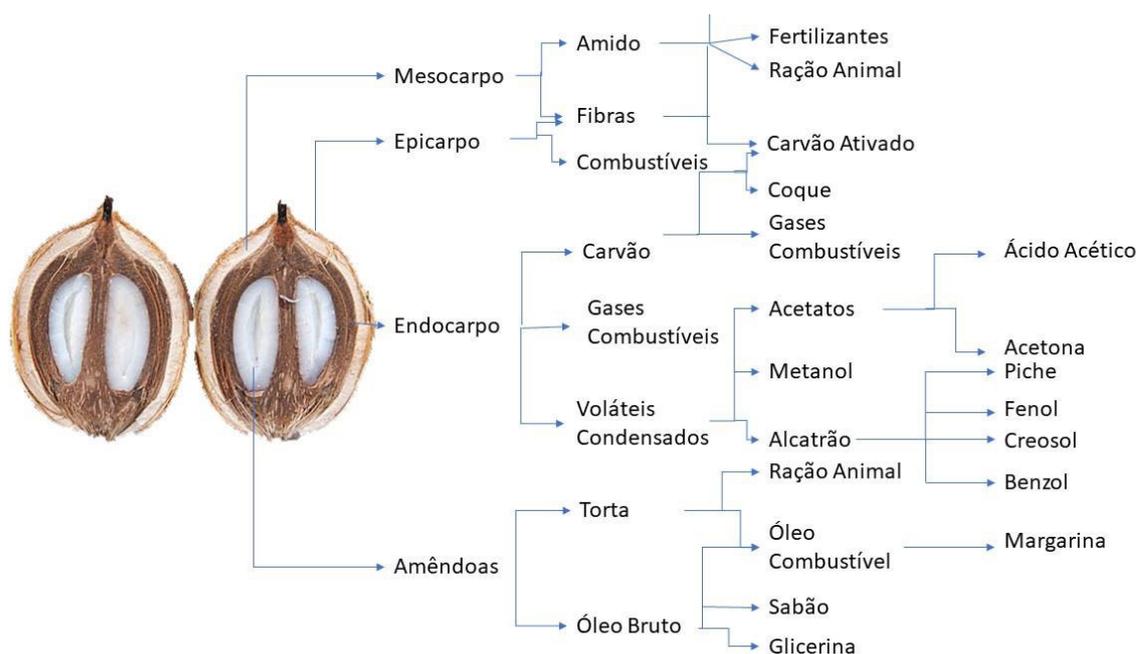
O fruto pesa cerca de 200g e tem uma composição mássica percentual de: 11 % de epicarpo, 23% de mesocarpo, 59% de endocarpo e 7 % de amêndoa (EMBRAPA, 1984).

Dentre as partes que compõe o babaçu, duas merecem destaque, o endocarpo e a amêndoa. O endocarpo, é matéria prima para produção de um carvão de excelente qualidade, tanto para coque quanto para carvão ativado. Obtido de maneira adequada, o carvão possui bom poder calorífico, pureza e baixa concentração de substâncias indesejáveis (ZYLBERSZTAJN, 2000).

A semente do babaçu, ou a amêndoa, é composta por 60% de óleo, que pode ser usado para produzir biodiesel com qualidade suficiente para atender às especificações da Agência Nacional de Petróleo, além de possuir aplicação na indústria de cosméticos (CALAND, 2007).

As demais partes, também podem ser utilizadas, o mesocarpo por exemplo, possui grande aplicação na alimentação animal e é capaz de gerar etanol, uma vez que cerca de 13 % da sua composição é amido (ZYLBERSZTAJN, 2000). A Figura 1 demonstra um pouco mais da aplicação do fruto em geral:

Figura 1 - Produtos obtidos a partir do aproveitamento integral do babaçu



Fonte: Adaptado May, 1990

A utilização dos resíduos produzidos por esses materiais, ou seja, a biomassa, pode ser aproveitada como fonte energética, através de processos termoquímicos, entre os quais a gaseificação, responsável pelas reações entre combustíveis sólidos (biomassa/carvão), na presença de oxigênio (NONES, 2017).

Os processos termoquímicos são muito utilizados, pois a combustão e as tecnologias envolvidas na conversão dos resíduos em energia, são eficientes e sustentáveis, apresentando um baixo impacto ambiental e resultando em um produto que possui uma grande área de aplicação (NONES, 2017).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

Simular o processo de gaseificação, utilizando como matéria prima a biomassa do babaçu.

### 2.2 Objetivo específico

Analisar o efeito da temperatura, da quantidade de vapor (SB) no sistema, e a razão de equivalência (ER);

Observar o efeito da utilização de um reator downdraft no processo de gaseificação;

Analisar o efeito da otimização do processo inicial de pirólise.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Possuindo em torno de 150 milhões de hectares, todos com possibilidade de serem incorporados a produção agrícola, o Brasil pode aumentar a produção de óleos vegetais (INFORMATIVA REDE BAIANA, ns 72). Essa grande área, distribuída em todo território nacional, aliado a condições climáticas favoráveis, fazem do Brasil, um país capaz de desenvolver culturas como as de soja, milho, amendoim, girassol, babaçu, etc, podendo ser exploradas na produção de biocombustíveis (FREITAS, 2016).

No território nacional, existe uma variedade de palmeiras, com a possibilidade de desempenhar um papel importante, caso sejam exploradas corretamente, no cenário econômico do país (SANTOS, 2008). Dentre elas, se destaca o babaçu, possuindo cerca de 12 milhões de hectares plantados na região nordestina, sendo que, boa parte está concentrada no estado do Maranhão.

#### 3.1 Matriz energética Brasileira

A importância da renovação da matriz energética brasileira é um assunto que vem sendo bastante discutido. Matriz energética corresponde aos recursos energéticos disponíveis em um país ou região e por ser quantitativa, pode ser usada com forma de planejamento do setor energético (AID, 2021).

A busca por diversificar a matriz energética brasileira já vem de algum tempo. A Tabela 1 traz a composição da matriz energética brasileira nos anos de 2013 e 2014, enquanto que a Tabela 2, demonstra a composição da matriz nos anos de 2018 e 2019.

Tabela 1 – Oferta de energia interna (2013/2014)

<b>Especificação (Mtep)</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>13/14 (%)</b>
<b>Não renovável</b>	176,47	185,1	4,9
Petróleo e derivados	116,5	120,33	3,3
Gás Natural	37,8	41,37	9,5
Carvão mineral e derivados	16,48	17,55	6,5
Urânio (u308) e derivados	4,1	4	-1,7
Outras não renováveis	1,6	1,8	13,9
<b>Renovável</b>	119,83	120,49	0,5
Hidráulica e eletricidade	37,09	35,02	-5,6
Lenha e Carvão vegetal	24,58	24,72	0,6
Derivados de Cana de açúcar	47,60	48,13	1,1
Outras renováveis	10,56	12,61	19,5

Fonte: MME, 2015, p.5

Tabela 2 – Oferta de energia interna (2018/2019)

<b>Especificação</b> (Milhões de Toneladas equivalente por petróleo - Mtep)	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>18/19 (%)</b>
<b>Não renovável</b>	158,0	158,4	0,2
Petróleo e derivados	99,6	101,1	1,4
Gás Natural	35,9	35,9	0,0
Carvão mineral e derivados	16,4	15,5	-5,7
Urânio (u308) e derivados	4,2	4,2	0,0
Outras não renováveis	1,8	1,8	-3,7
<b>Renovável</b>	131,9	135,6	2,8
Hidráulica e eletricidade	36,5	36,4	-0,3
Lenha e Carvão vegetal	25,5	25,7	0,8
Derivados de Cana de açúcar	50,1	52,8	5,5
Outras renováveis	19,8	20,7	4,4

Fonte: MME, 2015, p.20

O Aumento da fonte de energias não renováveis, indica a importância que o desenvolvimento de energias provenientes de matérias primas, como a biomassa, é importante para a diversificação e o desenvolvimento da matriz energética do país (MME, 2015).

O estado do Maranhão, devido a sua posição geográfica, possui um grande potencial para geração de energia limpa. Além de biomassa, o estado possui potencial energético para desenvolver outros tipos de energia limpa, como eólica, solar e maremotriz (SEME, 2017).

No estado, já são realizadas algumas atividades, buscando desenvolver projetos que façam uso da biomassa como matéria prima para produção de energia. Um exemplo é o projeto desenvolvido pela empresa de papel e celulose, Suzano, em Imperatriz. No âmbito nacional, segundo o Balanço energético nacional, BEN, as biomassas de cana e madeira, são responsáveis por 27% da energia primária do Brasil (SEME, 2017).

Investir em fontes de energia alternativa, não só melhora a matriz energética do país, como também melhora a qualidade de vida de determinada população, uma vez que tudo isso está ligado ao consumo de energia. Segundo a IEA, Agência Internacional de Energia, um terço da população mundial não tem acesso à energia elétrica.

Essa realidade se reflete no Brasil, principalmente nas regiões mais carentes do país, como as regiões Norte e Nordeste. O uso de fontes de energia convencional em determinadas áreas dessas regiões é inviável, tornando necessário a busca por novas fontes de energia que sejam de fácil obtenção e com matéria prima abundante nas regiões (ANDRADE, 2007).

### **3.2 Biomassa**

Durante o século 20, a produção de energia foi dominada por combustíveis fósseis, como carvão petróleo e gás, e representavam, até o começo do século 21, 80% de toda energia produzida no mundo (WEA, 2000).

Outras fontes de energia tinham pequenas participações, como a nuclear e a hidroelétrica, além das novas fontes renováveis, como a solar, sendo estas mais atraentes do ponto de vista ambiental, porém pouco utilizadas, representando apenas 1,5% da produção mundial. No total, todas estas fontes reunidas somavam 10% da produção de energia, sendo a biomassa responsável pelos 10% restante (MORAIS, 2015).

A busca por fontes de energias renováveis, estão sendo bastante estudadas, devido a grande preocupação de governos com relação aos planos ambientais. Desde que problemas como efeito estufa e outros surgiram, a preocupação com mudanças climáticas está sempre presente ao se falar de fontes de energia (ANDRADE, 2007).

