



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

JESSÉ MEDEIROS DE PAIVA FILHO

PROJETO PRELIMINAR DE UM REATOR DE PIRÓLISE RÁPIDA

MOSSORÓ

2020

JESSÉ MEDEIROS DE PAIVA FILHO

PROJETO PRELIMINAR DE UM REATOR DE PIRÓLISE RÁPIDA

Projeto de conclusão de curso apresentado a Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, campus Mossoró, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Edson Nogueira Fraga – UFERSA.

MOSSORÓ - RN

2020

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

P142p Paiva, Jessé Medeiros.
PROJETO PRELIMINAR DE UM REATOR DE PIRÓLISE
RÁPIDA / Jessé Medeiros Paiva. - 2020.
47 f. : il.

Orientador: Francisco Edson Nogueira Fraga.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2020.

1. Termoconversão. 2. Leito fluidizado. 3.
Biocombustível. 4. Casca da castanha de caju. I.
Fraga, Francisco Edson Nogueira, orient. II.
Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JESSÉ MEDEIROS DE PAIVA FILHO

PROJETO PRELIMINAR DE UM REATOR DE PIRÓLISE RÁPIDA

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Centro de Engenharias para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 03/02/2020.

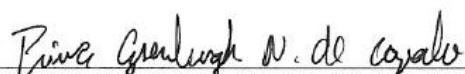
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. FRANCISCO EDSON NOGUEIRA FRAGA
Orientador/Presidente da Banca Examinadora



Prof. Dr. ROMULO PIERRE BATISTA DOS REIS
Membro da banca



MSc. PRINCE AZSEMBERGH N. DE CARVALHO
Membro da banca

RESUMO

A diversificação da matriz energética tem se tornado um caminho a ser seguido na busca pela substituição dos combustíveis tradicionais. Neste cenário, foi projetado um reator de pirólise rápida, sendo uma das principais formas de termoconversão da biomassa para obtenção de biocombustíveis. Dentre as vantagens do bio-óleo, destacam-se a densidade energética bem maior que a da biomassa que o originou, alto poder calorífico e possuir características semelhantes aos combustíveis provenientes do petróleo. A proposta do projeto tem como finalidade o processamento de até 50 kg/h de Casca da Castanha do Caju (CCC), visando a obtenção de maior rendimento da fração líquida (bio-óleo). O projeto do reator de leito fluidizado foi composto pela determinação das condições de serviço, dimensionamento e seleção de materiais e, por fim, a modelagem do equipamento. O procedimento dimensional e modelagem dos componentes do reator mostraram resultados satisfatórios, visto que os parâmetros necessários foram alcançados, respeitando as premissas e condições de serviço envolvidas no processo.

Palavras-chave: Termoconversão. Leito fluidizado. Biocombustível. Casca da castanha do caju.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição dos produtos obtidos a partir de diferentes tipos de pirólise	14
Figura 2 – Mecanismo e distribuição dos produtos no processo de pirólise rápida	15
Figura 3 – Rendimento dos produtos em relação à temperatura de pirólise.....	16
Figura 4 – Rendimentos dos produtos em relação ao tamanho da partícula	16
Figura 5 – Influência da taxa de alimentação nos rendimentos.....	17
Figura 6 – Esquema conceitual do processo de pirólise rápida.....	18
Figura 7 – Esquema da Planta de Pirólise Rápida, modelo PPR-20, tecnologia Bioware	19
Figura 8 – Esquema de reatores utilizados na pirólise rápida	20
Figura 9 – Aplicações do bio-óleo.....	24
Figura 10 – Representação dos estados do leito no reator pirolítico	31
Figura 11 – Sistema de transferência de calor em parede composta cilíndrica.....	32
Figura 12 – Fluxograma das etapas do projeto do reator pirolítico.....	34
Figura 13 – Camadas de isolamento térmico da parede do reator e suas características	40
Figura 14 - Vistas frontal e explodida do reator pirolítico projetado	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rendimentos típicos obtidos para diversos tipos de pirólise	14
Tabela 2 – Esfericidade de partículas	27
Tabela 3 – Porosidade na condição de mínima fluidização para alguns sólidos	28
Tabela 4 – Dados de entrada para o projeto do reator pirolítico	38
Tabela 5 – Dados calculados para o projeto do reator pirolítico	39
Tabela 6 – Dimensões dos componentes do reator pirolítico	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVOS.....	10
2.1 OBJETIVO GERAL	10
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
3. REFERÊNCIAL TEÓRICO	11
3.1 PIRÓLISE.....	11
3.1.1 Pirólise rápida.....	15
3.1.2 Materiais utilizados na estrutura do reator pirolítico.....	21
3.2 BIOMASSA	22
3.2.1 Casca da castanha do caju	24
3.3 APLICAÇÃO DA PIRÓLISE RÁPIDA NO BRASIL	25
4. PROJETO DO REATOR PIROLÍTICO	26
4.1 CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS	26
4.2 PARÂMETROS DE FLUIDIZAÇÃO	28
4.3 DIMENSÕES DO REATOR PIROLÍTICO	31
4.3.1 Altura do reator	31
4.3.2 Espessuras das camadas da parede do reator.....	32
5. MATERIAIS E MÉTODOS	34
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	38
6.1 CARACTERIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO REATOR PIROLÍTICO.....	38
6.2 MODELAGEM EM CAD DO REATOR E PROCEDIMENTOS PARA MONTAGEM E OPERAÇÃO.....	40
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional em conjunto com os anseios tecnológicos dos últimos anos vem favorecendo ao aumento excessivo da demanda energética. As fontes de energia utilizadas ao redor do mundo são petróleo (31,1%), carvão mineral (29%), gás natural (21,5%), nuclear (4,7%), de fontes renováveis (10%), hidráulica (2,5%) e uma pequena parcela de outras fontes (1%). Observando a matriz energética mundial, fica evidente a grande dependência de combustíveis fósseis, e até mesmo o Brasil, que é referência mundial no uso de energias de fontes renováveis, ainda possui cerca de 60% da sua matriz energética dependente de fontes não renováveis (BRASIL, 2015).

A diversificação da matriz energética tem se tornado um caminho a ser seguido na busca pela substituição dos combustíveis tradicionais. A exploração desenfreada de reservas naturais e o aumento dos problemas ambientais relacionados ao uso de combustíveis fósseis provocaram a necessidade de produção sustentável de energia. Neste cenário, foram desenvolvidas novas tecnologias que buscam a produção de biocombustíveis para a utilização como fonte de energia. A biomassa, por exemplo, tem papel fundamental no contexto energético, ambiental e socioeconômico, visto que seu uso não provoca um aumento líquido no nível de CO₂ na atmosfera. Além disso, ela pode ser convertida em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, aplicáveis na geração de energia térmica (FRITZ, 2010).

Desta forma, despertou-se interesse pelos estudos e desenvolvimento das tecnologias de conversão termoquímica da biomassa. A pirólise rápida é uma das inúmeras formas de termoconversão da biomassa para obtenção de bio-óleo, o qual tem como vantagens uma densidade energética bem maior que a da biomassa que o originou, a facilidade de transporte e de estocagem, além de ser adequado para a produção descentralizada (AIRES, 2003).

O principal componente da tecnologia de pirólise rápida é o reator, o presente trabalho irá abordar sobre a utilização do reator de leito fluidizado no processo, o qual apresenta atualmente grande potencial devido ao elevado rendimento na produção de bio-óleo. Com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento do estudo do processo de pirólise, será proposto um projeto de reator de leito fluidizado para utilização em uma unidade piloto de pirólise. A biomassa utilizada para o processamento é a Casca da Castanha do Caju (CCC), um resíduo sólido abundante originário do beneficiamento de frutos do Nordeste brasileiro.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo geral estudar o processo de pirólise, em específico o processo de Pirólise Rápida, abordando suas características bem como o projeto de um reator pirolítico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisão bibliográfica abrangendo o processo de pirólise rápida e seu uso no Brasil;
- Projeto de um reator para pirólise rápida: determinação das condições de serviço e projeto do equipamento envolvendo dimensionamento e seleção dos materiais.

3. REFERÊNCIAL TEÓRICO

3.1 PIRÓLISE

A pirólise pode ser definida como a degradação térmica do material orgânico na ausência parcial ou total de um agente oxidante, ou mesmo num ambiente com uma concentração de oxigênio capaz de impedir a gaseificação intensiva do material orgânico. Este processo poderá vir a ser um eficiente aliado na geração de energia, quando diz respeito à obtenção de produtos renováveis, uma vez que o balanço energético e ecológico tem sido positivo (PEDROZA, 2010).

O tratamento térmico por pirólise recebe destaque dentre as tecnologias disponíveis e adequadas no mercado, pois reduz o volume do resíduo em até 90%, além de possibilitar o fornecimento de matérias primas, com valores agregados, que podem ser usados como fonte de combustíveis e/ou para gerar energia elétrica, bem como em outros segmentos industriais (OLIVEIRA, 2009).

O processo de pirólise envolve uma série de reações complexas que, aliado aos processos de transferência de calor e massa, resultam na produção de combustíveis com alto valor energético e poder calorífico. Se a pirólise ocorrer em baixas temperaturas e com longo tempo de residência, a produção de materiais sólidos será favorecida. Também há um favorecimento da formação de líquidos caso o tempo de residência seja curto e tenha temperaturas em torno de 500 °C. E se a reação ocorrer na presença de altas temperaturas e longo tempo de residência, a maior parte dos produtos irá se constituir de gases não condensáveis (VELDEN, 2010).

As proporções das frações líquidas, sólidas e gasosas dos produtos no final do processo dependerão dos parâmetros reacionais, das propriedades do material a ser processado e do método de pirólise que será utilizado. Entre os parâmetros que possuem influência direta, destacam-se:

a. Temperatura e Tempo de residência

A temperatura juntamente com o tempo de residência determinam expressivamente os rendimentos dos produtos obtidos através da pirólise. Tem-se que com o aumento do tempo de residência a baixas temperaturas (400 a 450°C), irão ocorrer reações secundárias de

polimerização do alcatrão que resultarão no favorecimento da produção de material sólido. Quando se quer obter altos rendimentos de alcatrão, indica-se a utilização de baixo tempo de residência e temperaturas por volta de 500°C. Enquanto que para a obtenção de maiores porcentagens de gases não condensáveis é necessário que a reação ocorra com longo tempo de residência e elevadas temperaturas (XIAO, 2013).

b. Composição da matéria

As propriedades químicas da matéria-prima influenciam de forma significativa na formação dos produtos obtidos pelo processo de pirólise, como por exemplo, a concentração na biomassa de celulose e hemicelulose que poderão favorecer a formação de gases e vapores condensáveis. Para aquelas que possuem maior concentração de lignina, favorecem a obtenção de frações sólidas, pois a lignina é responsável por cerca de 50% do carbono fixo na composição do carvão vegetal (CORTEZ, 2008).

c. Taxa de aquecimento

A influência da taxa de aquecimento sobre o processo pirolítico ocorre da seguinte forma: se o aumento de temperatura for rápido sobre o processo de pirólise, então a reação favorecerá a formação de frações voláteis (gases e líquidos). Caso o aquecimento ocorra de forma gradual, então a reação favorecerá a formação de sólidos (carvão vegetal) (CORTEZ, 2008).

d. Pressão e Granulometria da biomassa

O aumento da pressão no reator pirolítico é outro fator que contribui para a formação de frações sólidas. Ainda pode-se citar a influência da granulometria na composição do produto, pois se o material a ser processado estiver em pedaços grandes, maior será o tempo de residência dos voláteis dentro da zona de calor que consequentemente levará a reações secundárias e, logo em seguida, a carbonização do material, resultando em um maior rendimento das frações sólidas (CORTEZ, 2008).

e. Tipo de atmosfera

A atmosfera atua na desoxigenação dos vapores da pirólise, convencionalmente é utilizada uma atmosfera inerte de gás nitrogênio (N_2). Porém pode-se optar por uma atmosfera reativa, para reciclar e utilizar resíduos de gases não condensáveis produzidos durante a pirólise, em substituição total ou parcial da atmosfera inerte. A atmosfera reativa consiste principalmente de CO , CO_2 , H_2 e hidrocarbonetos leves (MULLEN, 2013).

f. Utilização de catalizadores

O catalisador é uma substância capaz de alterar a velocidade de uma reação química sem aparecer nos produtos. Há formação de compostos instáveis na superfície do catalisador que funcionam como intermediários na reação catalítica. Em catálise heterogênea são possíveis diversas combinações de fases, mas em geral o catalisador é um sólido enquanto os reagentes e produtos distribuem-se por uma ou mais fases diluídas (FIGUEIREDO, 1989).

