

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**



CAROLINA DA SILVA SABOIA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DOS
RESÍDUOS DA EXTRAÇÃO DA POLPA DE AÇAÍ (*Euterpe
Oleracea*) EM LEITO FLUIDIZADO**

São Luís
2021

CAROLINA DA SILVA SABOIA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DOS
RESÍDUOS DA EXTRAÇÃO DA POLPA DE AÇAÍ (*Euterpe
Oleracea*) EM LEITO FLUIDIZADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso da Engenharia Química da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Alejandro Carjaval Florez

São Luís
2021

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

da Silva Saboia, Carolina.

Análise experimental do comportamento dos resíduos da extração da polpa de açaí *Euterpe oleracea* em leito fluidizado / Carolina da Silva Saboia. - 2021.

43 p.

Orientador(a): Fábio Alejandro Carvajal Florez.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2021.

1. Açaí. 2. Carvão. 3. Leito Fluidizado. 4. Resíduo. I. Carvajal Florez, Fábio Alejandro. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. FÁBIO ALEJANDRO CARVAJAL FLOREZ
Orientador – DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO PEREIRA RODRIGUES
DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. JEAN ROBERT PEREIRA RODRIGUES
CCEM/CCET/UFMA

28 de abril de 2021

Dedico este trabalho ao meu pai William, mãe Jucilene (in memoriam) e à minha irmã Catarina que sempre me incentivaram aos estudos e sempre estão ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por todas as oportunidades que tive até chegar neste momento, sem Ele eu não estaria aqui.

Agradeço aos meus pais e minha irmã Catarina, que sempre me incentivaram a buscar o meu melhor, independente das situações adversas. A maior herança que a família pode dar aos filhos é o caráter e os estudos. Aos meus tios Joás Albuquerque, Graça Santos e Janete Moreira por sempre estarem ao meu lado e cuidarem de mim. Aos meus primos Samara Santos e Sóstenes Apolo, por serem como irmãos mais velhos para mim, por me incentivarem e torcerem pelo meu melhor. Ao meu avó João Fernandes por todo amor e carinho que tem me dedicado ao longo dos anos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr Fábio Alejandro Carvajal pela disponibilidade em me auxiliar neste trabalho de conclusão de curso, me permitindo usar o seu laboratório de pesquisa. Agradeço também à banca avaliadora formada pelo Prof. Dr José Roberto Rodrigues e ao Prof. Dr Jean Robert Rodrigues por disponibilizarem o seu tempo para avaliarem esse momento tão importante da minha vida.

Agradeço aos meus amigos Thiago Sousa, Raquel Nascimento e Ivo Chaves que me incentivaram e tiraram minhas dúvidas no decorrer do curso, onde me ajudaram a ver diferentes situações em uma outra perspectiva. Foram peças fundamentais para quem estou me tornando.

Tenho imensa gratidão à Marcelo José e Glene Henrique, onde foram meus superiores em um projeto de Bolsa Pesquisa no Laboratório de Análises e Química Analítica de Petróleo e Biocombustível, onde fiquei trabalhando bons anos de estudo e me deram o start para o mercado de trabalho. Foram peças fundamentais para a profissional que tenho me tornado.

Agradeço à Bruna Karoline pelo suporte e ajuda durante a realização dos ensaios de fluidização no Laboratório de Instrumentação e Automação de Processos – LEPEC vinculado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologias da Universidade Federal do Maranhão.

E não menos importante, agradeço a mim mesma por nunca ter desistido apesar dos infortúnios.

“Porque onde estiver o teu tesouro, aí estará também o teu coração.”

Mateus 6:21 (Bíblia Sagrada)

“O essencial é invisível aos olhos, só se vê bem com o coração.”

Antoine de Saint-Exúpery

SABOIA, Carolina da Silva. **Análise experimental do comportamento dos resíduos da extração da polpa de açaí (*Euterpe oleracea*) em leito fluidizado**. 2021. 43 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

RESUMO

No Maranhão o açaí possui grande importância econômica e nutricional. Além disso, constitui-se como fonte de renda para muitos comerciantes e famílias extrativistas. Apesar de ser uma fonte de material lignocelulósico renovável, o açaí representa, atualmente, um grave problema de limpeza pública devido a grande quantidade de resíduo constituídos basicamente de fibras e caroço, que normalmente são dispostos de maneira inadequada no meio ambiente, como em ruas e em lixões, sem serem submetidos a nenhum tratamento prévio, causando inúmeros prejuízos ao meio ambiente. Nesse sentido, o aproveitamento desses resíduos da extração da polpa de açaí como recheio em colunas de leito fluidizado no tratamento de sistemas gás - sólido e líquido - sólido daria uma destinação final conveniente. Assim, o objetivo deste trabalho, avaliar experimentalmente o comportamento do regime de fluidização dos resíduos da extração da polpa de açaí em leito fluidizado com geometria cônica, visando agregar valor aos resíduos gerados na extração da polpa do açaí. Para o desenvolvimento desse trabalho, utilizou-se um leito fluidizado com um formato geométrico cônico de vidro, acoplada a uma caixa de madeira interligada por um tubo de PVC de diâmetros interno e externo 5, 3 e 6 cm respectivamente a um compressor centrífugo que impulsiona o ar para o sistema experimental. Para o controle da vazão do fluido (ar comprimido) foi utilizado um inversor de frequência, cuja velocidade máxima era de 3480rpm. Os ensaios eram realizados em uma única altura estática de leito, $H_0 = 5$ cm. Os sinais digitais foram processados e analisados num microcomputador com o auxílio do software Labview. O estudo indicou que o carvão vegetal de açaí foi o que apresentou um melhor comportamento dentro do leito fluidizado em comparação com o caroço de açaí com fibra e sem fibra.

Palavras-chave: Leito fluidizado. Carvão. Resíduo. Açaí.

SABOIA, C. S. **Experimental analysis of the behavior of residues from the extraction of açáí pulp (*Euterpe oleracea*) in a fluidized bed.** 2021. 43 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

ABSTRACT

In Maranhão, açáí has great economic and nutritional importance. In addition, it is a source of income for many traders and extractive families. Despite being a source of renewable lignocellulosic material, açáí currently represents a serious problem of public cleaning due to the large amount of waste consisting basically of fibers and stones, which are normally disposed of improperly in the environment, such as in streets and in dumps, without being subjected to any previous treatment, causing innumerable damage to the environment. In this sense, the use of these residues from the extraction of açáí pulp as a filling in fluidized bed columns in the treatment of solid - liquid and liquid - solid systems would provide a convenient final destination. Thus, the objective of this work is to experimentally evaluate the behavior of the fluidization regime of the residues from the extraction of the açáí pulp in a fluidized bed with conical geometry, aiming to add value to the residues generated in the extraction of the açáí pulp. For the development of this work, a fluidized bed with a conical geometric shape of glass was used, coupled to a wooden box connected by a PVC tube with internal and external diameters 5, 3 and 6 cm respectively to a centrifugal compressor that drives the air to the experimental system. For the control of the flow of the fluid (compressed air), a frequency inverter was used, whose maximum speed was 3480rpm. The tests were performed on a single static bed height, $H_0 = 5$ cm. The digital signals were processed and analyzed on a microcomputer with the aid of the Labview software. The study indicated that charcoal from açáí was the one that presented a better behavior inside the fluidized bed in comparison with the açáí stone with fiber and without fiber.

Keywords: Fluidized bed. Coal. Residue. Açáí.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fruto do açaizeiro	05
Figura 3.2 – Resíduos do caroço de açaí	07
Figura 3.3 – Diferentes regimes de fluidização em sistemas de leito fluidizado	09
Figura 3.4 – Comportamento do leito fluidizado em diferentes circunstâncias	11
Figura 3.5 – Diagrama de classificação das partículas para fluidização gás-sólido	12
Figura 4.1 – Amostras dos sólidos utilizados no leito fluidizado para avaliar o comportamento fluidodinâmico	17
Figura 4.2 – Leito experimental utilizado no ensaio fluidodinâmico	18
Figura 4.3 – Inversor de Frequência	19
Figura 4.4 – Sensor de pressão diferencial MPXV700D	19
Figura 5.1 – Curva de calibração dos sensores	22
Figura 5.2 – Comportamento inicial do açaí com fibra	23
Figura 5.3 – Comportamento final do açaí com fibra	23
Figura 5.4 – Comportamento inicial do açaí sem fibra	24
Figura 5.5 – Comportamento final do açaí sem fibra	24
Figura 5.6 – Comportamento inicial do carvão vegetal de açaí	25
Figura 5.7 – Comportamento final do carvão vegetal de açaí	25
Figura 5.8 - Curva característica de fluidização dos resíduos da extração da polpa de açaí ...	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Características distintivas dos quatro grupos de partículas segundo Geldart.....	13
Tabela 3.2 – Esfericidade de alguns materiais	16
Tabela 5.1 – Dados do ensaio preliminar para cada sensor	21

