



APLICAÇÕES DO MÉTODO “RESPIROMÉTRICO” COMO FERRAMENTA PARA O ACOMPANHAMENTO “ON-LINE” NOS PROCESSOS DE COMPOSTAGEM

Applications of the “respirometric” method as a tool for on-line control of
composting processes

Edvaldo J Scoton^{*,1}, Rosane AG Battistelle^{*,2}, Adilson Renóbio^{*,3}, Jorge Akutsu^{+,4},
João EM Perea Martins^{#,5}, Gilberto S Castilho Filho^{*,6}

^{*} Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Campus de Bauru, Brasil

[#] Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Campus de Bauru, Brasil

⁺ Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil

Email: ¹ scoton@hotmail.com, ² rosane@feb.unesp.br, ³ renofio@feb.unesp.br,
⁴ akutsu@ufscar.br, ⁵ perea@fc.unesp.br, ⁶ gilfi@uol.com.br

Palavras-chave: Resíduos sólidos, análise gasosa, lodo de esgoto

Keywords: Solid waste, gas analysis, sewage sludge

Título abreviado: método respirométrico e compostagem

ABSTRACT

The environmental crisis in our contemporary, globalized world, is facing a paradigm: the company now has a major technological development, and is also a society that destroys most in history. All the achievements of our civilization provide various negative factors, such as fast-paced population growth, depletion of natural resources, expansion of consumption of materials and production systems that use polluting production processes and waste, which if not treated and/or properly designed produce imbalances in the biosphere, changing vital ecosystems. In seeking

solutions to the disposal of waste organic solids, we find that the composting process can be considered one of the most appropriate alternatives in the environmental point of view, promoting greater recycling and more appropriate in terms of material and energy when compared with other methods. This search of the society for better environmental conditions, points to a tendency to experience a substantial increase in the amount of sludge to be disposed of in the coming years, it appears, therefore, need to be presented techniques that allow an efficient and adequate treatment of them. The use of the composting process in Brazil is still very limited, the high degree of empiricism used in the control and evaluation process for lack of more in-depth technical knowledge, not giving rise to the implementation of new forms of analysis and effective control. In the evaluation process called the method "respirometric", uses a new methodology in which the parameters of biological degradation of waste is not measured in the solid phase, but in the gas phase. The analysis in the gas phase has the advantage of greater representativeness, precision and reliability, to be totally homogeneous. The parameters measured in the gas phase of the composting process of sewage sludge, determine the temporal evolution of O₂ consumption and CO₂ and their generation, these gases are analyzed, recorded, the data are sent to a computer that displays the results instantly.

RESUMO

A crise ambiental no nosso mundo contemporâneo globalizado, enfrenta um paradigma: a sociedade que agora tem seu maior desenvolvimento tecnológico, e é também uma sociedade que mais destrói na história. Todas as conquistas da nossa civilização propiciam diferentes fatores negativos: como o crescimento demográfico em ritmo acelerado, o esgotamento dos recursos naturais, expansão do consumo de materiais e sistemas de produção que utilizam processos de produção poluentes e geradores de resíduos, que se não tratados e/ou destinados adequadamente produzirão desequilíbrios na biosfera, alterando os ecossistemas. Na procura de soluções para a destinação dos resíduos sólidos orgânicos, encontramos o processo de compostagem que pode ser considerado uma das alternativas mais adequadas sob o ponto de vista ambiental, promovendo uma maior e mais apropriada reciclagem, em termos de material e de energia, quando comparadas com outros métodos. Esta busca da sociedade por melhores condições ambientais, aponta para uma tendência

de ocorrer um incremento substancial na quantidade de lodo a ser disposto nos próximos anos, surgindo, portanto, a necessidade que sejam apresentadas técnicas que possibilitem um tratamento eficiente e adequado dos mesmos. O emprego do processo de compostagem no Brasil, é ainda bastante restrito, pelo alto grau de empirismo utilizado no controle e avaliação do processo, por falta de conhecimento técnico mais aprofundado, não dando origem ao implemento de novas formas de análise e controle eficazes. No processo avaliativo chamado método "respirométrico", utiliza-se uma nova metodologia na qual os parâmetros de degradação biológica dos resíduos não são medidos na fase sólida, mas em sua fase gasosa. A análise realizada na fase gasosa tem como vantagens uma maior representatividade, precisão e confiabilidade, por ser totalmente homogênea. Os parâmetros medidos na fase gasosa do processo de compostagem do lodo de esgoto, determinam a evolução temporal de consumo de O_2 e sua geração de CO_2 e, estes gases são analisados, registrados, os dados obtidos são enviados para um computador que apresenta os resultados instantaneamente.

INTRODUÇÃO

Os efeitos negativos dos resíduos sólidos orgânicos sobre o meio ambiente surgiram desde quando os homens abandonaram a vida nômade e adotaram o estilo de vida sedentário. Com a industrialização, o mundo vivenciou um intenso processo da urbanização que repercutiu em um aumento significativo das populações urbanas colaborando para o desenvolvimento de vários problemas, dentre eles o aumento da geração de resíduos e a necessidade de destiná-los corretamente.

Segundo Fadini (2001) a primeira ação tomada pelos governos, logo após a Revolução Industrial, foi a de tratar o lixo como um problema que devesse ser escondido da sociedade, passando a depositá-lo em locais distantes. Esses locais, no entanto, foram rapidamente alcançados e até mesmo incorporados em decorrência da explosão urbana, um reflexo do próprio desenvolvimento industrial, sendo notório o despreparo das cidades em acompanhá-lo. Os resultados dessas ações foram claros e imediatos, além de resultarem em uma aproximação da sociedade e aumentarem os problemas com saneamento básico e riscos de contaminação, os locais de disposição tornaram-se cada vez mais escassos.

A aprovação da Lei nº 12305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), após longos vinte e um anos de discussões no Congresso Nacional marca o início de uma articulação institucional envolvendo os três entes federados – União, Estados e Municípios, o setor produtivo e a sociedade civil na busca de soluções para os graves problemas causados pelos resíduos, que vem comprometendo a qualidade de vida dos brasileiros.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece princípios, objetivos, diretrizes, metas e ações, e importantes instrumentos, tais como este Plano Nacional de Resíduos Sólidos, que está em processo de construção e contemplará os diversos tipos de resíduos gerados, alternativas de gestão e gerenciamento passíveis de implementação, bem como metas para diferentes cenários, programas, projetos e ações correspondentes.

