



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GPT/04
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO-II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

**CONCEPÇÃO E AVALIAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE UMA USINA INTEGRADA DE GERAÇÃO
DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS**

José Geraldo de Melo Furtado (*)
CEPEL

Ricardo Ramos Wanderley
UFRJ

RESUMO

A crescente produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) se constitui num atual grave problema ambiental, com negativos impactos socioeconômicos, em função da redução das áreas para a disposição destes resíduos. Assim, a possibilidade de aproveitamento dos RSU para a geração de energia elétrica representa a conjugação da valorização destes materiais residuais, da mitigação de problemas ambientais e do incremento da geração de energia.

Este trabalho tem por objetivo apresentar os principais resultados e análises acerca da concepção e estabelecimento do projeto conceitual de uma usina de geração de energia, com foco em centros urbanos, caracterizada principalmente pelos diferenciais de elevada integração de rotas tecnológicas bioquímicas e termoquímicas, minimização de emissões e geração energética de alta eficiência.

PALAVRAS-CHAVE

Geração Distribuída, Integração Energética, Resíduos Sólidos Urbanos, Cogeração, Combustíveis de Resíduos

1.0 - INTRODUÇÃO

A urbanização da população é um fenômeno atualmente observado em escala mundial (1). Dessa forma, a crescente produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) se constitui num atual grave problema ambiental, com negativos impactos socioeconômicos, em função da redução das áreas para a disposição destes resíduos (2, 3). O uso descontrolado de grandes áreas nas vizinhanças das cidades como lixões e aterros intensifica as emissões de gases provenientes de aterros, contribuindo significativamente para o efeito estufa em virtude dos seus elevados teores de metano (2-5). Em países em desenvolvimento e emergentes, em função de restrições econômico-financeiras, a disposição inadequada de RSU é uma constante (3). Paralelamente, em âmbito nacional, a recente legislação sobre resíduos sólidos (Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305/2010), preconiza que os municípios devem elaborar planos de ação acerca do gerenciamento e destinação desses resíduos (6).

Neste macrocenário, a possibilidade de aproveitamento dos RSU para a geração de energia elétrica representa a conjugação da valorização destes materiais residuais, da mitigação de problemas ambientais e sociais, bem como do incremento da geração de energia elétrica. Contudo, a garantia da economicidade desta forma alternativa de geração de energia elétrica é fundamental para a sua efetiva adoção como opção tecnológica de geração de energia e de destinação de RSU, para determinados nichos de mercado, mormente no âmbito da Geração Distribuída (GD) de energia elétrica, em função da atual tendência de procura por meios de geração de menor porte, com menores impactos ambientais e por elevadas eficiência, qualidade e confiabilidade da energia elétrica gerada, especialmente nas áreas e vizinhanças de grandes aglomerações urbanas (4, 5, 7).

(*) Avenida Horácio Macedo, nº 354 – sala 121 – DTE – CEP 21.941-911 Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6069 – Fax: (+55 21) 2280-3537 – Email: furtado@cepel.br

Dessa forma, dentre as diversas opções tecnológicas para geração de energia a partir de resíduos sólidos, aquelas que apresentam altos níveis de integração, recuperação e eficiência energética, além de compacticidade e modularidade, tendem a serem vistas como mais adequadas para as proximidades dos grandes centros urbanos, típicas regiões de grande produção de RSU e de intenso consumo de energia elétrica. Dentro deste escopo, o presente trabalho apresenta os principais resultados e análises acerca da concepção e estabelecimento do projeto conceitual de uma usina de geração de energia, no âmbito da GD, com foco em centros urbanos, caracterizada principalmente pelos diferenciais de elevada integração de rotas tecnológicas, minimização de emissões e alta eficiência energética.

2.0 - TECNOLOGIAS

De uma forma geral, conforme considerado no diagrama esquemático mostrado na Figura 1, as principais tecnologias que têm sido consideradas para o aproveitamento do conteúdo energético de resíduos, e em especial dos RSU, para a geração de energia elétrica (EE) dividem-se em dois grandes grupos: (i) os processos que resultam na produção de misturas gasosas ricas em metano mediante a decomposição bioquímica anaeróbica (DBA) da matéria orgânica presente nos RSU e (ii) os processos termoquímicos de tratamento direto dos RSU ou de fração destes, os quais resultam na produção de combustíveis derivados de resíduos (CDR) que tanto podem ser líquidos quanto gases.

Em função das características dos RSU, dos pré-tratamentos requeridos, das possibilidades de conjugação com outros tipos de resíduos e, principalmente, das características construtivas dos sistemas e equipamentos que são empregados, os dois macro-grupos supracitados se dividem em diversas tecnologias de processamento (TP) específicas. Contudo, em ambos os casos, o que estes processos fazem é produzir misturas de fluidos, que podem apresentar composição química e conteúdo energético diversos, as quais podem ser empregadas em sistemas termelétricos convencionais de geração de energia, com ou sem cogeração, ou mesmo em sistemas de geração com células a combustível, quando convenientemente purificadas (7, 8). A escolha da tecnologia de geração de EE depende de vários fatores e irá determinar a viabilidade técnico-econômico-ambiental do empreendimento, mediante o valor do custo da energia elétrica gerada (CEE) e de seus benefícios secundários.

