

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIANGULO MINEIRO
PROGRAMA DE MESTRADO EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

ROGERIO BERNARDES ANDRADE

**DIMENSIONAMENTO DE LEITO FLUIDIZADO PARA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS**

UBERABA – MG

2015

ROGERIO BERNARDES ANDRADE

**DIMENSIONAMENTO DE LEITO FLUIDIZADO PARA INCINERAÇÃO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM) para a obtenção do título de mestre em inovação tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bacci

**Uberaba – MG
2015**

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

A57d Andrade, Rogério Bernardes
 Dimensionamento de leito fluidizado para incineração de resíduos sólidos urbanos / Rogério Bernardes Andrade. -- 2015.
 55 f. : il., fig., graf., tab.

 Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) -- Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2015

 Orientador: Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva

 Coorientador: Prof. Dr. Francisco Aurilo Azevedo Pinho

 1. Resíduos sólidos. 2. Incineradores. 3. Fluidização. I. Silva, Marcelo Bacci da. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 628.4

ROGÉRIO BERNARDES ANDRADE

DIMENSIONAMENTO DE LEITO FLUIDIZADO PARA INCINERAÇÃO DE
RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Trabalho de conclusão apresentado ao
Programa de Mestrado Profissional em
Inovação Tecnológica da Universidade
Federal do Triângulo Mineiro, como requisito
para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 17 de agosto de 2015

Banca Examinadora:

Marcelo Bacci da Silva

Prof. Dr. Marcelo Bacci da Silva
Orientador - PMPIT - UFTM

Mário Sergio da Luz
Prof. Dr. Mário Sergio da Luz
Membro Titular - UFTM

Ana Marta de Souza
Profa. Dra. Ana Marta de Souza
Membro titular - UFU

DEDICATÓRIA

Ao meu filho Bernardo que com sua humildade e inocência, me mostra a cada dia o verdadeiro sentido de amar e de buscar novos horizontes.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me dar o dom da vida, a saúde e a energia necessária para lutar e conquistar todos os meus sonhos.

Ao meu filho Bernardo, razão da minha vida e de todas as batalhas para conquistar meus objetivos.

A minha doce e querida Rayane, noiva amiga e acima de tudo companheira, que com seu jeito todo especial deu um novo significado para minha vida, a ela devo toda a motivação e alegria em conquistar mais este sonho.

A minha família que sempre me apoiou e acreditou nos meus sonhos, e motivou-me mostrando principalmente que eu era capaz de realizá-los.

Ao professor Marcelo Bacci meu orientador e amigo que teve a paciência necessária para compartilhar seus conhecimentos com dedicação.

Ao professor Aurilo, meu coorientador que sempre buscou alternativas para resolução dos problemas.

EPÍGRAFE

“O homem não teria alcançado o possível se, repetidas vezes,
não tivesse tentado o impossível.”

Max Weber

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre dimensionamento de leito fluidizado para incineração de resíduos sólidos urbanos, analisou-se os fatores fundamentais para o projeto de um incinerador, sendo estes a velocidade mínima de fluidização, altura de arraste (TDH), e velocidade terminal das partículas.

Foram realizadas simulações para determinar o comportamento do leito quando em relação a velocidade mínima de fluidização, variando-se a esfericidade e o diâmetro das partículas sólidas presente no leito, vale salientar que esta velocidade é fator determinante no dimensionamento do equipamento.

Em relação à queda de pressão em função da velocidade, variou-se a esfericidade e o diâmetro da partícula, obtendo-se como resultado, características dos combustíveis derivados de resíduos (CDR), que otimizassem o funcionamento do leito.

A velocidade terminal foi simulada tendo como parâmetro de variação o diâmetro da partícula que no caso específico desses trabalho, por se tratar de CDR esta entre 4,2 e 10 cm, constatando-se a influencia dessa característica na velocidade do gás que ocasiona o fenômeno de arraste.

Por fim projetou-se a coluna de fluidização, a placa distribuidora e a placa de orifício, determinando-se a altura do leito fixo, altura da coluna e a placa de orifícios.

Palavras chaves: Leito Fluidizado, resíduos sólidos urbanos, dimensionamento.

ABSTRACT

This paper presents a study on the sizing of fluidized bed for incinerating urban solid waste. We analyzed the fundamental factors for the design of an incinerator. These factors were the minimum fluidization velocity, transport-disengaging height (TDH), and terminal velocity of the particles.

Simulations were carried out to determine the behavior of the bed when compared to minimum Fluidization velocity, varying the sphericity and the diameter of the solid particles present in the bed. It is worth pointing out that such velocity is the determining factor in sizing equipment.

Regarding the pressure drop depending on the speed, the sphericity and the particle diameter were varied, obtaining as a result the characteristics of refuse-derived fuels (RDF), which optimized the operation of the bed.

The terminal velocity was simulated by using the particle diameter as the variation parameter specifically for this paper, since the RDF is between 4.2 and 10 cm, confirming the influence of this characteristic in gas velocity that causes the entrainment phenomenon.

Finally, the fluidization column, the distributor plate and the orifice plate were designed, determining the fixed bed height, the column height and the orifice plate.

Key words : Fluidized Bed , municipal solid waste , sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Geração de RSU	17
Figura 2 - Valores médios por habitante/ano correspondentes aos recursos aplicados na Coleta de RSU e nos demais Serviços de Limpeza Urbana	18
Figura 3 - Metodologia para caracterização gravimétrica de RSU	20
Figura 4 - Composição Gravimétrica dos RSU no Brasil	21
Figura 5 - CDR em fluff	25
Figura 6 - CDR em Pellets	25
Figura 7 - CDR em briquette	26
Figura 8 - Emissões – g de CO ₂ fóssil/kWh de eletricidade	27
Figura 9 - Regime de fluidização leito fixo	28
Figura 10 – Regime de fluidização leito fluidizado	29
Figura 11 - Regime de fluidização leito borbulhante	30
Figura 12- Leito fluidizado (a) Regime Turbulento (b) Regime disperso	30
Figura 13 - Queda pressão em função da velocidade superficial do gás em um leito fluidizado	36
Figura 14 - Determinação da velocidade terminal	38
Figura 15 - Etapa de quartejamento da gravimetria	39
Figura 16 - Processo de aferimento de massa e volume	39
Figura 17 - Composição Gravimétrica média (em massa) para o Município de Conquista - MG	41
Figura 18 - Composição Gravimétrica média (em volume) para o Município de Conquista - MG	42
Figura 19 - Esquema de um ciclone	43
Figura 20 - Velocidade mínima de fluidização em função da esfericidade	44
Figura 21- Velocidade mínima de fluidização em função do diâmetro da partícula	45
Figura 22 - Perda de carga no leito na transição de leito fixo para leito fluidizado	45
Figura 23 - Queda de pressão em função da velocidade com esfericidades diferentes	46
Figura 24 - Queda de pressão em função da velocidade com diâmetros diferentes	47
Figura 25 - Velocidade terminal em função do diâmetro	47
Figura 26 - Dimensionamento do leito	53
Figura 27 - Placa de orifício	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação das características do CDR a outros combustíveis	23
Tabela 2- Propriedades físicas do CDR	27
Tabela 3 - Porcentagem (em massa) dos materiais coletados na semana da realização da gravimetria.	40
Tabela 4 - Porcentagem (em volume) dos materiais coletados na semana	40
Tabela 5 - Média Percentual (em massa) ao término da realização da gravimetria	41
Tabela 6 - A média percentual (em volume) ao término da realização da gravimetria.....	41
Tabela 7 - Parâmetros para o dimensionamento.....	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
Apresentação	13
Objetivos	14
Objetivo Geral.....	14
Objetivos Específicos.....	14
Justificativa e motivação	14
Estrutura do trabalho	15
2. Resíduos Sólidos	16
– Resíduos Sólidos Urbanos.....	16
– Definição e Classificação.....	16
– Geração	17
– Características dos Resíduos Sólidos Urbanos	18
– Propriedades Químicas	19
– Propriedades Físicas.....	20
2.2.2.1 – Parâmetros nacionais de composição gravimétrica.....	21
– Legislação Específica.....	21
– Política Nacional de Resíduos Sólidos.....	21
3. Combustíveis Derivados de Resíduo (CDR).....	22
– Características dos CDR.....	22
– Tecnologias de produção de CDR.....	23
– Tipos de CDR.....	24
– As emissões de CO ₂ e o CDR	26
– Propriedades do Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR)	27
4. Fluidização	27
– Caracterização da fase sólida	31
– Diâmetro das partículas.....	31
– Esfericidade das partículas	31
– Massa específica	32
– Fração volumétrica de gás.....	32

– Caracterização fluidodinâmica	33
– Velocidade superficial do gás	33
– Velocidade mínima de fluidização	34
– Velocidade terminal das partículas	37
5. Metodologia.....	38
– Gravimetria de resíduos sólidos da cidade de Conquista – MG	39
– Resultados obtidos na Gravimetria.....	40
– Dimensionamento do leito	42
6. Resultados e Discussões	44
7. Conclusão	54
8. Referências Bibliográficas	55

1. INTRODUÇÃO

Apresentação

O processo de urbanização ocorrido de forma acelerada, aliado ao crescente consumo de produtos descartáveis, tem provocado um aumento e uma consequente diversificação nos resíduos sólidos gerados pela população. O encargo de gerenciar esses resíduos tornou-se uma tarefa complexa que necessita de ações articuladas. O grande desafio consiste em encontrar soluções eficientes e ambientalmente seguras, capazes de resolver o problema de gestão de resíduos sólidos PAVAN (2010).

Segundo HENRIQUES et al (2010) os resíduos sólidos urbanos são problemas ambientais não só do Brasil, mas do mundo como um todo. A maior parte dos resíduos tem a sua destinação final feita de forma incorreta, produzindo como resultado uma carga poluidora que escorre pelas águas pluviais urbanas e rurais.

No Brasil, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE (2013), são geradas 76.387.200 toneladas de resíduos por ano. Dessas, 209.280 toneladas são coletadas diariamente, das quais 70% (146.496 toneladas) são referentes a resíduos domiciliares e comerciais, foco de interesse do presente trabalho.

No entanto, esses resíduos se corretamente gerenciados, podem ser utilizados do ponto de vista da geração de energia. Vários países, principalmente na Europa e América do Norte utilizam energia gerada a partir de resíduos sólidos. A incineração tem sido utilizada como um método para processar resíduos desde o início do século XVIII. Durante as últimas décadas ela tem sido amplamente utilizada, principalmente tomando como base os avanços tecnológicos. Modernas plantas de incineração estão agora quase todas sendo construídas com aproveitamento energético LIMA (2014).

Além disso, podem se destacar outros benefícios da recuperação de energia dos resíduos sólidos urbanos, como por exemplo: a) utilização como fonte alternativa de energia; b) redução do volume inicial de resíduos em até 90%; c) benefícios ambientais, pois ela mitiga a produção de gases do efeito estufa; d) emprego de mão de obra qualificada e não qualificada nas várias etapas do processo de recuperação de energia de energia a partir dos resíduos JORDAO (2011).

Este trabalho toma como ponto de partida uma revisão bibliográfica sobre tecnologias disponíveis para o aproveitamento de energia a partir de resíduos sólidos, especialmente a incineração em leito fluidizado e efetua o dimensionamento de um incinerador de leito fluidizado, levando em consideração características dos CDR (combustível derivado de resíduo).

Segundo MACHADO (2015) o resultado dessa dissertação torna-se relevante à medida que a maior discussão em relação à incineração de resíduos sólidos para geração de energia está relacionado à questão ambiental, principalmente ligada a emissão de gases tóxicos (dioxinas e furanos), esta tecnologia reduz de forma substancial a emissão desses gases.

Objetivos

Os objetivos deste trabalho foram divididos entre objetivo geral e objetivos específicos, conforme descrito abaixo.

Objetivo Geral

- Dimensionar um incinerador de leito fluidizado para incineração de resíduos sólidos urbanos da cidade de Conquista- MG.

Objetivos Específicos

- Analisar os parâmetros que influenciam na qualidade da incineração
- Verificar a influência das características dos CDR (combustível derivado de resíduos) na qualidade da incineração.
- Analisar os regimes de fluidização de um incinerador de leito fluidizado para incineração de resíduos sólidos urbanos, visando à redução do volume inicial de resíduos, bem como a emissão de poluentes para a atmosfera.