O Art. 36. da Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelece que:

“no âmbito da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, cabe ao titular dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, observado, se houver, o plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos:

I - adotar procedimentos para reaproveitar os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis oriundos dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos;

II - estabelecer sistema de coleta seletiva;

III - articular com os agentes econômicos e sociais medidas para viabilizar o retorno ao ciclo produtivo dos resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis oriundos dos serviços de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos;

IV - realizar as atividades definidas por acordo setorial ou termo de compromisso na forma do § 7º do art. 33, mediante a devida remuneração pelo setor empresarial;

V - implantar sistema de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articular com os agentes econômicos e sociais formas de utilização do composto produzido;

VI - dar disposição final ambientalmente adequada aos resíduos e rejeitos oriundos dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos. “

Na busca de soluções para a destinação dos resíduos sólidos orgânicos, encontramos o processo de compostagem, que pode ser considerado uma das alternativas mais adequadas sob o ponto de vista ambiental para sua destinação, promovendo uma maior e mais apropriada reciclagem, em termos de material e de energia, quando comparadas com outros métodos.

Na procura de soluções para a destinação dos resíduos sólidos orgânicos, encontramos o processo de compostagem que pode ser considerado uma das

alternativas mais adequadas sob o ponto de vista ambiental, promovendo uma maior e mais apropriada reciclagem, em termos de material e de energia, quando comparadas com outros métodos.

A compostagem é um processo biológico em que os microrganismos transformam a matéria orgânica, num material semelhante ao solo, a que se chama composto, e que pode ser utilizado como adubo, mas que pode ocorrer através de um conjunto de técnicas aplicadas para controlar a essa decomposição de materiais orgânicos, com a finalidade de obter, no menor tempo possível, um material estável, rico em húmus e nutrientes minerais (Kiehl, 2008).

No entanto, o emprego do processo de compostagem no Brasil, é ainda bastante restrito, quando comparado ao método do aterro sanitário, principalmente pelo fato de exigir maior investimento inicial, apresentar maior dificuldade operacional e custo unitário de tratamento bem superior ao referido método, além do fato de ocorrerem experiências negativas no passado, pelo alto grau de empirismo utilizado no controle e avaliação do processo, por falta de conhecimento técnico mais aprofundado.

Existem várias tentativas para reproduzir, em escala laboratorial o processo de compostagem, no entanto, a reprodução em escala de laboratório não é tarefa muito simples, deve tomar em consideração várias condições e considerações (Petiot *et al.*, 2004).

Segundo Akutsu *et al.* (2009), a utilização de uma técnica que não disponha de critérios, parâmetros e índices consolidados, no que se refere à avaliação de sua performance e controle operacional, apresenta incertezas e falta de confiabilidade, contribuindo para que não exista avanço de sua aplicação, principalmente em larga escala.

Este trabalho aborda um projeto experimental realizado na Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Campus Bauru desde 2009, através de uma nova metodologia para avaliação, acompanhamento e controle operacional do processo de compostagem, denominado “método respirométrico”, onde a abordagem em que os parâmetros de degradação biológica dos resíduos não são mensurados na fase sólida, e sim na fase gasosa. Através das análises realizadas no meio gasoso pode-se encontrar inúmeras vantagens, tais como maior precisão, representatividade e confiabilidade por constituir um meio homogêneo, além de permitir que as mesmas sejam realizadas em tempo real e de forma contínua, o que é fundamental para o acompanhamento operacional “on line” do processo (Akutsu *et al.*, 2009).

A presente pesquisa acompanhou e analisou, através do método “respirométrico”, o processo de co-compostagem de lodo de esgoto com podas de grama, na busca de aumentar o aproveitamento e melhoria da qualidade dos produtos gerados, além da redução do tempo de processamento, contribuindo com a literatura existente sobre o assunto e possibilitando a divulgação e disseminação dos resultados obtidos.

REVISÃO DE LITERATURA

Na revisão da literatura são abordados os temas de interesse da presente pesquisa, principalmente no que se refere à destinação correta dos resíduos sólidos urbanos, e especificamente do lodo de esgoto.

Resíduos sólidos

Segundo Albuquerque *et al.* (2007), na formação e o desenvolvimento das cidades, e mais ainda com a Revolução Industrial quando uma importante parcela da população rural dirigiu-se em massa para as cidades, originando um importante crescimento urbano e, por outro lado, quando teve início o uso intensivo dos recursos do planeta, a problemática da gestão dos resíduos agravou-se e o seu mau domínio começou a dar origem aos primeiros problemas ambientais graves.

A preocupação com a destinação dos resíduos sólidos tem alcançado patamares cada vez maiores em todos os setores da sociedade. Esta preocupação aumentou devido à crescente produção de lixo nos grandes centros urbanos e pela evidente negligência resultante do Poder Público, Legisladores, Administradores e, conseqüentemente, pela população mais carente que não dispõe de condições financeiras e, muito menos, uma educação ambiental.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, sancionada em 2010, reúne princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão dos resíduos sólidos. O projeto de lei, que tramitou por mais de 20 anos no Congresso Nacional até que fosse aprovada, responsabiliza as empresas pelo recolhimento de produtos descartáveis (logística reversa) e estabelece a integração de municípios na gestão dos resíduos e responsabiliza toda a sociedade pela geração de lixo.

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT (2000), a disposição de resíduos no solo sob a forma de aterros não tratados, implica em elevados riscos como, por exemplo: contaminação dos aquíferos subterrâneos, implicando em possíveis prejuízos à saúde pública, além de outros incômodos relativos a, odor, fumaça, impacto visual, desvalorização da terra.

Segundo Albuquerque *et al.* (2007), na concepção técnica o lixo, deve ser visto e analisado sob o prisma biológico, assim lixo orgânico é todo lixo que tem origem animal ou vegetal, ou seja, que recentemente fez parte de um ser vivo. Numa linguagem mais técnica e moderna, abordamos os resíduos sólidos, sendo seu componente biológico a matéria orgânica, mas da mesma forma oriundos dos seres vivos, animais e vegetais.

Mesmo na atualidade esse tipo de lixo é considerado poluente e, quando acumulado, o lixo orgânico muitas vezes pode tornar-se altamente rejeitado e mal-cheiroso, normalmente devido à decomposição destes produtos. Os fenômenos naturais de decomposição ocorrem por ação inicial de microorganismos, cujo trabalho

metabólico tem como resultante a água, gás carbônico e energia (calor). Quanto às características físicas, segundo Albuquerque *et al.* (2007), os resíduos sólidos orgânicos são classificados como molhados. Normalmente tem composição constituída por restos de comida, cascas e bagaços de frutas e verduras, ovos, legumes, alimentos estragados, etc.

A PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos, no seu Art. 13, estabelece a seguinte classificação para os resíduos sólidos:

Tabela 1. Classificação dos resíduos sólidos quanto à origem, de acordo com a PNRS (Política Nacional de Resíduos sólidos).

Table 1. Solid wastes classification taking into account their procedence, according to PNRS (Política Nacional de Resíduos sólidos = Brazilian National Policy of Solid Wastes).

I - QUANTO A ORIGEM	
CLASSIFICAÇÃO	ORIGEM
a) resíduos domiciliares:	os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
b) resíduos de limpeza urbana:	os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
c) resíduos sólidos urbanos:	os englobados nas alíneas “a” e “b”;
d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços:	os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico:	os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
f) resíduos industriais:	os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;

g) resíduos de serviços de saúde:	os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
h) resíduos da construção civil:	os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
i) resíduos agrossilvopastoris:	os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
j) resíduos de serviços de transportes:	os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
k) resíduos de mineração:	os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

Fonte: Adaptado de PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos (2012).

Tabela 2. Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade, de acordo com a PNRS (Política Nacional de Resíduos sólidos).

Table 2. Solid wastes classification taking into account dangerousness, according to PNRS (Política Nacional de Resíduos sólidos = Brazilian National Policy of Solid Wastes).

II - QUANTO A PERICULOSIDADE

CLASSIFICAÇÃO	ORIGEM
a) resíduos perigosos:	aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
b) resíduos não perigosos:	aqueles não enquadrados na alínea “a”.

Fonte: Adaptado de PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos (2012).

Panorama da disposição dos resíduos sólidos no Brasil

Com a aprovação da política, foi elaborado o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, cujo texto passou por um processo de consulta pública, e apresenta um mapa da atual disposição dos resíduos sólidos em todo território brasileiro.

A Tabela 3 mostra a composição dos resíduos mais encontrados no Brasil no ano de 2008 e sua quantidade, expressa em toneladas por dia.

Tabela 3. Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008.

Table 3. Estimated composition by weight of urban solid wastes collected in Brazil during year 2008.

RESÍDUOS	(%)	QUANTIDADE (tn/dia)
Material reciclável	31.9	58527.40
Metais	2.9	5293.50
Aço	2.3	4213.70
Alumínio	0.6	1079.90
Papel, papelão e tetrapak	13.1	23997.40
Plástico total	13.5	24847.90
Plástico filme	8.9	16399.60
Plástico rígido	4.6	8448.30
Vidro	2.4	4388.60
Matéria orgânica	51.4	94335.10
Outros	16.7	30618.90
Total	100.0	183481.50

Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, a partir de IBGE (2010b) e artigos diversos (2012).

Através desta tabela traça-se a Figura 1, para uma análise mais clara dos percentuais de cada resíduo encontrado. Observa-se que a matéria orgânica, corresponde a 51.4%, ou seja mais da metade de todo resíduo sólido coletado.

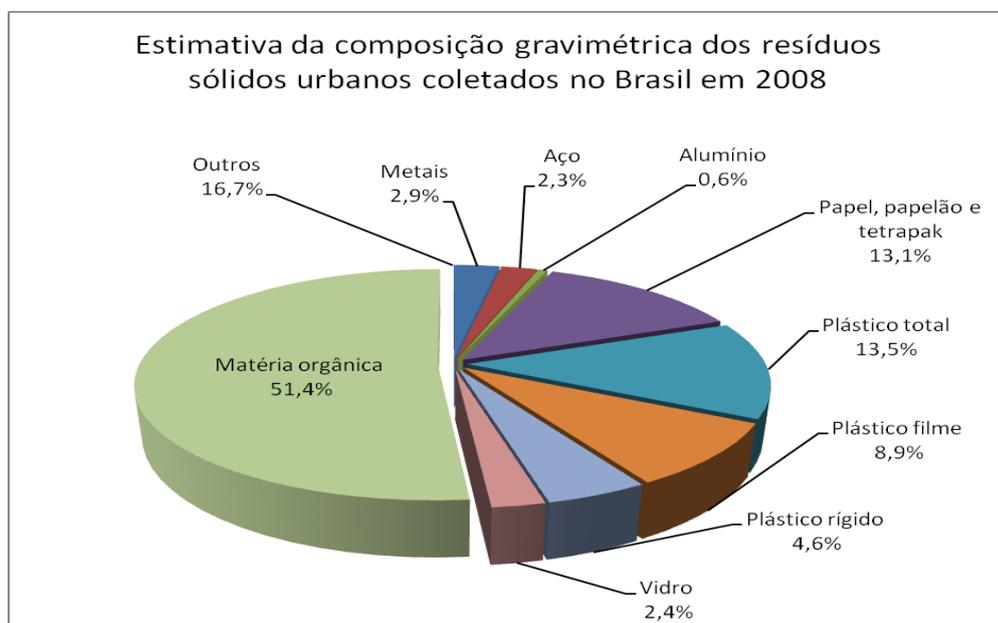


Figura 1. Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2008. Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, a partir de IBGE (2010b) e artigos diversos (2012).

Figure 1. Estimated composition by weight of urban solid wastes collected in Brazil during year 2008. Source: Adapted from National Plan of Solid Wastes, IBGE (2010b) and other articles (2012).

Tabela 4. Estimativa da quantidade de resíduos sólidos domiciliares e/ou públicos coletados no Brasil em 2000 e 2008.

Table 4. Estimated quantities of home solid wastes and/or public collected in Brazil in years 2000 and 2008.

Unidade de análise	Quantidade de resíduos coletados (tn/dia)		Quantidade de resíduos por habitante urbano (kg/hab.dia)	
	2000	2008	2000	2008
Brasil	149094.30	183481.50	1.1	1.1
Norte	10991.40	14637.30	1.2	1.3
Nordeste	37507.40	47203.80	1.1	1.2
Sudeste	74094.00	68179.10	1.1	0.9
Sul	18006.20	37342.10	0.9	1.6
Centro-Oeste	8495.30	16119.20	0.8	1.3

Fonte: Adaptado do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, a partir de IBGE (2010b) e artigos diversos (2012).

Tanto em 2000 quanto em 2008 observa-se que, mais de 90%, em massa, dos resíduos são destinados para a disposição final em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, sendo os 10% restantes distribuídos entre unidades de compostagem, unidades de triagem e reciclagem, unidades de incineração, vazadouros em áreas alagadas e outros destinos.