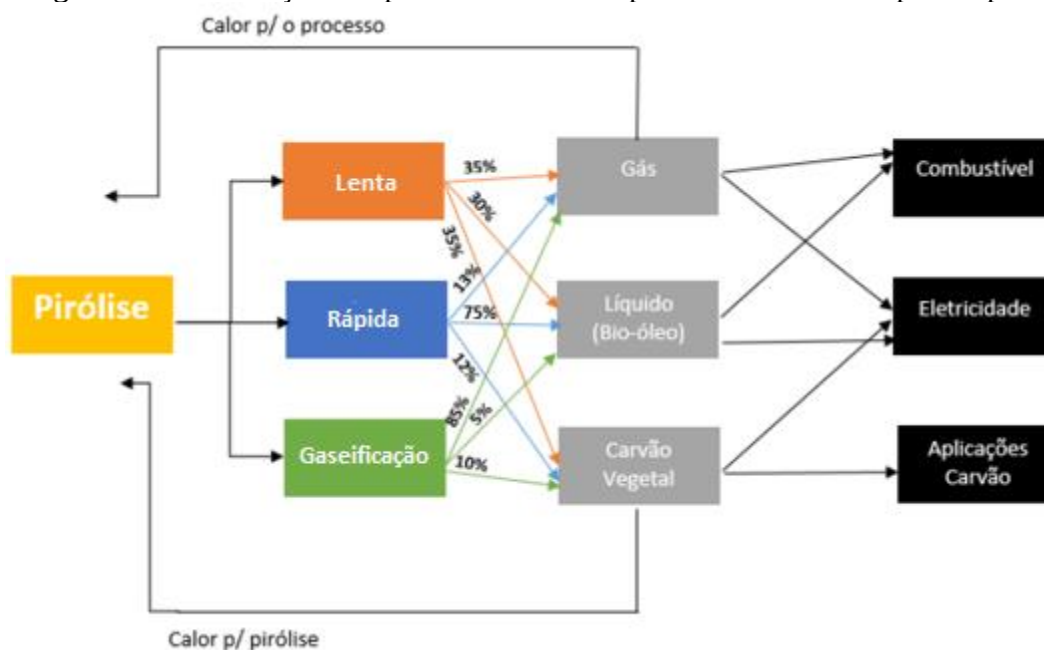
Existem basicamente três modos de se realizar a pirólise: pirólise lenta, pirólise rápida e a gaseificação. A pirólise lenta, conhecida também como carbonização, é realizada com baixas temperaturas, 400 a 450 °C, com partículas grandes e baixas taxas de aquecimento, favorecendo assim o processo de formação de carvão vegetal. A pirólise rápida ocorre em temperaturas moderadas, sendo sua temperatura máxima em torno de 650 °C e com tempo de residência de 0,5 a 5 segundos, tendo como seu principal produto o bio-óleo. A gaseificação é um tipo de pirólise que utiliza altas taxas de aquecimento, podendo obter temperaturas máximas de 1000 °C. Seu tempo de residência é longo e o produto principal da reação é o gás combustível (CORTEZ, 2008). A Tabela 1 apresenta alguns exemplos do perfil de rendimentos dos produtos para diferentes condições de processo da pirólise e a Figura 1 ilustra a distribuição desses produtos a partir de diferentes processos de pirólise.

Tabela 1 – Rendimentos típicos obtidos para diversos tipos de pirólise

Processo	Tempo de residência	Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento	Líquido (%p/p)	Sólido (%p/p)	Gás (%p/p)
Pirólise lenta	horas/dias	300-450	Muito baixa	30	35	35
Pirólise rápida	0,5-5s	450-650	Alta	75	12	13
Pirólise tipo gaseificação	Longos	800-1000	Alta	5	10	85

Fonte: Adaptado de Bridgwater (2003).

Figura 1 – Distribuição dos produtos obtidos a partir de diferentes tipos de pirólise



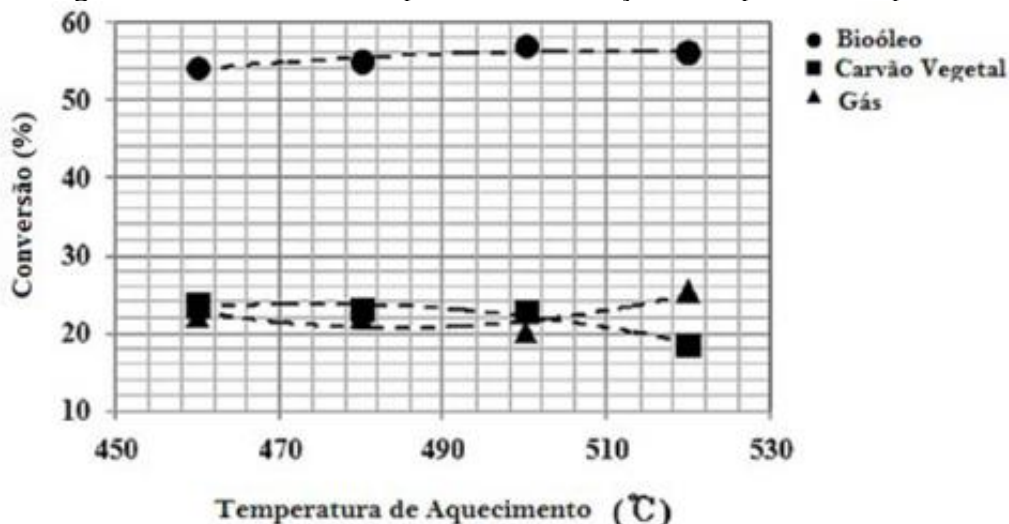
Fonte: Adaptado de Bridgwater (2004).

Os insumos tratados na pirólise podem ser os resíduos sólidos urbanos, ou seja, aqueles de origem domiciliar, comercial e de limpeza urbana. Porém, atualmente existe grande interesse para a produção sustentável de combustíveis, assim, as fontes de energia renováveis, como a biomassa, têm papel fundamental nesse contexto energético, ambiental e socioeconômico.

baixo tempo de residência dos vapores, tipicamente menor que 2 segundos e resfriamento rápido (SÁNCHEZ, 1994).

Os rendimentos dos produtos obtidos através da pirólise rápida podem variar de acordo com a temperatura adotada no processo. O gráfico mostrado na Figura 3 apresenta a variação dos rendimentos dos produtos obtidos para o processo de pirólise rápida a partir do bagaço da cana-de-açúcar (CHOI, 2011).

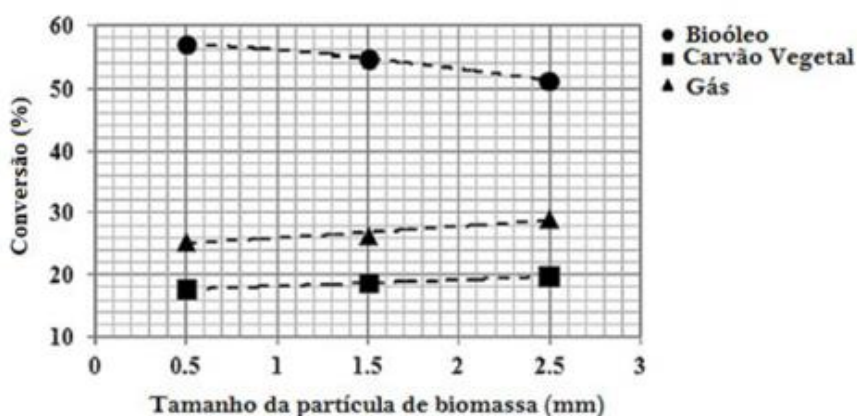
Figura 3 – Rendimento dos produtos em relação à temperatura de pirólise



Fonte: Adaptado de Choi (2011).

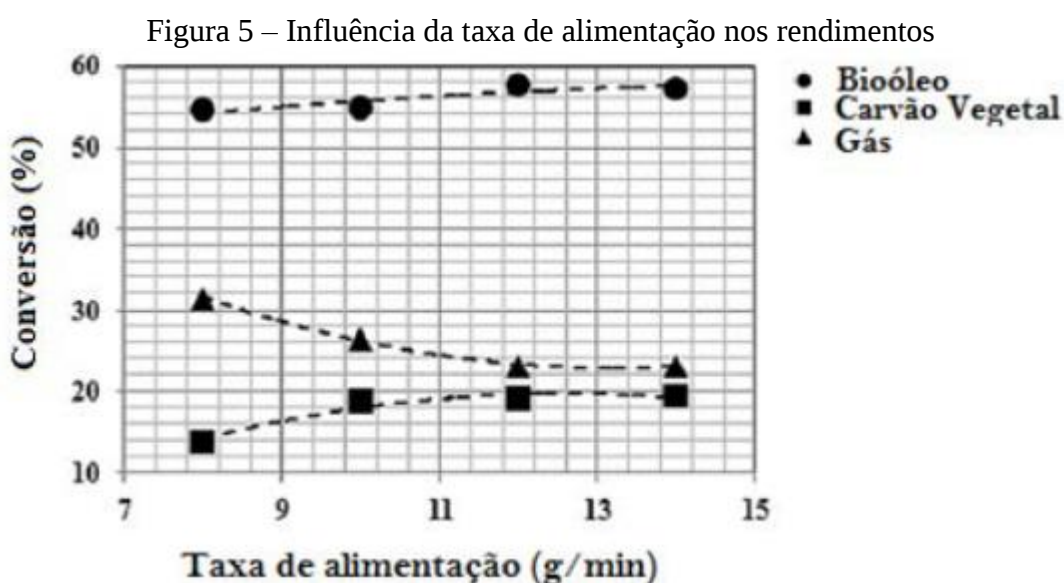
Em relação ao tamanho das partículas, quanto menor for sua dimensão, maior será a quantidade de frações líquidas produzidas. Como mostrado na Figura 4, à medida que o tamanho das partículas aumenta, ocorre a diminuição do rendimento de bio-óleo e o aumento da produção de carvão e gás. Isso acontece devido à maior dificuldade encontrada para se realizar a rápida transferência de calor, da superfície da partícula até seu interior, aumentando assim o tempo de residência que favorecerá as reações secundárias (CHOI, 2011).

Figura 4 – Rendimentos dos produtos em relação ao tamanho da partícula



Fonte: Adaptado de Choi (2011).

A Figura 5 mostra os resultados obtidos com a variação da taxa de alimentação da biomassa no sistema. Ao aumentar a taxa de fornecimento da biomassa, os rendimentos de bio-óleo e carvão serão favorecidos e, para esse mesmo caso, o rendimento do gás será reduzido. Sendo assim, com o aumento da taxa de alimentação, até o limite de fornecimento do reator, a produção de bio-óleo será favorecida devido aos fatores ligados ao padrão de fluidização, o qual será alterado em decorrência da mudança do formato da bolha e sua interação com o material lignocelulósico, otimizando as características da transferência de calor (CHOI, 2011).



Fonte: Adaptado de Choi (2011).

Com o aumento do fluxo de nitrogênio, fluido inerte, as movimentações das bolhas no reator se tornam mais vigorosas e, conseqüentemente, as interações entre as partículas quentes e a biomassa se intensificam, ocasionando o aumento da taxa de transferência de calor e favorecendo a produção de voláteis (CHOI, 2011).