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	i
DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS.....	iii
EPÍGRAFE.....	iv
RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	viii
SUMÁRIO.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 OBJETIVOS.....	04
2.1 Objetivos gerais.....	04
2.2 Objetivos específicos.....	04
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
3.1 Açai e seus produtos	05
3.1.1 Principal subproduto da indústria de processamento do açai	06
3.2 O problema do descarte inadequado do resíduo do açai	06
3.3 Leito fluidizado	08
3.3.1 Os diferentes regimes de fluidização em leito fluidizado	08
3.3.2 Comportamento do leito fluidizado em diferentes circunstâncias	10
3.4 Fluidodinâmica em sistema de leito fluidizado	11
3.4.1 Caracterização dos grupos de partículas de acordo com Geldart	12
4 MATERIAL E MÉTODOS	17
4.1 Material.....	17
4.2 Local da pesquisa.....	17
4.3 Equipamentos utilizados	18
4.4 Ensaio do comportamento fluidodinâmico	20
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
5.1 Tratamento dos dados de pressão	21
5.2 Análise do comportamento fluidodinâmico	22
5.3 Curva característica de fluidização	26

6	CONCLUSÃO.....	27
	REFERÊNCIAS.....	28

1 INTRODUÇÃO

O mundo está mudando, com isso novas ideias vão surgindo em prol de beneficiamentos com o uso de todo o tipo de resíduos encontrados e que podem ser reaproveitados. Um desses aproveitamentos é o uso do carvão feito através do resíduo do caroço de açaí.

O açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) é um alimento típico do Brasil e pertence à família *Arecaceae* (palmeira). A palmeira está localizada nas regiões do baixo Amazonas, Maranhão, Tocantins e Amapá, alcançando as Guianas e a Venezuela (SOUZA et al., 1996), por ser uma espécie adaptada às condições elevadas de temperatura, precipitação pluviométrica e umidade relativa do ar (Nogueira; Figueirêdo; Müller, 2005).

O açazeiro é uma árvore que pode atingir até 30 metros de altura, que cresce preferencialmente em áreas úmidas. O fruto é arredondado, com aproximadamente 1 a 2 cm de diâmetro e um peso médio de 0,8 a 2,3g. Seu epicarpo é de cor violácea-púrpura, muito fino e tem apenas 1 a 2 mm de espessura, e junto com o mesocarpo constitui a parte comestível do açaí (Teixeira et al., 2006). O fruto ganhou um apelo mundial por possuir uma cor roxa escura, com sabor exótico e sem nota doce, além de ser um produto nutracêutico (Fundação Banco do Brasil, 2010).

Devido ao grande aumento da demanda pela polpa do fruto do açaí a nível nacional, e um aumento da instalação de novas indústrias em várias partes do nosso estado para suprir essa necessidade, faz-se necessário o desenvolvimento da cadeia produtiva de polpa de açaí com a utilização de tecnologias para o manejo de açazeiros nativos, melhoria da qualidade e aumento da produtividade de polpa, além de descartes adequados para os resíduos desse processo (Mochiutti et al., 2002).

Como formas de aproveitamento desse caroço, cita-se que após a decomposição pode ser largamente empregado como matéria orgânica, sendo considerado ótimo adubo para o cultivo de hortaliças e plantas ornamentais (GANTUSS, 2006). A partir dos estudos de Reis et al. (2002) verificou-se que a potência calorífica do caroço de açaí no processo de combustão é em média 4.500 Kcal/Kg. Então NAGAISHI (2007) afirma que o seu uso energético pode ser uma saída oportuna e se for bem analisada, pode ser considerada viável economicamente gerando benefícios sociais e ambientais. Já Junior (2010) indica que a produção de carvão ativado seria uma solução para esse desperdício, e daria a esse resíduo valor agregado, auxiliando na renda de comunidades onde esses produtos são descartados e diminuindo o impacto dos mesmos à natureza.

A indústria moderna utiliza diversas técnicas e variados equipamentos para a realização de seus processos. Nos processos que envolvem a interação entre fluído e sólido, seja o fluído de ordem gasosa ou líquida, pode-se utilizar a técnica de fluidização, a qual destina-se a operações diversas como por exemplo: craqueamento catalítico, revestimento de partículas, torrefação de grãos, catálise de reações diversas, mistura, remoção de partículas indesejada se adsorção, dentre outros (FOUST et al., 1982).

No leito fluidizado ocorre o processo de fluidização, o qual é obtido a partir do movimento ascendente de um fluído (líquido ou gasoso) através de um leito de partículas, geralmente sólidas, denominada fase densa. Neste movimento, o fluído adquire velocidade suficiente para suportar as partículas, porém sem arrastá-las, originando algo parecido com um líquido em ebulição, daí o termo fluidizado. As vantagens da utilização deste sistema são: uma melhor mistura do fluído, altos coeficientes de transferência de calor e massa e a disponibilização da área superficial das partículas para a transferência, assim obtendo melhores resultados (FOX et al., 2010).

O leito fluidizado é de suma importância na indústria pela sua capacidade de resolver problemas até então complicados no que se refere a troca de massa e calor simultaneamente, uma vez que possibilita eliminar uma quantidade considerável de estágios para se obter um resultado desejado, reduzindo custo financeiro da planta (GOMIDE, R. 1980).

A operação de fluidização é conhecida desde 1926 e foi inicialmente concebida para a gaseificação do carvão. Porém, somente na década de 40 esta técnica foi difundida com a construção do primeiro leito fluidizado para o craqueamento do carvão (ROCHA, 2002).

Segundo Roitman (2002), a fluidização baseia-se na circulação de sólidos juntamente com um fluído impedindo a existência de gradientes de temperatura. Comporta-se num estado intermediário entre um leito estático e um em que os sólidos estejam suspensos num fluxo.

Nos sistemas gás-sólido, as bolhas de gás se alastram pelo leito através dos sólidos de maneira não uniforme, dando a aparência de um líquido no estado de ebulição (LEVENSPIEL, O; KUNII, DAIZO, 1923).

A introdução de fluído pela base de um leito contendo sólidos pode causar a fluidização das partículas e com o aumento gradual da velocidade superficial do fluído no leito, alguns regimes podem ser identificados, são eles: Leito fixo, fluidização borbulhante, fluidização turbulenta e transporte pneumático, (GRACE et al., 1997).

Quando um fluído escoar através de um leito de partículas a uma baixa vazão, o fluído apenas percola os espaços entre as partículas estacionadas, caracterizando o leito fixo de

sólidos. A transição do leito fixo para o leito fluidizado é delineada pela velocidade de mínima fluidização, a qual é a menor velocidade na qual todas as partículas do leito estão suspensas pelo gás, KUNII e LEVENSPIEL (1991). Essa velocidade pode ser determinada obtendo-se o ponto em que a queda de pressão no leito diminui com o aumento da velocidade superficial do fluido de entrada, após um aumento contínuo que ocorre enquanto o leito está fixo, GRACE et al. (1997).

Com um aumento na velocidade do fluido acima da velocidade de mínima fluidização, o leito é chamado de borbulhante, caracterizado por grandes instabilidades e formação de canais preferenciais, além da presença de bolhas, KUNII e LEVENSPIEL (1991).

Os regimes turbulentos e de fluidização rápida utilizam altas velocidades superficiais de fluido, nesses casos, existem agitações mais intensas no leito e o movimento dos sólidos torna-se mais vigoroso, (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

A transição do regime turbulento para a fluidização rápida ocorre na velocidade de transporte, em que um significativo número de partículas deixa o leito pelo topo da coluna. Já a transição da fluidização rápida para o transporte pneumático ocorre quando a fase densa na base do leito desaparece e todos os sólidos presentes podem ser arrastados pelo fluido, (GRACE et al. 1997).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar experimentalmente o comportamento do regime de fluidização dos resíduos da extração da polpa de açaí em leito fluidizado com geometria cônica.

2.1 Objetivos específicos

- Determinar as melhores condições experimentais do sistema fluidodinâmico;
- Avaliar o regime de fluidização do caroço de açaí com e sem fibra, além do carvão vegetal de açaí;
- Caracterizar a curva de fluidização do caroço de açaí com e sem fibra, além do carvão vegetal de açaí dentro de um sistema fluidodinâmico.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Açaí e os seus produtos

O açaizeiro é uma palmeira da família *Arecaceae* amplamente difundida e cultivada na Amazônia brasileira. Ocorre de forma espontânea nesta região e tem se destacado pela importância econômica para a fruticultura regional (NEVES et al., 2015).

O açaizeiro é muito procurado devido o palmito que é produzido pela sua palmeira. Mas, com os anos, o açaí tem sido bastante procurado devido a “cultura fitness”, onde o produto é muito consumido devido seu alto teor energético, propriedades oxidantes e possuir a chamada “gordura boa”, fazendo com que hoje seja incluindo na categoria dos super alimentos.