Justificativa e motivação

O consumo crescente e os impactos ambientais e sociais causados pelas fontes de energia tradicionais têm levado o poder público, privado e a comunidade científica a pensarem em novas alternativas para a geração de energia.

Segundo ABRELP (2013) A geração total de RSU no Brasil em 2013 foi de 76.387.200 toneladas, o que representa um aumento de 4,1%, índice que é superior à taxa de crescimento populacional no país no período, que foi de 3,7%.

No entanto a destinação desses resíduos conforme RIBEIRO (2010), apresenta diferenças relacionadas ao grau de desenvolvimento do país, visto que enquanto a Europa e Japão as Prefeituras pagam às empresas que recebem os RSU cerca de R\$ 250,00 ou mais por tonelada de lixo, dando destinação final adequada. No Brasil, devido à baixa renda da população, não é possível pagar valores desta magnitude, sendo comum taxa de R\$ 6,00 a tonelada, o que só viabiliza lixões ou aterros remediados.

Nesse contexto, a geração de energia a partir de resíduos sólidos vem apresentando-se como uma alternativa possível, com vistas ao desenvolvimento sustentável. Deve-se considerar que esta prática pode incentivar o desenvolvimento de práticas sanitárias adequadas, em decorrência dos projetos para a iniciativa privada. Outras vantagens do aproveitamento energético dos RSU podem ser enumeradas, destacando-se: geração de emprego, substituição de combustíveis fósseis, mitigação de gases do efeito estufa e redução do volume inicial do resíduo em 90%.

Estrutura do trabalho

A dissertação está organizada da seguinte forma: no capítulo 01 faz-se uma introdução ao tema, justificando a necessidade da pesquisa. No capítulo 02 realiza-se uma abordagem sobre as características dos RSUs (Resíduos Sólidos Urbanos). No capítulo 03 caracteriza-se os combustíveis que tem como matéria prima os resíduos sólidos urbanos, neste trabalho denominados como CDR (combustível derivado de resíduos). O capítulo 04 versa sobre características da fluidização, bem como os principais regimes de operação. O capítulo 05 discorre sobre a metodologia utilizada para a realização do trabalho. No capítulo 06 realiza-se uma discussão sobre os principais resultados alcançados pela pesquisa. O Capítulo 07 é a conclusão da presente dissertação.

2. Resíduos Sólidos

– Resíduos Sólidos Urbanos

– Definição e Classificação

De acordo com a definição da ABNT (2004) em sua norma NBR-10.004/2004, resíduos sólidos são:

“Resíduos nos estados sólidos e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamentos de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.”

Desta forma PAVAN (2010), define que os lixos ou resíduos sólidos apresentam grande diversidade e são gerados pelas mais variadas atividades humanas e nos mais diversos ambientes urbanos, constituindo assim uma massa de materiais reunidos julgados sem utilidade e postas para fora.

Os resíduos sólidos podem ser classificados de acordo com sua origem, periculosidade e fonte geradora, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), de acordo com Resolução 005/93, classifica os resíduos sólidos urbanos nos seguintes grupos:

Grupo A: resíduos que apresentam risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente devido à presença de agentes biológicos. Esse grupo é composto, principalmente, pelos resíduos de serviços de saúde;

Grupo B: resíduos que apresentam risco potencial à saúde pública e ao meio ambiente proveniente das características químicas. Como exemplos desse grupo são encontrados os resíduos farmacêuticos, as drogas quimioterápicas e, os demais produtos perigosos, classificados pela NBR 10.004 ABNT (2004);

Grupo C: resíduos radiativos - deverão obedecer às exigências definidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN);

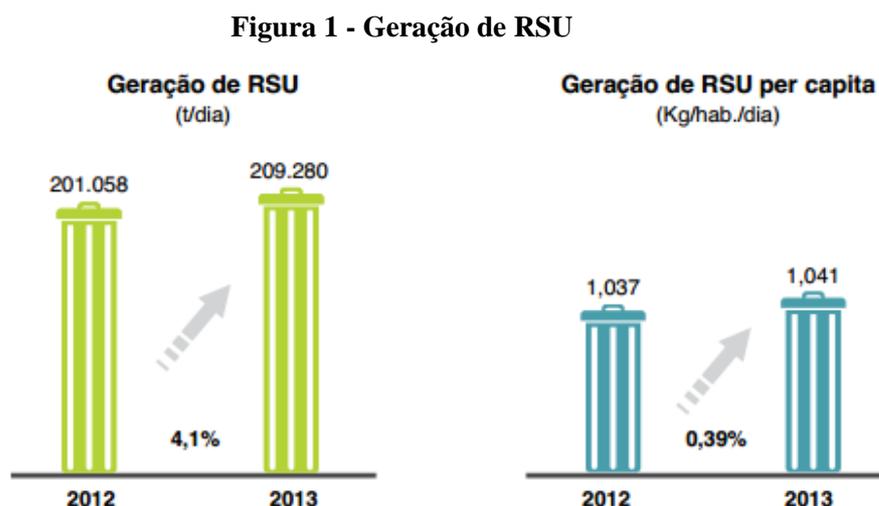
Grupo D: resíduos comuns, que não se enquadram nos grupos supracitados.

Os resíduos sólidos urbanos abrangem: resíduo domiciliar ou doméstico; resíduos de poda de manutenção de jardim, pomar ou horta; entulho de pequenas obras de reforma, de demolição ou de construção em habitações familiares; resíduo público (parques, praias, avenidas, ruas e demais espaços públicos); resíduo proveniente de feira livre; resíduo de estabelecimentos comerciais, industriais ou de unidades de trato de saúde humana ou animal, cuja composição seja similar aos domiciliares. Os resíduos sólidos especiais abrangem, dentre outros, os lodos e lamas, com teor de umidade superior a 70%, oriundos de estações de tratamento de água, de esgotos sanitários, de fossas sépticas, postos de lubrificação de veículos.

– Geração

Com o crescimento da população há, naturalmente, o aumento da quantidade de resíduos gerados. Porém, além das consequências diretas do aumento populacional, ocorre também uma mudança de hábitos da população, decorrentes do modelo de produção e consumo adotados, que se reflete em uma maior geração per capita de resíduos.

Segundo ABRELPE (2014), houve um aumento na produção de RSUs, quando comparado os anos de 2012 e 2013. O dado de geração diária em 2013, comparado com 2012, é apresentado na Figura 1.



Fontes: Pesquisa ABRELPE e IBGE

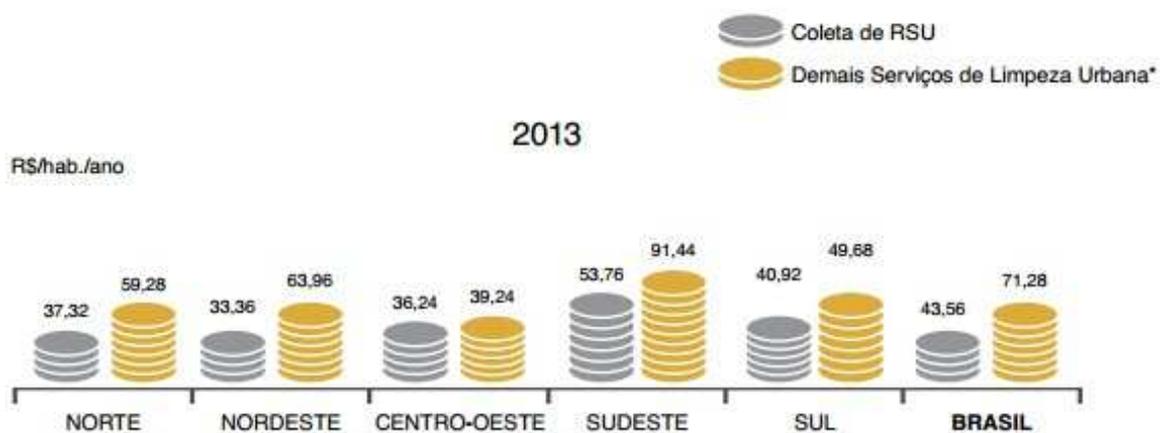
Nota: Os índices per capita referentes a 2013 e 2012 foram calculados com base na população total dos municípios;

A comparação entre a quantidade de RSU gerada e a coletada em 2013, mostra que diariamente mais de 20.000 toneladas deixaram de ser coletadas no país e, por consequência, tiveram destino impróprio ABRELPE (2014).

Em 2013, pouco mais de 62% dos municípios registraram alguma iniciativa de coleta seletiva. Embora seja expressiva a quantidade de municípios com iniciativas de coleta seletiva, convém salientar que muitas vezes estas atividades resumem-se à disponibilização de pontos de entrega voluntária ou convênios com cooperativas de catadores, que não abrangem a totalidade do território ou da população do município.

Os valores apresentados na Figura 2 revelam que em 2013 os municípios aplicaram, em média, R\$ 114,84 por habitante/ano na coleta de RSU e demais serviços de limpeza urbana.

Figura 2 - Valores médios por habitante/ano correspondentes aos recursos aplicados na Coleta de RSU e nos demais Serviços de Limpeza Urbana



Fontes: Pesquisa ABRELPE e IBGE Notas: Incluem as despesas com a destinação final dos RSU e com serviços de varrição, capina, limpeza e manutenção de parques e jardins, limpeza de córregos, etc.

– Características dos Resíduos Sólidos Urbanos

Em SOARES (2011), define-se que as características dos resíduos sólidos urbanos variam de cidade para cidade, e também variam em função de diversos fatores, como o porte da cidade, a atividade, os hábitos da população, o clima e o nível educacional. As características dos RSU vão se modificando com o decorrer dos anos, tornando necessários programas de caracterização periódicos, de preferência ao longo do ano, em função do número de habitantes da cidade, visando

à atualização destes dados e a adaptação do sistema de gerenciamento dos resíduos sólidos a estas transformações.

As características dos resíduos sólidos urbanos podem ser reunidas em três grupos, sendo eles: características biológicas, químicas e físicas.

Destes três grupos, aquele que interfere de forma mais incisiva no dimensionamento do sistema de coleta e disposição, considerando eventualmente a existência de um programa de coleta seletiva e reciclagem, é o das características físicas, por influenciar em vários aspectos da gestão dos resíduos sólidos urbanos.

– Propriedades Químicas

Segundo SOARES (2011), os RSU são muito heterogêneos, pois consistem de frações de diversos tamanhos com diferentes composições, sendo estas muito específicas. Isso faz com que a caracterização química dos resíduos sólidos urbanos seja muito difícil e cara. Como propriedades químicas dos resíduos sólidos podemos citar:

Poder calorífico: indica a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor, quando submetido à queima, sendo extremamente importante nos processos de tratamento térmico dos resíduos.

Composição química: consiste na determinação dos teores de cinzas, carbono, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo, enxofre, matéria orgânica, resíduo mineral total e resíduo mineral solúvel, presentes nos resíduos sólidos urbanos;

Relação carbono hidrogênio: indica o grau de decomposição da matéria orgânica dos RSU nos processos de tratamento e disposição final;

Potencial hidrogeniônico (pH): indica o teor de alcalinidade ou acidez da massa de resíduos sólidos urbanos. O pH está relacionado com a velocidade de degradação e estabilização da matéria orgânica nos resíduos.

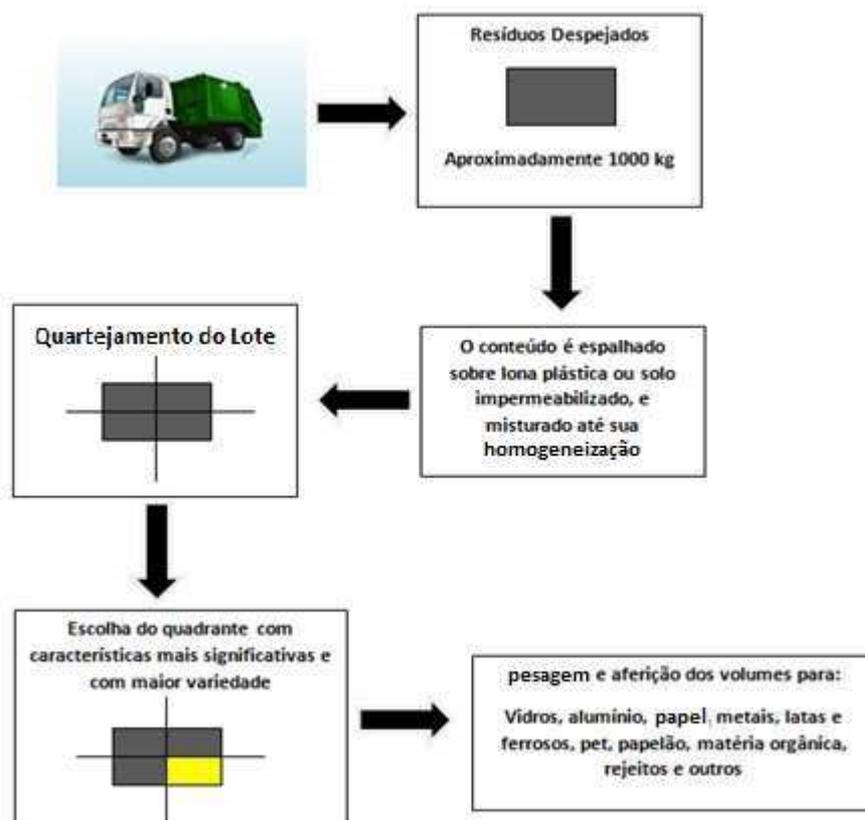
Teor de Sólidos Totais Voláteis: pela determinação do teor de sólidos totais voláteis determina-se a percentagem de cinzas e a quantidade de matéria orgânica existente no resíduo sólido. Portanto, esse parâmetro pode ser um indicador da degradabilidade dos RSU ao longo do tempo.