Um dos principais responsáveis por toda essa preocupação, o CO<sub>2</sub>, teve nos últimos 100 anos um aumento de concentração na atmosfera próximo de 40% ppm. Todo esse aumento, ocorreu devido ao uso de combustíveis fósseis (CLIMATE CHANGE 2001, 2006).

Assim como petróleo, a biomassa é um hidrocarboneto, porém, ao contrário dos combustíveis fósseis, ela possui átomos de oxigênio na sua composição química. A presença de oxigênio na sua composição, tem vantagens e desvantagens, dentre as vantagens, uma delas é que, por já possuir o átomo de oxigênio, ao realizar a queima, acaba sendo menos poluente. Porém, a presença do átomo de oxigênio, faz com que tenha uma quantidade de energia liberada menor (IRENA, 2018).

Além disso, outra diferença com relação aos combustíveis fósseis, é a produção de CO<sub>2</sub>. Enquanto que para os combustíveis, como petróleo, a produção desse gás seria uma adição ao meio ambiente, o que tornando-o prejudicial, ao realizar o processo de queima de biomassa voltado para o uso energético, todo CO<sub>2</sub> produzido, já está inserido dentro do ciclo ambiental (CLIMATE CHANGE 2001, 2006).

A biomassa utilizada como combustível, é oriunda da matéria orgânica de origem animal ou vegetal, sendo a vegetal formada através da fotossíntese, formam fibras vegetais e auxiliam na formação de polímeros primários (REN *et al.*, 2020). Do ponto de vista vegetal, é estruturada por 3 famílias de compostos químicos: Hemicelulose, celulose, lignina, além de outros componentes como os extrativos.

### **3.2.1 Hemicelulose**

As hemiceluloses, também são chamadas de polioses, e são o segundo tipo de polissacarídeo mais importante da parede celular (PALMA, 1993). Em decorrência do seu caráter amorfo, ou seja, por não possuir uma estrutura determinada, está mais suscetível a hidrólise ácida, fornecendo maior acesso aos ácidos que geralmente são utilizados como catalizadores (FENGEL; WEGNER, 1989).

Por meio das pontes de hidrogênio com a celulose e das ligações covalentes com a lignina, a hemicelulose tem funções diversas, uma delas é a estabilização da parede celular. Além disso, podem ser utilizadas como mecanismos de armazenamento de produtos rústicos e como sistema de retenção de água em sementes (WYMAN *et al.*, 2005).

### **3.2.2 Lignina**

Também é uma molécula amorfa, e sua composição na parede vegetal varia em torno de 15 a 30 %, dependendo da espécie vegetal analisada (SANTOS, 2008). Devido ao grande número de unidades precursoras, e suas inúmeras combinações, a lignina é bem mais complexa que a celulose e a hemicelulose (MARABEZI, 2009).

É o segundo polímero mais abundante na terra, representando em torno de 30% de todo carbono orgânico não fóssil (LAURICHESSE; AVÉROUS, 2014). Além disso, é definida com material polifenólico, derivado da polimerização desidrogenativa de 3 estruturas: álcool coniferílico, álcool sinapílico e álcool p-cumarílico, responsáveis por dar origem a uma grande quantidade de grupos funcionais e ligações (SANTOS; COLODETTE; QUEIROZ, 2013; WATKINS *et al.*, 2015).

É considerada, basicamente, como um resíduo da produção da celulose, papel e etanol, em decorrência da sua complexidade e variedade estrutural. (SOUSA-AGUIAR *et al.*, 2014).

### **3.2.3 Celulose**

O polissacarídeo mais abundante da natureza, a celulose é proveniente da grande variedade de fontes vegetais (KLEMM, D; HEUBLEIN, B; FINK; BOHN, 2005).

Formada por duas unidades de glicose e unidas por ligações  $\beta$  (1-4), as cadeias agregam-se formando fibrilas e pontes de hidrogênio, resultando em uma molécula cristalina (TAMANINI, HAULY, 2014).

### **3.3 Babaçu**

Caracterizada por ser uma palmeira de grande porte, e com troncos cilíndricos, o fruto possui formato elipsoidal, pesando cerca de 90 a 280 gramas (VIVACQUA FILHO, 1968).

O fruto é geralmente utilizado para produção de amêndoas oleaginosas, contudo, sua estrutura física apresenta quatro partes aproveitáveis: epicarpo, que representa 11% da sua composição; mesocarpo, representando 23%; endocarpo, que equivale a quase 59% e amêndoa, 7% (EMBRAPA, 1984).

Com respeito a produção de biocombustível, o babaçu possui uma composição láurica, ou seja, possui um teor elevado de ácido láurico, C12:0, que é caracterizado por ser um ácido gordo saturado de cadeia média, com 12 átomos de carbono na composição, tornando-o um excelente material para produção de biodiesel.

#### **3.3.1 Amêndoa**

Apesar de ser a parte que possui a menor composição física, é a mais aproveitada do fruto. Cada coco possui de 3 a 6 amêndoas, que ficam localizadas na parte interna do endocarpo. Pode ser aproveitada de duas formas: Como óleo, equivalente a 60% da amêndoa, normalmente utilizado em indústria de cosméticos e alimentícia; enquanto que o restante, chamada de torta, é utilizada em rações para animais e como adubo (MACHADO, CHAVES E ANTONIASSI, 2006).

#### **3.3.2 Epicarpo e Mesocarpo**

O epicarpo é localizado na parte externa, é a parte responsável pela proteção do fruto, através de suas fibras. Já o mesocarpo, está localizado no meio do fruto, é a parte de onde é retirada a matéria prima para produção de farinha, comumente usada na região Nordeste.

#### **3.3.3 Endocarpo**

Parte com alto teor de lignina, possuindo uma densidade aparente de 1,27 g/cm<sup>3</sup>, uma das maiores para biomassa (VIVACQUA FILHO, 1968). É com essa parte do fruto que é produzido o carvão, rico em carbono fixo e amplamente utilizado em indústrias siderúrgicas como fonte de energia.

Além da produção de óleos, a planta como um todo apresenta mais utilidades,

como a produção de leite e carvão. Em uma análise do ponto de vista energético, o babaçu apresenta grande potencial, já que cerca de 90% do fruto é considerado resíduo (TEIXEIRA, M.A., 2001).

### **3.4 Processamento de biomassa**

Existem vários mecanismos de resistência a quebra de ligações químicas, um deles é a lignina, que atua como barreira física e limita o acesso de micro-organismos, restringindo assim, as enzimas às frações açucaradas. A estrutura da biomassa, funciona como um mecanismo de defesa: o agrupamento acetil da hemicelulose, altera o reconhecimento catalítico das enzimas e atrapalha o rendimento da hidrólise, a cristalinidade da celulose diminui sua área superficial, fator que é essencial para a ação das enzimas celulase (ZHAO *et al.*, 2012).

Para biomassa de produtos como etanol, é importante uma etapa de pré-tratamento, que tem a função de solubilizar açúcares da hemicelulose e facilitar o acesso das enzimas hidrolíticas à celulose. Outra etapa comum durante o pré-tratamento da biomassa, é a fermentação; utilizar microrganismo capazes de fermentar pentoses, é um importante componente para realizara fermentação da parte hemicelulósica, além disso, para a fermentação da parte celulósica, depende de uma hidrólise enzimática, que libera os monômeros de glicose, que posteriormente serão fermentados pelas leveduras capazes de fermentar hexoses. (KUMAR *et al.*, 2009).

#### **3.4.1 Processamento Bioquímico**

O processo bioquímico caracterizados pela quebra das paredes celulares através de uma hidrólise, formando monômeros açucarados e ácidos, seguida de uma fermentação, que dá origem aos álcoois superiores, etanol e hidrogênio (JENKINS, 2007).

A biomassa lignocelulósica requer um pré-tratamento para destruir sua estrutura celular e torna-la mais acessível ao tratamento químico ou biológico. O custo de produção é relativamente alto, quando comparado com o bioetanol proveniente de matéria prima açucarada, e a economia do processo, depende totalmente da velocidade de conversão dos açúcares presentes na celulose e hemicelulose (BALAT *et al.*, 2008).

O processo de hidrólise se divide em 2 grandes grupos, enzimático e ácido. No processo enzimático, a conversão da celulose e hemicelulose em açúcares é realizada por uma solução enzimática, enquanto que no segundo grupo, por uma solução ácida (HAMELINCK *et al.*, 2005).

O processo ainda possui algumas dificuldades tecnológicas com respeito a implementação comercial, como por exemplo, o desenvolvimento de sistemas de pré-tratamento adequados para diferentes tipos de biomassa e processo. Outro problema é o desenvolvimento de novos tipos de enzimas, buscando um maior tempo de atividade enzimática e redução de custos de comercialização (MACEDO, 2008).

### **3.4.2 Processos Termoquímicos**

Para o processo de obtenção e aproveitamento de biomassa, os processos termoquímicos apresentam melhor eficácia, isso se deve, pois, as tecnologias envolvidas combinam em um sistema eficiente e sustentável. Os principais processos termoquímicos estudados são: Pirólise, combustão e gaseificação (BORGES, 2010).

#### **3.4.2.1 Pirólise**

Processo de degradação térmica, que acontece ao se aplicar calor em um material ou substância, na ausência de oxigênio e com uma corrente de gás inerte. Portanto, a pirólise é considerada um processo endotérmico, uma vez que faz uso de uma fonte externa de calor (energia). Por meio desse processo, a biomassa é transformada em 3 frações: Sólida, líquida e gasosa (CUBAS, 2004).

A fração sólida consiste, basicamente, em carvão e cinzas, podendo variar de acordo com a temperatura aplicada. É comumente utilizada na produção de carvão ativado ou até mesmo como combustível (MÉIRE E FAIX, 1999).

A parte gasosa também pode ser usada como combustível, já que na sua composição tem-se hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono (MÉIRE E FAIX, 1999).

