



Grupo de Estudo de Geração Térmica-GGT

Conjugação do aproveitamento energético de biomassas e de resíduos como forma de incrementar a eficiência e a segurança energética no Brasil

ABIGAIL NOEMI ESQUIVEL OJEDA(1); JOSE GERALDO DE MELO FURTADO(1);
CEPEL(1);

RESUMO

O presente trabalho propõe e analisa modificações (em termos de rotas de processos, integração dos mesmos e inserção de geradores mais eficientes) em plantas *Waste-to-Energy* (WTE), conjugando-as ao processamento de biomassas, com foco na integração material-energética e no incremento das eficiências energéticas e das receitas secundárias da planta como forma de otimizar a economicidade de tais plantas. O módulo base é capaz de processar mil toneladas por dia de resíduos sólidos urbanos (RSU) e foram obtidos resultados superiores aqueles de plantas WTE e de termelétricas, ambas convencionais, gerando-se energia elétrica com custos intrínsecos na faixa de 145 a 295 US\$/MWh.

PALAVRAS-CHAVE

Integração Energética, Biomassas, Combustíveis de Resíduos, Cogeração, Eficiência Energética

1.0 - INTRODUÇÃO

O atual cenário elétrico nacional é caracterizado pela ampla cobertura geográfica proporcionada pelo sistema integrado nacional (SIN), com forte predominância da geração hidrelétrica, no qual a geração termelétrica apresenta um importante papel complementar, em função da crise hídrica que se faz sentir desde o início deste século, além da crescente participação das fontes renováveis (solar fotovoltaica e a eólica,) na geração de energia elétrica (EE). Dessa forma, no âmbito do SIN (que, quanto à geração, atualmente pode ser visto como um sistema hidro-termo-eólico de grande porte), a preocupação com a segurança energética e com a eficiente integração de diversas formas de geração de EE é uma questão central (1). Num quadro ampliado, somam-se a isso as crescentes restrições climatoambientais às emissões de gases causadores do efeito estufa (GCEE) (2) e o grave problema relacionado à destinação de resíduos no Brasil (3), tanto os resíduos sólidos urbanos (RSU) quanto os resíduos biomássicos das intensas atividades agroindustriais (RBAI), sendo que estes podem ser bem distintos em diferentes regiões do país, bem como em função da sazonalidade.

De fato, a crescente produção de 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 EE representa a conjugação da valoração destes materiais residuais, da mitigação de problemas ambientais e do incremento da geração de energia. Ocorre que, em geral, somente sob condições de mercado, a geração de EE a partir de RSU mediante sua queima controlada por processos *Waste-to-Energy* (WTE) não apresenta economicidade e eficiência competitivas em relação à geração termelétrica convencional, muito embora tais processos sejam muito eficientes quanto à redução do grande volume de resíduos (sua principal razão de ser), de forma que são amplamente empregados em diversos países, especialmente no Japão, na União Européia, nos Estados Unidos e na China (4-6).

Diversas têm sido as iniciativas e possibilidades de incrementar a eficiência e reduzir o custo da EE gerada (CEE) por processos WTE convencionais (processamento por queima ou incineração), sejam intrínsecas ao processo, ao ciclos energéticos envolvidos (em termos de configurações buscando a otimização energética), ou sejam externas, como regulatórias e políticas de incentivos. No atual contexto do SIN, no qual, por vezes, tem-se a entrada das termelétricas convencionais de alto custo, com valores para EE tipicamente na faixa R\$ 470-780/WWh (7), uma redução do CEE por plantas WTE pode viabilizar sua inserção no sistema, sendo ainda mais favorecidas pela minimização de emissões e pelas perspectivas de incremento da integração energética (8).

