

GERAÇÃO DE ENERGIA COM RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ANÁLISE CUSTO BENEFÍCIO

Rachel Martins Henriques

Luciano Basto Oliveira

Angela Oliveira da Costa

Instituição: IVIG-COPPE/UFRJ

Email: rachel@ivig.coppe.ufrj.br

Palavras chave: energia; resíduos sólidos urbanos; análise custo-benefício

I – Introdução

A geração de energia no Brasil passou por uma grave crise de faltas de investimento, que culminou com o *apagão* em 2001. Desde então várias medidas têm sido tomadas para incentivar a geração descentralizada de energia e também a geração de energia proveniente de fontes alternativas. Neste campo, a geração de energia com resíduos aparece como a solução de alguns problemas, a destacar o destino dos resíduos para algum fim controlado evitando a emissão de metano dos lixões; a geração de energia descentralizada; geração de emprego para pessoas de baixa renda; estímulo à reciclagem de resíduos; produção de subprodutos de interesse nacional entre outros.

Este artigo faz uma panorâmica de três tecnologias para geração de energia com resíduos sólidos urbanos e a análise custo benefício destas tecnologias considerado suas potencialidades de obtenção de créditos por emissões evitadas de carbono. Dentre as tecnologias selecionadas, DRANCO, Incineração e GDL (gás de lixo), somente esta última possui alguma experiência em território nacional. As outras, embora presentes em alguns países dos Estados Unidos e Europa, ainda não possuem plantas em operação no Brasil.

Gestão de Resíduos Sólidos no Brasil

No Brasil, o sistema de gerenciamento de resíduos não é feito de forma eficiente e a disposição final da maior parte do lixo coletado nem sempre é feita da forma mais adequada. Com dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE (PNSB, 2000), nota-se que ainda hoje o destino final de grande parte do lixo coletado é o lixão ou aterro sanitário não controlado.

Tabela 1 – Unidades de Destinação Final de Lixo Coletado

Região do Brasil	Vazadouro a céu aberto (lixão)	Vazadouro em áreas alagadas	Aterro controlado	Aterro sanitário	Aterro de resíduos especiais	Usina de compostagem	Usina de reciclagem	Incineração
NORTE	488	8	44	32	10	1	0	4
NORDESTE	2538	7	169	134	69	19	28	7
SUL	848	11	738	478	219	117	351	101
SUDESTE	1713	36	785	683	483	117	198	210
CENTRO-OESTE	406	1	132	125	29	6	19	3

Fonte: PNSB, 2000

Os resíduos sólidos, sejam domiciliares, hospitalares, industriais ou agrícolas, são um dos principais problemas ambientais não só do país mas do mundo como um todo. Como visto na Tabela 1, a maior parte dos resíduos (cerca de 72% do total nacional) é indevidamente disposto e compõe a carga poluidora que escorre pelas águas pluviais urbanas e rurais. Assim, disposto inadequadamente a céu aberto ou em áreas alagadas, pode gerar problemas sanitários e de contaminação hídrica nos locais onde é depositado. O lixo tóxico, normalmente industrial ou agrícola, traz conseqüências ambientais na saúde humana e na preservação da fauna e da flora de maneira mais danosa.

Os serviços de gestão de resíduos sólidos não se restringem, assim, à fase de coleta, mas também à transferência do lixo coletado para tratamento, reaproveitamento e sua disposição final.

Os resíduos tóxicos são, atualmente, um dos maiores problemas ambientais nos países ricos. Embora a situação no Brasil ainda careça de indicadores sistemáticos, sua magnitude é considerada alarmante pelos órgãos e entidades ambientais. No caso brasileiro, conforme será mostrado a seguir, a gestão do próprio lixo urbano não pode ser considerada ideal (MOTTA,

SAYAGO, 1998). De acordo com a Pesquisa Nacional de Amostra Domiciliar (PNAD, 2001), os serviços essenciais de saneamento básico, coleta de lixo e iluminação elétrica, que são de grande importância para a melhoria das condições de vida e saúde da população, vem desde o último censo realizado em 1999 ampliando a sua abrangência. Destes serviços, o que alcançou maior cobertura foi o de iluminação elétrica, que atendia a 94,8% das habitações em 1999 e atingiu a 96,0% em 2001. A proporção de residências atendidas por serviço de coleta de lixo passou de 80,0% em 1999 para 83,2% em 2001. Na

Tabela 2 podem ser observados dados das duas décadas anteriores e comparados com os dados citados acima. Houve uma melhora acentuada na coleta de resíduos na década de 80 praticamente em todas as classes sociais. No início da década de 90, foi generalizada em todas as regiões a piora do serviço de coleta de lixo domiciliar. No entanto, nota-se com clareza que na maioria das vezes as classes mais favorecidas são as que menos são afetadas pelas pioras e as mais beneficiadas quando há melhoras.