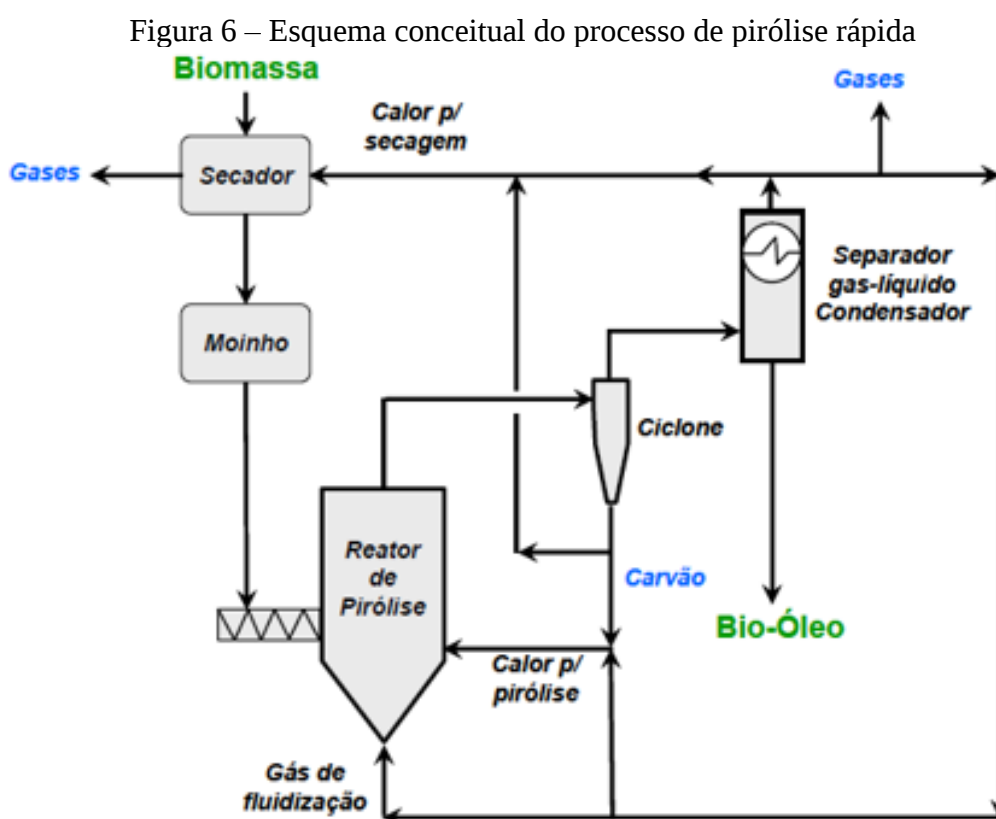
O principal objetivo da área de pirólise rápida é a implementação das chamadas bio-refinarias, consideradas como complexos de produção integrada de energia, com elevada qualidade termodinâmica e ambiental. Sendo obtida a custos competitivos, visando a sua aplicação como combustível para a produção de entalpia e energia elétrica (DINIZ, 2005).

A pirólise rápida tem demonstrado ser um método de obtenção de energia bastante atrativo, pois a facilidade de se estocar, transportar e manusear o combustível produzido, permite com que a indústria tenha um menor custo em suas operações. Por outro lado, devido ao seu formato recente, a produção em longa escala a partir deste processo pode se tornar uma operação não tão vantajosa, pois os procedimentos para extração dos combustíveis e a sua

melhoria são muito dispendiosos. Futuramente, com o desenvolvimento de novas tecnologias, espera-se que este processo seja financeiramente vantajoso e que se estabeleça no mercado de forma a beneficiar a produção de biocombustíveis (AIRES, 2003).

i. Processo da pirólise rápida

As etapas do processo de pirólise rápida compreendem: secagem da biomassa, tipicamente para menos de 10% de umidade, para minimizar a quantidade de água no produto líquido; moagem da biomassa, para obter tamanho de partículas suficientemente pequenas, em torno de 2mm para leito fluidizado; reação de pirólise; separação do carvão dos gases e vapores; condensação rápida dos vapores e coleta do bio-óleo (BRIDGWATER, 2004). A Figura 6 ilustra um esquema conceitual do processo de pirólise rápida.

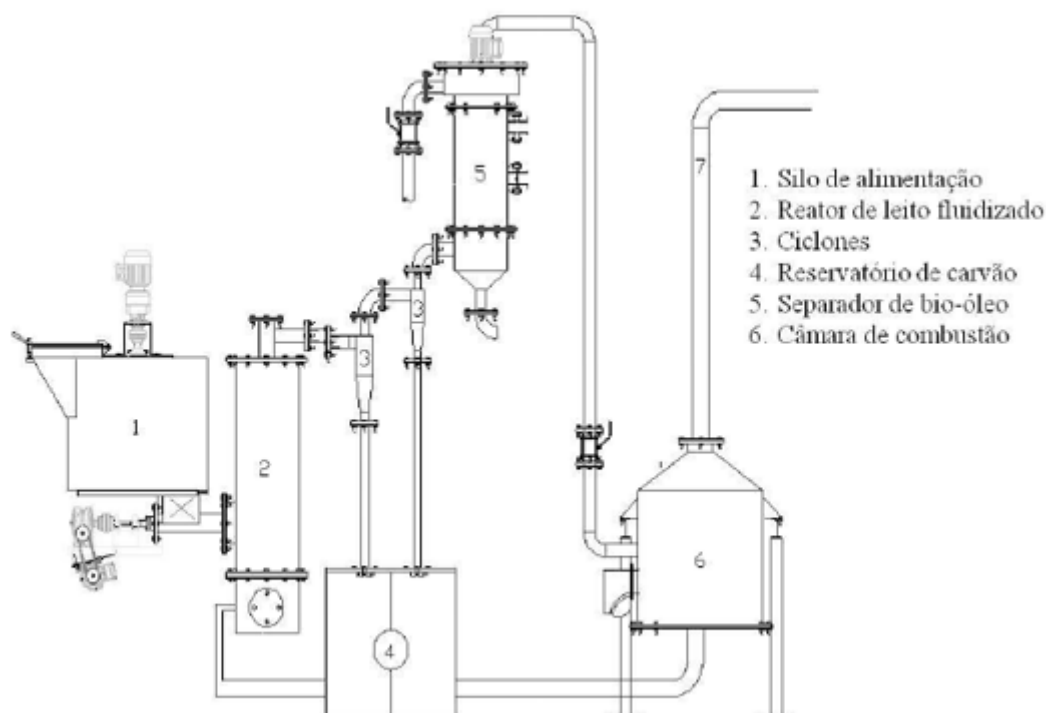


Fonte: Almeida (2008).

A PPR-20, planta de pirólise rápida da Bioware Ltda. Campinas-SP, está baseada na tecnologia de leito fluidizado e utiliza ar como agente de fluidização. A Figura 7 ilustra um esquema dos principais componentes da planta de pirólise, sendo eles: silo de alimentação, reator de leito fluidizado, ciclones, reservatório de carvão, separador de bio-óleo e câmara de combustão. Um sistema de aquisição de dados monitora as pressões e temperaturas em

diferentes alturas do reator e nas entradas e saídas dos sistemas de recuperação de bio-óleo e carvão (SOUZA, 2013).

Figura 7 – Esquema da Planta de Pirólise Rápida, modelo PPR-20, tecnologia Bioware



Fonte: Souza (2013).

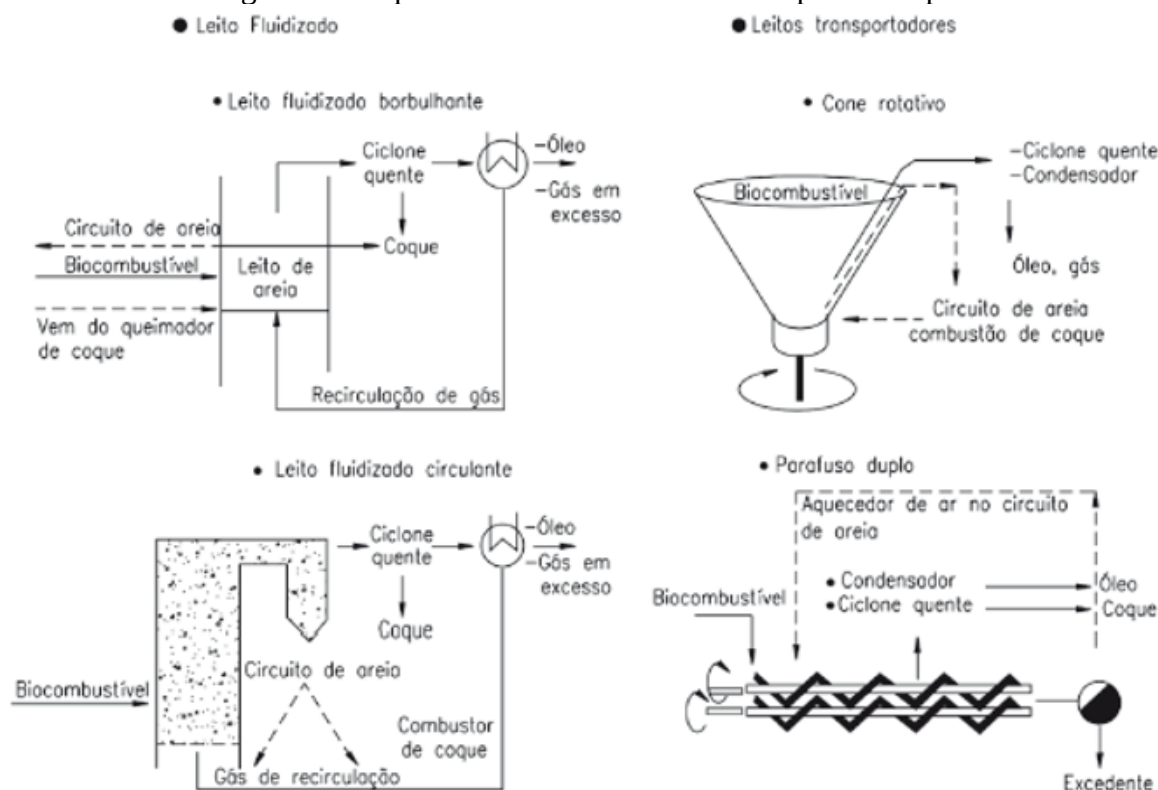
A operação da planta de pirólise PPR-20 deve-se realizar os seguintes procedimentos: (a) inicialmente, dentro do reator é colocada a areia, a qual atua com o objetivo de intensificar a troca de calor e massa com a biomassa. (b) em seguida, usando uma resistência elétrica, a temperatura da areia é aumentada até 500 °C para início da operação. (c) a biomassa é alimentada desde o silo de alimentação até o reator com a rosca sem-fim. (d) a vazão de ar é controlada por um rotâmetro em quantidade suficiente para manter a temperatura do reator entre 470-500 °C e o leito fluidizado. (e) no interior do reator, a biomassa é transformada em gases, vapores e sólidos. (f) o produto da transformação é direcionado ao ciclone, equipamento projetado para separar os sólidos dos gases e vapores. (g) estes seguem para o trocador de calor, onde ocorre a condensação do vapor à fase líquida. (h) o sistema de recuperação de bio-óleo e a câmara de combustão são ligados. (i) no sistema de recuperação, é separado o bio-óleo leve (extrato ácido) e uma fração mais viscosa, chamada de bio-óleo pesado. (j) por fim, usando um sistema de aquisição de dado, é possível controlar a pressão e a temperatura ao longo do reator e nas entradas e saídas dos sistemas de recuperação de carvão, bio-óleo e extrato (SOUZA, 2013).

ii. Reator pirolítico

A tecnologia da pirólise tem potencial para ser uma grande aliada na geração de energia. Neste processo, um equipamento importante para transformação da biomassa em um biocombustível é o reator, onde ocorre a maior parte das reações químicas. Os reatores de pirólise podem ser caracterizados a partir do movimento dos sólidos, do caráter da operação, da forma de fornecimento de energia, do tamanho da partícula empregada, entre outros. Sendo assim, os reatores poderão ter diversos tipos de configurações para o processamento de pirólise. O reator mais eficiente ainda não está estabelecido, porém o rendimento da fase líquida da maioria dos existentes se encontra na mesma faixa (entre 65 e 75%) (BRIDGWATER, 2004).