O açaí é um fruto bacáceo de cor roxa, oriundo do açaizeiro planta nativa da Amazônia Brasileira, e é a espécie mais importante do Gênero *Euterpe*, dentre as dez registradas no Brasil e das sete que ocorrem na Amazônia, contudo, apenas 3 (três) são de interesse, do ponto de vista Agroindustrial: *E. oleracea*, *E. edulise*, e a *E. precatória* (CONAB, 2019). O açaí é um dos principais produtos do extrativismo nacional, seu maior produtor é o estado do Pará. Na figura 3.1, mostra como é a aparência do fruto.

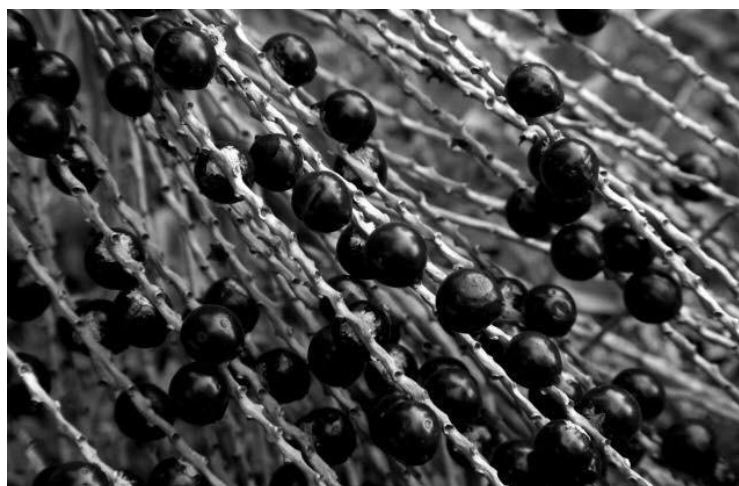


Figura 3.1: Fruto do açaizeiro

Fonte: Globo Rural

São inúmeras as pesquisas que buscam valorizar este fruto amazônico por meio do conhecimento de suas funcionalidades como ação antioxidante (NASCIMENTO et al., 2016), anti-inflamatória (KANG et al., 2011) (2S,3S, antibiofilme e antimicrobiana (DIAS-SOUZA et al., 2018.). A agregação de valor a esse fruto amazônico ocasiona a expansão em seu consumo,

que leva a indústria de polpas de frutas a buscar caminhos que atendam às necessidades dos consumidores nacionais e estrangeiros (NOGUEIRA; SANTANA, 2016).

3.1.1 Principal subproduto da indústria de processamento do açaí

Como principal subproduto da indústria de processamento do açaí, destaca-se o caroço do mesmo. Trata-se de uma semente oleaginosa, formada por um pequeno endosperma sólido ligado a um tegumento, que na maturidade é rico em celulose (53,20%), hemicelulose (12,26%) e lignina (22,30%) (RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA et al., 2008), apesar dos remoção da polpa do açaí o caroço continua com altos teores de hemicelulose e celulose.

Logo, vale ressaltar que o processamento do açaí origina uma grande quantidade de resíduos, com rendimento de polpa de aproximadamente 26,4%, o que remete a um baixo aproveitamento, gerando grande quantidade de semente (73,6%) (CARVALHO et al., 2005).

Em função do aumento na produção e consumo de açaí na região Amazônica, e em todo o Brasil, tem crescido também a quantidade de resíduos gerados, como os caroços, por exemplo, que normalmente são dispostos de maneira inadequada no meio ambiente, como em ruas e em lixões, sem serem submetidos a nenhum tratamento prévio, causando inúmeros prejuízos ao meio ambiente (ALMEIDA et al., 2017).

3.2 O problema do descarte inadequado do resíduo do açaí

Cerca de 80% do total de açaí processado transforma-se em resíduo, ainda sem destinação econômica adequada, sendo jogados sem nenhum tratamento nos rios e lixões (FARINAS et al, 2009).

Entende-se por Resíduos Sólidos: Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, e cuja a destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido e semissólido, bem como os gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos LEI 12.305/201).

É crescente a busca por soluções para a redução do impacto ambiental, ocasionado pelo consumo exagerado da população, junto ao descarte inadequado dos resíduos sólidos urbanos e agroindustriais.

Na tentativa de minimizar os impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos, o governo federal instituiu a política nacional de resíduos sólidos, LEI N° 12.305, de 2 de agosto de 2010, cujos objetivos correspondem a qualidade ambiental e proteção da saúde ambiental, não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010). Na figura 3.2, mostra como fica o resíduo do açaí após a retirada da polpa.



Figura 3.2 - Resíduos do caroço de açaí

Fonte: Portal Pebinha de Açúcar

O descarte indevido do resíduo da polpa de açaí pode causar sérios problemas ambientais, sabendo disso é muito importante estudos que visem seu reaproveitamento, seja como adubo orgânico, em alguns casos até como incremento na ração animal e adsorção de compostos químicos nocivos ao meio ambiente, entre outros.

O IBGE (2010) mostra que a região Norte é a maior produtora de açaí, refletindo na quantidade de resíduos gerados, que estão propensos a serem apenas dispostos, irregularmente, nas ruas das cidades, ou ainda são jogados às margens de rios, resultando no aumento da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e na eutrofização dos mananciais, entre outros problemas (MARANHO; PAIVA, 2012).

Fazer a disposição final de rejeitos requer uma completa neutralidade com o meio ambiente. Isso significa que o destino final dos resíduos não deve poluir ou alterar o meio e/ou prejudicar a população local. As principais formas de poluição é a contaminação do solo, dos lençóis freáticos e do ar. As consequências dessa poluição é a proliferação de doenças

decorrentes de pragas de ratos, insetos e animais que vivem dos rejeitos assim como doenças ocasionadas pela poluição dos lençóis freáticos como a diarreia (MACHADO, 2016).

No Maranhão o açaí possui grande importância econômica e nutricional. Além disso, constitui-se como fonte de renda para muitos comerciantes e famílias extrativistas. Apesar de ser uma fonte de material lignocelulósico renovável, o açaí representa, atualmente, um grave problema de limpeza pública devido a grande quantidade de resíduo constituídos basicamente de fibras e caroço. (ROGEZ, 2000; RODRIGUES et al., 2006).

3.3 Leito Fluidizado

No leito fluidizado ocorre o processo de fluidização, o qual é obtido a partir do movimento ascendente de um fluido (líquido ou gasoso) através de um leito de partículas, geralmente sólidas, denominada fase densa. A fluidização pode ser definido, basicamente, como uma operação em que as partículas sólidas são suspensas por um fluxo ascendente do fluido (gás ou líquido), porém sem o arraste das partículas pela fase fluida. Durante este processo, as partículas sólidas se comportam como partículas em um estado líquido (GIBILARO, 2001).

Devido à sua versatilidade, a fluidização pode ser aplicada a todos os processos que envolvam o contato entre a fase sólida particulada e a fase fluida (KUNNI; LEVENSPIEL, 1991).

O processo de fluidização é muito utilizado na indústria, principalmente em: processos de secagem de sólidos, misturas, revestimentos de partículas, aquecimento, resfriamento e congelamento de sólidos (ROPELATO; FONTES; FUSCO, 2010). Esse processo é empregado em tecnologias como adsorção de gases, reações gás-sólido e secagem por favorecer a interação sólido-fluido proporcionando altas taxas de transferências de calor e massa. A fluidização pode ser também empregada no processamento de diversos materiais granulares, tais como: areia, açúcares, produtos farmacêuticos, alimentícios e químicos.

3.3.1 Os diferentes regimes de fluidização em leito fluidizado

Um leito é um conjunto de partículas em uma coluna. Quando é injetado na parte inferior da coluna um fluxo ascendente de gás ou de líquido, cada partícula é submetida a diferentes forças. Durante o processo de fluidização, a força da gravidade que atua nas partículas é compensada pela força de arraste exercida pelo escoamento do fluido. Como a força de arraste que atua em cada partícula é diferente, o comportamento dessas moléculas também será

diferenciado (SAMUELSBERG; HJERTAGER, 1996). Para a escolha do tipo de fluido (gás ou líquido) que será utilizado no sistema é necessário saber qual o melhor meio em que o material de estudo irá se comportar.

A velocidade mínima da fluidização é importante para garantir a eficiência do processo, pois, abaixo dessa velocidade, o leito é fixo e, em velocidades muito acima da velocidade mínima, as partículas podem ser arrastadas pela fase fluida para fora do leito (SAMUELSBERG; HJERTAGER, 1996). Através de um gráfico entre a variação de pressão e a velocidade do fluido, pode-se analisar a velocidade mínima. O aumento será contínuo no início do processo até que a força aplicada pelo fluido na partícula se iguale a sua massa, isso ocorrerá através do aumento da velocidade do fluido e a variação de pressão dentro do sistema fluidodinâmico. Dependendo da velocidade de vazão que o fluido irá passar, haverá um tipo específico de leito.

Quando a velocidade do fluido ascendente que percorre os sólidos é baixa, o fluido apenas percorre os espaços vazios entre as partículas estacionárias e o leito é chamado de leito fixo, ou seja, está abaixo da velocidade mínima de fluidização (Figura 3.3a).