Tabela 2 – Proporção da População Urbana com Acesso ao Serviço de Coleta de Lixo (Em %)

Regiões	Nível de Renda	Lixo Coletado				
		1981	1990	1995	1990-1981	1995-1990
Norte						
	0-1 SM	15,7	30,7	36,6	15,0	6,1
	1-2 SM	17,9	33,8	38,3	15,9	4,5
	2-5 SM	27,9	48,5	51,9	20,6	3,4
	>5 SM	56,5	71,1	75,5	14,6	4,4
	Total	36,5	59,9	58,6	23,4	-1,3
Nordeste						
	0-1 SM	29,0	43,9	25,3	14,9	-18,6
	1-2 SM	33,1	51,3	32,9	18,2	-18,4
	2-5 SM	46,9	60,7	49,7	13,8	-11,0
	>5 SM	72,4	80,2	79,2	7,8	-1,0
	Total	46,7	64,2	48,1	17,4	-16,2
Centro-Oeste						
	0-1 SM	25,9	48,0	48,0	22,1	0,0
	1-2 SM	33,8	56,6	48,6	22,8	-8,0
	2-5 SM	49,7	64,0	65,3	14,3	1,3
	>5 SM	75,7	86,2	86,6	10,5	0,4
	Total	54,6	76,3	70,8	21,7	-5,5
Sudeste						
	0-1 SM	41,9	64,2	53,8	22,3	-10,2
	1-2 SM	49,1	63,8	56,6	14,7	-7,2
	2-5 SM	64,7	75,3	74,9	10,6	-0,4
	>5 SM	86,8	92,4	92,4	5,6	0,0
	Total	72,4	85,1	82,1	12,7	-3,0
Sul						
	0-1 SM	35,7	59,1	49,1	23,3	-1,0
	1-2 SM	44,3	64,4	54,6	20,1	-9,8
	2-5 SM	58,4	77,1	69,8	18,7	-7,3
	>5 SM	78,3	91,2	87,9	12,9	-3,3
	Total	63,5	83,9	75,8	20,4	-8,1
Brasil - Total						
	0-1 SM	33,0	51,3	37,0	18,3	-14,3
	1-2 SM	40,3	56,8	43,4	16,5	-13,4
	2-5 SM	57,3	69,6	63,9	12,3	-5,7
	>5 SM	81,9	89,0	88,4	7,1	-0,6
	Total	62,8	78,4	69,2	15,6	-9,2

Fonte: MOTTA, SAYAGO, 1998

Os indicadores nacionais da Tabela 2 indicam que 69,2% da população urbana têm acesso a este serviço. O acesso na classe com renda até 1 salário-mínimo (1 SM) é de apenas 37%, na de 1 a 2 SM é de 43,48%, na de 2 a 5SM eleva-se para 63,9% e salta para 88,4% nas classes com renda superior a 5 SM.

Do lixo coletado a predominância ainda é de material orgânico (restos de comida, por exemplo), embora esta participação, a exemplo de outros países de alta concentração urbana e industrial, tem declinado. Na Tabela 3, apresenta-se alguns indicadores desta participação em São Paulo, estimados em Cempre (1995), que mostram sua redução de 76% em 1965 para 47,4% em 1990. Ou seja, a matéria inorgânica ganha maior volume no lixo urbano na medida em que as famílias utilizam mais produtos industrializados ou processados que carregam embalagens.¹ No Rio de Janeiro, a COMLURB fez a análise gravimétrica do lixo da cidade em 2002 e os dados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 3 – Variação na Composição dos Resíduos Sólidos na Região Metropolitana de São Paulo (Em %)

Tipos de material	1965	1969	1972	1989	1990
Papel, papelão	16,8	29,2	25,9	17,0	29,6
Trapo, couro	3,1	3,8	4,3	-	3,0
Plástico	-	1,9	4,3	7,5	9,0
Vidro	1,5	2,6	2,1	1,5	4,2
Metais, latas	2,2	7,8	4,2	3,3	5,3
Matéria Orgânica	76,0	52,2	47,6	55,0	47,4

Fonte: Cempre (1995)

¹ Esta mesma pesquisa, entretanto, observa um acentuada redução deste declínio em 1993.

Tabela 4- – Variação na Composição dos Resíduos Sólidos na Região Metropolitana de São Paulo (Em %)

Tipos de Materiais	1981	1989	1991	2001
Papel, papelão	41,72	31,54	27,11	18,71
Trapo, couro	3,35	2,66	3,11	1,38
Plástico	6,56	12,55	12,71	19,77
Vidro	3,7	2,83	2,19	3,52
Metais, latas	3,88	3,5	3,24	1,96
Matéria Orgânica	34,96	40,98	48,56	51,65

Fonte: COMLURB (2002)

Conforme se pode observar nas duas tabelas, a maior parte dos resíduos é composta por matéria orgânica, no caso do Rio de Janeiro de maneira crescente e em São Paulo de maneira decrescente. A presença maciça de matéria orgânica nos resíduos denota um caráter de desenvolvimento do país, uma vez que países mais industrializados apresentam menor carga orgânica nos seus resíduos.

Aproveitamento Energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU)

Existem, principalmente, dois conjuntos disponíveis de sistemas de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e que devem ser consorciados: a reciclagem e a transformação desses resíduos.

A reciclagem está relacionada ao reaproveitamento dos materiais com finalidades similares àquelas para as quais tinham sido originalmente produzidos. Como exemplo, os resíduos de papéis, plásticos, vidros e metais podem ser usados como matéria-prima reciclável nas próprias indústrias que os fabricaram. A esta opção deve ser concedida prioridade, devido a seu balanço energético mais favorável que a combustão desses materiais, única alternativa disponível. A segunda rota, a transformação, diz respeito ao uso de resíduos para fins diferentes dos originais, como no caso da utilização da biomassa presente nos restos alimentares para produzir combustível ou adubo.