Dentre os reatores existentes, estão os reatores de leitos fluidizados (borbulhante e circulante) e de leitos transportadores (cone rotativo e parafuso duplo), como ilustrados na Figura 8. O reator mais utilizado nas plantas de pirólise rápida é o de leito fluidizado, o qual se destaca pelo seu baixo custo e a sua eficiência na transferência de calor, além de ser de fácil controle na temperatura.

Figura 8 – Esquema de reatores utilizados na pirólise rápida



Fonte: Henrich (2005).

No reator de leito fluidizado, um fluido (gás ou líquido) é passado para o seu interior em alta velocidade, capaz de suspender o material inerte e fazer com que ele se comporte como um fluido. Este processo oferece várias vantagens relevantes, tais como: flexibilidade de operação com diferentes tipos de biomassa; elevadas taxas de transferência de calor entre as partículas de biomassa e de material inerte; as temperaturas dentro do leito são uniformes e de fácil controle (LORA, 2004).

A construção e operação do leito fluidizado são relativamente simples e os processos com esses tipos de leitos são amplamente realizados, os quais possuem capacidades de alimentação de biomassa variáveis, desde frações de kg/h até ton/h. Também é importante destacar que o tempo de residência dos gases e vapores no reator deve ser bastante curto, normalmente entre 0,5 e 2s, para obtenção de maiores rendimentos de líquidos (LEDÉ, 2013).

3.1.2 Materiais utilizados na estrutura do reator pirolítico

a) Carcaça

O AISI 310 Aço cromo-níquel, inoxidável austenítico, não magnético, de elevada resistência térmica e tenacidade, é um dos aços inoxidáveis refratários. Caracteriza-se pela formação de uma camada superficial de óxidos, que não se desprende durante os ciclos térmicos e que proporciona alta resistência ao ataque de gases quentes, de produtos de queima, de sais e metais fundidos em temperaturas elevadas. Também é caracterizado por um coeficiente de dilatação térmica linear cerca de 50% maior comparado ao dos aços para construção mecânica e dos demais aços (FERNANDES, 2010). No estado solubilizado (recozido) apresenta as seguintes propriedades mecânicas:

- Dureza Rockwel: 165 HB aproximadamente;
- Resistência à tração: 665 N/mm²;
- Limite de escoamento a 0,2 %: 315 N/mm²;
- Alongamento: 40%;
- Estricção: 50%.

O aço inoxidável 310, com cromo de 24 a 26% e níquel de 19 a 22%, resiste a temperaturas de até 1150°C. Podendo este ser destinado à fabricação de retortas para fornos de tratamentos térmicos, caixas de cimentação, componentes de turbinas a gás, incineradores e peças que exigem alta resistência à corrosão em temperaturas elevadas. É amplamente

utilizado no revestimento de caldeiras e fornos nas indústrias metalúrgicas, de vidros, de materiais cerâmicos, cimento, entre outros (CUNTO, 2005).

b) Isolamento

Para o isolamento térmico, utiliza-se a manta de fibra de cerâmica e uma camada de concreto refratário, em que a fibra de cerâmica servirá para isolar o calor perdido pela camada de concreto refratário. A manta de fibra de cerâmica possui um limite de trabalho de 1425 °C e ponto de fusão muito elevado, de 1760°C. A grande vantagem da manta de fibra de cerâmica é a de ser um material muito maleável, sendo facilmente encaixada. O concreto refratário (Kaolite 3000 BR) é o material que estará em contato direto com as altas temperaturas, sendo o principal elemento para conter o calor no interior do reator. O mesmo possui condutibilidade térmica de 1,11W/(m.K) a uma temperatura de 1371 °C e sua temperatura máxima de uso contínuo é de 1815 °C. Um fator de grande importância é que o concreto refratário suporta as pressões exercidas no interior do reator devido ao aquecimento dos gases no interior deste (BARBOSA, 2017).

3.2 BIOMASSA

A biomassa consiste em elementos como carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. O enxofre está presente em menores proporções e alguns tipos de biomassa contêm também porções significantes de espécies inorgânicas. As fontes de biomassa incluem madeira e resíduos de madeira, colheitas agrícolas e seus resíduos, resíduo sólido municipal, resíduos animais, resíduo de processamento de alimento, plantas aquáticas e algas. Os principais constituintes moleculares da biomassa são hemicelulose, celulose e lignina (BRIDGWATER, 1999).

Atualmente é utilizado o termo “biomassa industrial”, o qual significa qualquer matéria orgânica disponível em base recorrente ou renovável. Esta fonte renovável de energia é resultante do armazenamento da energia solar nas plantas, que através da fotossíntese convertem o gás carbônico (CO₂) da atmosfera em compostos orgânicos usados em seu crescimento. Essa energia contida na planta pode ser recuperada mediante vários processos, destacando-se a pirólise como um dos principais processos de conversão. A biomassa é uma alternativa importante como fonte de carbono renovável no Brasil, a imensa superfície do país

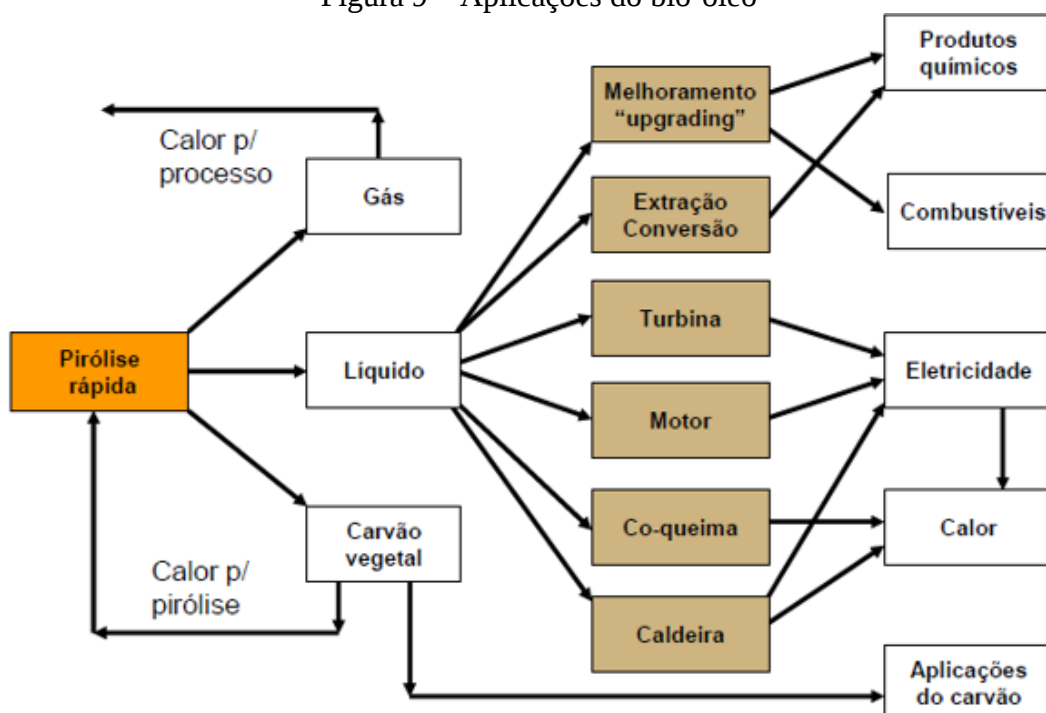
aliada ao clima favorável oferece excelentes condições para a produção e o uso energético da biomassa em larga escala (KAMM, 2006).

A biomassa precisa ser convertida a combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos que serão usados para gerar eletricidade, fornecer calor ou, ainda, para mover automóveis. Essa conversão é feita através de processos termoquímicos, bioquímicos e mecânicos. As conversões térmicas de materiais orgânicos são aquelas em que a biomassa sofre alterações na sua estrutura química, através do controle dos principais parâmetros do processo, sendo possível controlar tais parâmetros visando o maior rendimento gravimétrico da fase líquida, o bio-óleo (ROCHA, 2002).

O bio-óleo, conhecido também como óleo de pirólise, é um líquido de coloração marrom escura e odor característico de fumaça, com composição elementar próxima à da biomassa. Trata-se de uma mistura complexa de compostos oxigenados com uma quantidade significativa de água, originada da umidade da biomassa e das reações, podendo conter ainda pequenas partículas de carvão e metais alcalinos dissolvidos oriundos das cinzas. A sua composição depende do tipo de biomassa, das condições de processo, do equipamento e da eficiência na separação do carvão e na condensação. O bio-óleo pode ser considerado como uma microemulsão na qual a fase contínua é uma solução aquosa dos produtos da fragmentação da celulose e hemicelulose, que estabiliza a fase descontínua que são as macromoléculas de lignina pirolítica (BRIDGWATER, 2006).

O bio-óleo, principalmente pelo estado físico e pela semelhança química com derivados do petróleo, vem sendo indicado para substituição total ou parcial deste combustível fóssil. O mesmo tem sido utilizado com sucesso em caldeiras e tem mostrado potencial para uso em motores diesel e turbinas. Além disso, outra utilização potencial está associada às indústrias químicas e farmacêuticas (BRIDGWATER, 2004). A Figura 9 mostra um resumo das aplicações do bio-óleo.

Figura 9 – Aplicações do bio-óleo



Fonte: Adaptado de Bridgwater (2007).

3.2.1 Casca da castanha do caju

Aliando à necessidade de redução dos impactos ambientais ao foco da produção energética baseada em biomassas, deve-se trabalhar preferencialmente com o potencial dos resíduos agrícolas não comestíveis, contaminado de biomassa e resíduos de biomassa industrial, para que não haja concorrência entre as produções energética e alimentícia (TAVARES, 2016).

A região nordeste do Brasil apresenta uma forte economia em relação ao beneficiamento de frutos originários da região, como o coco, melão e caju. A casca da castanha de caju (CCC) é o principal resíduo de biomassa gerado em grande quantidade no processo de beneficiamento do fruto da castanha, boa parte deste resíduo já é reaproveitado na própria indústria ou mini-fábrica beneficiadora, e outra grande parte é destinada a aterros sanitários (MOREIRA, 2015).

Neste contexto, a CCC é um tipo de biomassa lignocelulósica que pode ser utilizada como fonte de energia e de produtos químicos através da pirólise. A mesma apresenta um grande potencial como fonte renovável para a geração de energia, por seu poder calorífico apresentar excelentes valores em relação a outras biomassas e por apresentar 60% da massa da noz de caju (FIGUEIREDO, 2011).

O processo de pirólise da CCC já vem sendo estudado por alguns pesquisadores como rota alternativa de aproveitamento desta biomassa. Das e Ganesh (2003) descreveram a distribuição dos produtos (líquido, gás e carvão) da CCC usando um reator de pirólise a vácuo e mostraram que a proporção de bio-óleo nos produtos manteve-se praticamente constante, entre 400°C e 550°C. O poder calorífico do bio-óleo obtido foi de 40 MJ.kg⁻¹, resultado semelhante aos combustíveis provenientes do petróleo.

No estudo realizado por Melzer (2013), as biomassas foram submetidas a um reator tubular previamente aquecido a 500°C sob um fluxo de nitrogênio. Dentre as biomassas estudadas, a CCC apresentou ser uma biomassa lignocelulósica rica em extrativos, revelando a influência destes sobre o comportamento de decomposição e de conversão da biomassa. Uma análise detalhada mostrou que os extrativos do óleo de pirólise da CCC não são totalmente craqueados, em comparação com óleos vegetais que se decompõem quase inteiramente, levando a sugerir propriedades físico-químicas semelhantes ao combustível óleo diesel.

3.3 APLICAÇÃO DA PIRÓLISE RÁPIDA NO BRASIL

No Brasil, as tecnologias para biocombustíveis de segunda geração ainda estão limitadas a centros de pesquisas e produção em pequena escala, devido ao elevado custo de investimento para sua produção, quando comparado com os combustíveis fósseis ou mesmo com os diversos biocombustíveis de primeira geração (FERRARI, 2005). Existem poucas pesquisas na área de pirólise rápida de biomassa, apenas o grupo de biocombustíveis da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP em parceria com a BOWARE conseguiu apresentar resultados de grande relevância ao trabalhar com a obtenção de bio-óleo a partir da tecnologia de reator de leito fluidizado borbulhante com capacidade de 200kg/h (MESA, 2003).