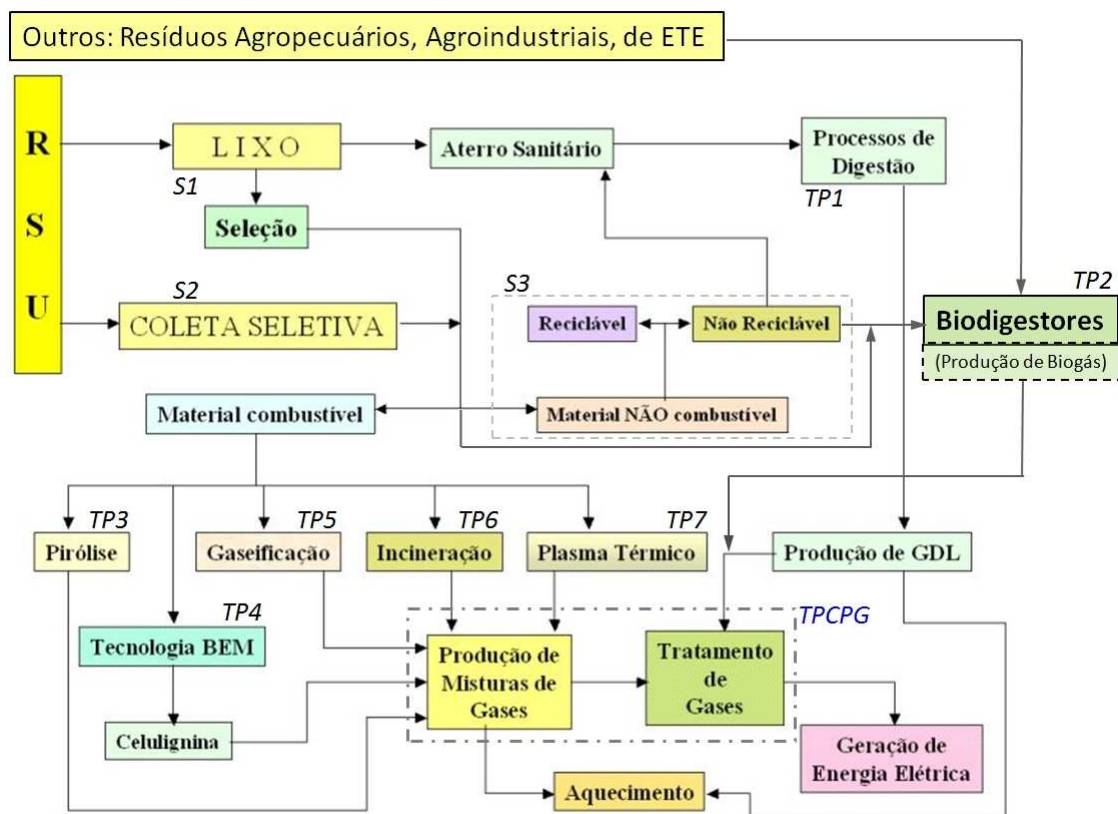


FIGURA 1 – Rotas tecnológicas para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos (RSU).

Com base no diagrama da Figura 1 verifica-se que a tecnologia de produção de gás de lixo (GDL), *TP1*, – também conhecido como gás ou biogás de aterro ou simplesmente biogás, embora esta denominação seja mais adequada

para o gás resultante da decomposição de resíduos específicos em biodigestores, *TP2* – é a tecnologia de base bioquímica, conforme anteriormente considerado, e as demais (Pirólise – *TP3*, Tecnologia BEM – *TP4*, Gaseificação – *TP5*, Incineração – *TP6* e Plasma Térmico – *TP7*) constituem o grande grupo das tecnologias baseadas em tratamentos termoquímicos dos RSU, as quais podem ainda assumir combinações com vários tipos de pré-processamento e seleção do resíduos (identificados como *S1*, *S2* e *S3* na Figura 1) e mesmo uma composição entre elas.

Conforme também ressaltado na Figura 1, seja qual for a rota tecnológica de processamento (*TP*) dos RSU para geração (cogeração) de energia elétrica, é imprescindível o tratamento das misturas gasosas e/ou CDR resultantes (etapa identificada como *TPCPG* – tecnologias de processamento, condicionamento e purificação de gases) previamente a sua alimentação aos processos de geração ou cogeração propriamente ditos. Tal etapa pode representar uma parcela bastante significativa do investimento total da unidade, bem como dos custos de manutenção, em função da agressividade dos gases e misturas sólido-gás produzidas, as quais favorecem fortemente o desenvolvimento de processos corrosivos e erosivos, além de representarem riscos ambientais (p. ex. emissões de dioxinas e furanos) (3-5).

No diagrama da Figura 1 a produção de GDL envolve a decomposição anaeróbia dos RSU dispostos em aterros sanitários (*TP1*), sendo um processo que tem encontrado grande aceitação, principalmente nos países em desenvolvimento, em virtude de ser uma tecnologia que permite a estabilização dos RSU a custo relativamente baixo. Em linhas gerais, trata-se da disposição e compactação dos RSU em camadas estratificadas a partir das quais ocorre a lenta produção de GDL mediante a DBA resultante da atividade microbiana. O GDL produzido é, essencialmente, composto por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), apresentando ainda outros gases, como nitrogênio, oxigênio e compostos sulfurados. Existem diversas formas construtivas do sistema de coleta para captura e transporte do GDL produzido, constituindo-se nas variantes da tecnologia; bem como detalhes construtivos que permitem maximizar a produção e coleta do GDL (como a utilização de cobertura impermeável), os quais, contudo, resultam em significativo incremento nos custos do sistema. O processo apresenta claros benefícios ambientais (uma vez que possibilita a captura e uso do metano – principal gás causador do “efeito estufa” – que de outra forma seria lançado na atmosfera), sendo, contudo, um processo de baixa eficiência quanto ao aproveitamento do GDL produzido, tanto devido às perdas no processo de coleta do gás, que, em geral, são elevadas (entre 10 e 40%) (8), quanto pelo fato de que o GDL é um combustível de baixo ou médio conteúdo energético. No entanto, o desenvolvimento de motores específicos para a combustão do GDL tem possibilitado seu maior aproveitamento energético (4). Em se tratando do gás produzido em aterros sanitários o emprego mais comum é de motores geradores convencionais e turbinas a gás e, em grandes aterros, usam-se turbinas a vapor. A eficiência da geração elétrica varia de 20 a 50%, o que pode ser incrementado adotando-se sistemas de cogeração.