Reciclagem

A reciclagem é um processo que vem ganhando espaço considerável e cuja função prioritária é promover a recuperação de materiais tidos como resíduo sólido, transformando-os em matérias primas a serem utilizados em processos de reprocessamento.

O ciclo descarte, recuperação e processamento secundário ou reprocessamento de material reciclável, também denominado “reciclagem”. Para Calderoni (*apud* Baptista, 2001), este termo pode ser estendido como um processo através do qual qualquer produto ou material, que tenha servido para os propósitos originais a qual foi concebido, pode ser considerado como uma matéria prima secundária para a produção de novos produtos e, portanto passível de ser separado do lixo e reintroduzido num novo processo produtivo igual ou semelhante ao anterior.

Em relação ao nível de reciclagem, Fialho (*apud* Baptista, 2001), considera que apenas aspectos meramente econômicos conduzem a soluções que não são ótimas do ponto de vista ambiental. Segundo o autor, o mercado sozinho não conseguirá fazer

com que a reciclagem se transforme num instrumento ambiental de gerenciamento de resíduos sólidos. É necessária uma disciplina de todo o processo e isto passa pelo auxílio do poder legislativo brasileiro.

Compostagem

A compostagem não é uma prática recente. Um dos primeiros registros da aplicação desta técnica na agricultura data do período do Império de Akkad, na Mesopotâmia, há cerca de 4500 anos atrás. Desde então várias civilizações, incluindo chineses, egípcios, gregos e romanos, amontoavam em pilhas a matéria vegetal, estrume, restos de comida e outros tipos de resíduos orgânicos e, deixavam-nos a decompor e a estabilizar até estarem prontos para serem devolvidos ao solo. No entanto, após a II Guerra Mundial, a crescente utilização de fertilizantes químicos aumentou e os métodos tradicionais de fertilização caíram em desuso (Almeida *et al. apud* Santos, 2007).

A definição de compostagem, não é universal sendo definida como a decomposição aeróbia de materiais orgânicos, tais como o estrume, folhas, papel e restos de comida, promovida por microrganismos e que decorre em condições controladas convertendo a matéria orgânica num produto estável semelhante ao húmus. Queda (*apud* Santos, 2007) define compostagem como um processo controlado de bioxidação de substratos heterogêneos biodegradáveis, resultante da ação dos microrganismos (bactérias, actinomicetas e fungos) naturalmente associados aos substratos, durante o qual ocorre uma fase termófila, a libertação temporária de substâncias com efeito

fitotóxico e as biomassas sofrem profundas transformações (mineralização e humificação parciais), sendo o principal produto final, designado composto, o qual deve ser homogéneo, resultante da bioxidação de substratos heterogéneos biodegradáveis, suficientemente estável para ser armazenado, higienizado e cuja aplicação ao solo não tenha efeitos adversos para o ambiente.

Os principais fatores que influenciam o processo de compostagem são os que afetam, direta ou indiretamente o metabolismo dos microrganismos que são responsáveis pela decomposição dos resíduos e sua transformação num produto estável e rico em substâncias húmicas — o composto (Santos, 2007).

Em relação ao substrato, os fatores que influenciam o processo de compostagem são: natureza do substrato, conforme seja de origem agrícola, florestal, urbana, industrial; tamanho das partículas, o tamanho ideal é de 1 a 5 cm, uma vez que, quanto menor o tamanho, maior facilidade para o ataque microbiano e maior velocidade de transformação; composição dos materiais, a quantidade de nutrientes pode ser um factor que limita o crescimento e o desenvolvimento dos microrganismos que intervêm no processo de compostagem (Santos, 2007).

Em relação ao processo de compostagem os fatores importantes são: a temperatura, a qual varia em função da atividade microbiana; pH, o valor ótimo está compreendido entre 5 e 8; o arejamento: um excesso de ventilação pode provocar o arrefecimento da biomassa e retardar o processo de compostagem; o teor de umidade: durante a fase de decomposição, na qual a atividade bacteriana é predominante, as biomassas a

compostar deverão ter teores de umidade compreendidos entre 45 e 65 %. Para teores de umidade inferiores a 40%, a atividade microbiana decresce, e para valores superiores a 65% a água expelle o ar da maior parte dos interstícios existentes entre as partículas da biomassa, o que dificulta a difusão do oxigênio e pode originar condições de microaerofília ou mesmo de anaerobiose (Santos, 2007).

Aplicações do método respirométrico na avaliação do processo de compostagem

O método respirométrico ou simplesmente respirometria é um procedimento em que as medições da velocidade ou taxa de consumo de oxigênio, ou a taxa de geração de sub-produtos gasosos decorrentes da atividade respiratória de uma biomassa ativa quando as mesmas efetuam a degradação biológica de um substrato orgânico, são efetuadas em meios líquidos ou gasosos (Akutsu *et al.*, 2009).

No caso de processos de compostagem, em que há a predominância de atividades de bactérias aeróbias na degradação dos resíduos, as medidas tanto da taxa de consumo de oxigênio (O_2) quanto da taxa de geração temporal de gás carbônico (CO_2), que no caso é o subproduto gasoso principal, podem ser realizadas na atmosfera de um ambiente controlado, como, por exemplo, do interior de um reator (Akutsu *et al.*, 2009).

De acordo com Akutsu *et al.*(2009), do respirograma pode-se extrair diversas informações e índices, possibilitando inclusive que as fases (lag, exponencial e endógena) do processo sejam identificadas. A fase lag é aquela associada à partida

do processo onde em geral existe o início de crescimento e adaptação das bactérias ao meio e resíduo. A fase exponencial caracteriza-se por uma intensa atividade bacteriana na conversão dos resíduos, em geral associada à intensa liberação de calor em que pode haver predomínio de bactérias termofílicas. A fase endógena caracteriza-se pela extinção gradativa de alimentos para as bactérias, sendo que as mesmas utilizam-se das próprias reservas energéticas para efetuar a respiração. Na prática, ela caracteriza o final do processo inicial aqui denominado de bioestabilização, após o qual inicia-se a fase de humificação do composto.