Aumentando a vazão do fluido que passa entre as partículas ocorre um distanciamento destas com pequenas vibrações e movimentações em pequenas regiões; neste momento o leito é chamado de leito expandido. Aumentando-se ainda mais a vazão do fluido, chega-se a uma condição na qual todas as partículas são suspensas pelo fluxo ascendente. É nesta condição que as forças de fricção entre as partículas e o fluido são superiores ao peso das mesmas. Assim, tem-se o leito com uma velocidade mínima de fluidização (Figura 3.3b) (GELDART, 1973).

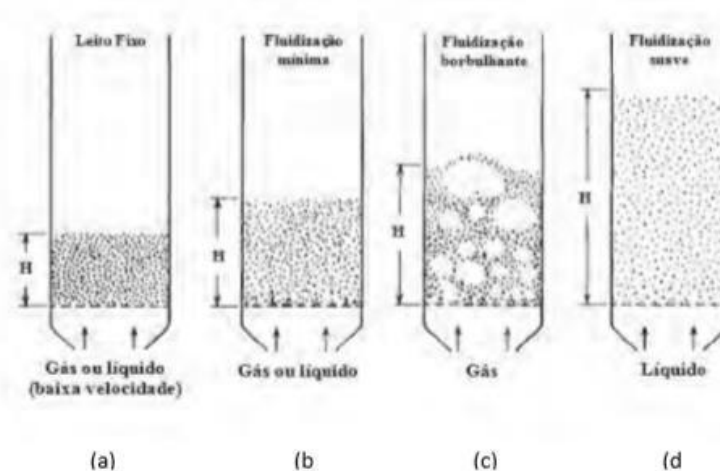


Figura 3.3 – Diferentes regimes de fluidização em sistemas de leito fluidizado

Fonte: Adaptado de (KUNI e LEVENSPIEL, 1991)

Existe também o leito classificado como borbulhante conforme apresentado na Figura 1c. Esse regime ocorre, normalmente, em sistemas gás-sólido. Quando se aumenta a velocidade do fluxo de um gás muito denso e com alta pressão em um leito com partículas muito finas observa-se o aparecimento de bolhas e a canalização deste gás.

Em alguns casos raros casos, o sistema sólido-líquido também se comporta como borbulhante, isso ocorre somente quando sólidos muito densos são fluidizados por líquidos de baixa densidade. Porém, normalmente, em um sistema sólido-líquido se obtém uma expansão lenta, progressiva e a fluidização é conhecida como suave (Figura 3.3d) (GELDART, 1973).

3.3.2 Comportamento do leito fluidizado em diferentes circunstâncias

Quando, em sistema gás-sólido com partícula finas, o leito apresenta um diâmetro pequeno, as bolhas de ar formadas se unem e crescem consideravelmente. Essas bolhas se estenderão por todo o leito se desfazendo somente na superfície (Figura 3.4a). O leito comporta-se como um pistão quando as partículas desse sistema são grossas (Figura 3.4b) (GELDART, 1973).

O leito fluidizado turbulento ocorre quando partículas finas são fluidizadas a uma vazão de gás superficialmente alta e a velocidade terminal dos sólidos é excedida. Assim, ocorre o arraste das partículas, e, ao invés de bolhas, observa-se um movimento turbulento de sólidos e vazios de gás de vários tamanhos e formas (Figura 3.4c) (GELDART, 1973).

Com um grande aumento na velocidade de fluidização do gás em sistemas sólido-gás ou do líquido em sistemas líquido-sólido, as partículas são transportadas para fora do leito. Neste instante temos um leito fluidizado com transporte pneumático de sólidos (Figura 3.4d) (GELDART, 1973).

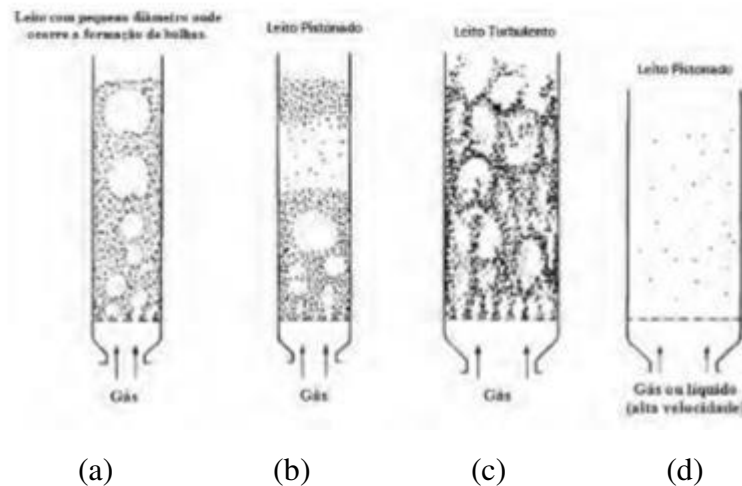


Figura 3.4 – Comportamento do leito fluidizado em diferentes circunstâncias

Fonte: Adaptado de (KUNI e LEVENSPIEL, 1991)

Diversos fatores podem afetar a dinâmica dentro do leito fluidizado, por conta disso é necessária uma análise minuciosa dentro do equipamento após a fluidização do leito. A geometria do equipamento e as propriedades das partículas são os principais fatores que podem influenciar a dinâmica dentro do fluido.

3.4 Fluidodinâmica em sistema de leito fluidizado

O fenômeno da fluidização caracteriza-se pelo contato entre partículas sólidas e uma corrente ascendente de gás, formando uma suspensão com comportamento semelhante a um fluido, que proporciona altas taxas de transferência de calor e de massa, sendo largamente utilizado em processos industriais (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Quando partículas sólidas são adicionadas a um escoamento, seja de gás ou líquido, essas partículas tendem a aumentar a resistência ao escoamento do fluido, necessitando que as partículas sólidas se organizem para diminuir a resistência ao escoamento. Desse modo, aumentando a velocidade do fluido que escoava através dos sólidos, a reorganização das partículas ocorre mais rapidamente e, como consequência, tem-se um aumento da força de arrasto exercida sobre as partículas (SANCHEZ et al., 2010).

O principal parâmetro determinante para distinguir os regimes de fluidização é a velocidade do fluido. Controlar a velocidade de fluidização é importante para a operação dentro do regime de fluidização esperado. Além disso, o desempenho fluidodinâmico de um leito fluidizado depende das propriedades da partícula sólida, tais como, diâmetro médio das partículas, densidade e esfericidade.

Outros parâmetros fundamentais para o estudo da fluidodinâmica das partículas são os denominados parâmetros dinâmicos, os quais se referem ao escoamento do fluido, como o coeficiente de arrasto, velocidade mínima de fluidização e a velocidade terminal da partícula (PÉCOR, 1995; FONSECA, 2009)

3.4.1 Caracterização dos grupos de partículas de acordo com Geldart

A caracterização da partícula pode ser feita de acordo com Geldart (1973), onde são organizados em 4 categorias (A, B, C, D). Com base nos diferentes tamanhos de partículas e na diferença de massas específicas de cada um, Geldart elaborou um diagrama como mostra a figura seguinte, que serve para classificar o comportamento aerodinâmico das partículas, esse diagrama vem sendo bastante aplicado.

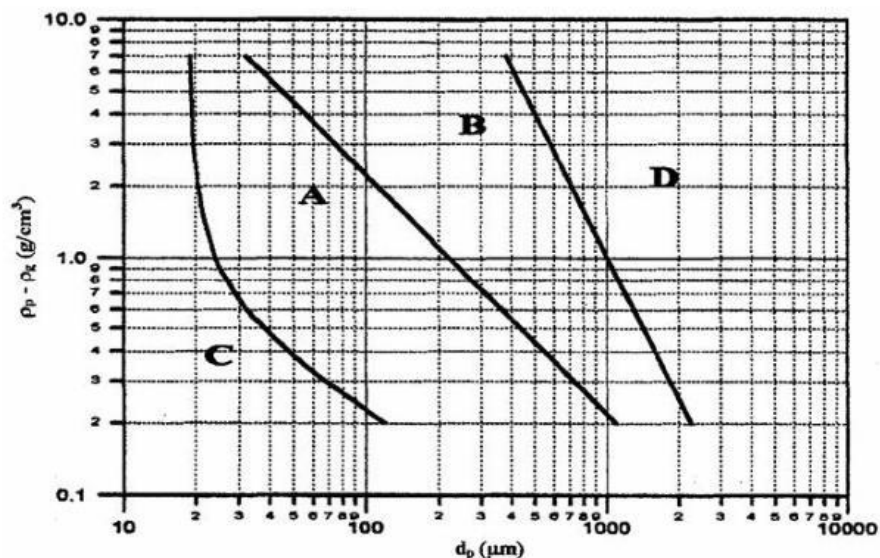


Figura 3.5 - Diagrama de classificação das partículas para fluidização gás-sólido
Fonte: Adaptado de Geldart (1973)

As principais características dos grupos com base no diagrama de Geldart (1973) apresentado no diagrama mostrado na figura 3.5 são:

Grupo A

As partículas sólidas do grupo A, de modo geral, possuem pequeno tamanho e densidade inferior a 1,4 g/cm³, sendo consideradas aeráveis e fáceis de fluidizar. Normalmente, encaixam-se nesse grupo pós-finos e leves, os quais se expandem consideravelmente quando expostos ao processo de fluidização (PORTO, 2005).