De uma forma geral, as tecnologias de incineração (*TP6*) – empregando temperaturas elevadas que proporcionam a combustão dos resíduos, mediante sua queima direta – têm como principal vantagem a possibilidade de reduzir consideravelmente o volume total dos resíduos a serem destinados aos aterros sanitários, não gerando um passivo ambiental para as gerações futuras, apresentando ainda elevadas eficiências de conversão da energia dos RSU. Os resíduos do processo podem ainda apresentar elevado grau de inertização. Também os processos de incineração de RSU apresentam grande diversidade de opções tecnológicas em função, principalmente, dos tipos de resíduos processados e do tipo de forno empregado (rotativos, horizontais, leito fixo ou fluidizado). A principal forma de aproveitamento energético mediante a incineração de RSU é a utilização de sistemas à base de turbinas a vapor, características de centrais termoelétricas convencionais.

Em virtude de ocorrer a queima completa dos resíduos, resultando em grandes volumes de gases com amplo espectro de composição química, torna-se indispensável um sistema de tratamento dos gases de exaustão e, em função das crescentes preocupações ambientais, um rigoroso controle de emissões de poluentes extremamente nocivos, tais como monóxido de carbono (CO), CO_2 , NO_x , SO_x , derivados halogenados, dioxinas, furanos e material particulado. Tais sistemas contribuem para a elevação do investimento e dos custos operacionais e de manutenção das plantas. Com a incineração controlada dos RSU é possível, com 150 toneladas diárias, gerar cerca de 3,3 MWh/dia (9).

Tanto as tecnologias de pirólise controlada (*TP3*) e gaseificação (*TP5*) quanto as tecnologias de plasma térmico (*TP7*) podem ser consideradas no âmbito das tecnologias de incineração, em função de suas semelhanças com o processo clássico de incineração. No processo de gaseificação por pirólise (decomposição térmica), o gás produzido num reator ou gaseificador pirolítico passa por processos de troca térmica e limpeza para adequação de temperatura e composição química e pode ser alimentado a caldeiras (*boilers*) ou mesmo turbinas a gás. A eficiência térmica global característica do processo de gaseificação (caracterizada por equipamentos mais compactos, dando maior flexibilidade de operação à planta) é superior àquela característica dos processos tradicionais de incineração (uma vez que se pode atingir temperaturas mais elevadas, sem comprometer a integridade da planta) e, principalmente, proporciona melhor controle de emissões. Tanto a pirólise quanto a gaseificação convertem os resíduos em materiais combustíveis ricos em energia aquecendo os resíduos sob condições controladas. Enquanto a incineração converte os resíduos totalmente em energia e cinzas, estes processos limitam deliberadamente a conversão, para que a combustão não ocorra diretamente.

Diferentemente dos processos tradicionais de incineração, na pirólise não há formação de cinzas, o material sólido resultante encontra-se vitrificado e, em geral, corresponde a cerca de 10% da massa original alimentada ao processo, podendo encontrar aplicação como insumo na área de construção civil. A pirólise é a degradação térmica de materiais carbonosos em temperaturas que oscilam entre 400 e 800°C, na ausência total de oxigênio ou com uma quantidade muito limitada deste gás. Este processo volatiliza e decompõe materiais orgânicos sólidos por meio do calor e não do fogo (incineração). Quando os resíduos são pirolisados (ao contrário de quando são queimados num incinerador), geram restos gasosos, líquidos e sólidos. Os resíduos sólidos são uma combinação de materiais não combustíveis e carbono. O gás de síntese produzido é uma mistura de gases, rica em monóxido de carbono e hidrogênio, apresentando ainda metano e uma vasta gama de outros compostos orgânicos voláteis. O gás de síntese (GS) tem um poder calorífico de 10 a 20 MJ/Nm³. A fração que se condensa pode ser recolhida e utilizada como combustível líquido. Tanto o GS quanto o efluente líquido são considerados CDR.

No processo de gaseificação ocorre a conversão dos combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações termoquímicas, envolvendo vapor aquecido e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão) numa câmara ou reator de gaseificação. Existem vários tipos de gaseificadores, apresentando grandes diferenças operacionais quanto à temperatura e/ou pressão. Os mais comuns são os reatores de leito fixo e, principalmente, de leito fluidizado. O gás resultante é uma mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio, cujas proporções variam de acordo com as condições do processo, particularmente se é ar ou oxigênio puro que está sendo usado na oxidação. Esse gás, depois de esfriado e tratado (limpo), sente então um CDR, pode, p. ex., ser alimentado a um motor a combustão interna acoplado a um gerador elétrico (moto gerador). A extração de máxima energia de um determinado combustível depende da eficiência da mistura deste com o oxigênio ou ar, e esta mistura é favorecida no caso de se utilizar combustíveis gasosos. Por isso a conversão dos RSU em combustíveis gasosos, mediante a operação de gaseificação, é considerada uma das melhores opções de geração de energia a partir dos RSU. O processo de gaseificação contorna os graves problemas de emissões de poluentes dos métodos ordinários de incineração. Este processo encontra-se entre a pirólise e a combustão (incineração convencional), posto que implica na oxidação parcial de uma substância. O oxigênio é acrescentado, mas não em quantidade suficiente para que produza uma combustão total. As temperaturas envolvidas são, em geral, superiores a 750°C. Quanto aos custos envolvidos em plantas de pirólise e gaseificação, alguns autores (5, 10, 11) indicam que os custos operacionais são elevados, principalmente aqueles relacionados ao sistema de limpeza dos gases.