Em ambos os casos há redução da quantidade de resíduos sólidos urbanos a ser depositada em aterros sanitários, o que amplia sua vida útil e soluciona um dos grandes problemas da atualidade, a escassez de áreas para novos depósitos de RSU.

Define-se por reciclagem o ganho de eficiência, seja pela redução de consumo de recursos naturais pelas indústrias, seja pela otimização das áreas destinadas a depósitos de resíduos ou, ainda, pela conservação de energia. Já a transformação visa obter produtos cuja competitividade pode ser alcançada mesmo com custos de processamento mais elevados, uma vez que seu custo de matéria-prima é negativo. Com isso, é evitada a demanda por áreas para destinação final e, conseqüentemente, a proliferação de doenças causadas pelo lixo, assim como os custos de despoluição.

Apesar de poder-se contar com estes benefícios ao utilizar o sistema de separação dos RSUs pós-coleta, os mesmos podem ser otimizados através da aplicação do sistema de coleta seletiva, com o qual os resíduos não chegam a ser misturados nos locais de sua produção. O êxito da coleta seletiva para reciclagem favorece, ainda, a transformação da biomassa presente nos restos alimentares, sobretudo em combustíveis. A coleta seletiva também fomenta o desenvolvimento comunitário, devido ao exercício de cidadania envolvido em sua manutenção, materializado pela atitude de segregação.

De um modo geral, deve-se considerar que os materiais encontrados nos resíduos passíveis de (re)aproveitamento são aqueles que demandam, na sua produção, muitos recursos naturais - minerais ou florestais -, ou, ainda, grande quantidade de energia. Esta característica é uma das vantagens ambientais do aproveitamento energético, reciclagem e reutilização dos resíduos sólidos urbanos. O aproveitamento energético de resíduos expande a vida útil das reservas de matéria-prima e energia, na medida em que reduz a demanda por esses recursos, tendo em vista que obriga a um uso mais eficiente dos mesmos. Isso pode representar, ainda, maior competitividade dos produtos nacionais, que atenderiam padrões ambientais internacionais cada vez mais rigorosos.

No aspecto social, a coleta seletiva mostra-se uma atividade extremamente atraente, podendo envolver população de menor renda, pois a maioria das atividades envolvidas no processo de coleta, reciclagem e geração

de energia demandam mão-de-obra pouco qualificada (catadores, sucateiros, micro e pequenas empresas beneficiadoras, produtores independentes de energia, etc.). Milhares de empregos podem ser criados em programas de coleta seletiva com um custo muitas vezes menor do que o necessário em atividades para a produção dos insumos substituídos. Além disso, a implementação de um amplo programa de coleta seletiva contribuiria consideravelmente para a diminuição do volume de resíduos sólidos, atendendo aos pressupostos do projeto de Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos, em tramitação no Congresso Nacional.

O aproveitamento energético das 20 milhões de toneladas anuais de resíduos sólidos urbanos (RSU) brasileiros, dos quais menos de 10% tinha destinação adequada em 1989² (OLIVEIRA, 2000), pode aumentar a oferta de energia elétrica em 50 TWh, cerca de 17% do consumo nacional e gerar receita superior a US\$ 5 bilhões anuais, fazendo do oneroso resíduo um valioso combustível. De acordo com a última pesquisa, disponibilizada pelo IBGE em maio de 2002, a geração de resíduos no Brasil totalizou 228 mil toneladas/dia, cerca de 83 milhões de toneladas de produção de lixo por ano. Esta produção de lixo permite, atualmente, atingir uma oferta de energia elétrica de aproximadamente 112 TWh, cerca de 30% do consumo nacional e gerar receitas superiores a US\$ 22,4 bilhões por ano. Apesar de significativos, estes valores podem aumentar se forem contabilizados os custos de todas as consequências da falta de racionalização na destinação final de RSUs, como as que afetam os setores de saúde e segurança públicas, (des)emprego e meio ambiente.

Para alterar este quadro é preciso somar custos operacionais da coleta de lixo e custos externos ambientais, sociais e do desperdício de energia, resultando no que denominamos custos sociais, deste sistema e procurar alternativas mais baratas. Um estudo realizado por OLIVEIRA, (2000) indicou como melhor alternativa para reduzir os custos externos das mais de 20 milhões de toneladas anuais de RSUs no Brasil uma alteração do procedimento atual, no qual a maioria dos resíduos é depositada a céu aberto, passando-se a aterrar, apenas, o estritamente necessário.

² A 1ª Pesquisa Nacional de Resíduos foi realizada pelo IBGE em 1989 e a 2ª em 2000. A última pesquisa foi disponibilizada em maio de 2002.

As duas rotas para aproveitamento do lixo, a reciclagem e a transformação dos resíduos, acabam por aumentar a oferta de energia e reduzir o consumo de combustíveis fósseis, visto que a expansão da oferta do setor elétrico brasileiro está prevista, ainda que não tenha conseguido ser materializada, principalmente, por usinas termelétricas movidas a gás natural, sobretudo o gás importado. Deste incremento na oferta obtém-se redução no risco de déficit, o qual aumentou em decorrência do crescimento da economia sem acompanhamento da oferta de energia, afastando o risco de déficit e o racionamento e o “efeito Califórnia” (ROSA, 2001).