A fração líquida, também chamada por Méire e Faix (1999), de óleos pirolíticos, ou bio-óleo, é caracterizada por ser uma mistura complexa de compostos aromáticos e alifáticos oxigenados. Possui importante conteúdo energético, e geralmente é chamada de alcatrão, ou seja, hidrocarbonetos, que pode ser aproveitado em motores, turbinas, etc. (CHIARAMONT, et al., 207).

A temperatura é a responsável por determinar que tipo de produto o processo vai obter. E é baseado nela que a pirólise é classificada, recebendo duas nomenclaturas diferentes, lenta; (carbonização), e rápida (MÉIRE E FAIX, 1999).

Essa diferenciação é feita baseada em alguns fatores, como por exemplo: taxa de aquecimento, a própria temperatura aplicada no sistema, tempo de residência das fases sólidas e gasosas e produtos desejados. (VIEIRA, 2004)

Tabela 3 – Variáveis do processo de pirólise

<b>Variantes do processo</b>	<b>Tempo de residência</b>	<b>Temperatura do processo (°C)</b>	<b>Produtos obtidos</b>
Carbonização	Horas/dia	400-450	Carvão vegetal
Convencional	5-30 min	Até 600	Bio-óleo, carvão e gás
Rápida	0,5-5 s	500 – 550	Bio-óleo
Flash – Líquido	< 1 s	< 650	Bio-óleo
Flash – Gás	< 1 s	>650	Gás combustível
Vácuo	2 – 30 s	400	Bio-óleo

Fonte: Adaptado de Gomez (2008)

### **3.4.2.2 Combustão**

É o processo térmico mais antigo, muito utilizado para obtenção de energia, aplicando –se para madeira e para resíduos lignocelulósicos. Acontece quando há oxidação total ou parcial de moléculas de carbono e hidrogênio, presentes na biomassa analisada. As ligações são rompidas, fazendo que os átomos se reorganizem, para formar os produtos. É por meio de desse processo que, a energia química gerada, características de processos exotérmicos, é convertida em energia térmica, ou seja, o calor liberado pela reação (PROTÁSIO, 2014).

O processo todo ocorre em 6 etapas: secagem, emissão de voláteis, ignição dos voláteis, combustão dos voláteis, extinção de chamas dos voláteis e combustão de resíduos de carbono. Após todo esse processo, o calor produzido pode ser utilizado como base para produção de vapor, e por consequência usado na geração de energia (NOGUEIRA; LORA, 2013; BRAND 2010).

### **3.4.2.3 Gaseificação**

É definida com o processo que converte a energia termoquímica de um material ou sólido, que possui na sua composição carbono, em combustível gasoso, através da oxidação parcial em altas temperaturas e pressões maiores que 32 atm (LORA, 2012).

Uma vez que o processo de gaseificação é uma oxidação parcial, que definido pela quantidade de ar e combustível que são adicionados ao reator, pode-se concluir que, são esses os parâmetros principais envolvidos no processo. Contudo isso pode variar de acordo com o reator envolvido, fazendo com que suas características físicas, adicionem

alguns fatores que podem interferir no desempenho do processo de conversão (NARVÁEZ *et al.*, 1996).

São eles:

- Fator de ar: Corresponde ao valor da relação ar – combustível real utilizada durante o processo, dividida pela relação ar – combustível teórico ou estequiométrico (NARVÁEZ *et al.*, 1996; DOGRU *et al.*, 2002).
- Temperatura: Deve estar condicionada pelas quantidades de ar e combustível presentes na reação.
- Capacidade de produção de gás: Em geral o gás produzido durante a gaseificação tem em sua composição monóxido de carbono, dióxido de carbono, água e pequenas partes de alcatrão. Portanto, o agente de gaseificação utilizado tem importância considerável na composição e no poder calorífico do gás produzido.

### **3.5 Reatores de Gaseificação**

#### **3.5.1 Downdraft**

O termo Downdraft refere-se ao fluxo gasoso no reator, e em português significa descendente. A gaseificação ocorre em leito fixo pois, é uma operação contínua e, à medida que o combustível é alimentado e as cinzas são retiradas, o leito move-se em direção ao fundo do reator (LORA, 2012).

Além dessa classificação, o sistema ainda pode ser analisado de acordo com a direção relativa do fluxo de combustível e do gás gerado, podendo ser cocorrente, concorrente e fluxo cruzado (ARENA, 2011)

Reatores cocorrentes, o gás escoar no sentido descende, enquanto que o combustível é adicionado pela parte superior do reator. Esse modelo é utilizado quando se tem como objetivo obter um baixo teor de alcatrão no gás gerado. Isso ocorre devido ao fenômeno de craqueamento que o gás sofre ao passar pelas zonas de alta temperatura (MIDILLI *et al.*, 2001).

Já no modelo de reatores contracorrente, o gás escoar no sentido contrário ao da alimentação. O modelo é utilizado quando o gás a ser produzido deve apresentar um alto teor de alcatrão, e é usualmente aplicado na produção de energia térmica (ARENA, 2011).

Nos reatores de leito cruzado, o gás é adicionado nas laterais do reator, enquanto que a biomassa é adicionada pela parte superior. Essa configuração também fornece um produto com um alto teor de alcatrão, e apresenta uma configuração mais simples, também sendo utilizado na produção de energia térmica (JAYAH, 2010)

### **3.5.2 Updraft**

O reator updraft, também é um reator de leito fixo, assim como no reator downdraft, a alimentação é feita pelo topo do reator, porém, os reatores divergem em alguns pontos. Um deles é a ingestão de oxidante, enquanto no reator downdraft ela se dá pelas laterais, no updraft acontece na parte inferior. Nesse modelo, os resíduos se movem em contracorrente com os gases, passando por diferentes zonas; secagem, pirólise, redução e oxidação. É um dos gaseificadores mais simples, de fácil operação e com elevada eficiência de conversão energética, produzindo uma grande quantidade de alcatrão (ARENA, 2011).

Na zona de combustão, é onde é atingida a maior temperatura, chegando próximo aos 1200 °C, e após todas as reações necessárias, o gás gerado no processo é ejetado pela parte superior. (MCKENDRY, 2001).

A alta eficiência térmica, se dá pelo fato dos gases quentes, enquanto estão na zona de combustão, funcionam como pré-aquecedores da carga de combustível. Apesar disso, a alta quantidade de alcatrão produzido em um reator updraft, impede que o gás seja utilizado diretamente em motores a combustão, restringindo sua utilidade (ARENA, 2011).

### **3.5.3 Leito Fluidizado**

Foi originalmente desenvolvida para resolver problemas de reatores de leito fixo, como por exemplo, alto teor de cinzas; mas no geral, o reator de leito fluidizado é mais eficiente, em comparação aos reatores de leito fixo, ao longo do processo (BELGIORNO *et al.*, 2003).

Este tipo de leito, possui vantagens quando se trata da utilização de biomassa como combustível. A produção de alcatrão, por exemplo, é menor que nos reatores updraft, porém, maior do que a quantidade produzida no downdraft (BASU, 2013).

Podem ser classificados em dois principais tipos, leito borbulhante e leito circulante. O reator de leito borbulhante foi desenvolvido em 1921, por Fritz Winkler. Nele, o fluxo de gás atravessa a placa distribuidora, e ao alcançar determinada velocidade, cria um regime chamado de ‘Regime de fluidização’, à medida que o a partícula sobe, o diâmetro do reator aumenta, provocando uma queda na velocidade da partícula. (ISAO; NOBUO, 2013). Além disso, existe um ciclone que captura partículas de carvão e as devolve para o leito, ocasionando um aumento no rendimento do processo (BASU, 2013).

Já o reator circulante, apesar de muito similar ao reator de leito borbulhante, tem um sistema de captura de carvão mais intenso e eficiente, provendo maior taxa de recirculação de material sólido. O aumento dessa taxa, gera uma diminuição na produção de alcatrão durante o aquecimento do combustível. Outra vantagem do reator de leito circulante, é o maior contato gás-sólido, aumentando assim a eficiência do reator (WINKLER; ELLIOT, 2006).

### **3.6 Razão de equivalência**

Um dos fatores que afetam o desempenho de um sistema de gaseificação, é a razão de equivalência, ou ER. É caracterizada pela razão entre ar-combustível real e ar-combustível estequiométrico teórico para combustão completa, como demonstrado na Equação 1:

$$ER = \frac{na}{na_s} \quad (1)$$

$na_s$ : número de moles de ar necessários para combustão completa;

$na$ : número de moles de ar na mistura.

### **3.7 Simulação de Processos**

Utilizando um banco de dados extenso, os simuladores de processo, permitem estimar e propriedades físicas e químicas de componentes, além de estimar o comportamento de processos químicos extensos e complexos. A utilização desses softwares, é bastante útil para projetar ou amplificar determinados processos (MARQUINI, 2007).

Na engenharia química, a simulação e modelagem é geralmente utilizada em análises de processos, tendo enfoque em validar o processo e otimizá-lo. O investimento em modelagem e simulação é justificável devido aos fatores econômicos, poupando dinheiro e tempo, análises de segurança, e a reprodutibilidade do processo (SECCHI, 1995).

Simuladores comerciais, como ASPEN, CHEMCAD e HYSYS, disponibilizam mecanismos para a análises de procedimentos químicos, porém estão limitadas as restrições impostas por seus desenvolvedores e a seus custos (PERLINGEIRO, 2005).

### **3.8 Parâmetro Z**

Para realizar a comparação dos resultados obtidos, com outros tipos de biomassa, determinou-se o parâmetro Z, caracterizado por:

$$\frac{\text{massa de gás de síntese obtida}}{\text{massa de biomassa adicionada na entrada do processo}} \quad (2)$$

### **3.9 ASPEN PLUS**

Dentre todos os softwares comercializados hoje em dia, o ASPEN, está entre um dos mais populares. Trata-se de um simulador de processos de fluxograma, que permite a modelagem e plantas químicas no geral. O simulador utiliza um algoritmo baseado em blocos, que representam operações unitárias ou reatores, e correntes. Além da simulação de processos, o software oferece a possibilidade de otimizar processos, análise econômica, e várias outras ferramentas (AL-MALAH, 2017; CARLSON 1996).