Este caso de obtenção do bio-óleo, em conformidade com o conceito de biorrefinarias e sua aplicação no mercado energético, foi o projeto realizado pela Bioware, empresa de base tecnológica, especializada no fornecimento de tecnologias inovadoras de alto impacto para produção de biocombustíveis, que consiste na separação de ácidos carboxílicos de baixo peso molecular contidos no bio-óleo para obtenção de um combustível líquido similar ao etanol, mediante a esterificação de Fisher em meio ácido. O combustível obtido após esse processo é denominado de bioflex que posteriormente será misturado com a gasolina comercial para o funcionamento de motores ciclo Otto (SAMANIEGO, 2007).

Neste projeto, o bioflex, produzido a partir dos ácidos carboxílicos do bio-óleo apresenta um poder calorífico superior à do etanol em 16,25%. Os resultados obtidos da mistura do bioflex com a gasolina e sua utilização em motores de ciclo Otto, demonstraram a sua viabilidade técnica, devido aos padrões termodinâmicos da mistura serem similares aos combustíveis já utilizados no país e se encontraram em conformidade com as especificações da Agência Nacional do petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (SAMANIEGO, 2007).

Com adoção do processo termoquímico de pirólise rápida em grandes escalas e a nível nacional, seria possível produzir cerca de 6326,1 kg de bio-óleo por cada hectare plantado no Brasil, equivalendo aproximadamente a 113869,8 MJ/ha. Isso seria equivalente a um acréscimo de 62,8% na produção de biocombustíveis, derivados da cana-de-açúcar, na matriz energética brasileira. A produção do bio-óleo tem grande vantagem em frente a outros biocombustíveis devido a sua diversidade de utilização, pois a partir dele é possível a produção de vários outros produtos (SOUZA, 2013).

Infelizmente, a utilização direta do bio-óleo como combustível ainda apresenta alguns problemas, como a sua baixa volatilidade, a alta viscosidade e corrosividade, tornando-o tecnicamente inviável no funcionamento de motores a combustão interna. Sendo assim, é necessário o estudo aprofundado do bio-óleo, visando sua melhoria para que possa obter um combustível compatível com os derivados de petróleo de forma técnica e economicamente viável para o seu consumo e produção (SAMANIEGO, 2007).

4. PROJETO DO REATOR PIROLÍTICO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS

As características físicas e morfológicas das partículas afetam desde fenômenos moleculares até o dimensionamento de um reator pirolítico. Tais características têm influência direta no aspecto construtivo, como diâmetro e altura útil, bem como, no aspecto operacional, como a definição de vazão de operação e perda de carga. No que se refere a tipos de particulados, pode-se citar o emprego da areia como material inerte em leitos fluidizados (CREMASCO, 2012).

a) Diâmetro de Sauter (d_{sv})

Visando representar melhor a interação entre a partícula e o fluido no interior do leito, pode ser encontrado o diâmetro de Sauter das partículas. De acordo com Cremasco (2012), este representa o diâmetro de uma esfera com razão entre área superficial externa (S_p) e o volume da partícula (V_p), conforme a equação a seguir:

$$\frac{\pi d_{sv}^2}{\frac{\pi d_{sv}^3}{6}} = \frac{S_p}{V_p} \quad (1)$$

b) Esfericidade (ϕ)

Outro parâmetro de influência no dimensionamento do reator é a esfericidade da partícula do material inerte. Segundo Kunii e Levenspiel (1991), pode ser definida pela razão entre a área superficial de uma esfera de mesmo volume da partícula analisada e a área superficial dessa partícula, conforme a Equação 2. A Tabela 2 apresenta esfericidades calculadas para diferentes tipos de areia.

$$\phi = \left(\frac{\text{superfície da esfera}}{\text{superfície da partícula}} \right)_{\text{de mesmo volume}} \quad (2)$$

Sendo

$\Phi = 1$ para esferas;

$0 < \Phi < 1$ para todos os outros formatos de partículas.

Tabela 2 – Esfericidade de partículas	
Tipo de partícula (Areia)	Esfericidade (Φ)
circular	0,86
pontiaguda	0,66
praia	maior que 0,86
rio	menor que 0,53

Fonte: Adaptada de Kunii e Levenspiel (1991).

c) Massa específica aparente (ρ_p)

A massa específica determinante no estudo é a aparente, a qual considera o volume das partículas incluindo o volume de seus poros internos (Equação 3). Vale ressaltar que para as partículas não porosas a massa específica aparente será igual a massa específica real (Yang, 2003).

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (3)$$

Sendo

m_p = massa da partícula;

V_p = volume da partícula.

d) Porosidade ($\mathcal{E}_p$)

A porosidade da partícula ($\mathcal{E}_p$) é encontrada a partir da razão entre o volume de poros no seu interior e o volume da partícula. Esta pode se relacionar com as densidades aparente e real (Equação 4), já que uma considera o volume ocupado pelos poros e a outra não, respectivamente.

$$\mathcal{E}_p = 1 - \frac{\rho_p}{\rho_r} \quad (4)$$

No estudo realizado por Kunii e Levenspiel (1991), foram apresentados valores de porosidade na condição de mínima fluidização ($\mathcal{E}_{mf}$) para alguns sólidos, os quais são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Porosidade na condição de mínima fluidização para alguns sólidos

Partículas	Diâmetro médio de partícula, d_p (mm)						
	0,02	0,05	0,07	0,10	0,20	0,30	0,40
Areia pontiaguda, $\phi=0,67$	---	0,60	0,59	0,58	0,54	0,50	0,49
Areia circular, $\phi=0,86$	---	0,56	0,52	0,48	0,44	0,42	---
Pó de carvão	0,72	0,67	0,64	0,62	0,57	0,56	---
Carvão antracite, $\phi=0,63$	---	0,62	0,61	0,60	0,56	0,53	0,51

Fonte: Adaptada de Kunii e Levenspiel (1991).

4.2 PARÂMETROS DE FLUIDIZAÇÃO

No leito fluidizado ocorre um processo pelo qual as partículas sólidas passam a apresentar comportamento semelhante ao de um fluido, por meio da suspensão em um gás ou líquido. Isso proporciona uma mistura intensa entre as fases fluida e particulada, o que implica em taxas elevadas de transferência de calor e de massa, bem como a uniformidade de distribuição de temperatura no interior do reator (CREMASCO, 2012).

Para atingir a situação de leito expandido é necessário chegar ao ponto em que a força de arraste entre a partícula e o fluido se iguale ao peso da partícula, de modo que todas as partículas fiquem suspensas pelo fluido ascendente. Kunii e Levenspiel (1991) propuseram que o início do estado de mínima fluidização, para um leito de partículas apoiadas sobre um distribuidor uniforme de gás, ocorre com a igualdade da equação a seguir:

$$\Delta P_b A_b = A_b \cdot L_{mf} \cdot (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g \quad (5)$$

em que

ΔP_b é a queda de pressão do gás através do leito (N/m²);

A_b é a área da secção transversal do tubo (m²);

L_{mf} é a altura do leito nas condições de mínima fluidização (m);

ε_{mf} é a porosidade do material no leito nas condições de mínima fluidização;

ρ_p é a densidade aparente das partículas sólidas do leito (kg/m³);

ρ_g é a densidade do gás (kg/m³);

g é aceleração da gravidade (m/s²).

De outro modo, Ergun e Ozcelik (2013) propuseram que a queda de pressão pode ser relacionada com outras grandezas num leito de partículas esféricas de iguais tamanhos, através da equação:

$$\frac{\Delta p}{L_f} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu_g U_0}{(\phi \cdot d_p)^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho_g \cdot U_0^2}{\phi \cdot d_p} \quad (6)$$

em que

L_f é a altura do leito estacionário de partículas (m);

ε é a porosidade do material inerte do leito na condição de leito estacionário;

μ_g é a viscosidade dinâmica do gás (Pa.s);

U_0 é a velocidade superficial do gás através do leito fixo de partículas (m/s);

d_p é o diâmetro médio de Sauter da partícula (m);

ϕ é a esfericidade das partículas do leito.

Em geral, para sólidos isotrópicos, Yang (2003) afirma que ao combinar as Equações 5 e 6 é possível encontrar a velocidade superficial nas condições de mínima fluidização (U_{mf}), originando a equação:

$$\frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi} \cdot \left(\frac{d_p \cdot U_{mf} \cdot \rho_g}{\mu_g} \right)_{p,mf}^2 + \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi^2} \cdot \left(\frac{d_p \cdot U_{mf} \cdot \rho_g}{\mu_g} \right)_{p,mf} = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{\mu_g^2} \quad (7)$$

Por sua vez, ao relacionar a Equação 7 com outros parâmetros, é possível simplifica-la (Equação 8), em que levando em consideração as condições para mínima fluidização, Re_{mf} é o

número de Reynolds (Equação 9), Ar é o número de Arquimedes (Equação 10) e os coeficientes K_1 e K_2 (Equações 11 e 12, respectivamente).

$$K_1 \cdot Re_{mf}^2 + K_2 \cdot Re_{mf} = Ar \quad (8)$$

$$Re_{mf} = \frac{d_p \cdot U_{mf} \cdot \rho_g}{\mu_g} \quad (9)$$

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{\mu_g^2} \quad (10)$$

$$K_1 = \frac{1,75}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi} \quad (11)$$

$$K_2 = \frac{150 \cdot (1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \cdot \phi^2} \quad (12)$$

A partir do resultado da raiz positiva obtida pela Equação 8, para o Re_{mf} , é possível encontrar a velocidade de mínima fluidização através da equação:

$$U_{mf} = \frac{Re_{mf} \cdot \mu_g}{\rho_g \cdot d_p} \quad (13)$$

Um aumento excessivo na velocidade do fluido proporciona um maior movimento das partículas e, conseqüentemente, uma expansão progressiva do leito, esse excesso pode resultar em grande instabilidade. Assim, é importante conhecer a velocidade do gás que limita o leito fluidizado, evitando que as partículas sejam arrastadas para fora do leito quando a velocidade do gás excede sua velocidade terminal. Haider e Levenspiel (1989) propuseram a Equação 14 para uma aproximação adimensional, a fim de avaliar diretamente a velocidade terminal das partículas, tendo em vista a necessidade de se obter o termo d_p^{ad} , o qual representa o tamanho adimensional da partícula (Equação 15).

$$U_t^{ad} = \left[\frac{18}{(d_p^{ad})^2} + \frac{2,335 - 1,744 \cdot \phi}{(d_p^{ad})^{0,5}} \right]^{-1} \quad (14)$$

$$d_t^{ad} = d_p \cdot \left[\frac{\rho_g \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{\mu^2} \right]^{1/3} \quad (15)$$

Por fim, é possível determinar a velocidade terminal da partícula através da equação:

$$U_t = U_t^{ad} \cdot \left[\frac{\mu \cdot (\rho_p - \rho_g) \cdot g}{\rho_g^2} \right]^{1/3} \quad (16)$$

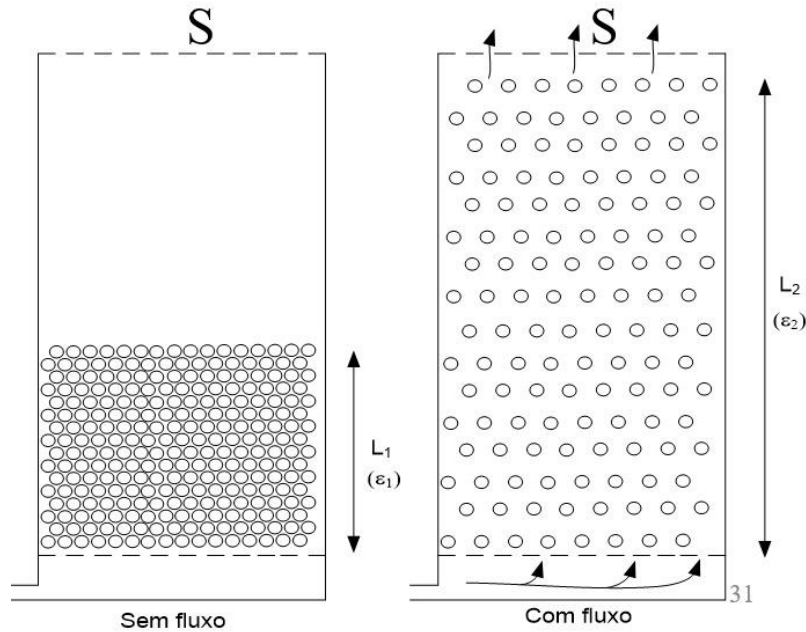
4.3 DIMENSÕES DO REATOR PIROLÍTICO

4.3.1 Altura do reator

Quando o leito atinge o estado de fluidização, há um aumento da porosidade e da sua altura. Esta relação é dada pela Equação 17. A Figura 10 ilustra o leito em seus dois estados (estacionário e fluidizado).

$$S \cdot L_1 \cdot (1 - \varepsilon_1) = S \cdot L_2 \cdot (1 - \varepsilon_2) \quad (17)$$

Figura 10 – Representação dos estados do leito no reator pirolítico



Fonte: Adaptada de Kunii e Levenspiel (1991).