A tecnologia de plasma térmico utiliza sistemas de tocha a plasma térmico que proporcionam a destruição dos RSU, produzindo gás de síntese, o qual pode ser empregado em sistemas de geração termelétrica convencional ou, após tratamento, até mesmo em sistemas de geração elétrica à base de células a combustível de alta temperatura (7, 8). Assim como nos processos clássicos de incineração, o resíduo produzido (material inertizado, essencialmente vitrificado, resultante da parte inorgânica dos RSU alimentados ao processo), representando um volume significativamente menor (em geral, cerca de 92-96% menor) do RSU original, também possui valor agregado e pode ser empregado na construção civil ou, dependendo dos tipos e homogeneidade dos RSU originais, podem também ser utilizados na recuperação de constituintes ou materiais industrialmente valiosos (12).

A tecnologia de plasma térmico baseia-se na formação de um plasma mediante o aquecimento de uma corrente gasosa, sendo, essencialmente, um processo de destruição térmica com cogeração. Com efeito, quando um gás é aquecido a cerca de 2000°C, suas moléculas começam a se dissociar em átomos. A 3000°C, os átomos são ionizados pela perda de parte dos elétrons. Este gás ionizado é chamado de plasma. O gás sob o estado de plasma apresenta boa condutividade elétrica e alta viscosidade quando comparado a um gás no estado normal. Esta tecnologia foi desenvolvida visando-se inicialmente a aplicação na destruição de resíduos perigosos; contudo, atualmente, tem ampliado o campo de aplicação para o tratamento de RSU de uma forma geral. Apesar do elevado consumo de eletricidade na produção do plasma, a combustão dos gases resultantes do processo de gaseificação permite a produção de energia elétrica. O balanço energético final é, em geral, positivo e equivalente a uma capacidade da ordem de 700 kW/tonelada de RSU (8,13). Os produtos retidos nos sistemas de lavagem (soda cáustica ou cal), podem ser introduzidos na câmara de tratamento sendo assim incorporados nas escórias vitrificadas, tornando possível ter-se apenas um único tipo de resíduo, a escória vitrificada. Uma instalação deste tipo, dado o elevado consumo de energia elétrica, faz sentido para o tratamento de grandes volumes de resíduos, tipicamente RSU em grandes cidades, acoplada a uma central termelétrica. Trata-se, portanto, de uma solução alternativa às incineradoras de resíduos urbanos.

3.0 - SISTEMA INTEGRADO: METODOLOGIA E RESULTADOS

Tendo-se em vistas as tecnologias e processos acima considerados para o tratamento de RSU e que resultam em insumos energéticos que podem ser empregados na geração de energia, os diversos atores envolvidos (municipalidades, instituições de pesquisa e desenvolvimento, empresas, organismos governamentais) têm procurado não apenas selecionar as opções a serem utilizadas nos diversos casos e aplicações existentes, mas também em reduzir os custos financeiros e ambientais envolvidos mediante a otimização da eficiência energética desses processos. Assim, a possibilidade de conjugar as tecnologias de processamento supracitadas de forma a minimizar o impacto sócio-econômico-ambiental dos RSU e, concomitantemente, incrementar a disponibilização de EE para a sociedade tem sido vista como uma meta de grande importância, notadamente no sentido do estabelecimento de uma economia de baixo carbono e intensiva em EE no médio-longo prazo (4, 14).

Dessa forma, tem-se considerado plantas de tratamento de RSU e geração de EE que podem ser representadas pelo diagrama de blocos conceitual mostrado na Figura 2. Este é, evidentemente, um diagrama genérico e, para muitos casos específicos de aplicação, ter-se-á apenas partes ou segmentos em implementação. Não obstante, o diagrama da Figura 2 tem a finalidade de representar a conjugação dos processos e tecnologias de forma a otimizar a relação entre tratar RSU e gerar EE.