– Propriedades Físicas

Para haver uma melhor gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos dos municípios brasileiros, primeiramente, é preciso conhecer o que é gerado. Para isto, a caracterização gravimétrica do mesmo é de primordial importância. Segundo a ABNT- NBR 10.007/2004, a gravimetria refere-se à porcentagem de cada componente (papel, plásticos, matéria orgânica, etc) em relação ao peso total do lixo.

Existem alguns métodos para a determinação dessas características físicas, sendo mais comum à denominada “método de quartejamento”, disposta na NBR 10007/2004. Esta técnica é o primeiro e principal passo para o estudo de minimização (ou redução) e recuperação (reutilização e reciclagem) dos resíduos. A figura 3, ilustra a metodologia utilizada no método de quartejamento:

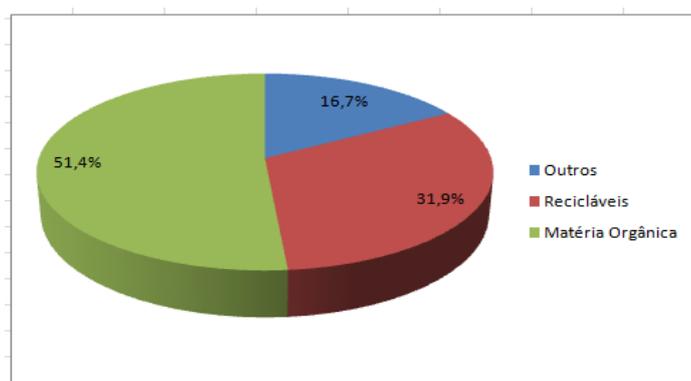
Figura 3 - Metodologia para caracterização gravimétrica de RSU



– Parâmetros nacionais de composição gravimétrica

Existem parâmetros nacionais para a quantificação de resíduos sólidos urbanos (RSU), de maneira mais genérica de acordo com o plano nacional de resíduos sólidos, a composição gravimétrica no Brasil está descrita na figura 4:

Figura 4 - Composição Gravimétrica dos RSU no Brasil



Fonte: Plano nacional de resíduos sólidos – versão pós-audiências e consulta pública para conselhos nacionais (Fevereiro, 2012). Adaptado pelo Autor

– Legislação Específica

Na área de saneamento básico com interface a processos de aproveitamento energético de RSU, os principais regulamentos são:

- Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei Nº 12.305, de 02/08/2010) e seu decreto regulamentador (Nº 7.404/2010)
- Lei Nacional de Saneamento Básico (LNSB, Lei Nº 11.445, de 05/01/2007) e seu decreto regulamentador (Nº 7.217/2010).

– Política Nacional de Resíduos Sólidos

No âmbito da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010) e seu decreto regulamentador (Nº 7.404/2010), alguns pontos a serem observados em projeto de aproveitamento energético da fração orgânica de RSU merecem ser destacados com o objetivo da redução de rejeitos, e a disposição final adequada dos resíduos (Art. 7, Art. 9 e Art. 36). SOUZA (2014)

Tendo como enfoque o aproveitamento energético pode ser citado o seguinte trecho da PNRS e do seu decreto regulamentador.

- Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha comprovada sua viabilidade técnica e ambiental com a implantação

de programas de monitoramento e emissão de gases tóxicos aprovados por órgãos ambientais (Art. 9, §1).

O decreto 7.404/10 foi estabelecido às diretrizes aplicáveis à gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos que são:

- Utilização de resíduos sólidos nos processos de recuperação de energia inclui o co-processamento, e obedecerão as normas estabelecidas pelos órgãos competentes (Art. 36).

3. Combustíveis Derivados de Resíduo (CDR)

Designam-se por Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR), do inglês refused derived fuel (RDF), os combustíveis sólidos preparados a partir de resíduos não perigosos cuja utilização visa à recuperação de energia em unidades de incineração e co-incineração (NP 4486).

Os combustíveis derivados de resíduos têm sua utilização possível em fornos rotativos, caldeiras de grelhas e caldeiras de leito fluidizado, estas de interesse para o presente trabalho. SOUZA (2006).

– Características dos CDR

Segundo BANDEIRA (2010), as características físico-químicas e biológicas de um CDR, variam em função da composição, que pode ser influenciada pelos seguintes fatores:

- A origem (urbana industrial ou construção);
- O sistema de recolha (indiferenciado ou separação na fonte);
- Tratamento aplicado (maior ou menor eliminação de contaminantes).

Os Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR) possui em sua composição de 33 a 50% de carbono biogênico, que tem como origem a fração orgânica dos RSUs.

Essa composição pode contribuir consideravelmente para a redução das emissões de CO₂, uma vez que a fração de carbono presente na biomassa do lixo não deve ser contabilizada para o cálculo das emissões de gases do efeito estufa (GEE), pois não são emissões líquidas de CO₂, já que o carbono emitido foi retirado da atmosfera por processos biológicos durante o crescimento da biomassa que gera a parte orgânica dos

RSU, isso tem como consequência um maior interesse em utilizar os RSUs, como fonte alternativa para geração de energia LEME (2010).

A Tabela 1 resume as principais características do CDR enquanto combustível em comparação com o carvão (que representa os combustíveis fósseis tradicionais) e com dois tipos de biomassa que são utilizados como combustíveis renováveis.

Tabela 1 - Comparação das características do CDR a outros combustíveis

Parâmetro ^{a)}	Carvão (Antracite) ^{b)}	Aparas Pinheiro ^{b)}	Casca de Eucalipto ^{b)}	CDR ^{c)}
PCI ^{d)} (MJ/kg)	33.17	16.99	14.90	18.06
umidade (% m/m)	1.90	9.30	12.00	18.00
Cinzas (% m/m)	2.80	0.30	4.20	15.00
Cloro (% m/m)	0.08	0.01	0.23	0.91
Enxofre (% m/m)	0.79	0.02	0.04	0.14

O CDR apresenta um PCI médio da mesma ordem de grandeza que a biomassa convencional, ficando, no entanto, bastante aquém do carvão. Em termos de umidade, cinzas e cloro, o CDR tem teores mais elevados que o carvão ou a biomassa de pinheiro ou eucalipto. No que diz respeito ao teor em enxofre, o CDR apresenta valores baixos quando comparado com o carvão.

– Tecnologias de produção de CDR

Em BANDEIRA (2010), define-se que os CDRs podem ser obtidos a partir de resíduos sólidos não perigosos, nomeadamente resíduos industriais banais, resíduos de construção e demolição, resíduos de veículos em fim de vida ou resíduos sólidos urbanos (RSU).

No presente trabalho dar-se-á enfoque a produção a partir de RSU. A grande diferença nas tecnologias de produção deve-se à presença ou não de matéria orgânica putrescível.

Na produção de CDR a partir da fração com elevado poder calorífico (FEPC) do RSU distingue-se dois métodos: o TMB e a bioestabilização. A principal diferença consiste no fato de no Tratamento Mecânico e Biológico (TMB) a fração orgânica putrescível não integrar o CDR, enquanto no segundo caso, os orgânicos fazem parte do combustível produzido.

O quadro 1 apresenta os principais objetivos das etapas do processo de geração de CDR a partir de resíduos sólidos, denominado TMB.

Quadro 1 - Objetivos das diferentes etapas do Tratamento Mecânico e Biológico aplicado a RSU.

Etapa	Objetivo
Separação Mecânica	<ul style="list-style-type: none"> • Separar a fração orgânica; • Separar possíveis recicláveis não contaminados (cartão, plástico, metais); • No caso da produção de CDR há a separação de contaminantes (PVC, resíduos eletrônicos).
Redução de Granulometria	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentar homogeneidade; • Facilitar armazenamento e transporte.
Tratamento Biológico	<ul style="list-style-type: none"> • Compostagem ou digestão anaeróbia da fração orgânica para produção de composto e/ou energia.

Adaptado de Gendebien et al. (2003).

O quadro 2 apresenta os principais objetivos das etapas do processo de geração de CDR a partir de resíduos sólidos, denominado Bioestabilização.

Quadro 2 - Objetivos das diferentes etapas do Tratamento de Bioestabilização de RSU.

Etapa	Objetivo
Secagem	<ul style="list-style-type: none"> • Reduz o teor de umidade para aumentar o poder calorífico e reduzir atividade biológica.
Separação Mecânica	<ul style="list-style-type: none"> • Separar possíveis recicláveis (metais); • Separação de contaminantes (PVC, resíduos eletrônicos).
Redução de Granulometria	<ul style="list-style-type: none"> • Separar possíveis recicláveis (metais); • Separação de contaminantes (PVC, resíduos eletrônicos).

Fonte: Adaptado de Gendebien et al. (2003).

– Tipos de CDR

Existem vários tipos de combustíveis derivados de resíduos, estas tipologias podem ser definidas de acordo com a forma do produto ou de acordo com a sua origem.

Tomando como parâmetro a forma, podemos distinguir os seguintes tipos:

- Pluff – material solto, de baixa densidade, que tem a característica de ser transportável pelo ar (CEN/TS 15357:2006). A figura 5 ilustra o pluff.

Figura 5 - CDR em fluff



Fonte: Do autor, 2015

- Pellets – CDR produzido por aglomeração de material solto em cubo, disco ou cilindro (CEN/TS 15357:2006). O diâmetro ou seu equivalente é inferior a 25 mm. A figura 6 ilustra o pellet.

Figura 6 - CDR em Pellets



Fonte: Do autor, 2015

- Briquette – Bloco ou cilindro de CDR produzido por aglomeração de material solto (CEN/TS 15357:2006). O diâmetro ou seu equivalente é superior a 25 mm. A Figura 7 ilustra o briquette.

Figura 7 - CDR em briquette

Fonte: Do autor, 2015

Tomando como parâmetro a origem, podemos distinguir os seguintes tipos:

- PDF (plastic derived fuel) – combustível derivado do plástico;
- PPF (paper and plastic fuel) – combustível de papel e plástico;

Os princípios do sistema de classificação de CSR assentam em três parâmetros importantes, referidos às propriedades principais de CSR: um parâmetro econômico (valor calorífico líquido, que corresponde à anterior nomenclatura de poder calorífico inferior – PCI), um parâmetro técnico (o conteúdo em cloro) e um parâmetro ambiental (o conteúdo em mercúrio). Estes são os parâmetros escolhidos para dar aos atores uma idéia imediata, ainda que simplificada, da qualidade do combustível em questão. O quadro 3 apresenta a classificação dos combustíveis derivados de resíduos de acordo com a especificação supra citada SOUZA (2006).

Quadro 3- Sistema de classificação dos Combustíveis Sólidos Recuperados.