Devido à falta de dados sobre investimento na coleta seletiva, calculou-se que mesmo se o custo operacional desta alternativa seja oito vezes superior ao do sistema atual de gerenciamento de RSU³, o lucro operacional líquido supera US\$ 2,5 bilhões anuais, como será detalhado na seqüência. Este valor é substancial quando comparado aos cerca de US\$ 3 bilhões de investimento necessário para as unidades de geração termelétricas da tecnologia com maior custo de investimento para geração elétrica com os resíduos orgânicos gerados no lixo brasileiro.

A busca por tecnologias alternativas para o aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos se mostra como uma ação de extrema importância, devido principalmente à falta de áreas para disposição final de resíduos próximas aos grandes centros urbanos – aonde esses resíduos são gerados –, ao potencial de aproveitamento energético apresentado pelo lixo urbano brasileiro e à redução de emissões de gases do efeito estufa. Os motivos apresentados, somados, levaram à busca por tecnologias que resolvam essas três questões, de forma ambientalmente correta, com viabilidade técnica e econômica.

Geração de Energia com Lixo

São apresentadas três tecnologias para o aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos: a tecnologia da incineração controlada do lixo, a tecnologia DRANCO (*dry anaerobic composting* – compostagem seca anaeróbia) e a tecnologia de aproveitamento do gás de lixo. A escolha pela tecnologia da

³ Premissas assumidas pelo CEMPRE, fruto da pesquisa CicloSoft.

incineração controlada do lixo se justifica, pois atualmente existe uma indústria consolidada, com sistemas de incineração de alta tecnologia e baixas emissões de poluentes, com larga utilização para tratamento do lixo perigoso. A tecnologia DRANCO já está plenamente desenvolvida e em utilização em diversos países da Europa, e se mostra como uma alternativa eficaz para a questão dos resíduos sólidos urbanos. A tecnologia de aproveitamento do gás de lixo foi levada em conta, pois é uma alternativa que pode ser aplicada a curto e médio prazo para os gases gerados nos aterros sanitários brasileiros.

Tecnologia DRANCO

Esta tecnologia trata da compostagem acelerada de resíduos sólidos urbanos. A figura 1 abaixo mostra esquematicamente a planta em Salzburg, já em operação.



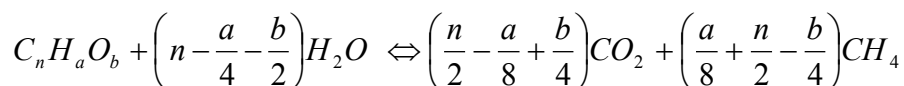
Figura 1 – Esquema de funcionamento da Planta DRANCO em Salzburg

Os resíduos passam primeiramente por uma pré-seleção onde os recicláveis são separados. A parte orgânica segue então para o triturador e

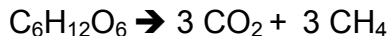
depois para a peneira. A parte que passa na peneira é direcionada para um separador magnético e depois para o reator, onde esta massa será transformada em húmus e biogás. A parte que não passa na peneira segue direto para um container.

Gás de Lixo

Quando resíduos são depositados em aterros, uma decomposição anaeróbica se inicia e então surge o gás de lixo. A formação de metano e gás carbônico se dá segundo a equação de 1952 de Busweel & Mueller (*apud* ETHERIDGE, 2003):



Ou, tomando como exemplo esta molécula ($C_6H_{12}O_6$) para uma reação com ausência de oxigênio seria:



Segundo WILLUMSEN (1999), o gás contém aproximadamente 50% de metano, que pode ser utilizado para propósitos energéticos. O restante da composição contém cerca de 45% de CO_2 , 3% de nitrogênio, 1% de oxigênio e 1% de outros gases. Durante os últimos 25 anos as plantas para extração e utilização de gás de lixo vêm se desenvolvendo e hoje há mais 950 plantas em todo o mundo

Uma planta de gás de lixo consiste de um sistema de extração e um sistema de utilização. Toda a recuperação pode ser feita por diferentes tipos de sistema de extração e utilização.

O sistema de coleta pode conter tubos verticais perfurados ou canais e em alguns casos com membrana protetora, sob a qual o gás produzido é coletado. O gás é succionado do aterro por bombas ou por um compressor direcionando o gás para o sistema de produção. O uso mais comum do gás é de combustível para máquinas movendo um gerador elétrico. O gás também

pode ser utilizado como em um boiler para produzir água quente para aquecimento domiciliar ou para processo. Para estes fins o gás não precisa ser purificado, somente as impurezas (partículas) devem ser removidas. Em alguns casos o gás é composto em sua maioria por metano, e pode até ser utilizado na rede de gás natural.