Além do aspecto de controle de produção de composto de qualidade, o grau de estabilidade desejado num processo de compostagem determinará diversos parâmetros de controle e dimensionamento do sistema, tais como taxa de aeração, e tempo de tratamento requerido para cada tipo de resíduo orgânico, considerando os diversos aspectos qualitativos intrínsecos envolvidos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos para avaliação do método “respirométrico” foram conduzidos nas instalações do projeto piloto de compostagem nas dependências do laboratório de resíduos sólidos da Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, o qual passou por reformulações, como a troca do tambor rotativo, além de manutenções que foram necessárias nos demais equipamentos, devido ao longo período em que ficou inativo.

A Figura 2 mostra a estrutura geral dos equipamentos do processo de análise experimental de compostagem de resíduos sólidos, pelo método “respirométrico”, e que foram utilizados na presente pesquisa.



Figura 2. Estrutura do processo de experimentos de compostagem formada basicamente por: tambor rotativo, analisador de gases e aquisição de dados.
Figure 2. Device used in the composting experimental process. Basically, it includes a rotative cylinder, a gas analyzer and a data logger system.

Os equipamentos utilizados foram: por um tambor rotativo, acoplado dentro de uma caixa fechada com vidros, para minimizar o odor característico do processo, assim permitir a visualização do mesmo (Figura 3), um analisador de gases (Figura 4) e um microcomputador para aquisição dos dados e o controle do tambor rotativo (Figura 5), sendo que cada uma destas etapas são interligadas e dependentes.

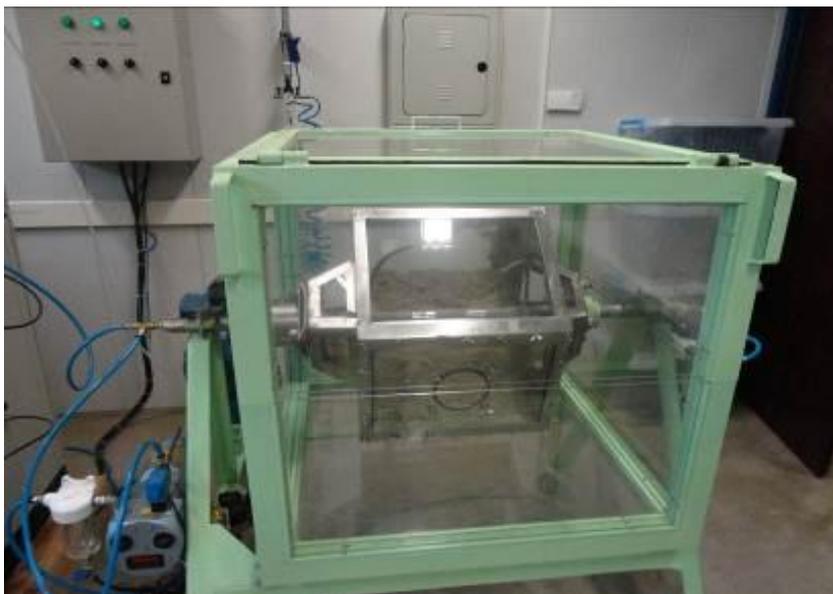


Figura 3. Tambor Rotativo.
Figure 3. Rotative cylinder.



Figura 4. Analisador de gases.
Figure 4. Gas analyzer.

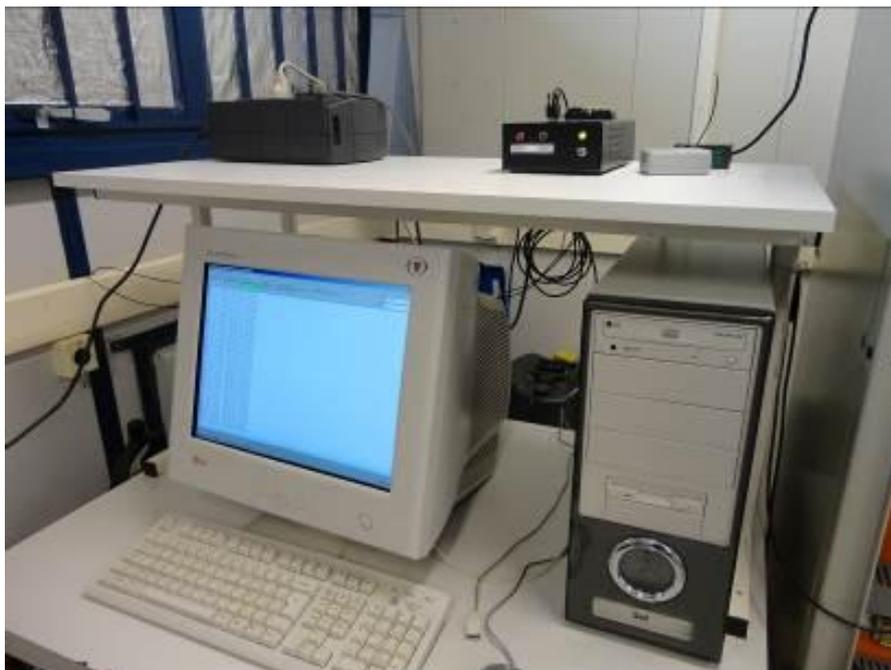


Figura 5. Aquisição de dados.

Figure 5. Data collecting and registering equipment.

O tambor rotativo, fabricado em aço inox, possui um volume útil de 90135 litros, tem um eixo tubular que serve como suporte para transmissão da rotação e ao mesmo tempo possui entrada e saída dos gases. Conta ainda com dois conjuntos de sopradores (bombas de ar), um destinado à alimentação do reator e outro destinado à recirculação. Apresenta em uma de suas paredes, uma janela removível para manuseio das amostras.

Conectados à linha de recirculação, a montagem piloto conta com um sistema completo de coleta e análises automatizada dos gases O_2 e CO_2 . O aparelho medidor, um dispositivo modelo S710, fabricado pela empresa Sick Maihak, apresenta em seu display e registra os valores de concentração desses gases em termos percentuais ($\%O_2$ e $\%CO_2$), apresentando opções de coleta e registro de dados

em intervalos de 1s a 600s. No caso do experimento, o intervalo de coleta de dados do aparelho foi ajustado para 60s, ou seja, 1 minuto. Nesses termos, o aparelho registra por dia um total de 1440 dados.. Este equipamento tem uma interface de comunicação serial que envia os valores medidos consecutivamente, em períodos específicos de tempo a um computador que recebe de forma “on line”, estas informações no formato de uma sequência de caracteres alfa-numéricos (string), e o seu formato é o seguinte:

```
#MS 07.02.12 15:41:08 4.381 Vol% CO2 16.227 Vol% O2
```

Onde:

- a) #MS: indicador (header) de resultados da análise do S710 em operação;
- b) 07.02.12: data do envio dos dados;
- c) 15:41:08: hora do envio dos dados;
- d) 4.381 Vol% CO₂: medida de CO₂ em Vol%;
- e) 16.227 Vol% O₂: medida do O₂

Após o conhecimento detalhado do padrão de dados gerados pelo analisador de gases, foi desenvolvido um software pelo Prof Dr João E M Perea Martins, do Departamento de Computação da Faculdade de Ciências da Unesp Bauru, que recebe continuamente dados do analisador, analisa estes dados e separa as informações relativas aos níveis de O₂ e CO₂. De acordo com os níveis percentuais de concentrações dos gases, o software controla um mecanismo de hardware que permite injetar uma concentração desejada e pré-estabelecida de ar no interior do

reator, para o consumo das bactérias envolvidas na degradação dos resíduos. Nesta pesquisa trabalhou-se com níveis de O₂ entre 5% e 20%.