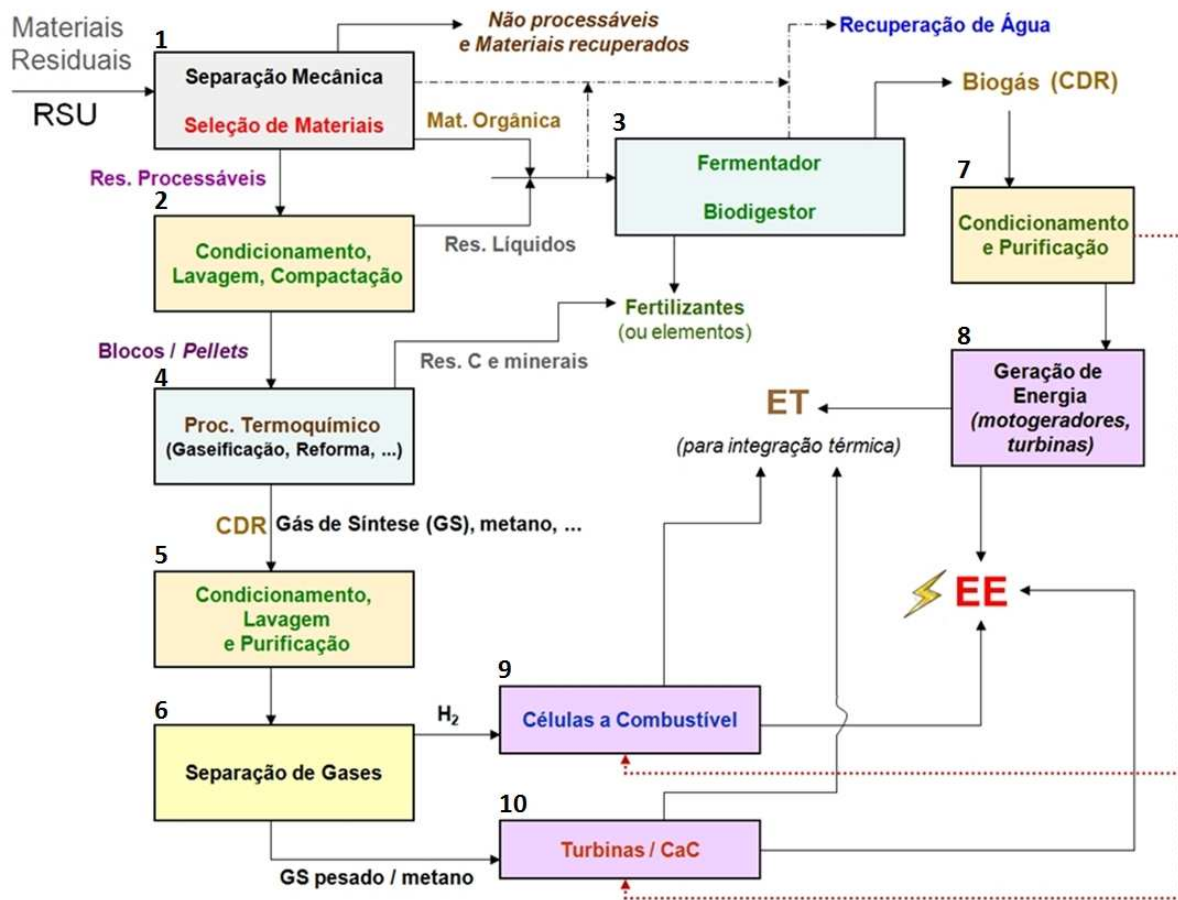


FIGURA 2 – Diagrama de blocos representando esquematicamente uma usina integrada de geração de energia a partir de materiais residuais (resíduos sólidos urbanos).

Assim, a planta representada na Figura 2 tem um caráter modular com elevado grau de integração material-energética e visa à geração de EE a partir de RSU, minimizando emissões, pois trabalha com coleta e inertização de cinzas e particulados e com sistemas gasosos operando essencialmente em circuito fechado, com sistema de triagem e classificação integrado, podendo ser alimentada diretamente a partir da coleta urbana, prescindindo assim da existência de aterros sanitários locais, apresentando concomitante produção de fertilizantes oriundos de resíduos de fermentação (processos de DBA). Biogás, gás de síntese e hidrogênio são os intermediários energéticos gasosos considerados, todos com produção e consumo local, mediante a conjugação de diversas opções de geração (moto geradores, turbinas, células a combustível), incluindo aproveitamento da energia térmica (ET) associada aos gases residuais, resultando no aumento da eficiência energética e na considerável redução dos impactos ambientais, tanto no que diz respeito à emissão de poluentes quanto à minimização do consumo de água em comparação com a geração termelétrica tradicional.

Os blocos 1 e 2 na Figura 2 representam o pré-tratamento que os RSU devem passar para produzir o material adequado aos processos de geração dos CDR (blocos 3 e 4), os quais, por sua vez, após condicionamento e purificação (blocos 5, 6 e 7) alimentarão os processos de geração de EE (blocos 8, 9 e 10). As etapas de pré-tratamento (PT) são consideradas na Figura 3 e compreendem a separação e condicionamento dos resíduos, bem como a agregação ou formulação dos blocos ou *pellets* de materiais que serão empregados a jusante no processo. Água rica em compostos orgânicos (e, portanto, representando uma demanda química de oxigênio, DQO) é retirada nas etapas “a” e “d” (Figura 3) e podem ser agrupadas e/ou ponderadas gerando correntes aquosas ricas em matéria orgânica como a “f” que pode ser encaminhada aos processos de DBA (bloco 3 da Figura 2). A etapa “b” apenas remove os materiais muito grosseiros, ao passo que metais e materiais muito densos são comumente separados nas etapas “c” e “e”. A sequência formada por PT4, PT5, PT6 e PT7 resulta nos blocos/pellets (fluxo “g”) que serão alimentados ao processamento termoquímico (bloco 4 da Figura 2).

A recuperação de materiais realizada em “b”, “c”, “e” e “n” pode também se constituir numa importante fonte de receita da planta, mediante reutilização e reciclagem dos materiais residuais em questão. Evidentemente, principalmente quanto aos materiais plásticos recicláveis, este é um ponto importante para o balanço econômico-energético-ambiental da planta, pois deve-se otimizar as relações entre incremento da geração de energia, redução das emissões e ganhos advindos da reciclagem.