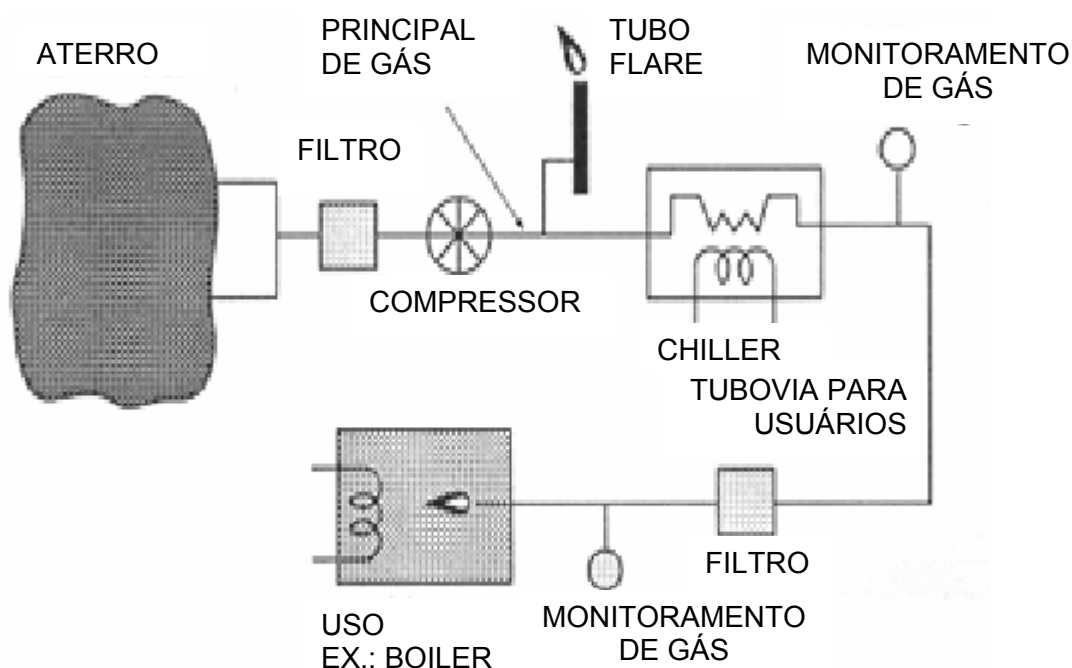


Figura 2 – Esquema de funcionamento de uma planta de Gás de Lixo genérica

Incineração

Incineração tem sido utilizada como um método para processar resíduos desde o início do século. Durante as últimas décadas ela tem sido amplamente utilizada, estabelecendo tecnologia com confiáveis e modernas facilidades operando em base comercial. Modernas plantas de incineração estão agora quase todas sendo construídas com aproveitamento energético.

A incineração ainda é muito mais uma opção para a disposição final de resíduos, do que uma fonte de energia renovável *per se*.

Sendo assim, quando olhamos para os méritos da incineração é importante considerar a estratégia global de disposição de resíduos, então os impactos e benefícios da recuperação de energia da incineração de resíduos podem ser comparados com outros métodos de disposição de resíduos.

Incineração é a maior opção para a disposição final de resíduos sólidos urbanos (MSW, do inglês *municipal solid waste*) em muitos países (Tabela 5), embora um grande número das plantas existentes não tenha a recuperação de energia.

Tabela 5 – Uso da incineração (e recuperação de energia) para a disposição de resíduos em vários países

País	Incineração de resíduos como tratamento do lixo urbano (%)	Fração com recuperação de energia
Dinamarca	65	100 (maioria aquecimento)
França	42	68
Japão	72	Poucas plantas
Holanda	40	50
Suécia	55	100 (maioria aquecimento)
Estados Unidos	16	60
Reino Unido	8	Poucas plantas

Fonte: WILLUMSEN, 1999

O atual processo de incineração consiste geralmente em dois estágios. Inicialmente, o resíduo é queimado em uma temperatura suficientemente alta para que algumas substâncias presentes se tornem gases e outra assuma a forma de pequenas partículas. Essa mistura de gases e partículas é então queimada a uma temperatura mais alta por um intervalo de tempo suficiente para que haja a combustão completa. Tempo de residência representativo para resíduos sólidos é de 30 minutos para o primeiro estágio e de 2 a 3 segundos para a combustão da fumaça no segundo estágio. A temperatura de projeto é normalmente entre 750°C -1200°C.

Os gases provenientes passam por um sistema de abatimento de poluição, que consiste em muitos estágios (por exemplo scrubber para a remoção de ácido no gás, precipitador eletrostático para a remoção de poeira e/ou filtros para a remoção de partículas finas), antes de serem enviadas para

a atmosfera via uma chaminé. As restritas regulamentações de emissões algumas vezes requerem o uso de carvão ativo no sistema de abatimento, para que haja redução da emissão de mercúrio e dioxinas.

Energia é recuperada da corrente quente de gases por aquecedores convencionais, que normalmente inclui superaquecedores e econômicos para aumentar a recuperação de energia. O vapor produzido é utilizado tanto para a geração de energia como, se existir infra-estrutura local, um sistema de geração de calor e energia.

Após a incineração, os resíduos são tirados da grelha. A quantidade de cinzas após o processo de incineração é cerca de 30% em massa (ou 10% em volume) do material original. O resíduo é normalmente tratado para que haja a recuperação de materiais ferrosos; não ferrosos podem também ser recuperados em certas circunstâncias. Uma pequena quantidade de finas partículas é carregada para fora da câmara de combustão pela exaustão dos gases (freqüentemente leves cinzas aquecidas); isso é coletado no precipitador ou no filtro.

Em algumas plantas depois do processo de combustão a cinza é carregada para a produção de material de construção civil, mas freqüentemente ela é levada para aterros sanitários (embora possa ser utilizado na construção de aterros). Assim que materiais combustíveis orgânicos foram removidos, este resíduo não se degrada para formar gás de aterro. Há também um número de resíduos produzidos do abatimento tecnológico, embora este vá depender do tipo de processo utilizado.