A estrutura dos dados recebidos tem um formato de texto (TXT), que pode ser importado diretamente por outros softwares, como editores de textos, planilhas eletrônicas ou softwares de processamento matemático e, conseqüentemente, construção e análise por meio de gráficos.

Resíduos utilizados para condução dos experimentos

Apesar do objetivo primordial do trabalho ser a avaliação do método “respirométrico”, buscou-se trabalhar com resíduos orgânicos que estão dispostos em grande quantidade na realidade do Brasil, e que apresentasse uma necessidade de destinação. Desta forma optou-se por trabalhar, como resíduo principal, o lodo de esgoto em processo de co-compostagem com a poda de grama.



Figura 6. Lodo de esgoto com alto grau de umidade
Figure 6. Sewage sludge with high humidity content

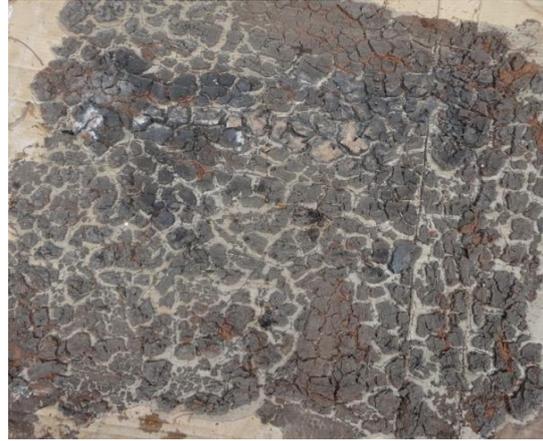


Figura 7. Lodo de esgoto em processo de desidratação.
Figure 7. Sewage sludge in process of dehydration



Figura 8. Lodo de esgoto desidratado
Figure 8. Dehydrated sewage sludge



Figura 9. Lodo de esgoto triturado.
Figure 9. Crushed sewage sludge.



Figura 10. Resíduos dos serviços de poda.
Figure 10. Pruning residues.



Figura 11. Poda de grama triturada.
Figure 11. Chopped mown grass.



Figura 12. Mistura dos resíduos de lodo de esgoto e de poda de grama, no interior do reator, para o início do processo de compostagem.

Figure 12. Mix of residues from sewage sludge and mowed grass inside the reactor, at the beginning of the composting process.

Levantamento de dados respirométricos - Medição dos índices de O₂ e CO₂

Os parâmetros medidos na fase gasosa consistiram basicamente na determinação da evolução temporal do consumo de O₂ e respectiva geração de CO₂ sendo estes gases analisados e registrados pelo aparelho medidor de forma contínua, excetuando períodos de coleta de matérias para análise de umidade, ao longo do processo aqui representado e referido como sendo um ciclo. Ao se construir um gráfico, através do software Matlab, plotando-se os valores da evolução do consumo de O₂ e respectiva geração de CO₂ ao longo do ciclo total do processo, que neste experimento atingiu um total de 39870 linhas de dados, obteve-se um diagrama aqui denominado de “respirograma”, do processo de compostagem.

RESULTADOS

Na Tabela 5 são apresentados os dados obtidos nesta batelada, indicam o tempo gasto para que o consumo de O₂, a partir do início do processo, com percentual encontra-se apresentando o valor de aproximadamente 21% do total da mistura gasosa no interior do reator, sendo reduzido para o valor de até 5% dessa mistura, parâmetro definido pelo range programado pelo sistema, a partir do qual ocorre a purga, isto é, a eliminação da mistura gasosa (com alto índice de CO₂) e a introdução de ar ambiente.

Tabela 5. Tempo gasto para consumo do oxigênio existente no interior do reator em cada ciclo de purga.

Table 5. Time to consume all the oxygen inside the reactor in each purging cycle.

CICLOS DE PURGA	DATA DE ENCERRAMENTO	TEMPO (min)	TEMPO (h)	MINUTOS ACUMULADOS	HORAS ACUMULADAS
1	26.01.12	505	8.42	505	8.42
2	27.01.12	484	8.07	1010	16.84
3	27.01.12	406	6.77	1494	24.90
4	27.01.12	477	7.95	1900	31.67
5	28.01.12	521	8.68	2377	39.62
6	28.01.12	503	8.38	2898	48.30
7	28.01.12	391	6.52	3401	56.69
8	29.01.12	366	6.10	3792	63.20
9	29.01.12	475	7.92	4158	69.30
10	29.01.12	416	6.93	4633	77.22
11	29.01.12	287	4.78	5049	84.15
12	30.01.12	406	6.77	5336	88.94
13	30.01.12	503	8.38	5742	95.70
14	30.01.12	307	5.12	6245	104.09
15	30.01.12	280	4.67	6552	109.20
16	31.01.12	437	7.28	6832	113.87
17	31.01.12	420	7.00	7269	121.15
18	31.01.12	292	4.87	7689	128.15
19	31.01.12	339	5.65	7981	133.02
20	01.02.12	589	9.82	8320	138.67
21	01.02.12	377	6.28	8909	148.49
22	01.02.12	299	4.98	9286	154.77