Propriedades	Medida Estatística	Unidade	Classes				
			1	2	3	4	5
Pode Calorífico Inferior (PCI)	Média	MJ/Kg	≥ 25	≥ 20	≥ 15	≥ 10	≥ 3
Teor de Cloro (Cl)	Média	% (Base Seca)	$\leq 0,2$	$\leq 0,6$	$\leq 1,0$	$\leq 1,5$	≤ 3
Teor de Mercúrio (Hg)	Mediana	MJ/Kg	$\leq 0,02$	$\leq 0,03$	$\leq 0,08$	$\leq 0,15$	$\leq 0,50$
	Percentil 80	MJ/Kg	$\leq 0,04$	$\leq 0,06$	$\leq 0,16$	$\leq 0,30$	$\leq 1,00$

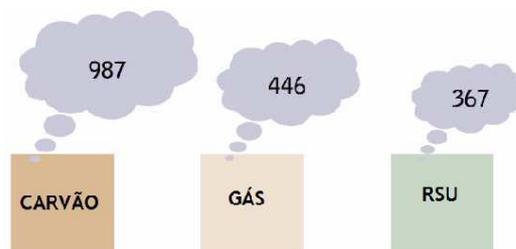
Fonte: SOUZA, 2006. Adaptado pelo autor

– As emissões de CO₂ e o CDR

Tal como com todas as fontes de energia renováveis, o maior benefício associado à utilização dos resíduos como fonte de energia é a redução da emissão dos poluentes gasosos que causam efeitos à

escala local e global. A figura 8 apresenta uma comparação da emissão de CO₂ para fontes de energia renováveis diferentes, comprovando a vantagem ambiental do resíduo sólido urbano.

Figura 8 - Emissões – g de CO₂ fóssil/kWh de eletricidade.



Fonte: (IEA BIOENERGY 2003)

– Propriedades do Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR)

Na tabela 2 apresentam-se várias propriedades físicas e térmicas dos CDRs indispensáveis para o dimensionamento de um incinerador apropriado. É de notar que os CDRs do tipo pellet, apresentam uma forma cilíndrica.

Tabela 2- Propriedades físicas do CDR

Propriedades Físicas	
Massa Volúmica (kg/m ³)	200 a 300
Porosidade do leito (%)	0,8
Comprimento (mm)	0,025
Umidade	De 10 a 15%
Poder Calorífico (Kcal/Kg)	De 3500 a 4200
Dimensões	> 4,2 cm e < 10 cm – 85% < 4,2 cm – 15%

Fonte: CARBOGAS, 2012. Adaptado pelo autor

4. Fluidização

Segundo MELO (2008), a fluidização é a operação pela qual as partículas sólidas são transformadas em um estado como de um fluido através de suspensão em um gás ou líquido.

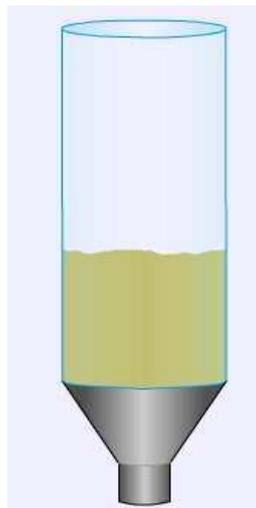
Em decorrência disso, consegue-se diminuir as resistências ao transporte de calor e massa, além de se promover uma boa mistura e homogeneização do material. De olho nessas características, a Engenharia Química desenvolveu várias aplicações para a fluidização, em especial para a fluidização gás-sólido, com destaque para os reatores químicos e os secadores.

A fluidização é o fenômeno pelo qual um leito de partículas sólidas (geralmente de pequeno tamanho) é submetido à passagem vertical e ascendente de um fluido, gás ou líquido formando uma suspensão com comportamento semelhante ao de um líquido FONSECA (2009).

Em PEDROSO (2013) define-se que a velocidade do fluido que atravessa as partículas sólidas do leito é essencial para controlar o comportamento do mesmo, e também para distinguir diferentes regimes de operação. Considerando um leito de partículas sólidas no interior de uma coluna (circular, quadrada ou retangular) depositado sobre placa perfurada ou microporosa, pode-se observar o aparecimento de diferentes regimes de contato fluido-sólido, à medida que a velocidade do gás aumenta.

Se um fluido passa ascendentemente através de um leito de partículas finas, a uma baixa velocidade, o fluido apenas atravessa o espaço entre as partículas, sendo que estas permanecem estacionárias, configurando um regime de fluidização denominado leito fixo, conforme pode ser observado na figura 9.

Figura 9 - Regime de fluidização leito fixo

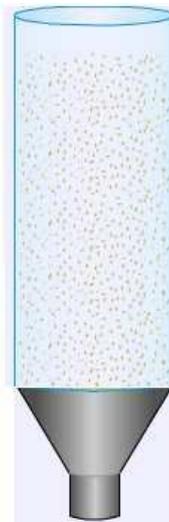


Fonte: Tannous, 2012. Adaptado pelo autor

Com vazão ainda maior, atinge-se uma condição em que todas as partículas são suspensas pelo fluxo ascendente do gás ou líquido. Neste ponto as forças de fricção entre as

partículas e o fluido contrabalançam o peso das partículas. A queda de pressão, através de qualquer seção no leito, torna-se igual ao peso do fluido e das partículas nesta seção. O leito é considerado como sendo fluidizado e é denominado como leito fluidizado incipiente ou um leito na mínima fluidização, esse etapa indica a transição entre o leito fixo e o leito plenamente fluidizado e, a velocidade superficial do fluido em que esse fenômeno ocorre é denominada velocidade de mínima fluidização, a figura 10 ilustra esse regime de operação FONSECA (2009).

Figura 10 – Regime de fluidização leito fluidizado



Fonte: Tannous, 2012. Adaptado pelo autor

Geralmente o comportamento dos sistemas fluidizados por gás é diferente daqueles que utilizam líquido, pois o aumento da velocidade do gás acima da correspondente à mínima fluidização produz instabilidades gerando o aparecimento de bolhas e canais preferências. Aumentando a velocidade do gás, a agitação passa a ser mais violenta e o movimento das partículas mais vigoroso. O leito não se expande muito mais do que volume de mínima fluidização, sendo esse regime denominado de fluidização agregativa, borbulhante ou heterogênea, a figura 11 ilustra este processo.

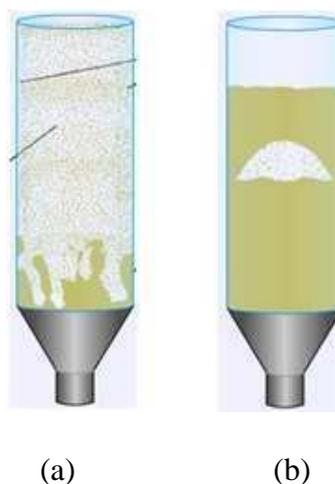
Figura 11 - Regime de fluidização leito borbulhante



Fonte: Tannous, 2012. Adaptado pelo autor

Quando a velocidade superficial do gás em um sistema gás-sólido é consideravelmente aumentada, pode-se superar o valor da velocidade terminal das partículas, produzindo o arraste de material sólido o que provoca o desaparecimento da superfície superior do leito. Nesse regime observa-se um movimento turbulento de sólidos e bolhas de gás de diversos tamanhos e formas. Este estado denomina-se leito fluidizado turbulento, como ilustra a figura 12 a. Com um incremento adicional na velocidade, as partículas são arrastadas pelo gás expulsando-as fora do leito. Nesse estado observa-se o regime de leito fluidizado disperso, diluído ou em fase dispersa, com transporte pneumático de sólidos, a figura 12 b demonstra esse processo.

Figura 12- Leito fluidizado (a) Regime Turbulento (b) Regime disperso



(a)

(b)

Fonte: Tannous, 2012. Adaptado pelo autor

– Caracterização da fase sólida

Serão apresentadas nesta seção as grandezas utilizadas para caracterizar a fase sólida particulada, essencial para o dimensionamento de leitos fluidizados e também na simulação numérica dos mesmos.

– Diâmetro das partículas

Segundo PEDROSO (2013) o diâmetro de uma partícula perfeitamente esférica é de fácil determinação, no entanto a geometria dos particulados utilizados em muitas aplicações com leitos fluidizados são mais complexas. Sendo assim, utiliza-se o diâmetro de Sauter, o qual representa o diâmetro de uma partícula que tem a relação de seu volume e sua área superficial a mesma que o total do volume de todas as partículas e a superfície total destas. Este diâmetro pode ser determinado através da equação 4.1, onde o valor de Δ_x representa a fração retida por cada peneira e D_n o diâmetro médio de abertura das peneiras superior e inferior.

(4.1)

$$D_v = \frac{1}{\sum \frac{\Delta_x}{D_n^3}} \text{ [g/m}^{-3}\text{]}$$

Em sistemas reais é utilizado o diâmetro médio de Sauter, que consiste na média sintética do diâmetro de Sauter, calculado em função da distribuição probabilística dos tamanhos das partículas.

– Esfericidade das partículas

É uma medida adimensional que determina a distorção da geometria de uma partícula em relação a uma esfera, segundo MELO (2008), pode ser calculada conforme a equação 4.2, onde φ é a esfericidade que pode variar de $0 < \varphi < 1$, sendo esférico quando $\varphi = 1$ e outras formas para valores de φ diferentes deste. A_e representa a área da esfera e A_p representa a área da partícula.

(4.2)

$$\varphi = \frac{A_e}{A_p}$$

– Massa específica

Em PEDROSO (2013), explicita-se que há duas massas específicas relacionadas ao sólido de importância em leitos fluidizados. A primeira delas é a massa específica do sólido ou da partícula ρ_s , definido pela equação 4.3.

$$\rho_s = \frac{M_p}{V_p(\text{com poros})} \quad [\text{g/m}^{-3}] \quad (4.3)$$

Onde M_p é a massa da partícula e V_p o volume ocupado pela partícula.

A segunda delas é a massa específica de sólidos efetiva ρ_r , que caracteriza a razão da massa total de partículas ocupando o volume (M_p), pelo próprio volume total da região de interesse no leito fluidizado (V_r), considerando inclusive os espaços preenchidos pelo gás entre as partículas, conforme a equação 4.4.

$$\rho_r = \frac{M_p}{V_r} \quad [\text{g/m}^{-3}] \quad (4.4)$$

– Fração volumétrica de gás

Um leito fixo composto pela disposição de partículas apresenta espaços preenchidos por gás entre estas. A relação entre o volume desses espaços (V_v) e o volume total do leito ou da região de interesse (V_r) é definida pelo parâmetro adimensional fração volumétrica de gás, ε_g , calculado através da equação 4.5.

$$\varepsilon_g = \frac{V_v}{V_r} \quad (4.5)$$

Resulta diretamente da definição de fração volumétrica de gás a fração volumétrica de sólidos ε_s , conforme equação 4.6.

$$\varepsilon_s = 1 - \varepsilon_g \quad (4.6)$$

Que permite reescrever a equação 4.3 na equação 4.7

(4.7)

$$\rho_r = \varepsilon_s \times \rho_s$$

onde:

ε : porosidade da partícula

ρ_s : massa específica da partícula

Distingue-se pelo menos duas outras condições para avaliação da fração volumétrica de gás em um leito: ε_m e ε_{mf} , que definem respectivamente a fração volumétrica de gás no leito fixo e em condição de mínima fluidização. Segundo PEDROSO (2013), um valor usual para fração volumétrica de gás em leito fixo composto por partículas esféricas de mesmo diâmetro é aproximadamente 0,4.

– Caracterização fluidodinâmica

O escoamento em leito fluidizado é fortemente influenciado pelas propriedades termofísicas e de transporte das fases de gás e sólida e pelas características físicas da fase sólida. Este escoamento é caracterizado pelos seguintes parâmetros: velocidade superficial do gás, perda de carga vertical, velocidade de mínima fluidização, velocidade terminal das partículas e velocidade de transporte, que serão detalhadas na próxima seção.

– Velocidade superficial do gás

Em FONSECA (2009) define-se que para o estudo de leito fluidizado é fundamental a determinação de duas velocidades: a velocidade de mínima fluidização e a velocidade terminal das partículas.

– Velocidade mínima de fluidização

Velocidade mínima de fluidização corresponde àquela velocidade do fluido, a partir na qual as partículas se separam umas de outras e são mantidas individualmente em suspensão. Nessa condição o balanço de forças fornece:

Força ascendente do fluido = peso das partículas

O que equivale a:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Queda de} \\ \text{pressão através} \\ \text{do leito na} \\ \text{mínima fluidização} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Área da} \\ \text{seção} \\ \text{transversal} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Volume} \\ \text{do} \\ \text{leito} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Fração} \\ \text{de sólidos} \\ \text{no leito} \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Peso} \\ \text{específico} \\ \text{do sólido} \end{array} \right)$$

Na condição mínima de fluidização essa queda de pressão é igual à do leito fixo, e podemos definir esta velocidade tomando como base a equação de Ergun 4.8.