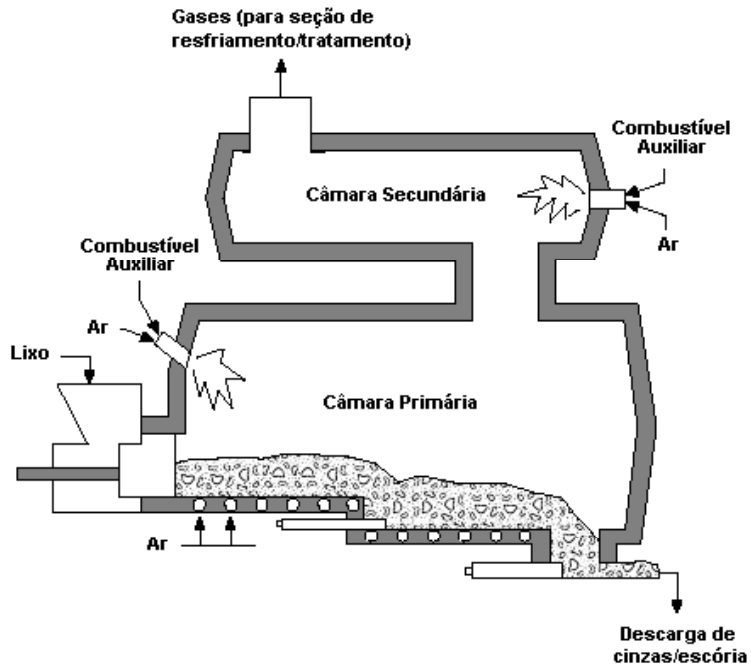


Figura 3 – Figura Ilustrativa de uma câmara de combustão de resíduos

Como os resíduos são produzidos e dispostos nas proximidades dos grandes centros urbanos, principais consumidores de energia, desconsidera-se o custo de transmissão de energia elétrica. Quanto ao custo de combustível, este será nulo, se for obtido a partir da recuperação do gás dos aterros, pois o custo de disposição final já terá sido pago, mas será negativo no caso dos resíduos serem utilizados por usinas cujas rotas tecnológicas evitem a disposição final da maior parte dos resíduos sólidos urbanos.

Os custos de investimento, de operação e manutenção, bem como as quantidades de combustível utilizadas, diferem de acordo com a tecnologia, como pode ser visto na tabela 6.

Tabela 6 – Dados das principais tecnologias

	DIGESTÃO ACCELERADA (DRANCO)	GÁS DE LIXO	INCINERAÇÃO
Toneladas/dia	200	300	500
MW	3	3	16
Investimento (US\$/kW)	1.500	1.000	1.563
Vida Útil (anos)	30	15	30
Prazo de Instalação (Meses)	9	12	18
Custo de Combustível (US\$/MWh)	-10.66	0	-8.18
Custo de Operação e Manutenção (US\$/MWh)	10.70	7.13	7.67

Fonte: elaboração própria

Algumas das rotas tecnológicas podem gerar sub-produtos que, caso não sejam comercializáveis, virão a onerar o sistema, reduzindo os custos negativos. Entretanto esta análise não será realizada neste trabalho, pois requer uma avaliação de mercado futuro, com vistas a identificar o potencial de escoamento da produção destes materiais. Outra alternativa que poderia ser considerada é a de doação dos sub-produtos, o que não incorre em nenhuma receita, bem como em nenhum custo extra ao empreendimento. Trata-se dos seguintes sub-produtos: o adubo orgânico na DRANCO e cinzas (que podem ser utilizadas na construção civil) na Incineração.

II – Metodologia

A metodologia para a análise destas tecnologias utilizou-se do Índice Custo-Benefício (ICB), considerando:

$$\text{ICB} = \text{CI} + \text{COM} + \text{CTI} + \text{CC}$$

Onde:

* **CI** – Custo Anual do Investimento na usina em \$/MWh, dado por:

$$\text{CI} = \frac{\text{IU} * \text{FR}}{\text{EG} * 8760}$$

IU: Custo Total do Investimento na usina, inclusive juros durante a construção, em \$;

FRU: Fator de Recuperação do Capital para a vida útil econômica da usina, expresso por:

$$\text{FRU} = \frac{i * (1 + i)^V}{(1 + i)^V - 1}$$

i = taxa anual de desconto;

V = vida útil em anos

EG: energia Garantida da usina em MW ano;

8760: número médio de horas no ano

* **COM** – Custo Anual de operação e manutenção na usina, em \$/MWh, dado por:

$$\text{COM} = \frac{\text{OMU} * \text{POT}}{\text{EG} * 8760}$$

OMU – custo anual de operação e manutenção na usina, em \$/MW/ano;

POT – potência instalada na usina em MW.

* **CTI** – custo anual de investimentos em transmissão em \$/MWh, dado por:

$$CTI = \frac{IT \cdot FRT}{EG \cdot 8760}$$

IT – investimento em transmissão, inclusive juros durante a construção, em \$;

FRT – fator de recuperação de capital para a vida útil econômica da transmissão.

* **CC** – custo anual de combustível da usina em \$/MWh, dado por:

$$CC = CUT \cdot REND$$

CUT – custo unitário do combustível em \$/t ou \$/m³;

REND – consumo específico médio da usina em t/MWh ou m³/MWh.