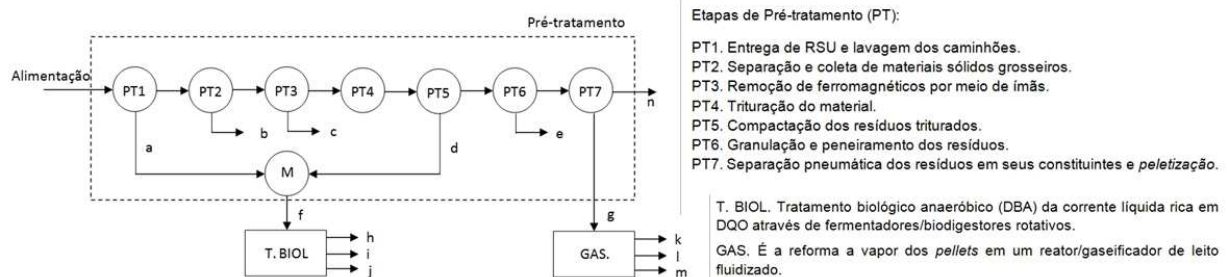


FIGURA 3 – Diagrama de blocos simplificado do processo de pré-tratamento dos RSU. Identificação: (a) corrente líquida rica em matéria orgânica, (b) materiais grosseiros presentes nos RSU, (c) materiais ferromagnéticos presentes nos RSU, (d) corrente líquida rica em matéria orgânica, (e) metais não ferromagnéticos, rochosos, etc. nos RSU, (f) conjugação das correntes (a) e (d) para o T. BIOL., (g) *pellets* formados pela agregação seletiva de material separado em PT7 para alimentação ao GAS., (h) corrente gasosa rica em metano, (i) corrente líquida ainda com DQO que precisa ser tratada, (j) lodo residual que pode ser utilizado como fertilizante, (k) corrente gasosa rica em hidrogênio (gás de síntese), (l) corrente líquida residual que precisa ser tratada, (m) material residual e/ou não reagido no gaseificador, (n) materiais plásticos separados que podem ir para a reciclagem.

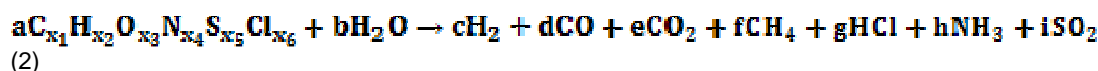
As correntes “f” e “g” da Figura 3 representam então os insumos energéticos que serão alimentados, respectivamente, aos processos de DBA (bloco 3, Figura 2) e termoquímicos (bloco 4, Figura 2). No que diz respeito à digestão anaeróbica ou biometanização, existem diversas possibilidades tecnológicas. Notadamente importante é a avaliação do teor de sólidos. Particularmente, a rota por via seca, caracteriza-se pelo elevado teor de sólidos, possibilitando a construção de plantas compactas, muito bem integradas e de alta eficiência de produção de biogás/biometano, proporcionando ainda a redução de impactos ambientais. Mas, mesmo esta rota apresenta variantes tecnológicas e diferentes projetos de engenharia. Contudo, projetos envolvendo outras alternativas tecnológicas no âmbito da biodigestão continuam em andamento ao redor do mundo, o que evidencia a importância da seleção da tecnologia para atender aos objetivos de um determinado projeto, com seu perfil característico de resíduos alimentados, bem como das condições externas e suas influências no condicionamento e controle dos agentes microbiais (8). Já quanto aos processos térmicos ou termoquímicos, os projetos clássicos de simples queima de resíduos não têm mais lugar no mundo contemporâneo devido às crescentes restrições de ordem ambiental, de forma que as plantas compactas e de alta eficiência de recuperação energética tendem a se sobressair, desde que possam garantir a inertização dos resíduos (produção de cinzas) e a compatibilidade das emissões atmosféricas com a vida urbana, bem como sua viabilidade econômica.

No presente estudo, a partir das operações unitárias e dos equipamentos típicos envolvidos nas representações das Figuras 2 e 3 (15-17) foi possível estimar as capacidades e balanços energéticos nas diferentes etapas. Para a determinação do teor total de água envolvida no processo considerou-se que, no Brasil, teor de umidade nos RSU é da ordem de 60% sobre a parcela orgânica/biomassa (3, 4, 8), a qual, por sua vez, representa tipicamente 60% do conteúdo mássico dos RSU no Brasil; sendo o restante formado por 5% de inertes e 35% de potencialmente recicláveis (papéis 18%, plásticos 12%, vitrocerâmicos 3% e metais 2%) (3, 4). Então, para a biometanização, pode-se estimar a conversão a metano (Y) por:

$$Y_{F/s}^T = \frac{\alpha_s \gamma_s}{\alpha_p \gamma_p} \quad (1)$$

Onde $\alpha = \frac{M_C}{M}$ (M_C é a massa molar do carbono e M é a massa molar de um C-mol do composto considerado) e $\gamma = 4 + a - 2b - 3z$ (da fórmula molecular do composto na forma $CH_aO_bN_z$). O índice “s” se refere ao substrato e o índice “p” se refere ao produto (18). Para o composto considerou-se que a matéria orgânica pode ser aproximada pela mesma fórmula molecular encontrada para a madeira ($C_{0,25}H_{0,50}O_{0,25}$).

A composição dos *pellets* é de grande importância, uma vez que estes são o insumo energético dos processos termoquímicos e influenciam fortemente a eficiência energética da planta. Essa composição pode ser aproximada por uma fórmula genérica em virtude da reação:



A qual representa justamente o processo de reforma a vapor do composto considerado. A partir das igualdades estequiométricas entre os átomos envolvidos e das restrições sobre o total das frações molares pode-se minimizar as necessidades energéticas do processo a partir da variação de entalpia associada à reação (2). Assim, como os *pellets* são formados a partir da combinação de diferentes resíduos separados mecanicamente, se pode estimar alguns exemplos de resíduos típicos e suas respectivas composições molares conforme considerado na Tabela 1.