Para utiliza-lo, é necessário ter conhecimentos como, as equações de balanço, cinética química das reações, conhecimento sobre termodinâmica, etc. O uso do software é de grande ajuda para design de processos e plantas, além de permitir a remodelagem de processos já existentes (AL-MALAH, 2017).

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Material**

A matéria prima utilizada na simulação, passou por diversas análises. Uma delas foi a determinação da análise imediata. Utilizando como referência as normas ASTM E871-82, D3175-11, E1534-93 e D3172-13, foram determinado teor de umidade e também o teor de cinzas, em que 1g da mesma biomassa foi levada à mufla e, posteriormente, coladas em dessecador, para então realizar a pesagem (COSTA *et al.*, 2017).

### **4.2 Processamento da Simulação**

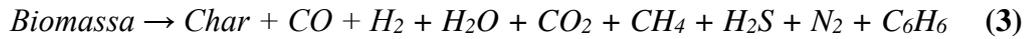
A simulação foi realizada no simulador comercial ASPEN Plus, o qual resultou de uma parceria com o Laboratório de Otimização, Projeto e Controle Avançado – LOPCA da Faculdade de Engenharia Química – FEQ da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP; um software com a capacidade de construção de modelos de processos químicos, que permite simular cálculos complexos. O computador utilizado para realizar as simulações foi Lenovo, Intel Core i3-6100U, com sistema operacional de 64 bits, Windows 10 e 4GB de memória RAM.

### **4.3. Reações e Cinética**

#### **4.3.1 Pirólise do Carvão**

Antes de chegar no reator de gaseificação, o carvão passa por um processo de

pirólise, com o intuito de decompor o material volátil. A Equação 2 demonstra como ocorre esse processo. O material volátil, apresentado neste modelo é composto inicialmente por CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub> e C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>.



Dentre esses materiais voláteis, os gases: CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> são combustíveis gasosos e C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> é a molécula que representa o bio-óleo (alcatrão).

#### 4.3.1.1 Correção de rendimentos experimentais devido à pressão real do processo

Em gaseificadores reais, a pressão utilizada, normalmente, é de 20-50 atm, isso indica que o efeito da pressão em cada produto, deve ser levado em consideração para análise dos resultados (C.-Y. Wen, T.-Z. Chaung, 1979).

#### 4.3.2 Combustão

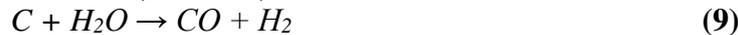
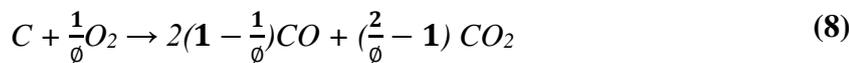
No processo de combustão, os gases produzidos no processo de pirólise irão reagir com oxigênio, de acordo com as Equações 4 – 7:



Pela taxa de reação da combustão gasosa ser rápida, e os gases combustíveis serem consumidos em um curto espaço de tempo, a cinética de reação do processo de combustão, são negligenciados no modelo. Além disso, as conversões de C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>, H<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub>, são consideradas 100%.

#### 4.3.3 Gaseificação

Depois do processo de combustão, o carvão é ainda mais gaseificado. Neste processo, inclui-se as reações 4-6, citadas anteriormente. Bem como reações 8-14:



Na reação 8,  $\emptyset$  é o símbolo que representa o coeficiente que depende do diâmetro de partícula da biomassa(dp). E foi calculado pelas relações apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo de  $\phi$  para diferentes tamanhos de partícula

dp (cm)	$\phi$	Y
< 0,005	$\frac{2Y + 2}{Y + 2}$	$= \frac{[CO]}{[CO_2]}$
0,005 – 0,1	$(2Y + 2) - \frac{Y(dp - 0,005)}{0,095}$	$= 2500e^{-\frac{6249}{T}}$
> 0,1	1	

[CO] e [CO<sub>2</sub>] – concentração de [CO] e [CO<sub>2</sub>], respectivamente.

T – Temperatura, em Kelvin (K)

As reações 7-11 são causadas pela reação da biomassa com componentes gasosos na fase gasosa. O modelo usado para descrever a cinética do reator é o unreacted-core shrinking. Isso ocorre por 2 pontos:

- No gaseificador real, as reações gás-carvão podem ser consideradas como reações de superfície, devido à alta temperatura da operação, normalmente acima de 1000°C;
- O carregamento de sólidos no gaseificador é, na maioria dos casos, muito pequeno, sendo assim a camada de cinzas formada é considerada como parte da partícula durante as reações.

Neste modelo, os efeitos de difusão da camada de cinzas, difusão gás filme e as reações químicas são consideradas. A taxa geral é expressa como Equação 15:

$$R_{C-i} = \frac{1}{\frac{1}{k_{diff}} + \frac{1}{k_s Y^2} + \frac{1}{k_{dash}} \left( \frac{1}{Y} - 1 \right)} (P_i - P_i^*) \quad (15)$$

Onde:

$R_{C-i}$  = Taxa de reação

$k_{diff}$ : Constante de difusão do gás, em g/(cm<sup>2</sup>) (atm)(s);

$k_s$ : Constante de reação da superfície, em g/(cm<sup>2</sup>) (atm)(s);

$k_{dash}$ : Constante de difusão de cinzas, em g/(cm<sup>2</sup>) (atm)(s);

$$Y: \frac{r_c}{r_p} = \left( \frac{1-x}{1-f} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$r_c$  é o raio da partícula, desconsiderando a camada de cinzas.

$r_p$  é o raio da partícula inteira, considerando a camada de cinzas.

$x$  é a conversão do carvão em qualquer momento, antes da pirólise está completa.

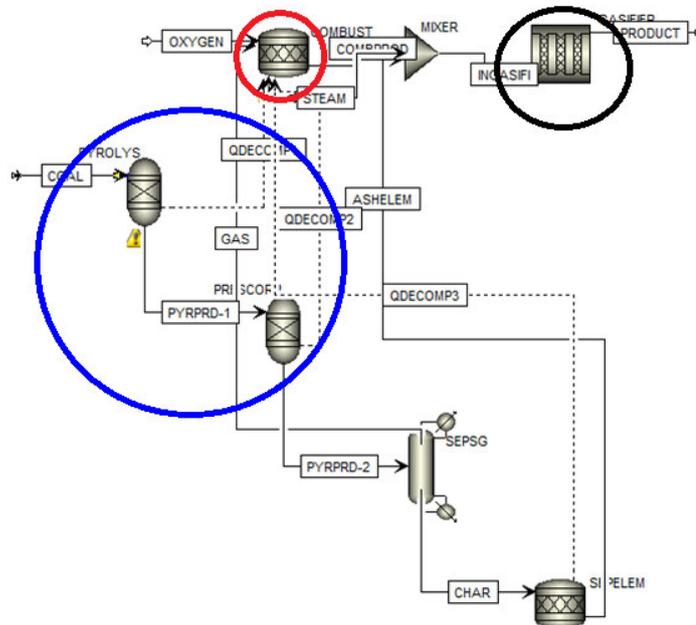
$f$  é a conversão do carvão quando a pirólise está completa.

$P_i - P_i^*$  = pressão parcial do componente  $i$ , levando em consideração a reação inversa.

#### 4.4 Simulação do processo de gaseificação

O processo de gaseificação aconteceu em um reator de fluxo borbulhante, sendo dividido em 3 etapas: pirólise da biomassa (círculo azul), combustão (círculo vermelho) e gaseificação propriamente dita (círculo preto), tal como apresentado na Figura 1.

Figura 2 – Fluxograma de todo processo



Fonte: Adaptado de ASPEN Plus

A seguir é apresentada a descrição de todos os equipamentos da Figura 1 (Tabela 5).

Tabela 5 – Funções de cada bloco

Bloco	Modelo	Função
<b>PYROLYS</b>	RYield	Simular o processo de pirólise, usando rendimentos previamente calculados, utilizando em um primeiro momento dados de rendimentos dá literatura, e depois rendimentos calculados com a metodologia de planejamento de experimentos, a 1 atm
<b>PRESCORR</b>	RYield	Realizar a correção de pressão, buscando otimizar o processo para uma pressão ideal, em cada um dos produtos provenientes do bloco PYROLYS
<b>SEPSG</b>	Sep2	Separar gás do char sólido
<b>COMBUST</b>	RStoic	Modelar o processo de combustão
<b>SEPELEM</b>	RStoic	Realizar a decomposição do char

<b>MIXER</b>	Mixer	Misturar a alimentação do bloco responsável pelo processo de gaseificação
<b>GASIFIER SPELMCAL</b>	Rplug Calculator	Modelar o processo de gaseificação Determinar a estequiometria dos produtos resultantes da decomposição do char
<b>GASIFCAL</b>	Calculator	Corrigir o tempo de residência do produto sólido no gaseificador

#### 4.4.1 Simulação do processo de pirólise:

Os equipamentos/blocos da Tabela 5 são conectados entre si para realizar a simulação do processo da seguinte forma: A biomassa foi alimentada ao bloco chamado de PYROLYS, utilizando uma base de cálculo de 276 kg/hr.

Após o processo inicial de pirólise, a corrente passou por segundo reator RYield (PRESCORR), mas nesse caso, apenas as condições de pressão foram modificadas, com intuito de simular o processo real, portanto é necessário realizar uma correção nos rendimentos devido à pressão. Apenas o rendimento total de voláteis é corrigido, e para realizar essa correção, foi utilizada a Equação 16 abaixo:

$$V_2 = V_1(1 - a \ln P_t) \quad (16)$$

Onde:

$V_1$ : Rendimento total de voláteis a 1 atm

$V_2$ : Rendimento total de voláteis a pressão real do gaseificador

$P_t$ : Pressão no reator real, atm

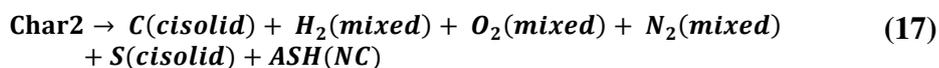
$a$ : constante no modelo, que nesse caso é igual a 0,066.