A aplicação dos dados da Tabela 6, já apresentada, à metodologia apresentada acima, permite obter os custos da energia gerada por cada tecnologia, que estão apresentados na Tabela 7. a seguir:

Tabela 7. Índice custo benefício das tecnologias propostas

Índice Custo Benefício (US\$/MWh), com taxa de desconto de 20% ao ano, sem impostos.	
GÁS DO LIXO	46.34
DRANCO	45.70
INCINERAÇÃO	43.61

FONTE: Elaboração Própria

Uma outra variável importante, por conta dos acordos internacionais que permitem a comercialização de créditos de carbono, é a que diz respeito à redução de emissões de gases do efeito estufa. O aproveitamento energético do lixo é reconhecido como uma das iniciativas com maior potencial neste sentido, por reunir a inibição de duas das principais fontes poluidoras: o metano

oriundo da decomposição do lixo e o dióxido de carbono proveniente da queima do gás natural para geração elétrica.

Como cenário de referência foram incluídos dois setores da atividade econômica, sendo necessário detalhar cada um deles. O primeiro é o setor de tratamento de resíduos, cuja realidade brasileira exposta pela 2ª Pesquisa Nacional de Resíduos Sólidos (PNSB), realizada pelo IBGE em 2000, mostrou que o metano raramente é recuperado e queimado. Utilizando-se a metodologia do IPCC (1996) para cálculo do metano, obtém-se que a cada tonelada de lixo, com a composição típica brasileira, emite-se 6,5% de metano, cujo potencial de aquecimento global (GWP), fator de normalização com relação ao dióxido de carbono, para o período de 100 anos, é 21. Entretanto, o GWP pode ser considerado 20, pois uma unidade será reabsorvida pela fotossíntese quando da próxima safra da biomassa que compõe o lixo e que é decomposta. Isto significa que cada tonelada de lixo, disposta em aterro sem recuperação e tratamento do biogás, emite 1,3 tonelada de dióxido de carbono equivalente.

Já a expansão do setor elétrico brasileiro está fundamentada em usinas termelétricas a gás natural em ciclo combinado (Presidência da República, 2001), com fator de emissão de 449 toneladas de CO₂ por gigawatthora (IPCC, 1996).

Para conhecer a emissão evitada pelo aproveitamento energético de cada rota tecnológica é preciso considerar suas eficiências individuais. Sabendo-se que cada unidade energética consome uma determinada quantidade de lixo e evita uma unidade energética gerada com gás natural, encontra-se a emissão evitada por unidade energética gerada por rota tecnológica, como mostra a tabela 8.

Tabela 8 – . Emissões evitadas por cada tecnologia

	GDL	INCINERAÇÃO	DRANCO
t lixo/ MWh	4,2	1,3	2,8
Emissão evitada pelo consumo do lixo (t CO ₂ eq/MWh)	5,41	1,50	3,61
Emissão evitada pela substituição do gás natural (t CO ₂ /MWh)	0,449	0,449	0,449
Emissão evitada (t CO ₂ /MWh) TOTAL	5,87	1,95	4,06

Fonte:elaboração própria

Considerando-se que cada tonelada de dióxido de carbono, negociada no mercado internacional, esteja variando entre US\$ 1 e US\$ 5 (BNDES, 1999), pode-se acrescentar uma redução no custo de cada unidade energética gerada, por cada rota tecnológica, como mostra a tabela 9.

Tabela 9 – Receita potencial com o carbono evitado (US\$/MWh)

	GDL	INCINERAÇÃO	DRANCO
Considerando US\$ 1/ t CO ₂	5,87	1,95	4,06
Considerando US\$ 5/ t CO ₂	29,35	9,75	20,30

Fonte: Elaboração Própria

Estes valores, descontados dos custos apresentados na tabela 7, permitem a construção da Tabela 10.

Tabela 10 – Custos da energia considerando receita do carbono evitado

Índice Custo Benefício (US\$/MWh), com taxa de desconto de 20% ao ano, sem impostos, descontada a receita com créditos de carbono.			
	US\$ 1/tCO ₂	US\$ 2/t CO ₂	US\$ 5/t CO ₂
GÁS DO LIXO	40,47	34,60	16,99
DRANCO	43,75	41,80	35,95
INCINERAÇÃO	42,61	41,61	38,61

Fonte:elaboração própria

Convém comparar estes valores com os custos da energia gerada nas usinas termelétricas a gás natural, tanto as usinas já em funcionamento e quanto àquelas que estão em construção. Os custos de energia gerada por essas usinas apresentam-se na faixa de US\$ 43,32/MWh. Este resultado foi obtido aplicando à metodologia a mesma taxa de desconto de 20%, custo de investimento de US\$ 625,00/kW (OLIVEIRA, 2000), com dois anos de construção e custos de operação e manutenção de US\$ 7,00/MWh (idem).

A Tabela 10 mostra que, com a comercialização da tonelada do carbono equivalente a US\$ 2 todas as alternativas de aproveitamento energético do lixo ficam mais baratas que a energia gerada através de usinas termelétricas a gás natural em ciclo combinado.

A tendência é que os custos de tratamento de resíduos sejam ampliados, já que os baixos custos atuais de utilização dos vazadouros de lixo devem-se a dois fatores principais: quando foram iniciados, havia menos exigências ambientais (e, portanto, menos custos) e suas distâncias dos centros urbanos serem menores que quaisquer das áreas atualmente disponíveis para futuras expansões. Com isto, as tecnologias que aproveitarem energeticamente os resíduos, evitando sua destinação final para os vazadouros novos, aumentarão o impacto do custo negativo de combustível no índice custo benefício.