Tabela 1 – Alguns resíduos típicos e suas composições (molares e mássicas nos *pellets*)

Resíduo	Composição molar	Composição dos <i>pellets</i> (% mássica)
PET (politereftalato de etileno)	$C_{0,455}H_{0,364}O_{0,181}$	$11,4 \pm 0,5$
PS (poliestireno)	$C_{0,500}H_{0,500}$	$3,0 \pm 0,3$
PE (polietileno)	$C_{0,333}H_{0,667}$	$2,5 \pm 0,2$
PVC (policloreto de vinila)	$C_{0,333}H_{0,500}Cl_{0,167}$	$5,8 \pm 0,2$
PP (polipropileno)	$C_{0,500}H_{0,500}$	$3,6 \pm 0,3$
PC (poli carbonato)	$C_{0,485}H_{0,434}O_{0,091}$	$4,9 \pm 0,4$
Celulose	$C_{0,286}H_{0,476}O_{0,238}$	$31,4 \pm 0,8$
Borracha	$C_{0,385}H_{0,615}$	$1,1 \pm 0,2$
Madeira	$C_{0,250}H_{0,500}O_{0,250}$	$33,6 \pm 1,5$
Nylon	$C_{0,285}H_{0,619}O_{0,048}N_{0,048}$	$2,7 \pm 0,2$

Assim, considerando-se os dados da Tabela 1, procurou-se o valor mínimo para a entalpia de reação (2), utilizando-se o método de Monte Carlo de busca aleatória (19, 20). Os resultados deste processo permitiram estimar os valores (composição média dos *pellets*) que se encontram na terceira coluna da Tabela 1 acima. A partir desses resultados o foco do estudo está na relação entre a composição dos *pellets* e a maximização do conteúdo energético global dos CDR, tanto para o biometano, tendo em vista a equação (1), como para o CDR representado pela mistura dos produtos da reação (2) e, além disso, também em relação ao estabelecimento da infraestrutura e dos serviços (relativa à planta de processamento de RSU e geração de energia) necessária ao ótimo aproveitamento da energia disponibilizada nos CDR considerados (e, portanto, em relação aos respectivos custos de investimento e de operação e manutenção). Os modelos para as variantes tecnológicas da planta representada na Figura 2 foram então implementados e simulados utilizando-se os sistemas EMSO (*Environment for Modeling, Simulation, and Optimization*) e HYSYS (*Hyprotech Systems process modeling software*).

Com relação às possibilidades de CDR gerado na reação (2) existem diversas alternativas, mas, tendo-se em vista a otimização da eficiência energética, pode-se maximizar a produção de GS (maximizando-se c e d) ou mesmo somente a de hidrogênio (buscando-se c máximo). Contudo, essa orientação certamente impactará sobre os custos globais e, portanto, sobre o CEE, uma vez que a complexidade tecnológica da planta será incrementada e os sistemas de purificação e condicionamento dos gases serão significativamente maiores (7, 8). Adicionalmente, em função da composição dos *pellets* (e dos próprios resíduos originais), tem-se que considerar as possibilidades (e quantidades) geradas de ácidos (notadamente clorídrico e sulfúrico) e de amônia; o que também resulta no estabelecimento de sistemas e processos secundários para retirada, neutralização ou aproveitamento dessas substâncias. O caminho do CDR metano/biometano a partir da fração exclusivamente orgânica/fermentável pode parecer menos complexo, mas envolve certamente o uso de biodigestores de alta eficiência (21). Tendo-se em vista essas considerações, a Tabela 2 apresenta os principais resultados obtidos nos estudos de modelagem e simulação, para um módulo capaz de processar mil toneladas por dia de RSU. Considerando-se a geração de resíduos da ordem de 0,8-1,0 kg/dia por habitante, este módulo seria tipicamente considerado para cidades ou áreas urbanas da ordem de um milhão de habitantes (8, 22). Em função das configurações da planta seria possível gerar de 935 a 1.140 MWh/dia, correspondendo ao atendimento da demanda de uma faixa de 104.000 a 230.000 consumidores, considerando-se um consumo médio no Brasil igual 150 kWh/mês, com valor de pico igual a 270 kWh/mês (3, 8), com o CEE na faixa de 147 a 293 US\$/MWh. Num cenário com incentivos (bônus) em termos de tratamento de RSU, redução de emissões e aumento de eficiência energética, bem como considerando as receitas secundárias da planta (agregação de valor e comercialização dos materiais recicláveis e dos subprodutos), conforme o item 6.1 da Tabela 2, o valor do CEE poderia estar na faixa 115-235 US\$/MWh.

Tabela 2 – Principais resultados acerca da simulação do projeto conceitual de uma planta de geração de energia a partir do aproveitamento de resíduos sólidos urbanos

Parâmetro/Indicador	Valores
1. Potência instalada no pré-tratamento (kW)	403 – 525
2. CDR para Trat. Termoquímico (kg/h)	3.820 – 4.240
2.1 Composição de 2 (% mássica) $H_2/CO/CO_2/CH_4$	31-45 / 32-39 / 10-23 / 5-11

2.2 Condensado (m ³ /h) / Sólidos Inertizados (kg/h)	0,92-1,35 / 27-42
3. CDR para Trat. Por DBA (t/h)	2,9 – 3,8
4. EE gerada (MWh/dia)	935 – 1.140
5. Investimento (US\$/kW)	2.650 – 4.430
6. CEE (US\$/MWh)	147 – 293
6.1 CCE (US\$/MWh) com receitas secundárias e bônus	115 – 235

Adicionalmente, se verifica a partir da Tabela 2 que se pode enriquecer o GS em hidrogênio, mas nas condições atuais, com o uso de células a combustível de alta temperatura para incrementar a eficiência energética e o aumento da capacidade do sistema de purificação de gases, tem-se concomitante incremento do investimento e no CEE. Já o GS com teores médios de hidrogênio pode ser processado em sistemas termoeletrônicos mais convencionais.