#### 4.4.2 Simulação do processo de separação de char e transformação

A corrente de saída do bloco PRESCORR foi direcionada para o Bloco SEPSG responsável pela separação das fases gasosas e da parte sólida. Para isso, foi utilizado o método RK-SOAVE, que usa a equação cúbica de estado Redlich-Kwong-Soave (RKS), para todas as propriedades termodinâmicas, exceto para volume molar líquido. No Bloco SEPSG, a separação sólido/gás acontece totalmente, gerando 2 correntes: a corrente gás, que sai por cima do reator, enquanto que a corrente denominada CHAR, é composta pela fase sólida, representado pelo Char2.

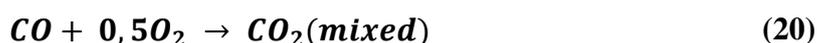
A corrente de fundos do separador SEPSG é encaminhada para o Bloco SEPELEM, o qual tem como função realizar a decomposição da parte sólida do produto.

Para simular este equipamento foi usado um reator Rstoic, o qual é utilizado quando se não conhece a cinética da reação, mas se sabe a estequiometria, e é possível determinar a conversão da reação. A Equação 16 demonstra a reação utilizada nesse bloco, inserida ao simulador, representando a decomposição do CHAR, parte sólida do processo.



#### 4.4.3 Simulação do processo de combustão

O Bloco COMBUST recebe a corrente gasosa proveniente do bloco PRESCORR e as correntes de energias dos blocos PYROLYS e SEPELEM. Para a simulação da combustão foi utilizado um reator Rstoic, justificado pelo mesmo motivo citado anteriormente, as equações 18-21, apresentam as reações deste processo.



#### 4.4.4 Simulação do processo de gaseificação

Após isso, as saídas, produzidas nos blocos SEPELEM e COMBUST, são misturadas no bloco MIXER, e alimentadas ao gaseificador, etapa final do processo, utilizando as equações estequiométricas e cinéticas (8 – 14). O processo foi realizado com a pressão nos reatores de 1 atm, tendo vista que variar a pressão não apresentou mudanças relevantes, enquanto que a temperatura variou entre 800-1000 °C.

#### 4.5 Dados de entrada do processo

A biomassa utilizada na simulação foi caracterizada e preparada, passando pelo processo de secagem e moagem com preparação da amostra. Além disso, foram realizadas as análises granulométricas, elementar e imediata. Os valores destas análises estão repostados na Tabela 7 (COSTA *et al.*, 2017).

Tabela 6 - Análise elementar do açúcar e babaçu em base seca (% mássica) – (Costa et al., 2017)

Biomassa	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio
Babaçu	44,75%	6,15%	42,59%	6,51%

Para a demonstração dos dados de entrada do processo, foi utilizado o trabalho,

*Otimização de pirólise de materiais lignocelulósicos usando metodologia de planejamento de experimentos* (MENDES et al., 2018).

A ferramenta utilizada no processo de otimização foi o delineamento de processos, dando em ênfase em dois processos: Delineamento Plackett-Burman e Composto Central Rotacional (DCCR). Com o auxílio do programa *Statistica*, foi realizado a primeira etapa do delineamento, com 13 experimentos, e em seguida um DCCR com 5 variáveis, resultando uma matriz de planejamento para 43 experimentos. Através desses experimentos, chegou-se aos componentes mais importantes na entrada do processo de pirólise.

Visando maximizar a produção de alcatrão, 3 componentes de entrada são importantes: CHAR, parte sólida do material, e os gases N<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Com base nesses dados, e utilizando a metodologia de planejamento de experimentos, determinou-se o valor de cada um dos 3 componentes para otimizar o processo de pirólise. A apresentação desses dados é importante, pois ao se otimizar o processo de entrada, imagina-se que as demais etapas do processo também apresentem resultados melhores, e por consequência, o produto final seja otimizado.

Por isso, foi realizado uma análise comparativa entre os rendimentos convencionais utilizados em processos convencionais de gaseificação da casca do babaçu, com os rendimentos determinado pelo processo de otimização.

A Tabela 6 apresenta os resultados da otimização, em comparação com os valores convencionais.

Tabela 7 – Rendimento de entrada convencional e otimizado

<b>Componentes</b>	<b>% Mássica Convencional</b>	<b>% Mássica Otimizado</b>
<b>CHAR1</b>	0,12	0,12
<b>CO</b>	0,0052	0,0055
<b>H<sub>2</sub></b>	0,00689	0,0074
<b>CO<sub>2</sub></b>	0,00325	0,0035
<b>H<sub>2</sub>O</b>	0,05	0,0534
<b>N<sub>2</sub></b>	0,00364	0,00364
<b>CH<sub>4</sub></b>	0,11102	0,0427
<b>C<sub>6</sub>H<sub>6</sub></b>	0,7	0,7639

Fonte: Dados obtidos pelo próprio autor após realizadas as simulações

#### **4.6 Casos de estudo**

Baseado no modelo de simulado por C.-Y. Wen, T.-Z. Chung, um dos parâmetros importantes para o processo de gaseificação, é a pressão. Segundo estudo realizado em uma planta piloto por Wen e Chung, a pressão ideal para o processo de

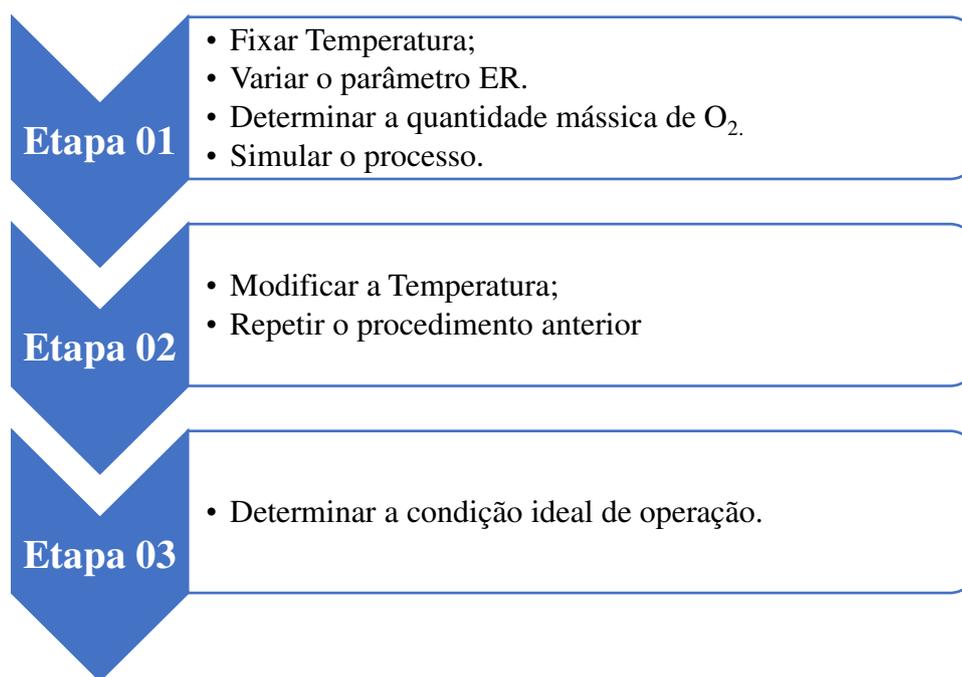
gaseificação varia entre 20-24 atm.

A variação da pressão não apresentou mudanças relevantes nos resultados, sendo assim, as simulações foram todas realizadas a 1 atm.

Outro fator relevante na operação do gaseificador, é a temperatura. Por isso também foram realizados experimentos afins de encontrar a temperatura que maximizasse a produção de CO e H<sub>2</sub>. Em geral, para gaseificação, a faixa de temperatura varia entre 800 – 1000°C, sendo assim, 3 experimentos foram realizados, utilizando as seguintes temperaturas: 800, 900 e 1000 °C.

Além da temperatura, realizou-se o estudo de dois outros fatores, são eles o valor de ER para o oxigênio, e a quantidade de vapor (SB). O cálculo de ER foi realizado aplicando a equação 1, em que, o valor de  $na$  foi igual a 0,866 O<sub>2</sub>/coal, enquanto que o valor de  $na_s$  foi determinado através de relações estequiométricas. Já o SB, variou de 0 para 0,5.

|As análises de caso de estudo foram realizadas seguindo os seguintes passos:



As variáveis analisadas foram as composições dos gases (H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>).

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Avaliação da influência de ER e SB na composição dos gases produzidos

Utilizando a equação 1, foi determinado o valor de ER. Na simulação base, simulação inicial, foi utilizado um valor de ER= 0,666. Novas simulações, com diferentes valores de ER foram realizadas variando este parâmetro, sendo eles 0; 0,1; 0,2; 0,4; 0,8 e 1 (sendo este último valor o necessário para combustão completa).

Já para o valor de SB, foram considerados duas situações: Em um dos casos foi utilizado a quantidade de vapor igual a 0, enquanto que, em um segundo caso, levou-se em consideração um valor para SB de 0,5.

Em todas as simulações realizadas, as condições foram iguais, modificando apenas a temperatura dos reatores PRESCORR, SEPELEM E GASIFIER, indicados na Tabela 5 e na Figura 2 que variou de 800-1000°C. A corrente de oxigênio e a corrente de vapor (STEAM), tiveram suas temperaturas e pressão fixadas em 25°C, a 1 atm e 423,54°C, a 24 atm (características de vapor superaquecido) em todas as simulações realizadas.

As Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados obtidos em cada uma das situações.