Por sua vez, a altura total do reator (L_R) pode ser definida pela Equação 18, sendo a resultante da relação entre a altura do leito expandido (L_e) e a distância percorrida pelos vapores na região de reações secundárias da pirólise (L_{sec}).

$$L_R = \frac{L_e}{2} + L_{sec} \quad (18)$$

sendo

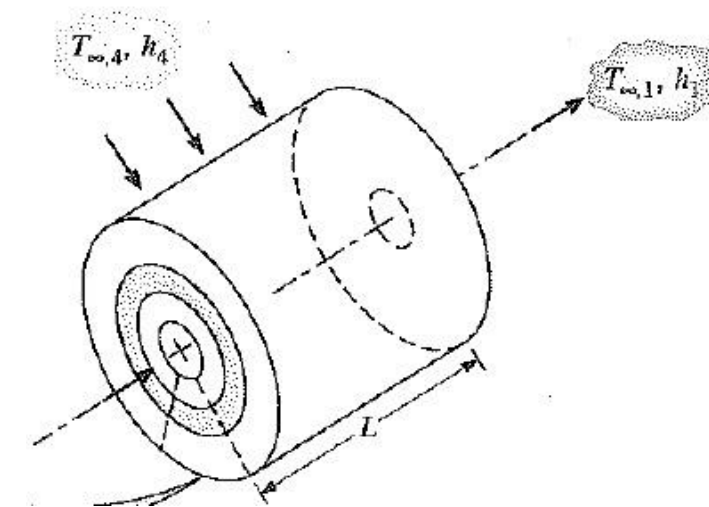
$$L_{sec} = U_0 \cdot t \quad (19)$$

em que U_0 corresponde à velocidade superficial da mistura de gases e t é o tempo de residência dos vapores no interior do reator.

4.3.2 Espessuras das camadas da parede do reator

Para determinar as dimensões das camadas do isolamento do reator é necessário a realização de uma análise da transferência de calor, objetivando adequar as espessuras das paredes de modo que o calor permaneça no interior do reator. Considerando um sistema composto de paredes cilíndricas, como mostrado na Figura 11, em que um fluido quente escoar em seu interior e um fluido frio está em contato com a sua superfície externa, há ocorrência de transferência de calor por convecção e por condução.

Figura 11 – Sistema de transferência de calor em parede composta cilíndrica



Fonte: Incropera (2011).

De acordo com Incropera (2011), a taxa de transferência de calor por convecção em uma parede cilíndrica pode ser obtida facilmente através da Equação 20. Já a distribuição de temperaturas associada à condução radial ocorre de forma logarítmica, não linear. Aplicando a lei de Fourier na distribuição de temperaturas é possível obter a taxa de transferência de calor (q_r), representada pela Equação 21.

$$q_r = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L \cdot h_1 \cdot (T_{s,1} - T_{s,2}) \quad (20)$$

$$q_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k \cdot (T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (21)$$

Ainda segundo Incropera (2011), considerando o sistema composto na Figura 11 e desprezando as resistências de contato interfaciais, a taxa de transferência de calor (q_r) pode ser representada pela equação:

$$q_r = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L \cdot h_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k_A \cdot L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2 \cdot \pi \cdot k_B \cdot L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2 \cdot \pi \cdot k_C \cdot L} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_4 \cdot L \cdot h_4}} \quad (22)$$

sendo

q_r = taxa de transferência de calor (W);

L = altura (m);

k = coeficiente de condução (W/m.K);

T = temperatura (K);

R = resistência térmica (K/W);

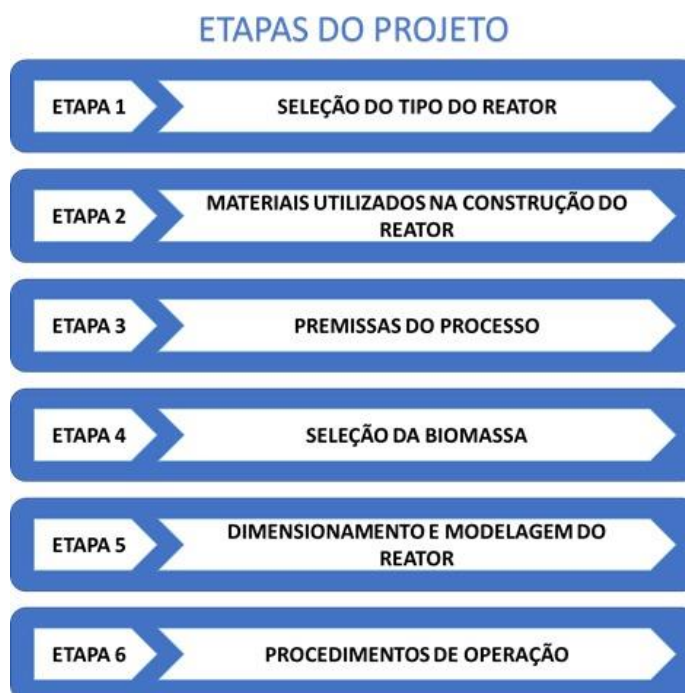
h = coeficiente de convecção (W/m².K)

5. MATERIAIS E MÉTODOS

O projeto do reator tem como finalidade a aplicação da técnica de pirólise rápida em uma planta piloto. Por meio de pesquisas bibliográficas foi feito um levantamento dos dados necessários para estabelecer as condições de contorno de operação e projeto/dimensionamento do equipamento. Dentre tais condições, foram estudadas a influência de parâmetros, como a temperatura e o tempo de reação, as características da biomassa a ser processada e os subprodutos resultantes do processo.

O presente trabalho irá determinar o tipo e as dimensões do reator, bem como as especificações de materiais a serem utilizados na construção do protótipo, a biomassa e os procedimentos de operação. A Figura 12 ilustra o fluxograma com as etapas a serem realizadas, as quais são descritas a seguir.

Figura 12 – Fluxograma das etapas do projeto do reator pirolítico



Fonte: Autoria própria (2020).

i. Tipo do reator

Optou-se pelo reator de leito fluidizado por ser mais utilizado, o qual destaca-se por possibilitar elevadas taxas de transferência de calor para as partículas de biomassa e pela sua eficiência no controle da temperatura. Além disto, sua construção e operação são relativamente simples, o que implica no baixo custo.

ii. Materiais utilizados na construção do reator

Para compor a estrutura do reator, foi selecionado o aço inoxidável refratário AISI 310, o qual caracteriza-se pela elevada resistência aos ciclos térmicos, ataque de gases quentes e de produtos de queima. Já para o isolamento térmico será utilizada uma manta de fibra cerâmica e uma camada de concreto refratário. A manta de fibra foi escolhida por possuir um ponto de fusão muito elevado, além de ser um material muito maleável podendo ser facilmente aplicada, esta servirá para isolar o calor perdido pela camada de concreto. O concreto refratário, Kaolite 300 BR, estará em contato direto com as altas temperaturas das partículas e gases no interior do reator, para isso, tem como característica uma alta condutibilidade térmica a elevadas temperaturas de trabalho. Além disso, um fator de grande importância é a sua capacidade de suportar as pressões exercidas pelos gases devido ao aquecimento no interior do reator.

iii. Premissas de projeto

A temperatura, taxa de aquecimento e o tempo de residência são fatores determinantes nos rendimentos dos produtos da pirólise, para elevar a fração líquida é necessário um baixo tempo de residência, alta taxa de aquecimento e temperaturas moderadas. Após análise dos estudos de casos abordados no presente trabalho e visando maximizar a produção de bio-óleo, foi determinado um aumento de temperatura da biomassa até atingir 500 °C, com tempo de residência no interior do leito de 2 segundos.

Para a desoxigenação dos vapores da pirólise, optou-se por uma atmosfera inerte de gás nitrogênio (N_2), bem como a reutilização dos gases não condensáveis produzidos durante a pirólise. Estes gases devem estar a uma pressão de 1 atm, uma vez que o aumento da pressão favoreceria a formação de fração sólida dos produtos. Dentro do reator é utilizado ainda um material inerte para intensificar a troca de calor com a biomassa, tendo a areia sílica (dióxido de silício = SiO_2) um ótimo desempenho nesta função.

iv. Escolha da biomassa

Um dos grandes focos da produção energética baseada em biomassas é trabalhar com o potencial dos resíduos agrícolas não comestíveis. O Nordeste brasileiro tem uma forte economia em relação ao beneficiamento de frutos originários da região, neste contexto, a casca de castanha de caju é um tipo de biomassa lignocelulósica a qual apresenta um grande

potencial como fonte renovável de energia através da pirólise, por seu poder calorífico apresentar excelentes valores em relação a outras biomassas.

v. Dimensionamento e modelagem do reator

Para o projeto do reator pirolítico se faz necessário o conhecimento das características físicas e morfológicas das partículas inertes utilizadas no leito fluidizado, tendo em vista que essas características possuem influência direta nos aspectos construtivos e operacionais do reator. Desta forma, através das equações presentes no item 4.1, foram calculados o diâmetro de Sauter, a esfericidade, a massa específica e a porosidade das partículas.

Para atingir a situação de leito fluidizado é necessário determinar a velocidade de mínima fluidização, velocidade na qual as partículas sólidas passam a apresentar comportamento semelhante ao de um fluido por meio da suspensão do gás. Isso ocorre quando chega ao ponto em que a força de arraste entre a partícula e o fluido iguala-se ao peso da partícula, de modo que todas as partículas fiquem suspensas pelo fluido ascendente. Um aumento excessivo nessa velocidade pode resultar em grande instabilidade, visto isso é de grande importância calcular a velocidade do gás que limita o leito fluidizado, evitando que uma expansão progressiva do leito proporcione o arraste de partículas para fora do reator. Os procedimentos dos cálculos a serem executados para encontrar a velocidade mínima de fluidização e a velocidade terminal da partícula estão presentes no item 4.2.

Definidos os parâmetros e premissas de projeto, é possível realizar o dimensionamento do reator pirolítico. A sua altura é encontrada através da equação presente no item 4.3.1, representada pela relação entre a altura do leito expandido e a distância que deve ser percorrida pelos vapores na região secundária da reação de pirólise. Para determinar as dimensões das camadas do isolamento do reator é necessário a realização de uma análise da transferência de calor, objetivando adequar as espessuras das paredes de modo que o calor permaneça no interior do reator. Isto foi possível através da utilização das equações presentes no item 4.3.2, em que para definir a resistência térmica equivalente da parede do reator foi preciso ter conhecimento dos coeficientes de transferência de calor por convecção e condutibilidade térmica de cada material, bem como as temperaturas envolvidas (a desejada no interior do reator de 500°C e a temperatura ambiente de 25°C). Após a definição dos materiais e dimensões foi feita a modelagem em CAD dos componentes do reator pirolítico separadamente e, posteriormente, a montagem do equipamento.

vi. Procedimentos de operação

Com a modelagem concluída, será desenvolvido o planejamento do procedimento de montagem, o qual trata-se da sequência e indicação dos locais dos equipamentos que compõem o reator. Em seguida, será descrito o procedimento de operação e as etapas do processo da pirólise.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este item encontra-se subdividido em duas partes, nas quais são apresentados e discutidos os principais resultados obtidos no projeto do reator de pirólise rápida. A primeira parte trata-se das características do processo, abordando os parâmetros e o dimensionamento do reator. A segunda apresenta a modelagem do reator e são indicados os procedimentos necessários para a sua montagem e operação.