Por outro lado pode ser considerada a manutenção da tendência de aumento dos preços dos combustíveis fósseis, particularmente do gás natural, que mesmo quando não-associado ao petróleo, costuma acompanhar o seu

preço. Estes dois fatores reunidos consolidarão a oportunidade das tecnologias capazes de aproveitar a energia do lixo.

III – Objetivo

Este artigo tem como objetivo mostrar que as tecnologias para geração de energia com resíduos são viáveis economicamente além de terem grandes benefícios ambientais.

Dentre os benefícios ambientais trazidos pela geração de energia com biomassa, destacam-se, para este artigo, aqueles relacionados ao aquecimento global. Neste caso específico, a emissão evitada de CO₂ em função de uma determinada quantidade de resíduos sólidos reutilizada como insumo no processo produtivo – e da conseqüente quantidade de energia conservada através do processo de geração de energia alternativa.

IV – Considerações Finais

Em vista do apresentado, surge uma tendência de que os custos de tratamento de resíduos sejam ampliados, já que os baixos custos atuais de utilização dos vazadouros de lixo devem-se a dois fatores principais: quando foram iniciados, havia menos exigências ambientais (e, portanto, menos custos) e suas distâncias dos centros urbanos serem menores que quaisquer das áreas atualmente disponíveis para futuras expansões. Com isto, as tecnologias que aproveitarem energeticamente os resíduos, evitando sua destinação final para os vazadouros novos, aumentarão o impacto do custo negativo de combustível no índice custo benefício.

Nas tabelas analisadas vê-se que todas as tecnologias têm a relação custo benefício semelhante. A tecnologia que tem maior eficiência, ou seja, a que gera a mesma quantidade de energia com a menor quantidade de resíduos é a incineração, seguida por DRANCO e GDL. A maior quantidade de emissões evitadas (ton de CO₂/ MWh) é conseguida por GDL, DRANCO e incineração nesta ordem (5,87; 4,06 e 1,95 respectivamente). Seguindo esta análise, a

maior receita provinda da comercialização dos certificados de carbono (CER's) vem na mesma sequência acima.

Por outro lado pode ser considerada a manutenção da tendência de aumento dos preços dos combustíveis fósseis, particularmente do gás natural, que mesmo quando não-associado ao petróleo, costuma acompanhar o seu preço. Estes dois fatores reunidos consolidarão a oportunidade das tecnologias capazes de aproveitar a energia do lixo.

Artigos sobre como Instrumentos Econômicos podem ser utilizados para reduzir a produção de lixo já foram desenvolvidos e a idéia de que resíduos sólidos urbanos podem ser utilizados para produzir energia já está bem consolidada.

Acredita-se que a médio-curto prazo algumas tendências neste sentido tem evoluído e possivelmente em pouco tempo deverão ser adotadas como fontes alternativas de energia proveniente de resíduos.

V – Bibliografia

BNDES (2002). *Programa para Apoio Financeiro a Investimentos em Energia*. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, acessado em 30/06/2002, disponível em <http://www.bndes.gov.br/produtos/financiamento/energia.asp>.

CETESB (1998) *Inventário Nacional de Emissões de Metano pelo Manejo de resíduos – Enabling Brazil to Fulfill its commitments to the United Nations Convention on Climate Change* – vol. I – Relatório Final – Julho/ 1998

ETHERIDGE, S.P.(2003). *Biogás Use in Industrial Anaerobic Wastewater Treatment*, Environmental Biotechnology Limited, CETESB, April, 2003

IPCC (1996). Intergovernmental Panel on Climate Change Greenhouse gas inventory reference Manual, revised – chapter 6 – Waste, 1996

MOTTA, S.R e SAYAGO, D. E.(1998) *Proposta de instrumentos Econômicos Ambientais para a Redução do Lixo Urbano e Reaproveitamento de Sucatas no Brasil* IPEA – Rio de Janeiro

MUYLAERT, M. (COORD.) *et alli* (2000) *Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta – Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – Estudo de Caso*. COPPE/UFRJ – 1999/2000

OLIVEIRA, L.B.(2000). *Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos e Abatimento de Gases do Efeito Estufa* – PPE/COPPE/UFRJ –Rio de Janeiro Setembro/2000.

OLIVEIRA, L., HENRIQUES, R., PEREIRA, A. (2002). *Coleta Seletiva, Reciclagem e Conservação de Energia*. IX CBE, vol. 3, pg. 1461, Rio de Janeiro, Maio/2002

PNSB (2000) – *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*, IBGE, Rio de Janeiro, Brasil – 2000

PNAD(2001) – *Pesquisa Nacional de Amostra Domiciliar*, IBGE, Rio de Janeiro, Brasil – 2001

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (2001). *Resolução nº 23, de 5 de julho de 2001- Confere prerrogativas do Programa Prioritário de Termelétricidade - PPT, a empreendimentos de geração termelétrica*. CÂMARA DE GESTÃO DA CRISE DE ENERGIA ELÉTRICA, Brasília, D.F. Disponível em www.energiabrasil.gov.br/resolucoes/resolucao_23.asp, acessado em 04/06/2002.

ROSA, L.P.(2001) *O apagão – Por que veio? Como sair dele?* Editora Revam – 1ª edição – Rio de Janeiro

WILLUMSEN, H.C.(1999) *Energy recovery from landfill gas in Denmark and Worldwide*, LGF Consult, Denmark,