Tabela 8 – Variação da composição dos gases (Kg/hr); SB = 0

<b>ER</b>	<b>Temperatura</b>	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>
<b>0</b>	800	6,727	0,670	1,348	9,261
	900	6,759	0,523	1,622	9,158
	1000	6,832	0,388	2,077	8,947
<b>0,1</b>	800	6,564	36,724	3,500	9,276
	900	6,304	30,134	7,885	9,167
	1000	6,052	22,837	12,911	8,948
<b>0,2</b>	800	6,501	74,750	4,437	9,268
	900	6,229	68,062	8,852	9,177
	1000	5,960	61,042	13,563	9,038
<b>0,4</b>	800	6,572	155,336	3,373	9,280
	900	6,308	148,902	7,613	9,197
	1000	5,919	138,968	14,240	9,022
<b>0,666</b>	800	6,614	261,353	2,768	9,283
	900	6,445	257,136	5,567	9,217
	1000	6,154	249,589	10,621	9,073
<b>1</b>	800	6,650	393,953	2,236	9,287
	900	6,552	391,398	3,953	9,235
	1000	6,401	387,308	6,724	9,139

Fonte: Dados obtidos pelo próprio autor

Tabela 9 - Variação da composição dos gases (Kg/hr); SB = 0,5

<b>ER</b>	<b>Temperatura</b>	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CO</b>	<b>CH<sub>4</sub></b>
<b>0</b>	800	6,724	0,795	1,228	9,284
	900	6,747	0,824	1,310	9,227
	1000	6,787	0,855	1,470	9,124
<b>0,1</b>	800	6,713	40,061	1,356	9,288
	900	6,718	39,692	1,692	9,230
	1000	6,733	38,985	2,360	9,105
<b>0,2</b>	800	6,707	79,386	1,454	9,286
	900	6,701	78,826	1,903	9,233
	1000	6,695	77,837	2,717	9,128

<b>0,4</b>	800	6,702	158,256	1,497	9,290
	900	6,686	157,509	2,059	9,240
	1000	6,660	156,037	3,188	9,130
<b>0,666</b>	800	6,700	263,238	1,508	9,291
	900	6,683	262,517	2,041	9,249
	1000	6,655	261,142	3,076	9,157
<b>1</b>	800	6,702	395,159	1,454	9,295
	900	6,687	394,521	1,927	9,257
	1000	6,660	393,245	2,886	9,173

Fonte: Dados obtidos pelo próprio autor

Por meio dos resultados das simulações, pode-se observar o efeito da reação de deslocamento gás-água, ou *WGSR* (do inglês *water-gas shift reaction*), que consiste na reação catalítica da água com o monóxido de carbono (CO), permitindo aprimorar a aplicação do gás de síntese com a maximização do H<sub>2</sub> em sua composição.

Fixando os parâmetros de ER e SB, pode-se observar o efeito da temperatura em cada uma das composições mássicas dos gases. À medida que a temperatura aumenta, as composições de H<sub>2</sub> e CO também aumentam, enquanto que a composição de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> diminuem. A diminuição da quantidade mássica de CO<sub>2</sub> com o aumento da temperatura, acontece devido a reação de redução que ocorre no gaseificador, onde um carbono reage com a CO<sub>2</sub> produzido na combustão, etapa anterior, gerando CO.

O mesmo acontece com o metano, que reage tanto com a água produzida ao longo do processo, especialmente para o caso onde SB = 0,5, devido a uma presença maior de água no gaseificador, quanto com o carbono. Nos dois casos, as reações favorecem o do gás de síntese.

Analisando o parâmetro ER, pode-se observar que a composição dos gases H<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub> não sofrem modificações significativas, enquanto a composição de CO<sub>2</sub> aumenta à medida que o valor de ER se aproxima de 1, o que é esperado, tendo em vista que à medida que o valor se aproxima de 1, a reação está se aproximando de uma reação de combustão.

Com relação ao parâmetro SB, houve alteração apenas nas composições de CO e CO<sub>2</sub>. Porém os resultados ao aumentar o valor de SB de 0 para 0,5 não foram tão interessantes. Isso se deve ao fato de que, ao adicionar a corrente de oxigênio, e se tratando de uma corrente de oxigênio puro, a corrente de vapor (SB) apresenta impurezas que colaboram com perda de eficiência do processo.

## 5.2 Gás de síntese (*Syngas*)

No processo de gaseificação, é gerado uma mistura de gases, conhecida como gás de síntese, ou *syngas*. Os principais componentes são o monóxido de carbono e hidrogênio (CO e H<sub>2</sub>, respectivamente).

Ao longo das simulações, o gás de síntese foi produzido, sendo possível determinar a porcentagem mássica do *syngas*. As Tabelas 10 e 11 apresentam os valores de porcentagem mássica de *syngas* em cada uma das condições de operação.

Tabela 10 - % mássica de *syngas*; SB = 0

<b>ER</b>	<b>Temperatura</b>	<b>% mássica de <i>syngas</i></b>
<b>0</b>	800	0,448
	900	0,464
	1000	0,488
<b>0,1</b>	800	0,181
	900	0,270
	1000	0,374
<b>0,2</b>	800	0,115
	900	0,163
	1000	0,218
<b>0,4</b>	800	0,057
	900	0,081
	1000	0,120
<b>0,666</b>	800	0,034
	900	0,043
	1000	0,061
<b>1</b>	800	0,022
	900	0,026
	1000	0,032

Fonte: Dados obtidos pelo próprio autor

Tabela 11 - % mássica de *syngas*; SB = 0,5

<b>ER</b>	<b>Temperatura</b>	<b>% mássica de <i>syngas</i></b>
<b>0</b>	800	0,441
	900	0,445
	1000	0,453
<b>0,1</b>	800	0,140
	900	0,146
	1000	0,159
<b>0,2</b>	800	0,084
	900	0,089
	1000	0,098
<b>0,4</b>	800	0,047
	900	0,050
	1000	0,056
<b>0,666</b>	800	0,029

	900	0,031
	1000	0,035
<b>1</b>	800	0,020
	900	0,021
	1000	0,023

Fonte: Dados obtidos pelo próprio autor

Analisando as Tabelas 10 e 11, é possível observar o efeito da reação *WGSR*, especialmente com relação a temperatura. Altas temperaturas favorecem a formação do gás, devido as reações de redução que ocorrem principalmente com o  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ .

Além da porcentagem mássica, foi possível obter a relação entre massa de *syngas* por massa de biomassa, parâmetro que foi denominado como *Z*. Considerando que a alimentação de biomassa foi e aproximadamente 276 kg/h, foi possível plotar um gráfico com o comportamento de *Z*, em diferentes temperaturas, com relação a ER, para cada valor de SB.

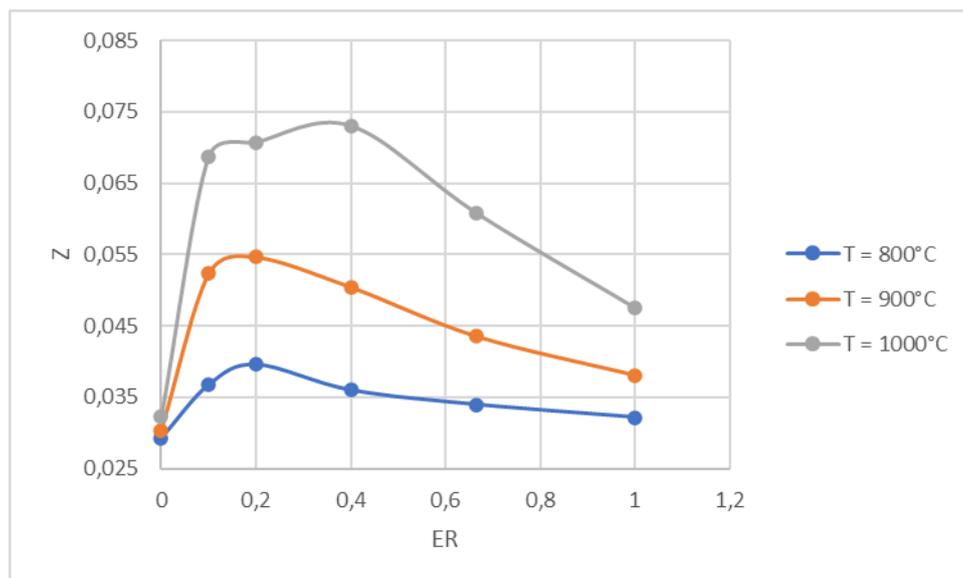
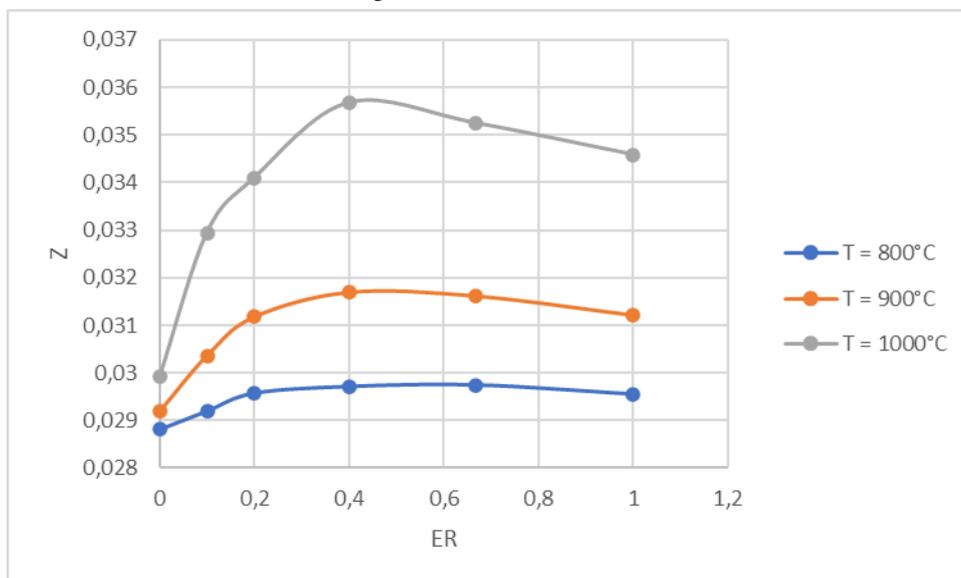


Figura 3 - Gráfico Z vs ER; SB = 0

Fonte: Dados obtidos pelo próprio autor

Figura 4 - Gráfico Z vs ER; SB = 0,5



Fonte: Dados obtidos pelo próprio autor

O parâmetro Z apresentou melhores valores, com relação a SB, quando não houve a presença de vapor no sistema. Tendo o melhor resultado a uma temperatura de 1000°C, com ER igual a 0,4, valor um pouco menor que o utilizado na simulação base. Nessas condições, o valor de Z foi 7%, valor baixo quando comparado a outros trabalhos realizados.