6.1 CARACTERIZAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DO REATOR PIROLÍTICO

O reator de leito fluidizado foi projetado para utilização em uma unidade piloto de pirólise rápida, composta ainda por um sistema de alimentação contínua de biomassa (CCC), ciclones para separar finos de carvão dos vapores, um condensador de bio-óleo e um sistema de reutilização dos gases remanescentes no processo. Os dados de entrada e os obtidos através dos calculados são apresentados nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 – Dados de entrada para o projeto do reator pirolítico

Parâmetros de entrada	Valor
Temperatura no interior do reator ($^{\circ}\text{C}$)	500
Temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	25
Pressão no reator (kPa)	101,325
Viscosidade dinâmica para a mistura de gases e vapores ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$)	$1,787 \times 10^{-5}$
Aceleração da gravidade (m s^{-2})	9,807
Número de furos por área do distribuidor de gás (m^{-2})	1000
Tempo de residência (s)	2
Diâmetro interno do reator (m)	0,35
Densidade aparente do N_2 (kg m^{-3})	1,1455
Densidade aparente da areia de sílica (kg m^{-3})	1700
Diâmetro da partícula de areia (m)	$0,164 \times 10^{-3}$
Taxa de alimentação da biomassa (kg h^{-1})	50
Diâmetro da partícula de biomassa (m)	0,001
Razão entre massa de areia e taxa de alimentação de biomassa (kg (kg/h)^{-1})	0,6

Fonte: Autoria própria (2020).

Dentre os parâmetros de entrada é importante destacar as considerações feitas em relação à temperatura no interior do reator, o tempo de residência e razão entre a massa de areia e a taxa de alimentação de biomassa. Como citado anteriormente, Sanchez (1994), Bridgwater (2003), Xiao (2012), entre outros destacam que na pirólise rápida a temperatura de 500°C apresenta elevados rendimentos da fração líquida e é amplamente utilizada, sendo este um valor de referência nessa área de estudo. Nos estudos de Sánchez (1994), Lédé (2013), entre outros, indicam a utilização de um tempo de residência dos vapores no leito bastante curto, normalmente cerca de 2s para maiores rendimentos de líquidos. Foi considerada uma razão entre a massa de areia e a taxa de alimentação de biomassa no valor de 0,6, condição na qual Mesa Pérez et al (2014) verificaram maior intensidade de reações de pirólise rápida.

Tabela 5 – Dados calculados para o projeto do reator pirolítico

Parâmetros calculados	Valor
Quantidade de areia (<i>kg</i>)	30
Altura do leito estacionário (<i>m</i>)	0,1834
Esfericidade	0,670
Porosidade de mínima fluidização	0,560
Diâmetro de Sauter (<i>m</i>)	9,807
Diâmetro primitivo adimensional da partícula	6,412
Velocidade terminal adimensional da partícula	2,608
Velocidade terminal da partícula ($m\ s^{-1}$)	1,591
Coeficiente K_1	14,873
Coeficiente K_2	837,202
Número de Arquimedes	16871,351
Número de Reynolds	15,747
Velocidade de mínima fluidização ($m\ s^{-1}$)	0,374
Altura do leito expandido (<i>m</i>)	0,417
Altura do reator (<i>m</i>)	0,957
Diâmetro externo do reator (<i>m</i>)	0,610

Fonte: Autoria própria (2020).

No que concerne ao projeto, os principais parâmetros calculados foram a velocidade terminal da partícula, a velocidade mínima de fluidização e a altura do reator pirolítico, tendo em vista que o conhecimento dos mesmos é fundamental para a eficiência do reator. Como citado nos itens anteriores, para atingir o estado de leito fluidizado adequado, a velocidade do gás deve respeitar a mínima de fluidização, bem como a velocidade terminal da partícula não deve atingir o seu valor máximo. Sendo importante ressaltar que estas velocidades têm influência direta na altura do leito expandido, que por sua vez interfere no tempo de residência e nas reações químicas da biomassa.

Com o valor do diâmetro interno conhecido (0,35 m), o diâmetro externo foi determinado com o acréscimo das camadas que constituem a parede do reator, resultando em 0,61 m. A eficiência do isolamento térmico foi atestada na análise de transferência de calor, realizada com o auxílio do *software Matlab*. Os valores obtidos para a taxa de transferência de calor e a temperatura da superfície externa foram de 727,46 W e 62,85°C, respectivamente. Para alcançar tais resultados, a parede do reator foi composta por 25 mm de espessura na camada de concreto refratário, 100 mm na manta de fibra cerâmica e 5 mm de aço inox AISI 310 (Figura 13). A disparidade da espessura da manta de fibra em relação às demais camadas constituintes justifica-se pela mesma possuir baixa condutibilidade térmica e se tratar de um material maleável e de fácil aplicação.

Figura 13 – Camadas de isolamento térmico da parede do reator e suas características

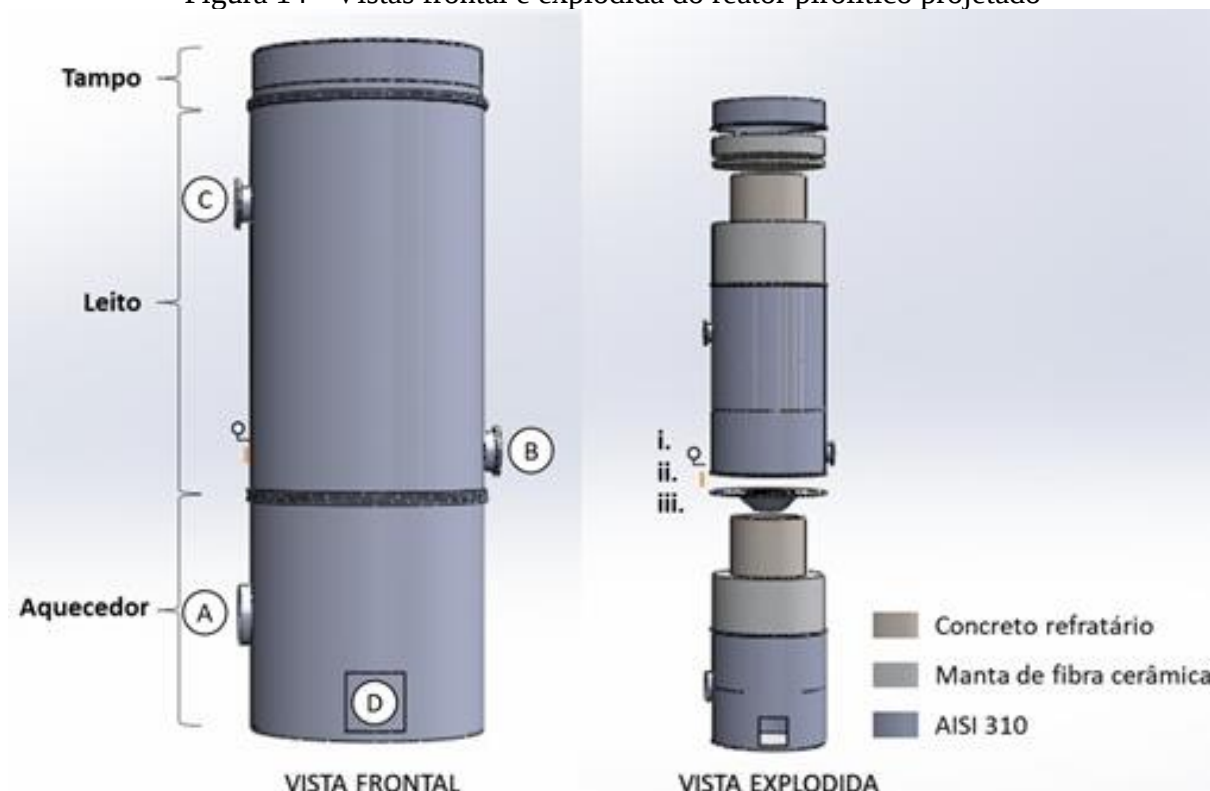


Fonte: Autoria própria (2020).

6.2 MODELAGEM EM CAD DO REATOR E PROCEDIMENTOS PARA MONTAGEM E OPERAÇÃO

A modelagem do reator foi realizada com o auxílio do *software SolidWorks*, a Figura 14 mostra o resultado em vista frontal e explodida e a Tabela 6 apresenta as principais dimensões dos componentes do reator. O reator foi subdividido em três regiões principais: aquecedor, leito e tampo. Os componentes foram modelados separadamente, sendo cada um composto por camadas de aço AISI 310, manta de fibra cerâmica e concreto refratário, diferenciadas pelas suas dimensões e formas. O item iii destacado na Figura 14 refere-se ao prato distribuidor de gás, o qual apresenta 1000 orifícios por unidade de área (m²) em sua superfície, tendo como função principal a distribuição do gás de forma homogênea em toda área em contato com o material inerte presente no interior do leito.

Figura 14 - Vistas frontal e explodida do reator pirolítico projetado



Fonte: Autoria própria (2020).

Tabela 6 – Dimensões dos componentes do reator pirolítico

Componentes		Medidas (m)
TAMPO	Altura	0,130
	Diâmetro	0,610
LEITO	Altura	1,000
	Diâmetro	0,610
AQUECEDOR	Altura	0,700
	Diâmetro	0,610

Fonte: Autoria própria (2020).

Os procedimentos de montagem do reator pirolítico são descritos a seguir:

- 1) Inserir a tubulação da alimentação de gás N_2 ao aquecedor no local A;
- 2) Acoplar o prato distribuidor (iii) na tubulação de alimentação do gás N_2 e na parte superior do aquecedor;
- 3) Montar o leito na parte superior do prato distribuidor;
- 4) Conectar o sistema de alimentação contínua de biomassa na entrada B;
- 5) Conectar na saída C a tubulação que transporta os resíduos e vapores até o ciclone;
- 6) Montar o manômetro (i) e o termopar (ii) na parede do leito;
- 7) Por fim, colocar o tampo na parte superior do leito.

Após concluída a montagem do reator, é possível iniciar a operação da pirólise rápida, a qual é descrita a seguir:

- a) A areia de sílica é colocada no reator através da parte superior do leito e o tampo é fechado;
- b) Utilizando o aquecedor (alimentado pela entrada D), a temperatura da areia é aumentada até atingir 500 °C;
- c) O reator é alimentado pela biomassa através do sistema contínuo de transporte (rosca sem fim);
- d) A vazão de ar é controlada, de forma que a velocidade do gás seja suficiente para manter a temperatura do reator a 500 °C e o leito fluidizado.

No interior do leito ocorrem as reações químicas e a biomassa é transformada em gases, vapores e sólidos, os quais são arrastados para fora do leito. Ao chegarem ao ciclone, os resíduos sólidos são separados dos gases e vapores. Em seguida, os resíduos são retirados e os vapores seguem para o trocador de calor, onde ocorre a condensação da fase líquida. O sistema de recuperação coleta o bio-óleo e, por fim, a fração sólida e os gases remanescentes são reaproveitados na geração de calor para o processo.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Brasil, as tecnologias para biocombustíveis de segunda geração são limitadas a centros de pesquisas e produção em pequena escala. É necessário que haja uma intensificação e disseminação do conhecimento nas universidades para o alcance de resultados relevantes, como os da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP em parceria com a BOWARE, a qual possui duas unidades piloto de pirólise em atividade. Uma vez que o desenvolvimento do processo de pirólise é de suma importância para a indústria energética e política sustentável do país.