Onde:

Re_{p,mf} representa o número de Reynolds da partícula na velocidade de mínima fluidização, sendo este um número adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície.

ε_{mf} é a porosidade do leito, sendo esta relação existente entre o volume de espaços vazios inter-partículas e o volume total do leito, de tal forma que ε sempre é menor que a unidade.

H esfericidade, definida como a razão entre a área superficial da esfera e a área superficial da partícula, ambas com o mesmo volume.

(4.8)

$$Ar = \frac{1,75}{3_{mf}\phi} Re_{p,mf}^2 + \frac{150(1 - mf)}{3_{mf}\phi^2} Re_{p,mf}$$

Onde Ar é o número de Arquímedes, dado pela equação 4.9.

Sendo:

d_p : o diâmetro da partícula

ρ_g : massa específica do gás

ρ_s : massa específica da partícula

g : aceleração da gravidade

μ : viscosidade do gas

(4.9)

$$Ar = \frac{d_p^3 \cdot \rho_g (\rho_s - \rho_g)g}{\mu^2}$$

E $Re_{p,mf}$ é o número de Reynolds da partícula calculado com a velocidade de mínima fluidização como mostra a equação (4.10).

Onde:

d_p : é o diâmetro da partícula

U_{mf} : sendo a velocidade mínima de fluidização

ρ_g : massa específica do gás

μ : viscosidade do gas

(4.10)

$$Re_{p,mf} = \frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu}$$

Quando ε_{mf} e/ou ϕ não são conhecidas, é possível estimar a velocidade de mínima fluidização de um leito fluidizado utilizando as constantes k_1 e k_2 obtidos à partir de aproximações baseadas em resultados empíricos, equação (4.11).

(4.11)

$$k_1 \cdot Re_{p,mf}^2 + k_2 \cdot Re_{p,mf} = Ar$$

Onde:

(4.12)

$$k_1 = \frac{1,75}{\epsilon_{mf}^3 \phi}$$

Sendo:

ϵ_{mf} : porosidade do gás na velocidade de mínima fluidização

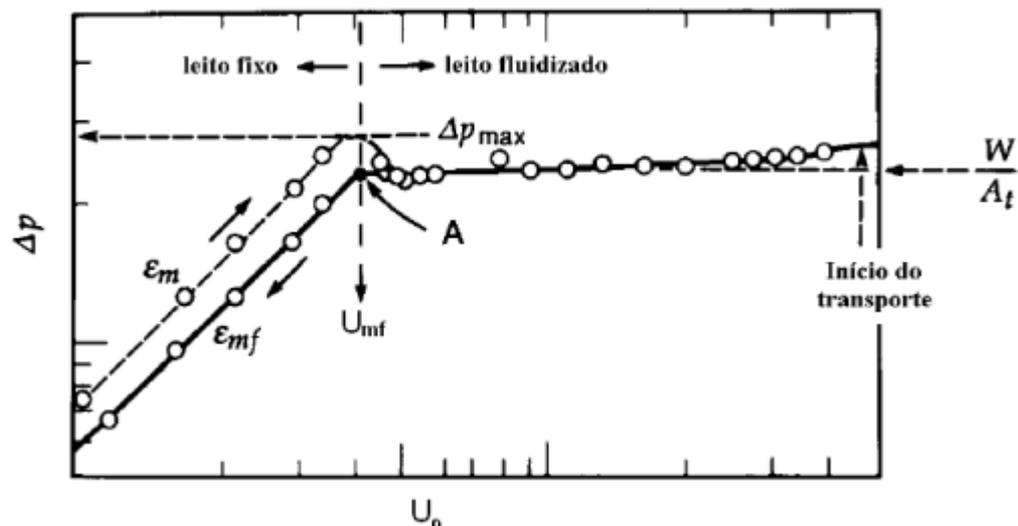
(4.13)

$$k_2 = \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\epsilon_{mf}^3 \phi^2}$$

As correlações foram obtidas em temperatura ambiente, embora a maiorias das aplicações de leito fluidizado sejam realizadas em temperaturas elevadas.

Nos leitos fluidizados a velocidade de mínima fluidização é determinada experimentalmente através do levantamento da curva fluidodinâmica mostrada na Figura 13.

Figura 13 - Queda pressão em função da velocidade superficial do gás em um leito fluidizado



Fonte: Fonseca, 2009

Segundo FONSECA (2009) método da curva fluidodinâmica é o mais convencional e amplamente usado, permite encontrar a velocidade mínima de fluidização de uma partícula através da medida da queda de pressão no leito. Para este método é aconselhável primeiramente fluidizar o leito de partículas e em seguida diminuir a velocidade superficial do gás até chegar à condição de leito fixo, determinando a queda de pressão ao longo do processo. A intersecção

das retas obtidas para o regime de leito fixo com a reta traçada pelo ajuste dos pontos obtidos na região de leito fluidizado permite a obtenção de U_{mf} , isto pode ser observado na Figura 13 onde o ponto A representa a velocidade de mínima fluidização.

– Velocidade terminal das partículas

A velocidade terminal ou máxima de fluidização (U_t) corresponde à velocidade do gás onde as partículas começam a ser arrastadas. Isso acontece quando a força de arraste do gás se iguala ao peso das partículas que se encontram suspensas pelo fluido, a equação (4.13) define o cálculo da velocidade terminal COUTO (2004).

(4.13)

$$U_t = \left[\frac{4d_p (\rho_s - \rho_g) g}{3 \rho_g C_D} \right]^{1/2}$$

Sendo:

d_p : o diâmetro da partícula

ρ_s : massa específica da partícula

ρ_g : massa específica do gás

g : aceleração da gravidade

Onde o coeficiente de arraste (C_D) foi descrito por Morsi e Alexander (1972), representado na equação 4.14.

(4.14)

$$C_d = \frac{K_1^*}{Re_p} + \frac{K_2^*}{Re_p^2} + K_3$$

Sendo:

Re : é numero de Reynolds, adimensional

K_1^*, K_2^*, K_3^* : Constantes da equação do coeficiente de arrasto, adimensional

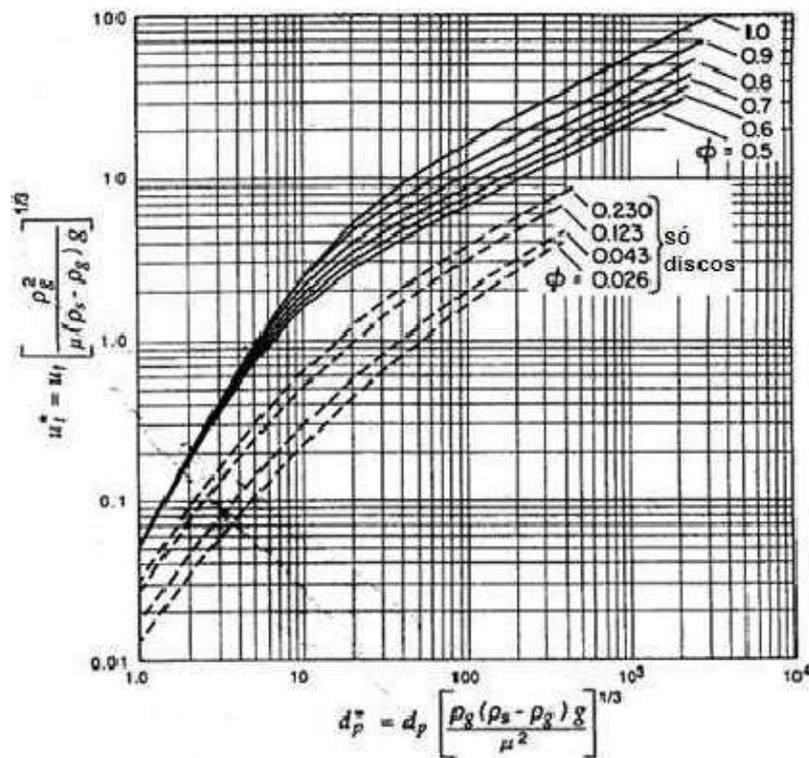
As constantes do coeficiente arraste são fornecidas em função de cada faixa de número de Reynolds como apresentado no quadro 4.

Quadro 4 – Constantes do coeficiente de arraste em função do número de Reynolds

Re_p	κ_1^*	κ_2^*	κ_3^*
< 0,1	24	0	0
0,1 - 1	22,73	0,0903	3,69
1 - 10	29,1667	-3,8889	1,222
10 - 100	46,5	-116,67	0,6167
100 - 1000	98,33	-2778	0,3644
1000 - 5000	148,62	-47500	0,357

O cálculo da velocidade terminal é um processo iterativo, pois o C_D é em função de número de Reynolds (Re_p).

Figura 14 - Determinação da velocidade terminal



Fonte: adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991

5. Metodologia

– Gravimetria de resíduos sólidos da cidade de Conquista – MG

Primeiro foi coletado uma amostra significativa de resíduos sólidos urbanos (aproximadamente 1000 kg), vale salientar que são produzidos 19 (dezenove) toneladas de RSUs por semana, ou seja 2,5 duas toneladas e meia por dia em todo o município de Conquista.

Para produzir a gravimetria, este resíduo foi despejado em piso impermeabilizado, distribuído de forma homogênea, e foi realizado o quartejamento, como pode ser observado na figura 15.

Figura 15 - Etapa de quartejamento da gravimetria



Fonte: O Autor

A amostra escolhida foi de 250 kg, foi separada em 9 tambores com volume aproximado de 0,100 m³ ou 100 L, com as seguintes nomenclaturas: vidro; papel; papelão; metais; latas e ferrosos; pet; plástico; alumínio; matéria orgânica e rejeito.

Depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada. Na sequência foi aferida sua massa e seu respectivo volume, a figura 16 ilustra o processo.

Figura 16 - Processo de aferimento de massa e volume



Fonte: O Autor

– Resultados obtidos na Gravimetria

O processo de gravimetria realizado em parceria com a empresa Terra Assessoria Ambiental adotou a seguinte metodologia: foram realizadas 03 (três) coletas amostrais na cidade de Conquista, durante o período de 05 a 09 de agosto de 2013, sendo esta realizada em três dias da semana (segunda, quarta e sexta-feira). Após o término do processo, obteve-se as porcentagens em massa dos materiais segregados, conforme pode ser observado na tabela 3.

Tabela 3 - Porcentagem (em massa) dos materiais coletados na semana da realização da gravimetria

	Vidros ®	Papel®	Alumínio®	Metal, Latas e ferrosos ®	Pet ®	Plástico ®	Papelão e Tetra pak ®	Matéria Organica	Rejeitos e Outros
1^o Dia	1,65%	2,31%	0,35%	0,77%	2,34%	10,79%	5,90%	51,50%	24,39%
2^o Dia	3,54%	2,95%	0,18%	1,91%	2,54%	14,81%	7,41%	45,89%	20,77%
3^o Dia	1,60%	2,50%	0,75%	1,56%	3,35%	11,50%	8,60%	46,80%	23,34%

Fonte: O Autor, 2013

A tabela 4 apresenta os dados relativos à porcentagem em volume dos materiais coletados na semana de realização da gravimetria dos resíduos sólidos na cidade de Conquista – MG.

Tabela 4 - Porcentagem (em volume) dos materiais coletados na semana

Gravimetria	Vidros ®	Papel®	Alumínio®	Metal, Latas e ferrosos ®	Pet ®	Plástico ®	Papelão e Tetra pak ®	Matéria Organica	Rejeitos e Outros
1 ^o Dia	0,85%	5,34%	1,68%	0,96%	0,96%	28,06%	21,00%	15,90%	25,24%
2 ^o Dia	0,80%	5,94%	1,31%	1,23%	1,32%	30,62%	20,29%	15,11%	23,39%
3 ^o Dia	0,83%	6,40%	1,64%	0,92%	0,92%	29,60%	19,98%	15,51%	24,20%

Fonte: O Autor, 2013

Ao término da gravimetria e do cálculo de suas respectivas porcentagens, foi possível realizar a média percentual em massa e volume de cada um dos materiais segregados. Este valor médio representa a característica do RSU do município de Conquista – MG, a tabela 5, apresenta a média percentual (em massa) ao término da realização da gravimetria.