CICLOS DE PURGA	DATA DE ENCERRAMENTO	TEMPO (min)	TEMPO (h)	MINUTOS ACUMULADOS	HORAS ACUMULADAS
23	02.02.12	470	7.83	9585	159.75
24	02.02.12	509	8.48	10055	167.59
25	02.02.12	299	4.98	10564	176.07
26	03.02.12	433	7.22	10863	181.05
27	03.02.12	505	8.42	11296	188.27
28	03.02.12	398	6.63	11801	196.69
29	04.02.12	480	8.00	12199	203.32
30	04.02.12	605	10.08	12679	211.32
31	04.02.12	405	6.75	13284	221.40
32	05.02.12	517	8.62	13689	228.15
33	05.02.12	605	10.08	14206	236.77
34	05.02.12	475	7.92	14811	246.85
35	06.02.12	803	13.38	15286	254.77
36	06.02.12	533	8.88	16089	268.15
37	07.02.12	721	12.02	16622	277.04
38	07.02.12	254	4.23	17343	289.05
39	07.02.12	195	3.25	17597	293.29
40	07.02.12	253	4.22	17792	296.54
41	08.02.12	395	6.58	18045	300.75
42	08.02.12	415	6.92	18440	307.34
43	08.02.12	394	6.57	18855	314.25
44	09.02.12	379	6.32	19249	320.82
45	09.02.12	428	7.13	19800	330.00
46	10.02.12	723	12.05	20228	337.14
47	10.02.12	528	8.80	20951	349.19
48	11.02.12	877	14.62	21479	357.99
49	12.02.12	960	16.00	22356	372.60
50	13.02.12	1311	21.85	23316	388.60
51	15.02.12	2410	40.17	24627	410.45
52	16.02.12	1266	21.10	27037	450.62
53	18.02.12	1927	32.12	28303	471.72
54	24.02.12	4414	73.57	30230	503.84
55	29.02.12	2929	48.82	34644	577.40
TEMPO MÉDIO		661.93	11.03	-	-

Verifica-se que, no total, foram completados 56 ciclos de purga, no tempo total de 577.40 horas, ou seja aproximadamente 24 dias, com tempo médio de purga de aproximadamente 11 horas.

A Figura 13 apresenta o tempo gasto no consumo de O_2 com relação ao volume total de gases no interior do reator, para os intervalos entre cada uma das purgas. Verificava-se que para o período de 26 de janeiro a 05 de fevereiro o tempo máximo foi em torno de 10 horas, com aumento de consumo no dia 06 de fevereiro, quando se constatou baixa umidade (36%). Entre os dias 07 e 09 de fevereiro este tempo sofre uma queda, aumentando a rapidez do consumo de O_2 . A partir do dia 10 de fevereiro o tempo gasto no consumo aumenta continuamente, período no qual, conclui-se, que ocorreu a estabilização na decomposição do composto.

Considerando a quantidade de nutrientes do material a ser compostado, a fase inicial do processo é quando ocorre atividades bacterianas em maior intensidade e, conseqüentemente, o consumo de O_2 no interior do reator, ocorre em tempos menores. O gráfico 3 apresenta esta condição, uma vez que os intervalos de purgas iniciais são pequenos e se espaçam ao longo do período do processo de compostagem.

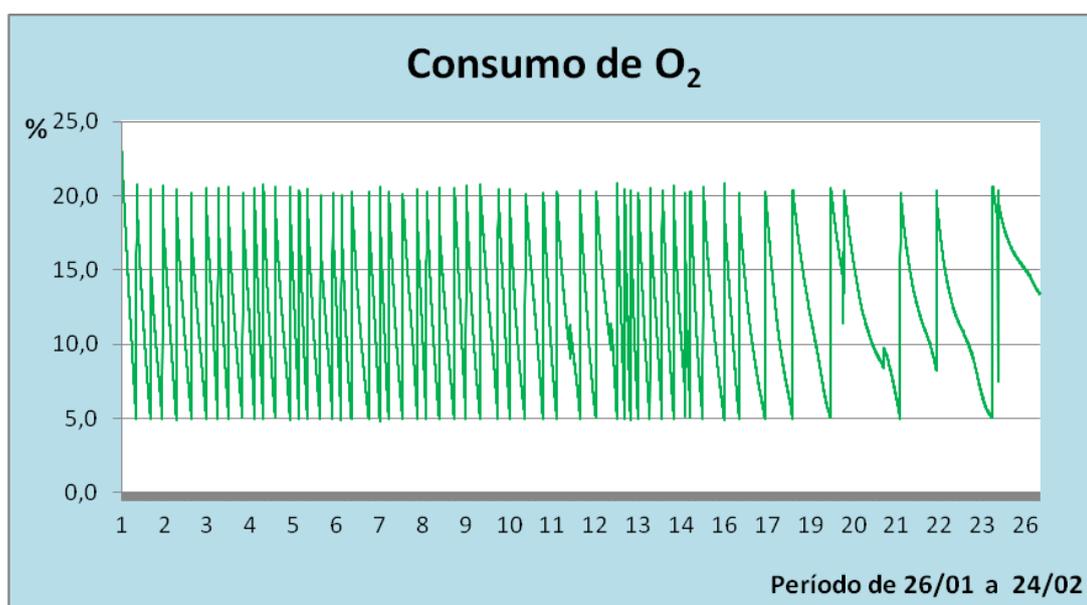


Figura 13. Representação da velocidade do processo do consumo de O_2 obtidos a partir de cada linha de dados coletada.

Figure 13. Oxygen consumption speed obtained from each data line collected

Neste gráfico (Figura 13), vale ressaltar que a faixa de range analisada no O_2 , isto é, a faixa que refere-se à amplitude delimitada por um valor mínimo e um valor máximo de dados, foi estabelecida entre 5% e 20%, para esta batelada. Nota-se que o percentual não fica abaixo de 5%, valor mínimo programado de range e, no momento em que atinge este valor, é o mesmo em que ocorrerá a purga dos gases. Ao término de cada purga o valor do percentual atinge seu máximo, entre 20% e 21%, onde o ar no interior do reator é eliminado e introduzido um novo volume de gás do ambiente externo. Verifica-se uma variação intensa nos dias iniciais do processo até por volta do dia 05 de fevereiro, onde a intensidade diminui. Entre os dias 7 e 9 de fevereiro, período em que o índice de umidade foi corrigido, obtendo-se atividade bacteriana mais intensa, e como consequência o consumo de O_2 torna-se intenso. A partir do dia 9 de fevereiro o consumo vai diminuindo, observa-se um intervalo cada vez maior entre as purgas, onde se conclui que nesta fase ocorre a estabilização do processo.