Grupo B

Nesse grupo, as partículas apresentam diâmetro entre 40 μm e 500 μm e uma densidade com valor superior a 1,4 g/cm³ e inferior a 4,5 g/cm³. A areia comum, bem como partículas de

carvão menores que 1 mm se classificam neste grupo (GELDART, 1973; KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Grupo C

Partículas de diâmetro inferior a 20 μm , com baixa densidade, possuindo tendência coesiva. Essas partículas tem uma predisposição de aderirem-se umas às outras, o que torna mais difícil o processo de fluidização.

Grupo D

As partículas do grupo D têm como características principais, o diâmetro médio superior a 1 mm e densidade elevada, o que traz como consequência a necessidade de uma maior velocidade de fluidização (PORTO, 2005).

De acordo com Basu (2006) e Santos (2010), apontam que dentro dessa classificação os grupos C e D são preferenciais para o uso em fluidização de partículas. As características específicas de cada grupo são apresentadas na tabela 3.1, a seguir.

Tabela 3.1 - Características distintivas dos quatro grupos de partículas segundo Geldart.

Grupo	C	A	B	D
Tamanho de partícula para $\rho_p = 2500 \text{ kg/m}^3$	< 20 μm	20 - 90 μm	90 - 650 μm	> 650 μm
Tendência para formação de canais preferenciais	Severa	Pequena	Insignificante	Insignificante
Expansão	Baixa	Alta	Média	Média
Velocidade mínima de borbulhamento, u_{mb}	Não forma bolhas	$> u_{mf}$	$= u_{mf}$	$= u_{mf}$
Forma de bolha	Canal único	Base plana Calota esférica	Arredondada com pequenos entalhes	Arredondada
Mistura sólida	Muito pequena	Alta	Média	Pequena
Gas back-mixing	Muito pequena	Alta	Média	Pequena
Tendência a fluxo pistonado	Pistões planos	Assimétrico	Principalmente assimétrico	Principalmente pistões espessos na parede
Efeito do tamanho da partícula na fluidodinâmica	Desconhecido	Apreciável	Pequeno	Desconhecido

Fonte: Adaptado de Basu (2006).

Dentre todas as características para a fluidização, a densidade destaca-se como uma das mais importantes para a fluidização. Para Geldart (1986 apud RAMIREZ-BEHAINNE, 1999), a relação entre massa do sólido e seu volume contendo os vazios internos e superficiais corresponde à densidade aparente da partícula. Isto é, a densidade aparente inclui a porosidade da partícula. Esse tipo de densidade é superior à densidade a granel do leito empacotado e inferior à densidade real da partícula (massa específica da partícula).

Outra característica é a porosidade de um leito de partículas que é representada pela seguinte equação:

$$\varepsilon_f = \frac{\text{volume de vazio}}{\text{volume do leito}} = \frac{V_L - V_p}{V_L} \quad (1)$$

Onde,

V_L : volume do leito (m^3);

V_p : volume dos sólidos (m^3).

A equação anterior pode ser representada da seguinte maneira, de acordo com a densidade do leito e das partículas:

$$\varepsilon_f = 1 - \frac{(m_s/\rho_p)}{V_L} = 1 - \frac{(m_s/V_L)}{\rho_p} = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_p} \quad (2)$$

Sendo,

m_s : massa do leito, igual à massa das partículas (kg);

ρ_p : densidade aparente das partículas (kg/m^3);

ρ_B : densidade a granel das partículas ou de leito empacotado (kg/m^3).

Quando um leito de partículas está levemente empacotado, a porosidade depende do diâmetro e da natureza das partículas. A maior parte dos materiais porosos e relativamente esféricos formam colunas de sólidos com porosidades perto de 0,45 (PELL, 1990 apud RAMIREZ-BEHAINNE, 1999).

Outra característica física que influencia na fluidodinâmica das partículas no leito é a esfericidade de partícula. Segundo Cortez et al. (2008), a esfericidade representa um fator de forma, ou seja, uma característica que reflete o formato ou geometria da partícula. Mohsenin (1970 apud CORTEZ et al., 2008) sugeriu algumas equações para calcular a esfericidade da partícula, como mostra a seguir:

$$\phi = \frac{d_e}{d_{ec}} \quad (3)$$

Onde,

ϕ : esfericidade da partícula (-);

d_e : diâmetro de uma esfera de mesmo volume da partícula (mm);

d_{ec} : diâmetro da menor esfera circunscrita (mm).

A equação anterior descreve a forma característica do sólido em relação à de uma esfera de mesmo volume. Uma segunda expressão para calcular a esfericidade assume que o volume de um sólido é igual ao volume de um elipsoide triaxial com seus interceptos “a”, “b” e “c”, e que o diâmetro de uma esfera circunscrita é o maior intercepto do elipsoide:

$$\phi = \left(\frac{V_S}{V_{ec}}\right)^{1/3} \quad (4)$$

Sendo,

V_S : volume do sólido (m³);

V_{ec} : volume da esfera circunscrita (m³).

Ou,

$$\phi = \left[\frac{\frac{\pi}{6}abc}{\frac{\pi}{6}a^3}\right]^{1/3} = \left(\frac{bc}{a^2}\right)^{1/3} \quad (5)$$

Onde,

a: maior intercepto (comprimento do sólido) (mm);

b: maior intercepto normal a “a” (espessura do sólido) (mm);

c: maior intercepto normal a “a” e “b” (largura do sólido) (mm).

Os interceptos a, b e c não necessitam necessariamente se cruzar em um ponto comum. Por fim, tem-se uma terceira definição, mais simples e de resultados satisfatórios, indicada por Massarani e Peçanha (1989 apud Cortez et al.,2008):

$$\phi = \frac{d_{ins}}{d_c} \quad (6)$$

Onde,

d_{ins} : diâmetro do círculo inscrito ao sólido (mm);

d_c : diâmetro do círculo circunscrito ao sólido (mm).

A esfericidade de alguns sólidos é apresentada na tabela 3.2 a seguir:

Tabela 3.2 - Esfericidade de alguns materiais sólidos

MATERIAL	ESFERICIDADE
Areia (média de vários tipos)	0,75
Areia sílica-quartzo (grão 407/40)	0,60
Bagaço de cana	0,30 - 0,55
Calcário	0,45
Carvão (picado)	0,65
Carvão (pulverizado)	0,73
Milho	0,66
Soja	0,90

Fonte: Adaptado de Basu (2006); Cortez *et al.* (2008)

A fluidodinâmica do sistema de leito fluidizado também depende do tamanho e da distribuição granulométrica das partículas. Normalmente, as partículas de um material sólido não apresentam um padrão de tamanho. O tamanho de uma partícula pode ser obtido mediante microscopia óptica, onde se analisa uma amostra para determinar o tamanho médio da partícula. Outra maneira é por meio de peneiras padronizadas, o método mais utilizado, principalmente pela simplicidade e rapidez (CORTEZ *et al.* 2008).

O método utilizando peneiras é padronizado onde cada peneira tem um diâmetro diferente que é capaz de fazer diferenciação do tamanho das partículas, o diâmetro médio é obtido através da análise de distribuição granulométrica. Onde irá demonstrar a dimensão característica do conglomerado de partículas.

Segundo Basu (2006), o diâmetro médio de Sauter é calculado a partir da Equação (7):

$$d_m = \frac{1}{\sum_{i=1} x_i / d_i} \quad (7)$$

Sendo:

x_i : fração mássica das partículas retidas na malha de cada peneira;

d_i : abertura média da malha obtida entre peneiras subsequentes.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os equipamentos e materiais utilizados no trabalho, bem como, as etapas e procedimentos realizados para o seu desenvolvimento.

4.1 Material

Para avaliar o comportamento fluidodinâmico, foram utilizados resíduos da extração da polpa de açaí obtidos em feiras livres de São Luís/MA. Esse material foi exposto ao sol durante o período de 6 horas, para retirada natural de água em excesso.

Após a pré-secagem, fez-se uma separação manual, objetivando a retirada de sedimentos e impurezas, sendo considerado como material apenas o caroço de açaí com fibra e caroço de açaí sem fibra. As amostras de carvão vegetal de açaí foram obtidas em processo de calcinação à 350 °C. Tais amostras são consideradas do GRUPO D de acordo com Geldart (1973) cujo o diâmetro médio superior a 1 mm e densidade elevada. Na figura 4.1, são apresentadas as amostras dos sólidos utilizadas.