Tabela 5 - Media Percentual (em massa) ao término da realização da gravimetria

Gravimetria	Materiais								
	Vidros ®	Papel®	Alumínio®	Metal, Latas e ferrosos ®	Pet ®	Plástico ®	Papelão e Tetra pak ®	Matéria Organica	Rejeitos e Outros
Média	2,24%	2,52%	0,41%	1,47%	2,70%	12,80%	7,07%	47,09%	23,70%

Fonte: O Autor

A tabela 6, apresenta a media percentual (em volume) ao término da realização da gravimetria.

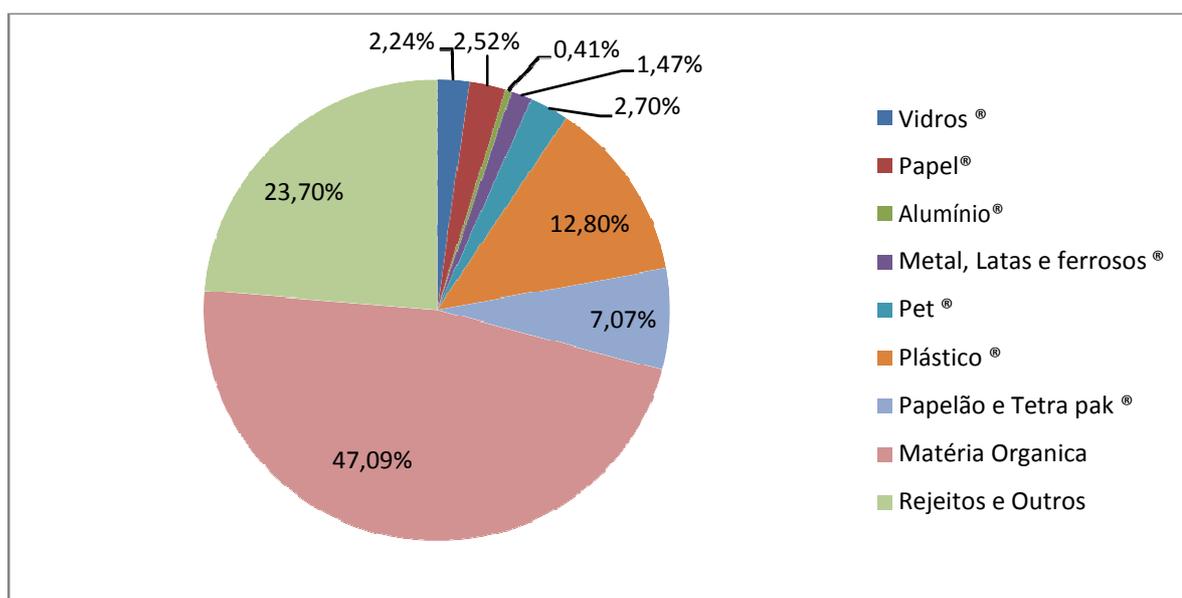
Tabela 6 - A média percentual (em volume) ao término da realização da gravimetria.

Gravimetria	Materiais								
	Vidros ®	Papel®	Alumínio®	Metal, Latas e ferrosos ®	Pet ®	Plástico ®	Papelão e Tetra pak ®	Matéria Organica	Rejeitos e Outros
Média	0,60%	4,80%	0,80%	1,20%	11,30%	27,00%	18,40%	14,30%	21,60%

Fonte: O Autor

É importante destacar que foram coletados no total 19.220 kg de resíduos na semana e o volume total corresponde a 168,852 m³.

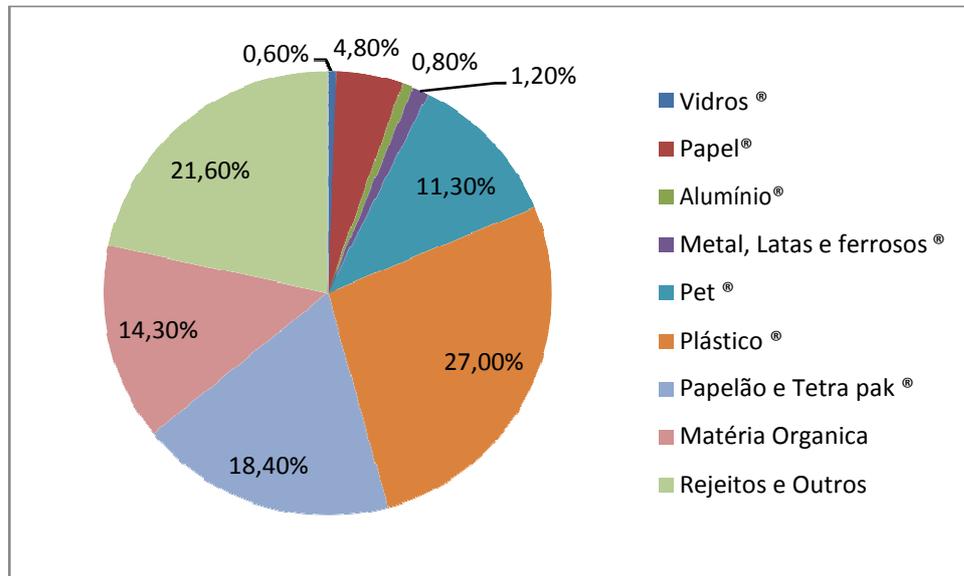
A figura 17 apresenta um gráfico da composição média (em massa), dos resíduos domiciliares para o município de Conquista – MG

Figura 17 - Composição Gravimétrica média (em massa) para o Município de Conquista - MG

Fonte: O Autor

A figura 18 é um gráfico que representa a composição gravimétrica média (em volume) para o município de Conquista – MG.

Figura 18 - Composição Gravimétrica média (em volume) para o Município de Conquista - MG



Fonte: O Autor

Podemos observar que os percentuais relativos a gravimetria média (em massa e em volume), estão em conformidade com a média nacional, o que reflete a tendência de países subdesenvolvidos em produzir resíduos de origem orgânica, resíduos esses que são o ponto chave para a produção de CDR (combustíveis derivados de resíduos), e conseqüentemente geração de energia PAVAN (2010).

– Dimensionamento do leito

Para o projeto e dimensionamento dos componentes, no qual se destacam a coluna de fluidização, a placa distribuidora e a placa de orifício, foi necessária a obtenção dos parâmetros de projetos fluidodinâmicos que serviram de base para todo o desenvolvimento do trabalho. Os parâmetros utilizados foram velocidade de mínima fluidização, altura crítica de arraste (TDH) e a velocidade terminal da partícula.

Um sistema de incineração de leito fluidizado inclui a coluna de leito fluidizado, um ventilador de gás, um aquecedor e sistemas de limpeza do gás, tais como ciclones e filtros. De forma a poupar energia, o gás é parcialmente reciclado. O gás após passar pelo leito de partículas entra na região livre e transporta consigo pequenas partículas cuja velocidade

terminal é menor que a velocidade de operação do gás. Este fenômeno é denominado de elutriação. A altura necessária para que não ocorra arraste de partículas é conhecida como THD ou zona de desagregação e pode ser estimada mediante o uso de correlações empíricas. No entanto como não há uma expressão universalmente aceita para o cálculo do TDH, o melhor é poder determinar esta altura experimentalmente GONCALVES (2011).

Ciclone

A existência do TDH permite garantir que não existirá arraste de partículas, no entanto, é sempre necessário a colocação de um ciclone à saída do secador para precaver que quaisquer partículas sólidas que tenham sido arrastadas pelo gás de secagem não danifiquem o ventilador. A figura 19 esquematiza o ciclone utilizado neste sistema de secagem.

Figura 19 - Esquema de um ciclone



Fonte: BRANCO, 2011.

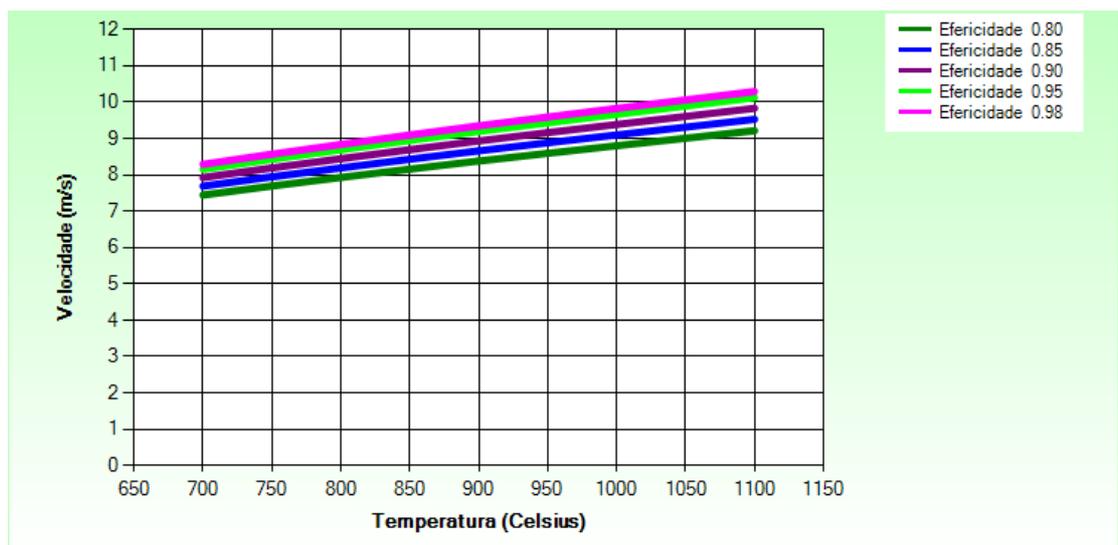
Procedeu-se a análise dos parâmetros que influenciam na qualidade da incineração, como por exemplo, a queda de pressão e a velocidade mínima de fluidização em função da esfericidade e do diâmetro da partícula, também foram analisadas a velocidade terminal em função do diâmetro da partícula.

6. Resultados e Discussões

O capítulo que se segue está relacionado com a apresentação de resultados e a respectiva discussão. Numa primeira fase, serão abordados os resultados relacionados às características do CDR (Combustíveis Derivados de Resíduos) que influenciam no dimensionamento do leito. Em um segundo momento serão apresentados, dimensionamentos do leito, baseados na quantidade de resíduo bem como em parâmetros fundamentais para projeto de incinerador de leito fluidizado, como por exemplo, velocidade mínima de fluidização e a velocidade terminal da partícula. Ressalta-se que para estas análises e dimensionamento foi utilizado o software MOSLEF¹ desenvolvido pelo próprio autor.

A velocidade mínima de fluidização que representa o valor mínimo que a velocidade de operação deve ter e a velocidade terminal que representa o valor máximo que se pode utilizar. Assim a velocidade de operação deve estar compreendida entre estas velocidades. Pode-se observar na figura 20, que a esfericidade da partícula, bem como a temperatura de operação influenciam na velocidade mínima de fluidização. A influência da temperatura está relacionada à mudança na viscosidade do fluido (gás), já a esfericidade influencia, pois quanto maior a esfericidade menor a fração de vazios, e, portanto maior a velocidade do gás necessária para iniciar o processo de fluidização.

Figura 20 - Velocidade mínima de fluidização em função da esfericidade

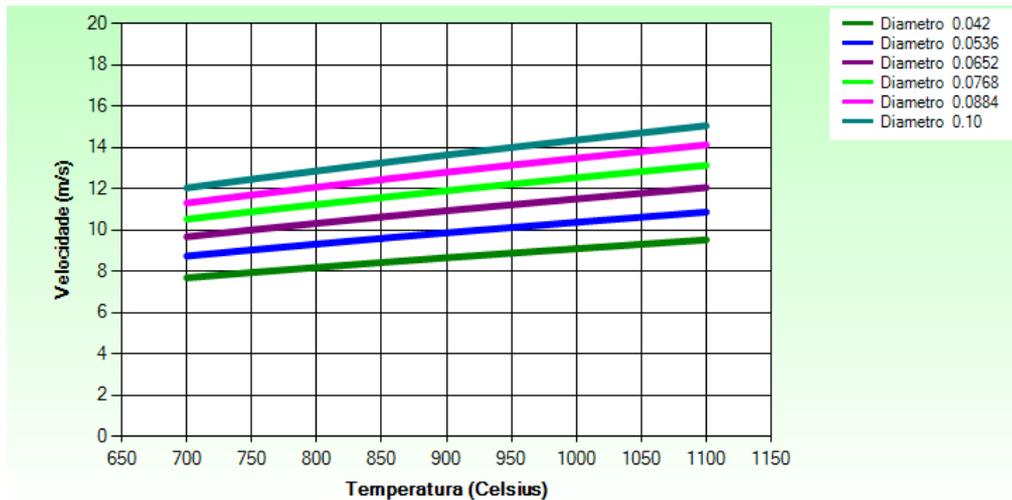


Fonte: O Autor

¹ MOSLEF – Sistema para Modelagem e simulação em Leito Fluidizado. Sistema desenvolvido no sistema em linguagem C#.