O presente trabalho apresentou uma proposta de um reator de leito fluidizado, para utilização em uma unidade piloto de pirólise rápida. A proposta do projeto tem como finalidade o processamento de até 50 kg/h de Casca da Castanha do Caju (CCC), visando a obtenção de maior rendimento da fração líquida (bio-óleo). Visto que, além deste, também são resultantes do processo a fração sólida (carvão) e os gases de pirólise (não condensáveis).

O sistema proposto neste trabalho apresenta como vantagens: flexibilidade de operação com diferentes tipos de biomassa; elevadas taxas de transferência de calor entre as partículas de biomassa (CCC) e o material inerte (areia sílica); temperatura uniforme e de fácil controle; baixo tempo de residência da biomassa; baixo custo na construção e fácil operação do leito fluidizado. Algumas desvantagens podem ser apresentadas na execução do processo, tais como: o tempo necessário para que o aquecimento do material inerte atinja a temperatura de operação; sinterização do material inerte e o acúmulo de resíduos dentro do reator.

O procedimento dimensional dos componentes do reator mostrou-se satisfatório, visto que os parâmetros necessários foram alcançados, respeitando as premissas e condições de serviço envolvidos no processo. Ainda é importante enfatizar que a análise da transferência de calor nas paredes do reator permitiu ajustes nas espessuras das camadas de isolamento térmico, de modo que atestasse a eficiência dos materiais selecionados para a retenção de calor no interior do leito, sem que houvesse um superdimensionamento das camadas de isolamento. Além disso, assegurou-se que a temperatura na superfície externa da parede do reator não apresente riscos aos trabalhadores durante a operação.

Por fim, os estudos mostraram que a biomassa utilizada, a CCC, apresenta um grande potencial como fonte renovável para a geração de energia, por seu alto poder calorífico (de até 40MJ/kg), resultado semelhante aos combustíveis provenientes do petróleo.

REFERÊNCIAS

- AIRES, R. D. Pirólise. III Fórum de Estudos Contábeis. Rio Claro, SP. Faculdades Integradas Claretianas, 2003.
- ALMEIDA, Marlon Brando Bezerra. Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico. Universidade federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro. Brasil. 2008.
- BARBOSA, Fernando Montanare et al. Projeto e construção de um forno para tratamento térmico de aços. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 74., 2017, Belém. CONTECC 2017. Belém: 2017.
- BRASIL. Resenha Energética Brasileira – Exercício de 2014. Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia - Ministério de Minas e Energia, 2015.
- BRIDGWATER, A. V.; MEIER, D.; RADLEIN, D. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Organic Geochemistry*, v. 30, n. 12, p. 1479-1493, 1999.
- BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, v. 91, n. 2-3, p. 87-102, 2003.
- BRIDGWATER, A.V. Biomass fast pyrolysis. *Thermal Science*: v. 8, n. 2, p. 21-49, 2004.
- BRIDGWATER, A.V. Biomass Pyrolysis - an overview prepared by Task 34. In: TUSTIN, J., IEA Bioenergy Annual Report, 2006.
- CHOI, H. S. Renewable Energy: Fast pyrolysis characteristics of lignocellulosic biomass with varying reaction conditions. Coreia, 2011.
- CORTEZ, Augusto Barbosa, et al. Biomassa para energia. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.
- CREMASCO, M. A. Operações unitárias em sistemas particulados e fluidodinâmicos. São Paulo: Blucher, 2012.
- CUNTO, Julio Cesar DL. Estudo da resistência à corrosão de aços inoxidáveis para uso na parte fria dos sistemas de exaustão de veículos. 2005. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-materiais. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- DAS, P.; GANESH, A.; Bio-oil from pyrolysis of cashew nut shell - a near fuel. *Biomass and Bioenergy*, v.25, p. 113-117, 2003.
- DINIZ, J. Conversão térmica de casca de arroz à baixa temperatura: Produção de bioóleo e resíduo sílico-carbonoso adsorvente. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

FERNANDES, João Carlos. Desenvolvimento de um dispositivo tipo carga constante para avaliação da susceptibilidade à corrosão sob tensão de aço inoxidável austenítico. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Materiais Para Engenharia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá - Mg, 2010.

FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. S.; SCABIO, A. Biodiesel de soja–taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. Química Nova, v. 28, n. 1, p. 19-23, 2005.

FIGUEIREDO, J. L.; RIBEIRO, F. R.; Catálise heterogênea; Fundação Calouste Gulbenkian: Lisboa, 1989.

FIGUEIREDO, Renata Andrade. Caracterização dos produtos da pirólise da casca de castanha de caju: influência da taxa de aquecimento e da temperatura. 2011. 107 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2011.

FRITZ, A. G. N. C. et al. Possibilidades Tecnológicas de Aproveitamento da Biomassa para Produção de Biocombustíveis. In: Abreu, Y. A. et al. Energia, economia, rotas tecnológicas. Málaga, Espanha: EumedNet, Univerdid de Málaga, 2010.

GÓMEZ, O. E. Estudo da Pirólise Rápida de Capim Elefante em Leito Fluidizado Borbulhante mediante a Caracterização dos Finos de Carvão. FEAGRI, Campinas, São Paulo, 2002.

HAIDER, A.; LEVENSPIEL, O. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles. Powder Technology, v. 58, p. 63-70, 1989.

HENRICH, E. Clean syngas from biomass by pressurized entrained flow gasification slurries from fast pyrolysis. Second Generation Automotive Biofuel Conference, 18-20, Stockholm, Sweden, 2005.

Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergman, T. L., Lavine, A. S., 2011, “Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa” Editora LTC, 6 Ed, Rio de Janeiro.

LORA, E. S.; NASCIMENTO, M. R. Geração Termelétrica: Planejamento, Projetos e Operação. Editora interciência, 2004.

LÉDÉ, J. Biomass fast pyrolysis reactors: a review of a few scientific challenges and of related recommended research topics. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles, v. 68, n. 5, p. 801-814, 2013

KAMM, B.; KAMM, M.; GRUBER, P. R. Biorefineries Systems – Na Overview. In: Biorefineries – Industrial Processes and Products . v.1. Weiheim, Germany, 2006.

KUNII, D., LEVENSPIEL, O. Fluidization engineering. 2 ed. Stoneham: Butterworth - Heinemann, 1991.

MÉIER, D. Aktuelle Entwicklungen auf dem Gebiet der Flash Pyrolyse zur Verflüssigung von Biomasse. Thermochemische Umwandlung von Biomasse, Flensburg, 2006.

MELZER, M.; BLINA, J.; BENSAXHRIAC, A.; VALETTEB, J.; BROUSTB, F. Pyrolysis of extractive rich agroindustrial residues. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v.104, p. 448-460, 2013.

MESA, J.M.; ROCHA, J.D.; OLIVARES, E. Pirólise rápida em leito fluidizado: uma opção para transformar biomassa em energia limpa. *Revista Analytica*, n.4, p.32-36, 2003.

MOREIRA, Renata. Estudo da pirólise lenta da casca da castanha de caju. 2015. 66 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

MULLEN, C. A.; BOATENG, A. A.; GOLDBERG, N.M. Production of Deoxygenated Fast Oils via Product Gas Recycling. *Energy and Fuels*, v.27, p.3867-3874, 2013.

NEGREIROS, Z. Rendimento de óleos leves obtidos da pirólise rápida de madeira e de tocos de eucalipto. In: II congresso brasileiro de ciência e tecnologia da madeira. Belo Horizonte, 2015.

OLIVEIRA, M. L.; CABRAL, L.L., LEITE, M.C.A.M.; MARQUES, M.R.C. Pirólise de resíduos poliméricos gerados por atividades offshore. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 19, n.4, p. 297-304, 2009.

Ozcelik, BK., Ergun, C., Dulger O. "Synthesis and Characterization of ZnO Nanoparticles Formed by Spray Pyrolysis Process", *International Conference on Composites or Nano Engineering ICCE-21*, Tenerife, Spain ,2013.

PANNIRSELVAM, P. V. Desenvolvimento de projeto para produção de fibra de coco com inovação de tecnologia limpa e geração de energia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. *Revista Analytica*, São Paulo, n. 15, p.56-61, 2005.

PEDROZA, M. M. Balanço energético da pirólise de lodo de esgoto: uma abordagem das propriedades termodinâmicas do processo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 18. Foz do Iguaçu: Anais. Foz do Iguaçu: ABEP, p. 1 – 8, 2010.

ROCHA, J. D. E.; GÓMEZ, O.; PÉREZ, J. M. M.; CORTEZ, L. A. B.; SEYE, O.; GONZÁLEZ, L. E. B. The demonstration fast pyrolysis plant to biomass conversion in Brazil. *World Renewable Energy Congress VII WREC*, 2002.

SAMANIEGO, M. R. P. Uso de biocombustível da pirólise rápida da palha de cana em um motor de ciclo Otto. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2007.

SÁNCHEZ, C. G. Tecnologia da Gaseificação. Campinas, SP: UNICAMP, Faculdade de Engenharia Mecânica, 1994.

SOUZA, A. R. Estudo da viabilidade da produção de bio-óleo a partir do processo de pirólise rápida do bagaço da cana-de-açúcar. 83 f. Universidade de Brasília - Unb, Gama, 2013.

TAVARES, Priscilla Torquato. Caracterizações física e química de resíduos sólidos da cajucultura e avaliação do potencial energético em processos de conversão térmica. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.

VELDEN, M. V.; Baeyens, J.; Brems, A.; Janssens, B.; Dewil, R. Renewable Energy 2010, v. 35, p. 232, 2010.

XIAO, R.; YANG, W. Renewable and Sustainable Energy Reviews: Influence of temperature on organic structure of biomass pyrolysis products. Renewable Energy. v. 50, p. 136-141, 2013.

YANG, W. C. (Ed.). Handbook of fluidization and fluid-particle systems. New York, NY: Marcel Dekker, 2003.

ATA DE DEFESA DE PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Às 15:00 horas, do dia **03 de fevereiro** deste ano, no prédio do C.E. campus Leste da UFERSA, reuniu-se a Banca Examinadora de defesa do PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO (PCC) de **JESSÉ MEDEIROS DE PAIVA FILHO** (Mat. nº 2017006522), aluno do curso de ENGENHARIA MECÂNICA desta instituição. O título do PCC foi: **PROJETO PRELIMINAR DE UM REATOR DE PIRÓLISE RÁPIDA**. A Banca Examinadora foi constituída pelo professor Dr. FRANCISCO EDSON NOGUEIRA FRAGA (C.E./DET/Eng.Mecânica/UFERSA), presidente da banca e orientador do aluno e pelo professor Dr. ROMULO PIERRE BATISTA DOS REIS (C.E./DET/Eng.Mecânica/UFERSA) e pelo Professor MSc. PRINCE AZSEMBERGH NOGUEIRA DE CARVALHO (C.E./DET/Eng.Mecânica/UFERSA). Foram registradas as seguintes ocorrências: A defesa foi pública; Após a apresentação do trabalho, foi feita arguição por parte dos membros da banca seguida de respostas por parte do aluno; Os apontamentos de correções por parte da banca foram entregues ao aluno; A aprovação ficou condicionada a apresentação ao orientador das correções solicitadas pela banca. Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da Banca Examinadora, que deliberou pela **APROVAÇÃO** do aluno, com as notas 9,0 ; 9,0 ; 9,0 , ficando o aluno com **MEDIA FINAL 9,0** e cumprindo, assim, todas as exigências para a conclusão/integralização do Projeto de Conclusão de Curso da Engenharia Mecânica. Conclusão no período letivo de 2019.**II**.

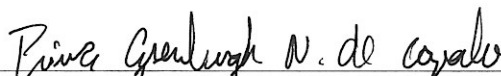
Mossoró, 03 de fevereiro de 2020.



Prof. Dr. FRANCISCO EDSON NOGUEIRA FRAGA
Orientador/Presidente da Banca Examinadora



Prof. Dr. ROMULO PIERRE BATISTA DOS REIS
Membro da banca



MSc. PRINCE AZSEMBERGH N. DE CARVALHO
Membro da banca