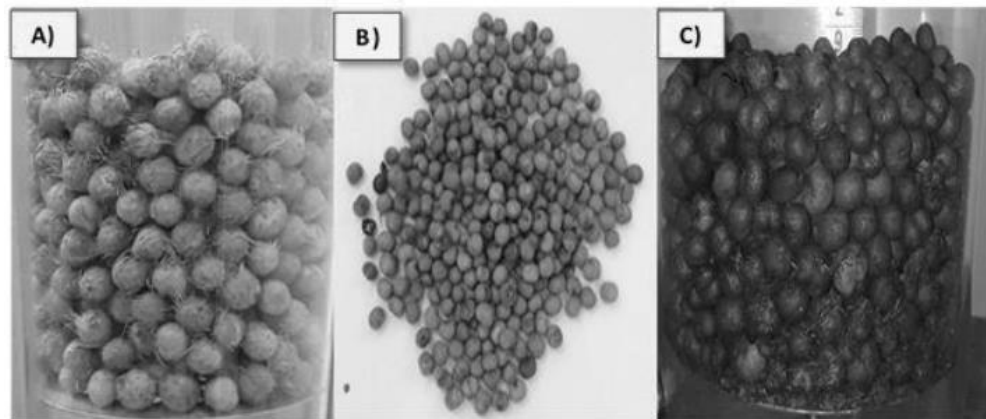


Figura 4.1 - Amostras dos sólidos utilizados no leito fluidizado para avaliar o comportamento fluidodinâmico: a) caroço de açaí com fibra, b) caroço de açaí sem fibra e c) carvão vegetal de açaí

4.2 Local da pesquisa

Esse trabalho foi realizado no Laboratório de Instrumentação e Automação de Processos localizado no Laboratórios de Ensino e pesquisa em Engenharia Química – LEPEQ vinculado ao Centro de Ciências Exatas e Tecnologias da Universidade Federal do Maranhão.

4.3 Equipamentos utilizados

Para o desenvolvimento desse trabalho, tornou-se necessário a montagem da unidade experimental composta dos seguintes equipamentos.

Um leito fluidizado com um formato geométrico cônico de vidro. Na figura 4.2, é apresentado o leito fluidizado utilizado na avaliação do comportamento fluidodinâmico.



Figura 4.2 – Leito experimental utilizado no ensaio fluidodinâmico

Essa coluna era acoplada a uma caixa de madeira interligada por um tubo de PVC de diâmetros interno e externo 5, 3 e 6 cm respectivamente a um compressor centrífugo que impulsiona o ar para o sistema experimental.

Para o controle da vazão do fluido (ar comprimido) provida ao sistema durante a realização do ensaio foi utilizado um inversor de frequência, cuja velocidade máxima era de 3480rpm, conforme apresentado na figura 4.3.



Figura 4.3 – Inversor de Frequência

No presente trabalho, o software Labview foi utilizado a fim de fornecer ao usuário informações de interesse dentro do processo que está em execução, tudo isso em tempo real, o que garante um maior controle sobre o mesmo, por meio da possibilidade de se realizar ajustes ou paradas extraordinárias.

Para analisar o comportamento da pressão, utilizou-se o sensor de pressão diferencial analógico na MPXV7002DP da Metaltex, que fornece um sinal de saída proporcional à pressão aplicada, sendo capaz de medir faixas de -2 a +2 kPa (-0.3 a +0.3psi), o qual é mostrado na figura 4.4. O Datasheet do instrumento já fornece a curva de calibração: $V_{out} = V_s(0.2 \times P(\text{kPa}) + 0.5)$.

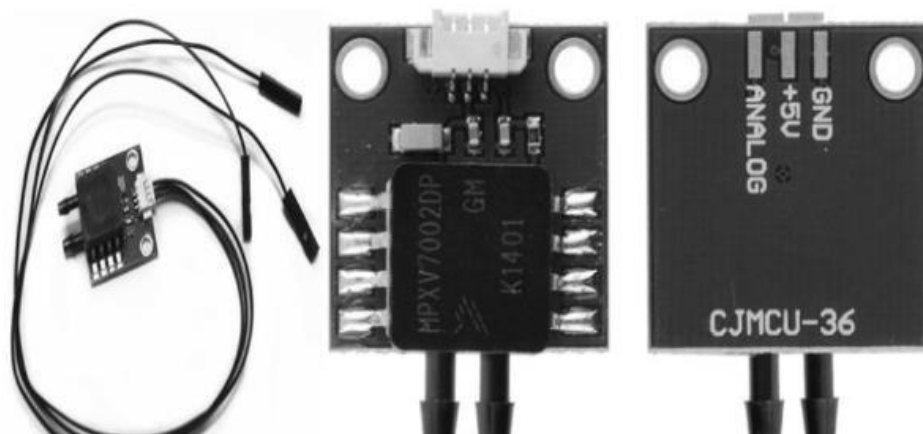


Figura 4.4 - Sensor de pressão diferencial MPXV7002D

Fonte: Metaltex

Segundo César Cassio Iato (2007), a medição e controle de pressão são as variáveis de processo mais usadas na indústria de controle de processos nos seus mais diversos segmentos. Além disso, através da pressão é facilmente possível inferir uma série de outras variáveis de processo, tais como nível, volume, vazão e densidade.

4.4 Ensaio do comportamento fluidodinâmico

Para a realização do ensaio do comportamento fluidodinâmico à temperatura ambiente, as amostras do caroço de açaí com fibra, caroço de açaí sem fibra e o carvão vegetal de açaí eram adicionadas dentro do leito. Os ensaios eram realizados em uma única altura estática de leito, $H_0 = 5$ cm. Uma vez definida a altura de trabalho, determinou-se a massa equivalente da carga do material, para a altura.

Antes dos ensaios, foi feito um acompanhamento das condições de todas as válvulas e instrumentos, para verificar o funcionamento de forma correta. Em seguida, iniciou-se os ensaios submetendo o sistema a variações na vazão de ar que era fornecida ao leito através de uma tubulação por um compressor, tendo o motor do soprador sido regulado pelo inversor de frequência, e tomadas, simultaneamente, as medidas de pressão dentro do leito, o que foi feito por meio da utilização de sensores de pressão diferencial. Os sinais digitais foram processados e analisados num microcomputador com o auxílio do software Labview.

Durante o experimento foi mantida uma câmera para analisar o comportamento do leito a partir de uma linha que representava a altura inicial do leito. Dessa forma, os regimes de fluidização puderam ser identificadas e caracterizados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com todas as etapas realizadas anteriormente, é possível realizar o tratamento de dados obtidos e, em seguida, a construção e análise dos resultados encontrados com o experimento.

5.1 Tratamento dos dados de pressão

Para assegurar os resultados obtidos nesse trabalho, realizou-se um ensaio preliminar do leito para obter uma precisão, cujos resultados são mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Dados do ensaio preliminar para cada sensor

Sensor 1		Sensor 2		Sensor 3	
Delta H (in)	Tensão (V)	Delta H (in)	Tensão (V)	Delta H (in)	Tensão (V)
0	2,73	0	2,83	0	2,73
1	2,97	1	3,06	0,9	2,89
3	3,22	2	3,275	1,9	3,15
3,8	3,64	2,95	3,52	2,9	3,35
4,9	3,94	3,9	3,8	3,9	3,6
5,9	4,19	4,9	3,97	4,9	3,87
6,8	4,37	5,9	4,29	5,87	4,1
7,85	4,65	6,8	4,44	6,9	4,35
8,9	4,85	7,8	4,7	7,8	4,55
9,4	4,99	9,3	4,95	8,9	4,84

De acordo com as informações contidas na Tabela 5.1, permitiram a construção das curvas de calibração para cada um dos sensores que compõem o sistema experimental no leito fluidizado, conforme mostrado na figura 5.1.