Observa-se na figura 21 que o diâmetro da partícula influencia na velocidade, no entanto quando se analisa sua influência na velocidade mínima de fluidização, percebe-se que esta influência é significativa. O aumento do diâmetro varia a densidade da partícula o que traz como consequência, a necessidade de uma velocidade maior para fluidizar.

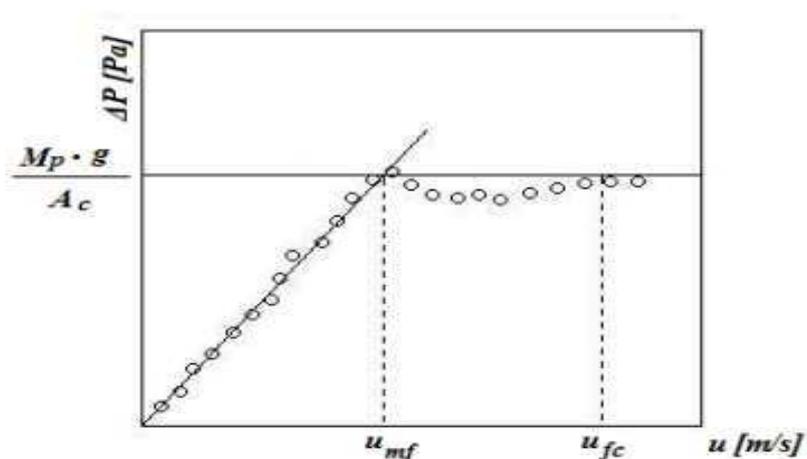
Figura 21- Velocidade mínima de fluidização em função do diâmetro da partícula



Fonte: O Autor

O formato das curvas características de fluidização figura 22 fornece boas informações sobre a natureza e as características do leito fluidizado. Por essa razão, o conhecimento das medidas de queda de pressão através do leito é muito útil para os projetos de caldeiras de leito fluidizado, principalmente para o start-up da caldeira SILVA (2011).

Figura 22 - Perda de carga no leito na transição de leito fixo para leito fluidizado

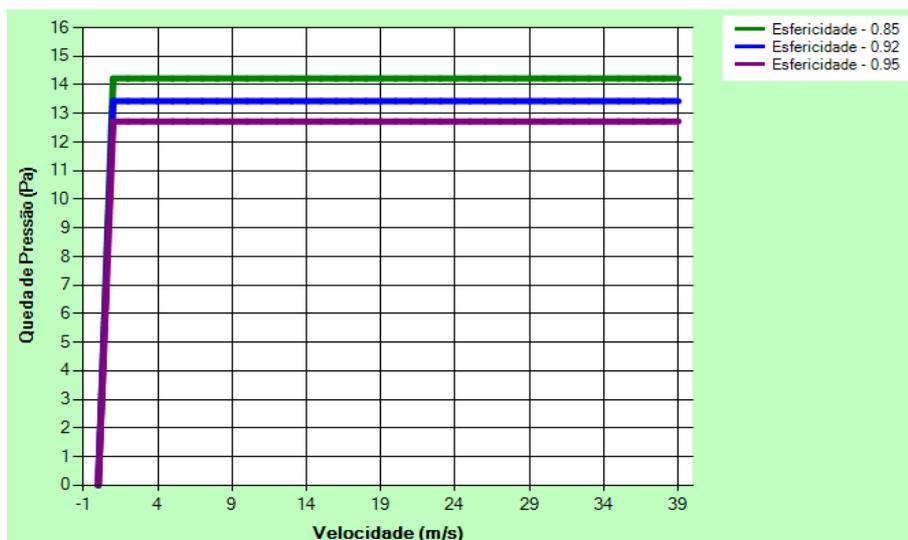


Fonte: (SILVA,2011)

Alguns fatores influenciam na queda de pressão, por exemplo, na figura 23 podemos observar que uma alteração na esfericidade do material sólido presente no leito influencia na queda de pressão.

Para projeto de leito fluidizado como já e amplamente difundido, é recomendado que se utilize materiais com esfericidade mais próximos de um, pois quanto maior o grau de esfericidade menor é a queda de pressão.

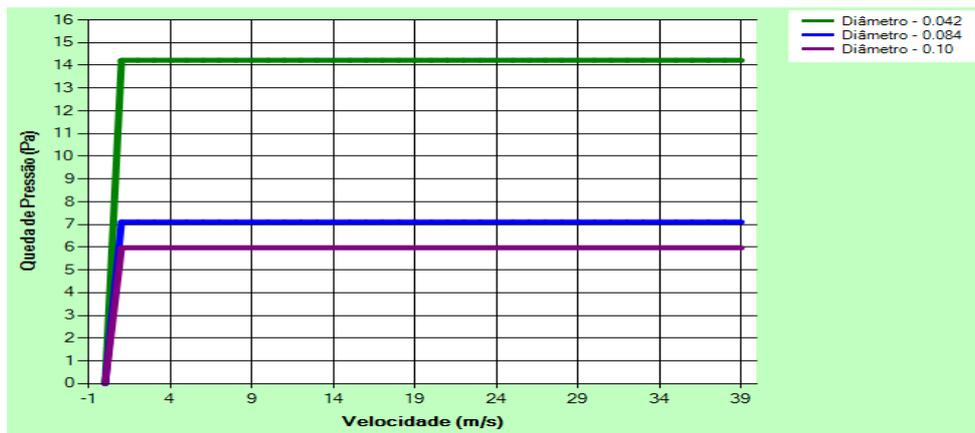
Figura 23 - Queda de pressão em função da velocidade com esfericidades diferentes



Fonte: O Autor

Outro fator relacionado ao material presente no leito que influencia na queda de pressão em função da velocidade é o diâmetro da partícula, observa-se que para este trabalho que se utiliza de CDR (Combustíveis Derivados de Resíduos), cujos diâmetros de 85% estão compreendidos em 0,042 cm e 0,1 cm, o que gera uma variação de pressão em torno de 8 Pa, conforme figura 24 MACHADO (2015).

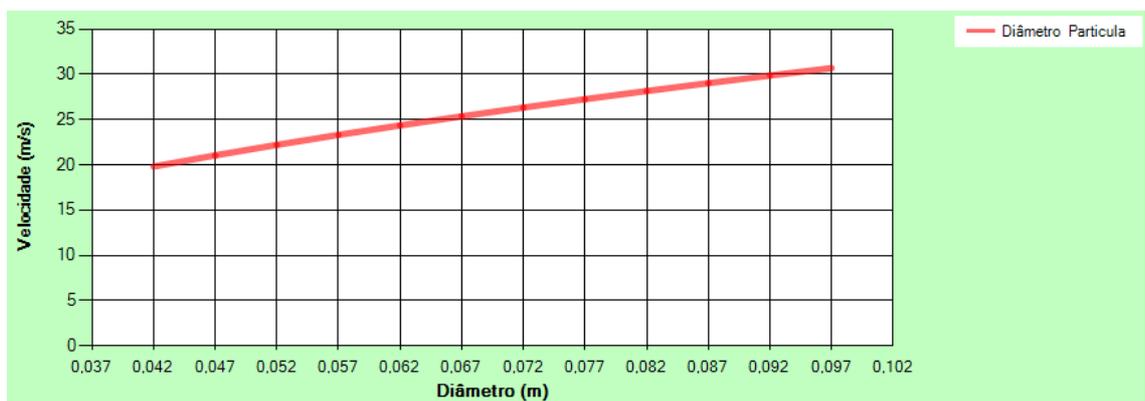
Figura 24 - Queda de pressão em função da velocidade com diâmetros diferentes



Fonte: O Autor

A velocidade terminal ou máxima de fluidização (U_t) corresponde à velocidade do gás onde as partículas começam a ser arrastadas. Isso acontece quando a força de arraste do gás se iguala ao peso das partículas que se encontram suspensas pelo fluido, este é um fator importante no projeto de leito fluidizado, este fator é influenciado pelo diâmetro da partícula, a figura 25, ilustra esse processo, para o projeto de interesse desse trabalho, velocidade terminal varia entre 20 e 30 m/s.

Figura 25 - Velocidade terminal em função do diâmetro



Fonte: O Autor

A partir do cálculo da velocidade de mínima fluidização, altura crítica de arraste e velocidade terminal, foi possível realizar o projeto dos componentes do sistema de leito fluidizado gás-sólido. A seguir são apresentados os resultados do projeto da coluna de fluidização, da placa distribuidora e da placa de orifício.

Para o dimensionamento do leito foi necessário informar os seguintes parâmetros para o sistema MOSLEF: quantidade de resíduos sólidos urbanos produzidos por dia, a densidade do resíduo e a quantidade de bateladas, sabe-se a priori que o tempo de residência é de 30 (trinta) minutos para a primeira etapa MACHADO (2015). Na tabela 7 estão apresentados, os parâmetros para o dimensionamento tomando como referencia a cidade de Conquista – MG.

Tabela 7 - Parâmetros para o dimensionamento

PARÂMETROS DE CONQUISTA - MG	
Quantidade diária de RSU (kg)	2500
Densidade do resíduo (CDR) (kg/m ³)	300
Número de bateladas	16

Fonte: O Autor

Volume do Leito

O volume foi calculado conforme equação 6.1, onde D representa a densidade do CDR proveniente do resíduo, e M representa a massa de sólidos presentes em cada batelada.

(6.1)

$$V = \frac{M}{D}$$

Cálculo da expansão do leito

Durante a fluidização, o leito fixo irá expandir-se de forma a manter a queda de pressão constante, logo é necessário calcular o valor dessa expansão. A este valor irá ser somado o valor do TDH para se saber a altura total da coluna. O valor da velocidade do fluido é cerca de 2,5 vezes superior à velocidade mínima de fluidização, ou seja, 26,25 m/s. O valor da velocidade mínima de fluidização a 850 °C é de 10,5 m/s, a massa molecular do ar é de 28,9 kg/kmol (GONÇALVES, 2011), este valor pode ser calculado conforme equação 6.2, onde:

- H_f é a altura do leito expandido,
- H_{mf} é a altura do leito fixo,
- V_f velocidade do fluido,
- V_{mf} velocidade mínima de fluidização,
- D_p diâmetro da partícula,
- ρ_p densidade da partícula

- m_m é massa molecular do ar

(6.2)

$$\frac{H}{f} = 1 + \frac{21.4 (V_f - V_{mf})^{0.738} \rho_p^{0.376}}{D^{1.006} V_{mf} \times m_m}$$

Cálculo do diâmetro das bolhas

O cálculo do diâmetro das bolhas é necessário para se poder estimar o valor do TDH. O valor da velocidade mínima de fluidização é de 10,5 m/s, o número de orifícios por unidade de área de distribuidor é de $1,262 \times 10^3$, pode-se calcular este valor utilizando-se a equação 6.3, onde:

- g é a aceleração da gravidade,
- V_f é a velocidade do fluido,
- V_{mf} é a velocidade mínima de fluidização
- H_{mf} é a altura do leito fixo,
- N_{or} é o número de orifícios na placa de distribuição.

(6.3)

$$D_{Br} = \frac{0.54}{g^2} (V_f - V_{mf})^{0.4} (H_{mf} + 4N_{or}^{-0.5})^{0.8}$$

Cálculo do TDH

O valor do TDH permite determinar a altura necessária que deve ser adicionada à expansão do leito para se ter a altura total da coluna. Este valor é necessário para no caso de ocorrer arrastamento de partículas estas não sejam projetadas para fora da coluna. O valor do diâmetro superficial das bolhas foi calculado anteriormente, esse valor pode ser obtido através da equação 6.4, onde:

- D_{bv} é o diâmetro superficial das bolhas

(6.4)

$$TDH = 4.47 D_{bv}^{0.5}$$

Cálculo da altura da coluna

Tal como foi dito anteriormente, o valor da altura da coluna é resultado da soma do altura do leito expandido e do valor do TDH, conforme equação 6.5, onde:

- H_f é a altura do leito expandido,
- TDH é a altura da zona de desagregação

(6.5)

$$H = H_f + TDH$$

Cálculo da altura mínima de “slugging”

O cálculo da altura mínima de “slugging” é necessário pois deve ser certificado que não ocorrerá “slugging” durante a fluidização. Esta característica depende do diâmetro da coluna anteriormente calculado, conforme equação 6.6, onde:

- D é o diâmetro da coluna.