4.0 - CONCLUSÃO

No cenário atual os processos de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos tendem a ganhar importância. Neste trabalho foi apresentada uma revisão dos principais aspectos tecnológicos concernentes aos processos envolvidos na concepção da planta material-energética proposta, bem como avaliou-se o projeto conceitual dessa usina de geração de energia alimentada com resíduos urbanos, caracterizada pela integração de rotas tecnológicas bioquímicas e termoquímicas que tendem a alcançar elevada eficiência de geração. Determinou-se a melhor faixa de composição dos insumos energéticos que são preparados com base nos resíduos urbanos, bem como os típicos fluxos de combustíveis derivados de resíduos que devem ser alimentados aos processos de geração de energia elétrica, de forma a gerar de 935 a 1.140 MWh/dia de eletricidade, numa faixa de custo entre 115 e 293 US\$/MWh, dependendo das configurações envolvidas e da incidência de incentivos governamentais. Estes valores são superiores aos tipicamente considerados no mercado nacional, mas podem se tornar competitivos frente aos crescentes valores da geração termoeletrônica convencional, notadamente quando também se leva em consideração o ganho socioambiental associado ao tratamento e inertização dos resíduos.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MONTGOMERY, M. R. The Urban Transformation of the Developing World. Science, v. 319, 761, 2008.
- (2) RIBEIRO, L. A. Gestão de resíduos sólidos urbanos com geração de energia: O projeto Ecoparque de Porto Alegre. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2008.
- (3) EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos, Nota Técnica DEA 18/14, Rio de Janeiro, 2014.
- (4) EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos, Nota Técnica DEA 16/14, Rio de Janeiro, 2014.
- (5) HENRIQUES, R. M. Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- (6) Política Nacional de Resíduos Sólidos. LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010.
- (7) FURTADO, J. G. M., SERRA, E. T. Avaliação tecnológica sobre a geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos. XX SNPTTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, 2009.
- (8) Estudo de pré-viabilidade para aproveitamento de resíduos para geração de energia. Relatório de Estudo de Caso. Eletrobrás, CETEC, CEPEL, 3E-Engenharia Ecológica. Relatório interno depositado na Eletrobrás, 2006.
- (9) LAGE, J. Usina no Rio produz energia a partir de lixo orgânico e plástico. Folha de São Paulo, pág. C4, 21 de março de 2009.
- (10) OLIVEIRA, L. B. Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- (11) OLIVEIRA, L. B., Reis, M. M., Pereira, A. S. Resíduos sólidos urbanos: lixo ou combustível?. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre, 2000.

- (12) OOST, G. V., HRABOVSKY, M., KOPECKY, V., KONRAD, M., HLINA, M. Pyrolysis of waste using a hybrid argon–water stabilized torch, *Vacuum*, v. 80, p. 1132–1137, 2006.
- (13) OOST, G. V., HRABOVSKY, M., KOPECKY, V., KONRAD, M., HLINA, M. Pyrolysis/gasification of biomass for synthetic fuel production using a hybrid gas–water stabilized plasma torch, *Vacuum*, v. 83, p. 209–212, 2009.
- (14) JACOBSON, M. Z., DELUCCHI, M. A., Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials, *Energy Policy*, Vol. 39, pp. 1154-1169, 2011.
- (15) DOUGLAS, J. M. *Conceptual Design of Chemical Processes*. McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1988.
- (16) PETERS, M. S., TIMMERHAUS, K. D. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1991.
- (17) WILLIAMS, P. T. *Waste Treatment and Disposal*. John Wiley & Sons, Ltd., 2 ed, 2005.
- (18) HAVLÍK, I., VOTRUBA, J., SOBOTKA, M. Mathematical Modelling of the Anaerobic Digestion Process: Application of Dynamic Mass-Energy Balance. *Folia Microbiol.*, n 31, pp 56-68, 1986.
- (19) BROOKS, A. GELMAN, G., MENG, X.-L. *Handbook of Markov Chain Monte Carlo*. CRC Press, 2011.
- (20) FISHMAN, G. S. *Monte Carlo: Concepts, Algorithms and Applications*. Springer-Verlag, New York, 1996.
- (21) Ghosh, R., Bhattacharjee, S. A review study on anaerobic digesters with an Insight to biogas production. *International Journal of Engineering Science Invention*, Vol. 2, n. 3, pp.08-17, 2013.
- (22) Revista Exame. Agosto de 2014.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José Geraldo de Melo Furtado

Nascido no Rio de Janeiro, RJ em 29 de março de 1969.

Doutorado (2005) e Mestrado (2001) em Ciência e Engenharia de Materiais: COPPE/UFRJ. Graduação (1997) em Engenharia Química: UFRJ.

Empresa: CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, desde 2002.

Pesquisador do Departamento de Tecnologias Especiais (DTE), atuando nas áreas de materiais e sistemas energéticos, modelagem e simulação de processos de cogeração, eletroquímica, sistemas de armazenamento de energia e ciências térmicas.

Ricardo Ramos Wanderley

Mestrado (2014) em Engenharia Química: UFRJ. Graduação (2012) em Engenharia Química: UFRJ.

Atua nas áreas de modelagem e simulação de processos químicos e bioquímicos.