A Tabela 12 compara esse valor obtido, com outros valores, teóricos e experimentais.

Tabela 12 - Comparação de Z

Biomassa	Z
Babaçu	7%
Cana – de – açúcar <sup>1</sup>	37,5%
Madeira <sup>2</sup>	33%

Fonte: [1] - DA SILVA, Kleber Machado; BAPTISTA, Marcelo Bruce; NITTA, Sílvia Tomoe (2017).

[2] - Sordi, A., SILVA, E. P. D., & Lobkov, D. D. (2006).

O baixo valor do parâmetro Z, está ligado a etapa de gaseificação, indicado pelo círculo preto, na Figura 2. O reator utilizado na gaseificação, permite a troca de calor, ou seja, um sistema não adiabático.

Para fins de comparação, foi realizado uma nova simulação, utilizando apenas os parâmetros considerados ideias de ER e SB (0,4 e 0), a uma temperatura de 1000°C.

Porém, nessa etapa, apenas os reatores PRESCORR, SEPELEM tiveram sua temperatura modificada, ou seja, a etapa de gaseificação agora passa a ser um sistema adiabático. Tabela 13 apresenta o novo valor de Z, fazendo comparação com o valor anterior e com os outros tipos de biomassa.

Tabela 13 - Comparação do novo parâmetro Z

<b>Biomassa</b>	<b>Z</b>
Babaçu (sistema não adiabático)	7%
Babaçu (sistema adiabático)	38%
Cana – de – açúcar <sup>1</sup>	37,5%
Madeira <sup>2</sup>	33%

Fonte: [1] - DA SILVA, Kleber Machado; BAPTISTA, Marcelo Bruce; NITTA, Sílvia Tomoe (2017).

[2] - Sordi, A., SILVA, E. P. D., & Lobkov, D. D. (2006).

Diferentemente do primeiro caso, agora temos valores de Z muito próximos aos obtidos na literatura, condizentes com o esperado, já que a composição elementar, especialmente da cana – de – açúcar é muito similar com a composição do babaçu.

## 6. CONCLUSÃO

Como o objetivo de uma gaseificação é a conversão termoquímica de um material sólido ou líquido, desde que apresente carbono na sua composição, em um produto gasoso combustível, ou seja, produção do gás de síntese, os parâmetros devem ser ajustados para que o sistema favoreça essa situação.

Os melhores desempenhos, em termos numéricos para produção de *syngas*, foram obtidos com baixos valores de ER, ou seja, longe da reação de combustão. Contudo, baixos valores de ER, significam baixa quantidade mássica, ou em um dos casos ausência, de O<sub>2</sub> no sistema. Nesses casos, a etapa de combustão seria prejudicada, uma vez que para que ocorra a combustão é necessário um agente oxidante.

Porém, utilizar altos valores de ER, significaria realizar uma combustão completa, o que em termos ambientais seria indesejado, uma vez que o produto de uma combustão são gases como o CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.

Sendo assim, os melhores e mais adequados para realizar o processo de combustão, seriam os intermediários, no caso deste trabalho: 0,4 e 0,666 (valor utilizado na simulação base).

Com relação a temperatura de operação dos reatores envolvidos no processo (PRESCORR, SEPELEM E GASIFIER), temperaturas elevadas apresentaram melhores resultados para produção do gás de síntese, sendo 1000°C o melhor valor, com exceção do reator GASIFIER, que obteve a melhor condição de operação, quando foi simulado

dentro de um sistema adiabático, isso deve ao fato de que o reator downdraft apresenta variações de temperatura ao longo do processo, não apresentando a uniformidade adequada para que o procedimento ocorra de forma eficiente. Mesmo que um sistema adiabático apresente resultados satisfatórios, é importante realizar uma avaliação de distribuição dentro do reator, buscando uniformizar os pontos que apresentam variações da temperatura determinada.

Além disso, a melhor condição de operação com relação a quantidade de vapor, foi obtida quando o sistema operou com ausência de vapor, ou seja,  $SB=0$ .

Para melhor condição de operação, levando em conta aspectos econômicos (maior produção de *syngas*) e aspectos ambientais (baixa produção de  $CO_2$  e  $CH_4$ ), os parâmetros adotados ser os seguintes:  $ER = 0,4$ ; temperatura =  $1000^\circ C$  e  $SB = 0$ , com o reator GASIFIER operando em um sistema adiabático.

Por fim, é importante ressaltar que, o Maranhão por ser um estado que possui grandes áreas de extração de babaçu, e devido a carência social existente dentro do estado, é uma área que necessita de projetos que buscam levar energia, através da matéria prima obtida dentro do próprio estado e de fácil obtenção para a população carente, são extremamente importantes e devem ser desenvolvidos, para que, além da melhora energética e da diminuição do uso de combustível fósseis, ocorra uma melhora na qualidade de vida da população, através da distribuição dessa fonte de energia para comunidades que não possuem acesso.

## 7. REFERÊNCIAS

Abreu, F. R.; Lima, D. G.; Hamu, E. H.; Wolf, C.; Suarez, P. A. Z.; J. Mol. Catal. A: Chem. 2004, 209, 29.

AID. <http://www.aneel.gov.br/>. fonte: aneel: [http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset\\_publisher/xgpxsqdmfhre/content/aneel-bate-meta-de-expansao-da-matriz-eletrica-em-2021-tres-meses-antes-do-previsto/656877?inheritredirect=false](http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/xgpxsqdmfhre/content/aneel-bate-meta-de-expansao-da-matriz-eletrica-em-2021-tres-meses-antes-do-previsto/656877?inheritredirect=false). 2021.

AL-MALAH, K. I. M. Aspen Plus® Chemical Engineering Applications. 1ª Ed. Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons Inc., 2017.

Andrade, R. Gaseificação de biomassa: uma análise teórica e experimental. Diss. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI. 2007. Pág. 205, 2007.

ARDILA, Yurany Camacho. Gaseificação da biomassa para a produção de gás de síntese e posterior fermentação para bioetanol: modelagem e simulação do processo. 2015. 202 p. Tese (doutorado) ; Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP.

ARENA, U. Process and Technological Aspects of Municipal Solid Waste Gasification. Department of Environmental Sciences, Second University of Naples, Caserta, Italy. International Journal of Integrated Waste Management: Science and Technology, vol. 32

ASPEN TECHNOLOGY, INC.. ASPEN PLUS ® USER GUIDE. ASPEN TECHNOLOGY, INC., P. 936, 2000.

Atmospheric bubbling fluidized bed. Effect of six operational variables on the quality of the Produced raw gas; ind. Eng. Chem. Res; vol. 35; pp. 2110-2120; 1996.

BALAT, M., BALAT, H., ÖZ, C.; Progress in Bioethanol Processing; Progress in Energy and Combustion Science

BARBOSA, Viviane. VIVENDO NA DESIGUALDADE: Tensões, Conflitos e Mobilização Social no meio rural maranhense, 2008

BASU, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. [S.l.: s.n.], 2013. v. 53. 1689–1699 p. ISSN 1098-6596. ISBN 9788578110796.

BELGIORNO, V.; FEO, G.; ROCCA, C. D.; NAPOLI, R. M. A. Energy from Gasification of Solid Wastes. Department of Civil Engineering, University of Salerno, Fisciano, Italy. Waste Management, vol.23, pp: 1-15, 2003.

Borges, Fernanda Cabral. "Proposta de um modelo conceitual de biorrefinaria com estrutura descentralizada." (2010).

C.-Y. WEN, T.-Z. CHAUNG, "Entrainment coal gasification modeling", ind. Eng. Chem. Process des. Dev., 18: 684-695, 1979.

Caland, L. B.; Santos, L. S. S.; Moura, C. V. R.; Moura, E. M. Síntese de novos catalisadores de óxidos de Cu, Co e Mn suportados em alumina na reação de transesterificação para obtenção de biodiesel. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE AGROENERGIA E BIOCOMBUSTÍVEIS. 1, Teresina, PI; 2007. Teresina-Piauí, 2007.

CARLSON, E. C. Don't Gamble With Physical Properties For Simulations. Chemical Engineering Progress, v. 92, n. 10, p. 35-46, 1996.

Castro, César Nunes de. A Agricultura no Nordeste brasileiro: oportunidades e limitações ao desenvolvimento, 2012

CHIARAMONTI, D.; OASMAA, A.; SOLANTAUSTA, Y. Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass. Renewable and sustainable energy reviews (11), p. 1 056-1 086, 2007.

CLIMATE CHANGE 2001. Disponível em: <[http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1/](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/)>. 2006.

COSTA, LETÍCIA GARRETO. Avaliação termoquímica de materiais lignocelulósicos maranhenses: processo de simulação e otimização usando o simulador de processos aspen plus, 2017.

Costa, R. C. A.; Biomass and Bioenergy 2004, 26, 405.

Cubas, Anelise Leal Vieira. "Eliminação de organoclorados por plasma térmico de corrente contínua." (2004).

DA SILVA, Kleber Machado; BAPTISTA, Marcelo Bruce; NITTA, Sílvia Tomoe. ESTUDO DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE GÁS DE SÍNTESE A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA. CONNECTION LINE-REVISTA ELETRÔNICA DO UNIVAG, n. 17, 2017.

DOGRU, M., HOWARTH, C. R., AKAY, G., KESKINLER, B., MALIK A. A; gasification of Hazelnut shells in a downdraft gasifier; energy; vol. 27; pp. 415–427; 2002.

EMBRAPA. (1984). Babaçu: programa nacional de pesquisa.