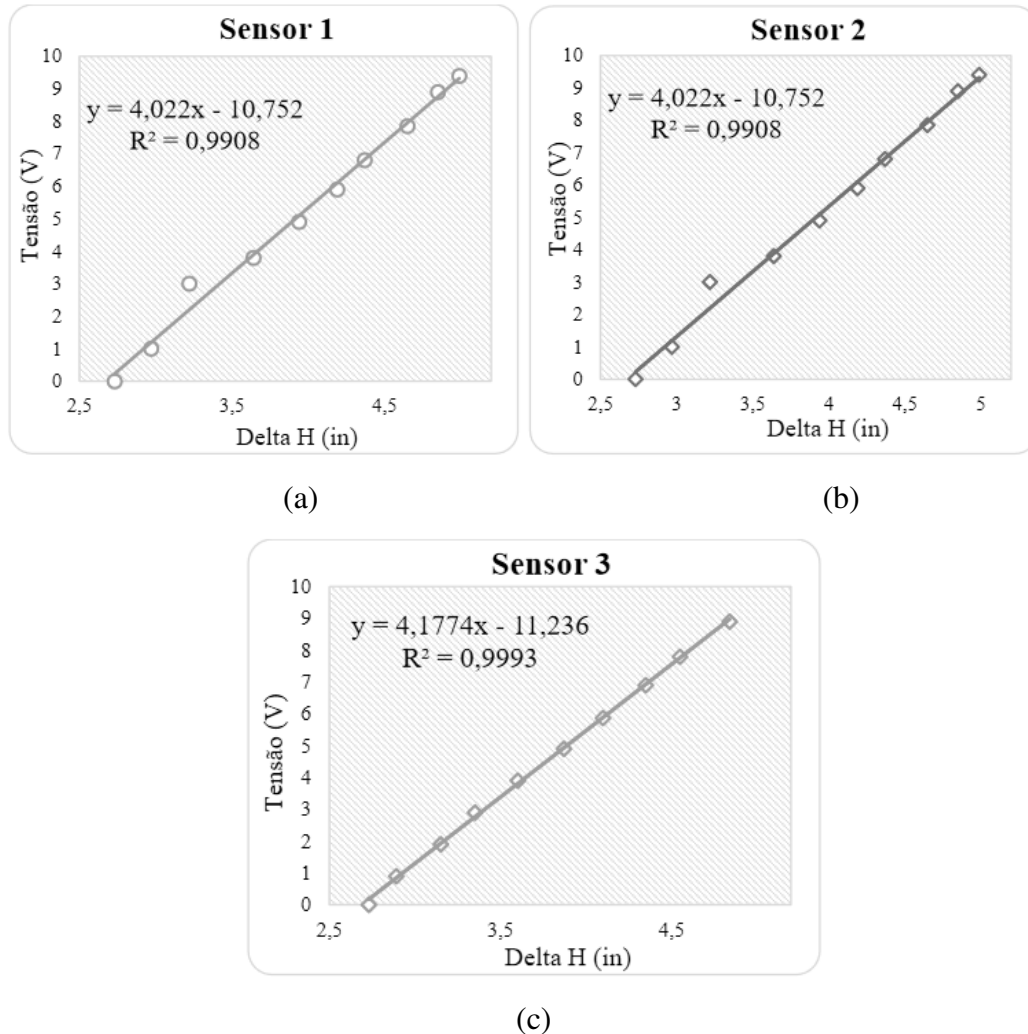


Figura 5.1 – Curva de calibração dos sensores: (a) sensor 1, (b) sensor 2 e (c) sensor 3
Fonte: Próprio Autor, 2021

Por meio da análise dos valores de R^2 encontrados para os sensores, e considerando que os mesmos estão bem próximos de 1, podemos então concluir que os sensores se encontram aptos a oferecerem bons e seguros resultados.

5.2. Análise do comportamento fluidodinâmico

Nas figuras 5.2 e 5.3, são apresentados os resultados obtidos para o comportamento fluidodinâmico do caroço de açaí com fibra, dentro do leito com uma altura fixa de 5 cm, nos estágios inicial com a vazão de ar igual e estágio final com um aumento na velocidade do inversor e a vazão de ar ao máximo.

Esse material sólido, não apresentou grandes modificações relacionadas a seu regime inicial, demonstrando apenas uma pequena expansão no leito e apresentando comportamento estático, caracterizando um regime de leito fixo.



Figura 5.2 - Comportamento inicial do açaí com fibra



Figura 5.3 - Comportamento final do açaí com fibra

Esse comportamento pode ser explicado pela atribuição de uma resistência ao movimento livre causada pela presença das fibras contida no caroço, que provocam um entrelaçamento entre si, fazendo com que o empuxo que age sobre o caroço não seja suficiente para compensar e atingir a fluidização. Já na figura 5.4 e 5.5, são apresentados os resultados obtidos para o comportamento inicial e final do caroço de açaí sem fibra dentro do leito, adotando as mesmas condições experimentais no ensaio com o caroço de açaí com fibra.

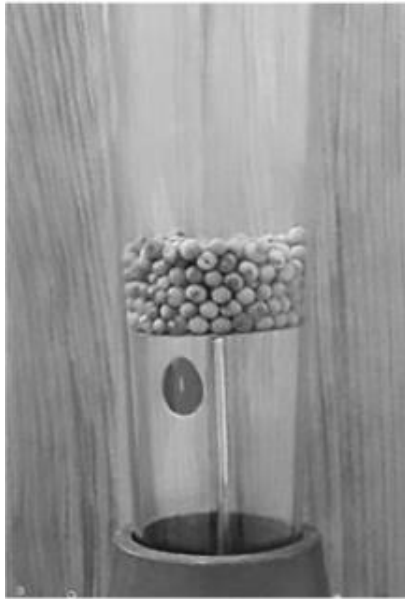


Figura 5.4 - Comportamento inicial do açaí sem fibra

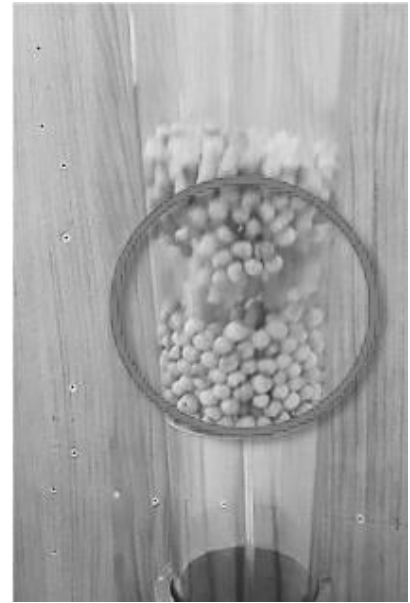


Figura 5.5 - Comportamento final do açaí sem fibra

Em comparação com resultado obtido com o caroço de açaí com fibra, observa-se que o caroço sem a fibra apresenta maior grau de agitação à medida em que se aumenta a vazão de ar, apresentando um movimento mais livre das partículas. A ausência das fibras pode ter diminuído a resistência atribuída ao movimento, diferente do primeiro material que se favorecendo uma agitação mais vigorosa e um empuxo com maior capacidade para sustentar as partículas arrastadas pelo fluido.

A figura 5.6 e 5.7 são apresentados os resultados obtidos para o comportamento inicial e final do carvão vegetal de açaí dentro do leite, adotando as mesmas condições experimentais no ensaio com o caroço de açaí com fibra e sem fibra.

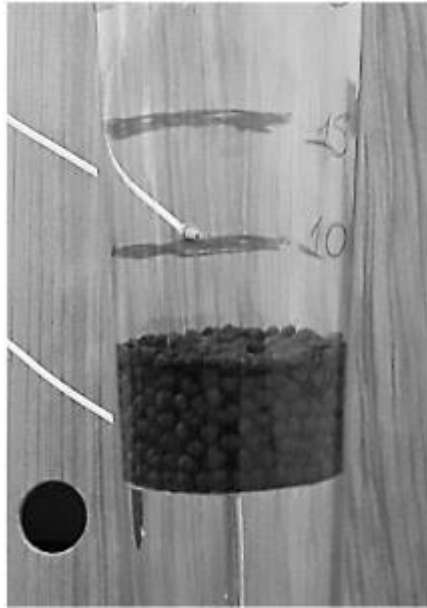


Figura 5.6 - Comportamento inicial do carvão vegetal de açai



Figura 5.7 - Comportamento final do carvão vegetal de açai

Observa-se que o carvão de açai apresentou uma grande variação em relação ao seu estado inicial, demonstrando um comportamento bastante vigoroso e instável, o que pode ter sido causado pela diminuição da massa específica do material após o processo de calcinação, ocasionando perda de massa e favorecendo a sua agitação dentro do leito, tendo como resultado agitações mais intensas e movimento mais vigoroso dos sólidos, características clássicas do regime turbulento de fluidização. O fato de o carvão vegetal de açai ser menos denso que o caroço ocasiona aumento no volume do leito, levando a um maior contato das partículas com as paredes do sistema fluidizado, a consequência é uma maior pressão estática em todas as tomadas de pressão quando a relação mássica de mistura apresenta como combustível uma partícula menos densa.

Os critérios propostos por Geldart (1973) foram utilizados no presente trabalho para classificar as partículas constituintes da amostra. Verificou-se que a maior parte do material sólido é composta por partículas da classe D, que se caracterizam pelo grande tamanho ou elevada densidade, apresentando a fluidização do tipo agregativa com surgimento de “*sluggings*”, produzindo jatos em vez de bolhas durante a fluidização.

5.3 Curva característica de fluidização

Por meio da leitura dos sensores durante o ensaio, foi possível obter-se a curva característica de fluidização do material sólido utilizado, mostrada na Figura 5.8.