(6.6)

$$H_{msl} = 1.34 D^{0.175}$$

Cálculo da velocidade mínima de “slugging”

O cálculo da velocidade mínima de “slugging” é necessário pois deve ser certificado que não ocorrerá “slugging” durante a fluidização. Esta característica depende do diâmetro da coluna e da velocidade mínima de fluidização já calculadas, conforme equação 6.7, onde:

- V_{mf} é a velocidade mínima de fluidização,
- g é a gravidade,
- D é o diâmetro da coluna

(6.7)

$$V_{msl} = V_{mf} + 0.07 \sqrt{gD}$$

Cálculo da queda de pressão ao longo da coluna

O cálculo da queda de pressão não só permite saber o valor da perda de carga ao longo do leito, mas também é necessário para o dimensionamento do distribuidor, conforme equação 6.8, onde:

- H_{mf} é a altura do leito fixo,
- v_{mf} é a porosidade na mínima fluidização
- ρ_p é a densidade da partícula
- ρ_g é a densidade do gás
- g é a aceleração da gravidade

(6.8)

$$\frac{\Delta_{pb}}{H_{mf}} = (1 - v_{mf})(\rho_s - \rho_g)g$$

Cálculo da queda de pressão no distribuidor

Com o conhecimento da queda de distribuição na coluna, o valor da queda de pressão no distribuidor é cerca de 30% da primeira, conforme equação 6.9, onde:

- Δ_{pb} é a queda de pressão ao longo da coluna.

(6.9)

$$\Delta_{pd} = 0,3 \Delta_{pb}$$

Cálculo do Número de Reynolds

O cálculo do número de Reynolds permite estimar o valor do coeficiente de orifício, necessário no cálculo da velocidade do fluido no orifício, a equação 6.10 é utilizada para este cálculo, sendo:

- D é o diâmetro da coluna
- V_f é a velocidade do fluido
- ρ_f é a densidade do fluido
- μ_f é a viscosidade do fluido

(6.10)

$$Re = \frac{D \times V_f \times \rho_f}{\mu_f}$$

Cálculo da velocidade do fluido no orifício

O valor da velocidade do fluido no orifício depende do coeficiente de orifício (0,6) (ver quadro 5) estimado mediante o valor do número de Reynolds e permitirá saber o valor da distribuição dos orifícios, na equação 6.11 é possível determinar essas velocidade, considerando-se que:

- $C_{d,or}$ é o coeficiente de orifícios
- Δ_{pd} é a queda de pressão no distribuidor
- ρ_f é densidade do fluido

Quadro 5 - Coeficiente de orifícios

Re	100	300	500	1000	2000	>3000
$C_{d, or}$	0,68	0,70	0,68	0,64	0,61	0,60

Fonte: GONCALVES, 2011. Adaptado pelo autor

(6.11)

$$V_{or} = C_{d,or} \left(\frac{2\Delta_{or}}{\rho_f} \right)^{0.5}$$

Cálculo do número de orifícios

Com a velocidade do fluido no orifício já calculada (V_{or}), mais o diâmetro do orifício (3 mm) e a velocidade do fluido na fluidização (V_f), calcula-se o número de orifícios por unidade de área de distribuidor e multiplicando-se pela área da seção reta do distribuidor (A) tem-se o número de orifícios da placa, conforme equação 6.12.

(6.12)

$$V_f = \left(\frac{n}{4} d_{or} V_{or} N_{or} \right) A$$

Dimensões do leito para a situação específica de Conquista – MG

Tomando como base os parâmetros do município de Conquista – MG, constantes na tabela 7, chega-se através do sistema MOSLIF aos seguintes resultados, que podem ser visualizados através da figura 26.

Figura 26 - Dimensionamento do leito

Quantidade diária de RSU (Kg): 2500

Densidade do RSU (Kg/m³): 300

Número de Bateladas: 16

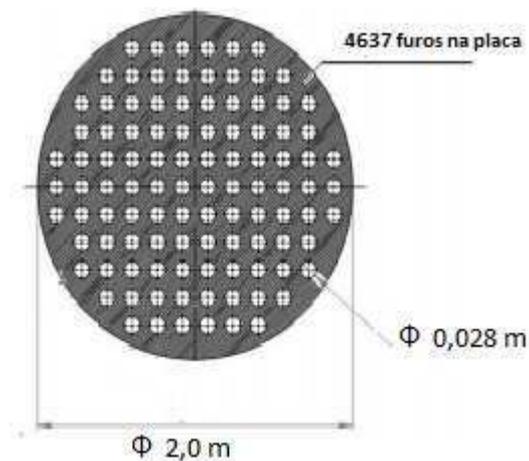
Informações do Leito

Altura do Leito Fixo: 0,332 m	Altura mínima de "slugging": 1,513 m
Diâmetro da Coluna do Leito: 2,000 m	Velocidade mínima de "slugging": 10,810 m/s
Expansão do Leito: 1,028 m	Queda de pressão ao longo da coluna: 194,641 Pa
Diâmetro das Bolhas: 0,434 m	Queda de pressão no distribuidor: 58,392 Pa
(TDH): 2,944 m	Número de Reynolds: 77091,942
Altura Coluna: 3,275 m	Velocidade do Fluido no orifício: 9,193 m/s
	Número de orifícios: 4637 orifícios

Fonte: O autor

A placa de orifício, um dos componentes principais do processo de fluidização, pode ter seu dimensionamento conforme figura 27, sendo para o projeto em questão, o diâmetro da placa igual a 2m e o diâmetro de cada orifício igual 0,028 m.

Figura 27 - Placa de orifício



Fonte: O autor

7. Conclusão

Esta dissertação começou pela análise de alguns parâmetros que determinam características de operação do incinerador, bem como de alguns aspectos que influenciam na sua variação, entre eles: a velocidade terminal, queda de pressão em função da velocidade, velocidade mínima de fluidização.

Determinou-se para a velocidade mínima de fluidização que o diâmetro da partícula e a esfericidade, influenciam de forma significativa, assim como esta também é influenciada pela temperatura.

Para a queda de pressão em função da velocidade, observou-se que a esfericidade e a porosidade influenciam de forma significativa, portanto recomenda-se para a operação partículas com esfericidade próximas de um e diâmetro compreendido entre 4,2 e 10 cm.

Em relação à velocidade terminal, verificou-se que o diâmetro da partícula, influencia de forma significativa, nesta velocidade tendo sendo que esta varia entre 20 e 30 m/s, pois 85% do diâmetro do CDR varia em 4,2 e 10 cm.

Sabendo que se poderia trabalhar com temperaturas de operação (850°C e 1000°C), foi estudado qual o impacto que esta alteração de temperatura iria ter nos valores das velocidades. Pode-se então concluir que o aumento da temperatura pouco afeta o valor da velocidade, deste modo, a escolha da temperatura de operação apenas afeta a incineração.

A altura total da coluna está representada pela expansão do leito mais a altura necessária para que no caso de ocorrer arrastamento de partículas, estas não saiam da coluna (TDH: 3,3 m). Tal como no caso das velocidades, estes parâmetros são afetados pela temperatura.

A placa de distribuição foi projetada levando em consideração, as formulações constantes do capítulo de resultados, chegando-se desta forma a parâmetros que serão utilizados posteriormente para a construção do equipamento.

8. Referências Bibliográficas

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. Disponível em <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2013.pdf>> acessado em 15/05/2014.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 10004. Resíduos sólidos classificação. Rio de Janeiro, 2004.

BANDEIRA, Carla Alexandra Loureiro. **Avaliação da Estabilidade Biológica de Combustível Derivado de Resíduo.** Disponível em <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142130378/Avalia%C3%A7%C3%A3o%20da%20Estabilidade%20Biol%C3%B3gica%20de%20Combustivel%20Derivado%20de%20Res%C3%ADduo.pdf>> Acesso em 13/09/2014.

BRANCO, Renata. **Separadores de ciclone removem poluentes do ar.** Disponível em <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/4738-separadores-de-ciclone/>> acessado em 13/04/2014.

CARBOGAS. Sertãozinho – SP. **Gaseificadores.** Disponível em <<http://www.carbogas.com.br/produtos2.asp>> Acesso em 05/05/2015

COUTO, Sandra M.. **Determinação da força de Determinação da força de arrasto e da velocidade terminal de frutos de café pela técnica de elementos finitos.** Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v8n2-3/v8n2a17>> acesso em 03/04/2015.

FONSECA, Oscar Leonardo Cárdenas. **Estudo Preliminar da Fluidodinâmica do Escoamento Gás-Sólido de um Leito Fluidizado Circulante Através da Análise dos Sinais Dinâmicos de Pressão.** Disponível em <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?down=000468286>> Acesso em 19/06/2014.

GONCALVES. Jose E. **Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis.** Disponível em <<http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0576.pdf>> Acesso em 25/08/2014.

HENRIQUES, Rachel Martins et al. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: análise custo benefício.** Disponível em: <http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/v_en/Mesa4/10.pdf> acesso em 15/05/2014.

JORDAO, Augusto Alessandro. **Tecnologia e meio ambiente: a valorização energética de resíduos sólidos no Brasil.** Disponível em <

http://base.repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/119486/jordao_aa_tcc_arafcl.pdf?sequence=1> Acesso em 27/03/2015.

LEME, Marcio Montagnana Vicente. **Avaliação das Opções Tecnológicas para geração de energia através dos Resíduos Sólidos Urbanos: estudo de Caso.** Disponível em < <http://saturno.unifei.edu.br/bim/0037110.pdf>> acessado em 15/05/2015.

LIMA, Ana Karina Castro. **Aproveitamento energético do biogás a partir de resíduos sólidos.** Disponível em: < http://web-resol.org/textos/incineracao_de_residuos_solidos_urbanos,.pdf > acesso em 12/04/2014.

MACHADO, Camila Frankenfeld. **Incineração: uma análise do tratamento térmico dos resíduos sólidos urbanos de Bauru/SP.** Disponível em < <http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10013010.pdf>> acessado em 27/03/2015.

MELO, Braulio Almeida de. **Avaliação Computacional de um Sistema de Gaseificação em leito Fluidizado utilizando o software CSFB.** Disponível em < <http://saturno.unifei.edu.br/bim/0033007.pdf>> Acesso em 19/11/2014.

PAVAN, Margareth de Cássia Oliveira. **Geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos: avaliação e diretrizes para tecnologias potencialmente aplicáveis no Brasil.** Disponível em: < www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/.../TeseDefMargPavan.pdf> acesso em 08/04/2014.

PEDROSO, Fabiano Anderson. **Estudo numérico do escalonamento de um leito fluidizado circulante utilizando o conjunto simplificado das leis de escala de Glicksman.** Disponível em < <http://biblioteca.asav.org.br/vinculos/000007/00000727.pdf>> Acesso em 17/05/2014.

RIBEIRO, Sergio Guerreiro. **Geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos - usinas “WASTE-TO-ENERGY” (WTE).** Disponível em: < http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/publicacoes/usinas_lixo_energia_no_brasill.pdf> acesso em 12/04/2014.

SILVA, Juliana Biscaia da. **Hidrodinâmica da fluidização de biomassa e inertes em leito fluidizado.** Disponível em: < <http://dspace.c3sl.ufpr.br:8080/dspace/bitstream/handle/1884/27646/R%20-%20D%20-%20SILVA,%20JULIANA%20BISCAIA%20DA.pdf?sequence=1>> acesso em 03/04/2015.

SOUZA, Mayara Ferrari de. **Tratamento de resíduos sólidos urbanos com recuperação energética por meio da tecnologia de plasma – Estudo de caso para a região de Taubaté - SP.** Disponível em: < <http://200.144.182.130/iee/sites/default/files/Mayra%20Ferrari%20de%20Souza.pdf>> acesso em 02/04/2015.

SOARES, Erika Leite de Souza Ferreira. **Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos.** Disponível em <
http://www.getres.ufrj.br/pdf/SOARES_ELSF_EJP_11_T_M_.pdf> acesso em 22/06/2014.

TANNOUS, Katia. **Tecnologia de Fluidização.** Disponível em <
<http://www.fluidizacao.com.br/pt/home.php?pgi=apresentacao.php&lg=pt>> Acesso
12/02/2014.