EMIR, A. [HTTPS://WWW.IPEA.GOV.BR](https://www.ipea.gov.br). FONTE: IPEA: [HTTPS://WWW.IPEA.GOV.BR/PORTAL/INDEX.PHP?OPTION=COM\\_CONTENT &VIEW=ARTICLE&ID=36322&CATID=131](https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=36322&catid=131). 2020.

ENERGIA, M. D. <https://www.epe.gov.br/>. fonte: epe: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/publicacoesarquivos/publicacao-377/topico-470/relat%c3%b3rio%20s%c3%adntese%20ben%202019%20ano%20base%202018.pdf> f. 2019.

FENGEL, D.; WEGENER, G. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Berlin: walter de gruyter, 1989. 613 p.

Freitas, Giovany Martins de Biomassa, uma fonte de energia/ Giovany Martins de Freitas. – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2016.

Goldemberg, J.; Science 2007, 315, 808

GOMEZ, G.; MENESES, M.; BALLINAS, L.; CASTELLS, F. Characterization of urban solid waste in chihuahua, mexico. *Waste management*, v. 28, p. 2465-2471, 2008.

HAMELINCK, C., HOOIJDONK, G. FAAIJ, A.; Ethanol from Lignocellulosic Biomass: Technoeconomic Performance in Short-, Middle-and Long-Term; *Biomass & Bioenergy*. Vol. 28, n. 4, p.384-410, 2005.

<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>

Informativa Rede baiana de biocombustíveis, nº 72, 09/07/2021.

IRENA. International Renewable Energy Agency. Power system flexibility for the energy transition Part 1: overview for policy makers. 2018.

ISAO, O.; NOBUO, S. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. v. 53, n. 1, p. 6–27, 2013.

JAYAH et al. Simulation Study of a Down-Draft Wood Gasifier Used to Produce Thermal Energy for Tea Drying. Trabalho Acadêmico do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Melbourne Parkville em Victoria, Austrália, 2010.

JENKINS, B. M. Bioenergy, Biofuels, and Potentials for Sustainable Development, Energy Lecture Series, Department of Biological and Agricultural Engineering, 14 de março, 2007. Downloaded from: [http://bioenergy.ucdavis.edu/materials/Presentations/Jenkins%20031407%20-%20EnergyLecture\\_Biofuels.pdf](http://bioenergy.ucdavis.edu/materials/Presentations/Jenkins%20031407%20-%20EnergyLecture_Biofuels.pdf).

KLEMM, D.; HEUBLEIN, B.; FINK, H.-P.; BOHN, A. Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte chemie international edition*, v. 44, n. 22, p. 3358–3393.

KUMAR, A., ESKRIDGE, K., JONES, D.D., HANNA, M.A., 2009. Steam-air fluidized bed gasification of distillers grains: effects of steam to biomass ratio, equivalence ratio and gasification temperature. *Bioresource technology* 100 (6), 2062–2068.

KUMAR, A., WANG, L., DZENIS, Y.A., JONES, D.D., HANNA, M.A., 2008. Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock. *Biomass and bioenergy* 32 (5), 460–467.

LAURICHESSE, S.; AVÉROUS, L. (2014) Chemical modification of lignins: towards biobased polymers. *Progress in Polymer Science*, v. 39, n. 7, p. 1266-1290. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymer.2013.11.004>

LORA, E.E.S., ANDRADE, R.V., MARTINEZ, J.D., ROCHA, M.H., SALES, C.A.V.B., MENDOZA, M.A.G., OBANDO, D.S. (2012) gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. In: lora, e.e.s., venturini, o.j. (coord.) Biocombustíveis. 1. Ed. Rio de janeiro, interciência. Pp. 411–498

MACEDO, H.; III Workshop Tecnológico sobre: Hidrólise para Produção de Etanol; Projeto Programa de Pesquisa em Políticas Públicas; 2008. Disponível online em: [www.apta.sp.gov.br/cana](http://www.apta.sp.gov.br/cana)

MACHADO, G.C. & CHAVES, J.B.P. & ANTONIASSI, ROSEMAR. (2006). Composição em ácidos graxos e caracterização física e química de óleos hidrogenados de coco babaçu. *Revista ceres*. 53. 463-470.

MARABEZI, K. Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar. 2009. 142 p. Dissertação (mestrado em química) – instituto de química de são carlos, universidade de são paulo, são carlos, 2009.

MARQUINI, M. F.; D. C.; MEIRELLES, A. J.; DOS SANTOS, O. A. A.; JORGE. L. M. M. Simulação e Análise de um Sistema Industrial de Colunas de Destilação de Etanol. *Acta Sci. Technol.* 20, 1 (2007) 23-28.

matriz energética brasil

MAY, PETER. Palmeiras em chamas; transformações agrárias e justiça social na zona do babaçu. São luís: emater-finep-fundação ford, 1990.

MCKENDRY, P.; Energy production from biomass (part 3): gasification technologies. Applied Environmental Research Centre Ltd, Tey Grove, Elm Lane, Feering, Colchester CO5 9ES, Reino Unido; 2001.

MÉIER, D.; FAIX, O. STATE OF THE ART OF APPLIED FAST PYROLYSIS OF LIGNOCELLULOSIC materials a review. *Bioresource technology* (68), p. 71-77, 1999.

MIDILLI, A. et al. Combustible gas production from sewage sludge with a downdraft gasifier. *Energy Conversion and Management. Health & Science*, vol.42

Morais, Luciano Cardoso de. Estudo sobre o panorama da energia elétrica no Brasil e Tendências futuras / Luciano Cardoso de Moraes, 2015.

Narváez, i., orío, a., aznar, m. P., corella, j; biomass gasification with air in an

NOGUEIRA, L. A. H; LORA, E, E, S. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. 2. Ed. Rio de janeiro, 2003.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; AMPESSAN, C. G. M.; FRIEDERICHS, G. Biomassa residual agrícola e florestal na produção de compactados para geração de energia. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, Lages, v. 16, n. 2, p. 155-164, 2017.

PALMA, M.B. influência da agitação e da aeração na atividade de xilanas de *penicillium janthinellum*. 1993. 89 p. Dissertação (mestrado em ciência e tecnologia de alimentos) - universidade federal de viçosa, viçosa, 1993.

Perlingeiro, Carlos Augusto G. Engenharia de processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos / Carlos Augusto G. Perlingeiro – São Paulo: Blucher, 2005.

PROTÁSIO, THIAGO DE PAULA. Biomassa residual do coco babaçu: potencial de uso bioenergético nas regiões norte e nordeste do Brasil. 2014. 173 p. Dissertação (mestrado em ciências e tecnologia da madeira) - universidade federal de lavras, lavras, 2014.

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.

Rendeiro, Gonçalo; Combustão e gasificação de biomassa sólida, 2008

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, H. de. (2013) Bioenergia e Biorefinaria: Cana-de-açúcar e Espécies Florestais. Os Editores. 551 p.

SANTOS, I. D. Influência dos teores de lignina, holocelulose, e extrativos na densidade básica e contratação da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado. Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

SCOTT, P. E. The International Energy Agency's (IEA) work in harmonising sampling and analytical protocols related to municipal solid waste (MSW) conversion to energy, *Biomassa and Bioenergy*, v. 9, p. 415-439, março 1995.

SECRETARIA DE ESTADO DE MINAS E ENERGIA - SEME;  
<https://seme.ma.gov.br/potencial-energetico/biomassa/>

SORDI, Alexandre et al. Gaseificação de biomassa e célula a combustível: sistema com célula tipo PEMFC. *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*, 2006.

SOUSA-AGUIAR, E.F.; APPEL, L.G.; ZONETTI, P.C.; FRAGA, A.C. (2014) Some important catalytic challenges in the bioethanol integrated biorefinery. *Catalysis Today*, v. 234, p. 13-23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cattod.2014.02.016>

TAMANINI, C; HAULY, M. C. O. Resíduos agroindustriais para produção biotecnológica de xilitol. *Semina: ciências agrárias, londrina*, v. 25, n. 4, p. 315-330, out./dez.

TEIXEIRA, M. A. La industria brasileña de extracción de aceite de palma de babassu, un nuevo enfoque. *Comunicaciones - iii congreso forestal español*. Granada, 2, arquivo ponenciashtml/1329.htm, 2001.

TEIXEIRA, MARCOS ALEXANDRE. Biomassa de babaçu no brasil. In: encontro de energia no meio rural, 4., 2002, campinas.

TEIXEIRA, Raullyson Eduardo Leal, As quebradeiras de coco babaçu da comunidade de Catucá: vidas atravessadas pelos babaçuais, 2019

VIEIRA, G. E. G. Fontes alternativas de energia: processo aperfeiçoado de conversão térmica. 2004. 130f. Tese (doutorado em química) - instituto de química, universidade federal fluminense, niterói, 2004.

VIVACQUA FILHO, ANTÔNIO. BABAÇU, aspectos sócios - econômicos e tecnológicos. Brasília: universidade de Brasília, 217p, 1968.

WATKINS, D.; NURUDDIN, M.; HOSUR, M.; TCHERBI-NARTEH, A.; JEELANI, S. (2015) Extraction and characterization of lignin from different biomass resources. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 4, n. 1, p. 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.10.009>

WINKLER, F.; ELLIOTT, D. Combustion and Gasification in Fluidized Beds. 2006.

World Energy Assessment - WEA 2000; Energy and the challenge of sustainability. United Nations Development Programme, United Nations Development of Economic and Social Affairs and World Energy Council.

WYMAN, C.E.; DALE, B.E.; ERLANDER, R.T.; HOLTZAPPLE, M.; LADISCH, M.R.; LEE, Y.Y. coordinated development of leading biomass pretreatment technologies. *Bioresource technology, essex*, v. 96, p. 1959-1966, 2005.

ZHAO, X., ZHANG, L., & LIU, D. (2012). Biomass recalcitrance. Part i: the chemical compositions and physical structures affecting the enzymatic hydrolysis of lignocellulose. *Biofuels, bioproducts and biorefining*, 6(4), 465-482.

Zylbersztajn, D. (Coord.). Reorganização do agronegócio do babaçu no estado do Maranhão. São Paulo: PENSA/FIA/USP. 2000.