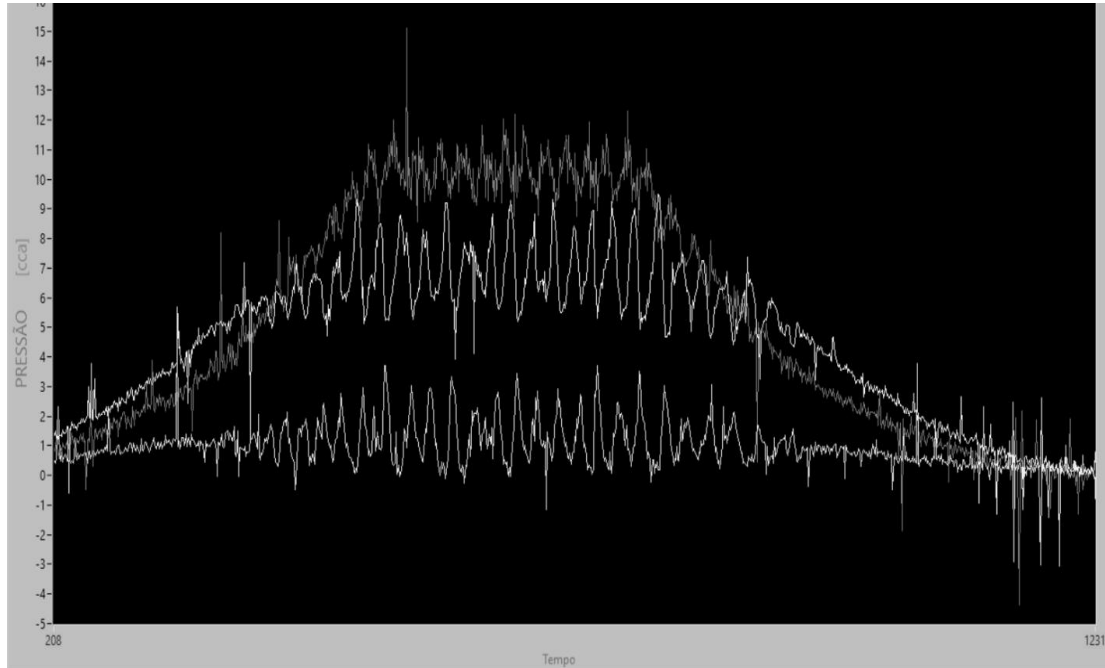


Figura 5.8 – Curva característica de fluidização dos resíduos da extração da polpa de açúcar

A velocidade mínima de fluidização (V_m) é obtida graficamente pelo ponto de maior valor após a região linear de crescimento da queda de pressão (ΔP), nessa região o leito se expande de maneira homogênea, a superfície superior é bem definida, e é caracterizado com fluidização particulada, após essa fase, o sistema é classificado como fluidização borbulhante, há a ocorrência da formação de várias bolhas próximas ao distribuidor que sobem para o leito.

Em sistemas gás-sólido, o aumento da vazão acima da velocidade mínima de fluidização gera uma grande instabilidade no leito, formando bolhas e canais de gás. Além disso, não há uma grande expansão no leito, o que faz com que o volume se mantenha bem próximo ao que possuía na condição de velocidade mínima de fluidização.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados apresentados anteriormente, conclui-se que o caroço de açaí com fibra, não apresentou grandes modificações relacionadas a seu regime inicial, demonstrando apenas uma pequena expansão no leito. Em comparação com resultado obtido com o caroço de açaí com fibra, observa-se que o caroço sem a fibra apresenta maior grau de agitação à medida em que se aumenta a vazão de ar. Já carvão vegetal de açaí apresentou uma grande variação em relação ao seu estado inicial, demonstrando um comportamento bastante vigoroso e instável, demonstrando um melhor comportamento fluidodinâmico em comparação com as amostras do caroço de açaí com fibra e sem fibra, o que garante um maior potencial para fluidização. Isso é devido sua baixa densidade depois que passou pela calcinação, fazendo com que o caroço de açaí ao passar por esse processo ficasse mais leve, promovendo uma maior agitação e instabilidade dentro do leito fluidizado.

Em linhas gerais, o trabalho teve seus objetivos alcançados. Com base nos critérios propostos por Geldart (1973) para classificar as partículas constituintes da amostra, verificou-se que a maior parte do material sólido utilizado é composta por partículas da classe D.

Para continuidade deste estudo, sugere-se a realização de experimentos adicionais, utilizando diferentes partículas de baixa esfericidade, a fim de estudar o comportamento fluidodinâmico do leito de fluidizado, carregado com partículas de diferentes tamanhos, usando as técnicas de CFD e FFT.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. V. DA C.; MELO, I. M.; PINHEIRO, I. S.; FREITAS, J. F. ; MELO, A.C.S. **Revalorização do caroço de açaí em uma beneficiadora de polpas do município de Ananindeua/PA: proposta de estruturação de um canal reverso orientado pela PNRS e logística reversa.** GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sist. v. 12, n. 3, p. 59, 2017. <https://doi.org/10.15675/gepros.v12i3.1668>.

BASU, Prabir. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds.** USA: Taylor & Francis, 2006. 473 p.

BRASIL. **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 14 de Março de 2021.

CARVALHO, J. E. U DE; MÜLLER, C. H. **Biometria e rendimento percentual de polpa de frutos nativos da amazônia.** Belém, PA. Embrapa Amazônia Oriental, 2005. 3 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Circular Técnica, 139).

CONAB. **Açaí fruto. Análise Mensal.** Florence Rios Serra–Analista de mercado –Engenheira de Alimentos. Março, 2019.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E.O. **Caracterização da Biomassa.** Biomassa para Energia. Campinas: Unicamp, 2008. p. 32-62.

FARINAS; SANTOS; NETO & PESSOA, 2009. Disponível em: <www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/658280>. Acesso em: 14 de março de 2021.

FONSECA, O.L. C. **Estudo Preliminar da Fluidodinâmica do Escoamento Gás-Sólido de um Leito Fluidizado Circulante Através da Análise dos Sinais Dinâmicos de Pressão.** 2009. 157 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

GELDART, D. **Types of gas fluidization.** Powder Technology, v. 7, p. 55–86, 1973.

GIBILARO, L. G. **Fluidization Dynamics**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001.

KUNNI, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. 2nd ed. Boston, 1991.

MACHADO, G. B. **Disposição Final Ambientalmente Adequada de Rejeitos**. 2016.

MARANHO, Á. S.; PAIVA, A. V. **Produção de mudas de *Physocalymma scaberrium* em substratos compostos por diferentes porcentagens de resíduos orgânicos e açai**. FLORESTA, v. 42, n. 2, p. 399 - 408, 2012.

PORTO, Paulo Sérgio da Silva. **Investigações sobre a secagem de partículas de xisto**. 2005. 198 p. Tese de Doutorado-Unicamp, Campinas, 2005.

PÉCORA, A. A. B. **Estudo da Fluidodinâmica de Leitos Fluidizados Circulantes com Injeção de Ar Secundário**. 1995. 258 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1995.

Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res0186.html>>. Acesso em: 14 de março 2021.

RAMIREZ-BEHAINNE, J. J. **Diminuição de H₂S na Gaseificação de Carvão Mineral Mediante Adição de Dolomita em Reator de Leito Fluidizado**. 1999. 173 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1999.

ROGEZ, H. **Açai: preparo, composição e melhoramento da conservação**. Belém: EDFPA, 2000. 313p.

RODRIGUES, R.B.; LICHTENTHÄLER, R.; ZIMMERMANN, B.F.; PAPAGIANNPOULOS, M.; FABRICIUS, H.; MARX, F. **Total oxidant scavenging capacity of *Euterpe oleracea* Mart. (açai) seeds and identification of their polyphenolic compounds**. Journal of Agricultural and Food Chemistry, Washington, v.54, n.12, p.4162-4167, 2006.

RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, U. F.; FARINAS, C. S.; BERTUCCI NETO, V.; LEMO, V. **Produção de Complexos Lignocelulíticos em Substratos Derivados de Resíduos Agroindustriais por Fermentação Semi-sólida.** In: Workshop de biocatálise e biotransformação, 4., 2008, São Carlos. Livro de resumos. São Carlos, SP: Instituto de Química de São Carlos. p. 107. 2008.

ROPELATO, K.; FONTES, C. E.; FUSCO, J. M. **On CFD practices for cyclone simulation.** 7th International Conference on Multiphase Flow (ICMF 2010). Tampa, FL USA, May 30-June 4, 2010.

SAMUELSBERG, A.; HJERTAGER, B. H. **An experimental and numerical study of flow patterns in a circulating fluidized bed reactor.** International Journal of Multiphase Flow, v.22, p. 575–591, 1996.

SANCHEZ, C. G.; BARREDA, E.; SANCHEZ, E.; SANTOS, F.; RAMIREZ-BEHAINNE, J.J.; FERNANDES, M.; CRUZ, R.; BIZZO, W. **Tecnologia da Gaseificação de Biomassa.** 1. ed. Campinas: Átomo, 2010. v. 1. 430p.

SANTOS, Marilin Mariano Dos; MATAI, Patricia Helena Lara Dos Santos. **A importância da industrialização do xisto brasileiro frente ao cenário energético mundial.** Revista Escola de Minas, Ouro Preto, p.673-678, dez. 2010.