A produção de CO_2 , durante o período do processo de compostagem, é observado no gráfico da Figura 14. Neste gráfico verifica-se uma alta produção de CO_2 nos momentos iniciais, onde o evento se repete de forma intensa. Assim como no consumo de O_2 nota-se que o percentual diminui a intensidade de variação entre 5 e 7 de fevereiro, período em que a umidade estava baixa. Após a correção da umidade, verifica-se novamente um aumento na produção de CO_2 , mas após o dia 9 de fevereiro o processo mais diminuindo progressivamente, o que interpreta-se como a fase de estabilização do processo de compostagem.

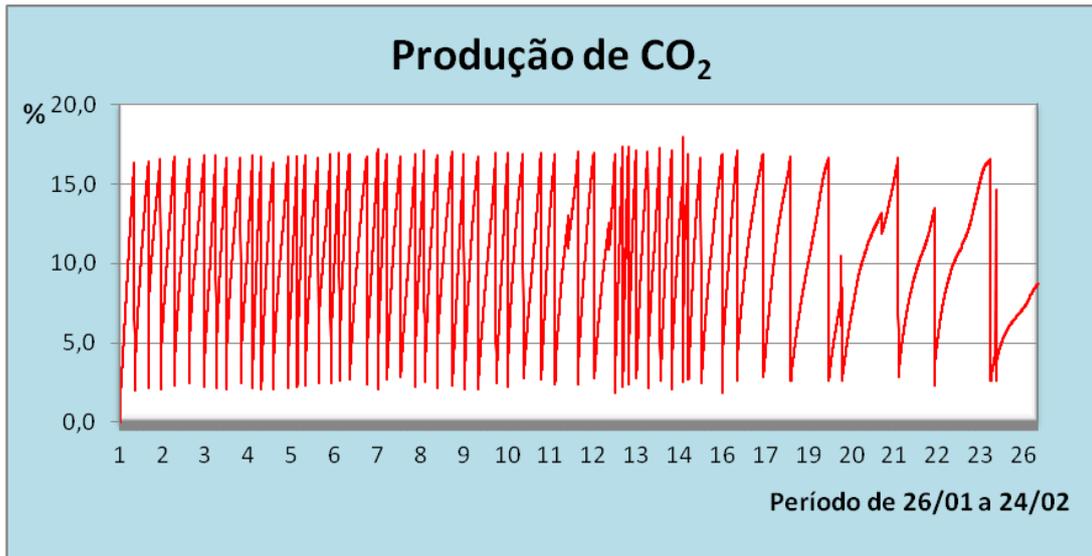


Figura 14. Representação do processo de produção de CO₂ obtidos a partir de cada linha de dados coletada.

Figure 14. Production of CO₂ obtained from each line of data collected.

A produção de CO₂ no processo é inversa ao consumo de O₂. Assim quando no interior do reator, se tem elevada porcentagem de O₂, ter-se-á baixa porcentagem de CO₂. Com o desenvolvimento de atividades bacterianas, o consumo de O₂ aumenta (o que reduz sua porcentagem no interior do reator) e proporcionalmente a esta redução, obtem-se o aumento de CO₂.

CONCLUSÕES

Pode-se destacar as seguintes conclusões:

- a) O método “respirométrico” demonstrou ser uma ferramenta extremamente útil e confiável com relação às respostas que o mesmo pode fornecer no acompanhamento operacional e na avaliação do andamento progressivo do processo de degradação dos resíduos sólidos;

b) As medições de parâmetros na fase gasosa, através da evolução temporal do consumo de O_2 e respectiva geração de CO_2 , demonstraram ser muito superiores em termos de representatividade, precisão e confiabilidade quando comparado ao método tradicional que efetua a avaliação do processo de degradação segundo análise da fase sólida;

c) O método respirométrico por apresentar respostas em tempo real “on line” em intervalos de tempo reduzidos, permite uma operação muito mais ajustada e eficiente, incluindo ainda a possibilidade de intervenções em tempo hábil para corrigir determinados erros ou falhas que eventualmente venham a ocorrer no decorrer do processo.

Tais conclusões demonstram viabilidade e potencialidade de projetos voltados para o desenvolvimento de ferramentas tecnológicas aplicadas na automação de processos, não somente na destinação de resíduos sólidos orgânicos, através da compostagem, mas em todas as áreas de gestão ambiental. Deve-se comentar que a pesquisa encontra-se em andamento com a utilização de outros resíduos orgânicos, como o de logo de esgoto e os de resíduos de restaurante do campus universitário.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akutsu J, Martins JEMP, Castilho GS, Renófilo A, ISA MM. 2009. Avaliação e Controle Operacional de Processo de Compostagem de Resíduos Sólidos através de Método Respirométrico. *XVI SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção*, Bauru, Brasil: <http://www.simpep.feb.unesp.br>
- Albuquerque HC, Marques CC, Araújo PGC, Gonçalves WP, Maia R, Barbosa EA. 2007. Caracterização de resíduos sólidos orgânicos produzidos no restaurante universitário de uma instituição pública. *XXVII ENEGEP –*

Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Foz do Iguacu, Brasil:

http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_tr650481_0422.pdf

- Baptista FRM. 2001. *Caracterização física e comercial do lixo urbano de Vitória - ES, em função da classe social da população geradora*. Dissertação Mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, ES, Brasil: 164 p
- Barbieri JC. 2003. *Desenvolvimento e Meio Ambiente*. Editora Vozes, São Paulo: 128 p
- Brasil. 2010. Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Senado. Brasília, DF
- http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm
- Brasil. 2011. Versão Preliminar do Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Ministério do Meio Ambiente. Brasília,DF.
- http://www.cnrh.gov.br/pnrs/documentos/consulta/versao_Preliminar_PNRS_WM.pdf
- Herbets RA. 2005. Compostagem de resíduos sólidos orgânicos: aspectos biotecnológicos. *Revista Saúde e Ambiente*, Joinville, Santa Catarina, SC: s.n, v.6, n.1, p. 41-50
- IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas). 2012. Brasil. Obtido em 27/01/2012. http://www.ipt.br/consultas_online
- Kiehl EJ. 2008. *Manual de Compostagem - Maturação e Qualidade do Composto*. Edição própria, Piracicaba, SP, Brasil: 171 p
- Petiot C. 2004. Composting in a Laboratory Reactor: A Review. *Compost Science & Utilization*, 12 (1): 69-79

- Santos JLD dos. 2007. *Caracterização físico-química e biológica em diferentes laboratórios de produtos obtidos a partir da compostagem de resíduos orgânicos biodegradáveis*. Dissertação Mestrado em Ecologia Aplicada - Programa de Pós-Graduação em Ecologia Aplicada, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, Porto, Portugal: 122 p