É motivado por essa situação que o presente trabalho propõe e analisa modificações (em termos de rotas de processos, integração dos mesmos e inserção de geradores mais eficientes) em plantas WTE, conjugando-as ao processamento de biomassas/RBAI, nas circunstâncias geográficas nas quais isso se mostra interessante, de forma que a utilização auxiliar de combustíveis derivados de biomassa (CDB), substituindo os combustíveis fósseis convencionalmente empregados (carvão, diesel, gás natural), tende a proporcionar significativos ganhos de eficiência energética, resultando também no aumento da economicidade dessas usinas de geração de EE e simultâneo ganho ambiental em virtude tanto da redução das emissões provenientes dos aterros de RSU quanto da substituição dos combustíveis fósseis. A usina integrada é capaz de otimizar a produção de intermediários energéticos, CDB e combustíveis derivados de resíduos (CDR), tais como gás de síntese (GS), biogás, biometano e hidrogênio, além de poder estar contida num sistema mais amplo, uma biorrefinaria, possibilitando assim grande integração material-energética e a disponibilização de coprodutos (bioprodutos e biomateriais) (9). Nesse sentido, o presente trabalho se insere no conjunto de estudos do grupo de CEPEL acerca da integração material-energética com base em recursos renováveis e/ou residuais e suas estratégias de otimização e agregação de valor (8-11).

2.0 - CONCEPÇÃO TECNOLÓGICA

Conforme observado no estudo (8), as principais tecnologias que têm sido consideradas para o aproveitamento do conteúdo energético de resíduos, e em especial dos RSU, para a geração de EE dividem-se em dois grandes grupos: (G1) os processos que resultam na produção de misturas gasosas ricas em metano (biogás, biometano) mediante a decomposição bioquímica anaeróbica (DBA) da matéria orgânica presente nos RSU e (G2) os processos termoquímicos de tratamento direto dos RSU ou de fração destes, os quais resultam na produção de CDR que tanto podem ser líquidos quanto gasosos. 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 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 (UTE), com ou sem cogeração, ou mesmo em sistemas de geração com células a combustível (CaC), quando convenientemente purificadas (10). 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 CEE e de seus benefícios secundários. Assim, a planta produtora de CDB/CDR pode estar diretamente ligada à planta geradora de EE, tal como ilustrado na Figura 1(a), e, no limite, essa primeira planta pode ser multipropósito, produzindo também diversos outros produtos, como no caso de uma biorrefinaria (9). A substituição, parcial ou total, de combustíveis convencionais, fósseis, empregados na UTE, por combustíveis de base renovável produzidos na planta de biomassa, representa tanto incremento de integração e eficiência energéticas quanto de maior adequação de toda a cadeia material-energética à sustentabilidade, também em função da redução de emissões de GCEE. Dessa forma, a conjugação do aproveitamento energético de biomassas e de resíduos pode ser fundamental para a economicidade das plantas e arranjos material-energéticos considerados.

Nos últimos anos, todavia, nos principais países, com a exclusão dos resíduos orgânicos/biodegradáveis dos aterros sanitários (ainda que o investimento fixo seja menor, cf. Figura 1(b) (11), de forma que a decisão não é apenas econômica), no que diz respeito às rotas do G1 acima, são apenas as possibilidades de produção de biogás/biometano em biodigestores industriais de alta tecnologia que têm sido consideradas e, no caso de se basearem em RSU, exigem a separação do lixo orgânico na origem e são caracterizadas por custos também elevados, resultando em altos CEE (12), muito embora possam ser bastante eficientes quando baseadas em resíduos específicos ou alguns tipos de RBAI de espectro estreito, notadamente como parte de um arranjo ou sistema mais amplo, como no caso das biorrefinarias, sendo assim o produto não apenas um energético, mas também um insumo químico (9, 13). Dessa forma, contemporaneamente, têm sido os processos englobados no grupo G2 (termoquímicos, WTE) os mais enfatizados para geração de EE, inclusive por proporcionarem grande redução dos aterros sanitários, ganhos em eficiência energética, destruição de resíduos não recicláveis, e recuperação dos metais contidos nas cinzas (inertizadas) (8, 10), ainda que também necessitem de redução do CEE e incremento de eficiência para se tornarem plenamente viáveis, especialmente nas condições brasileiras.

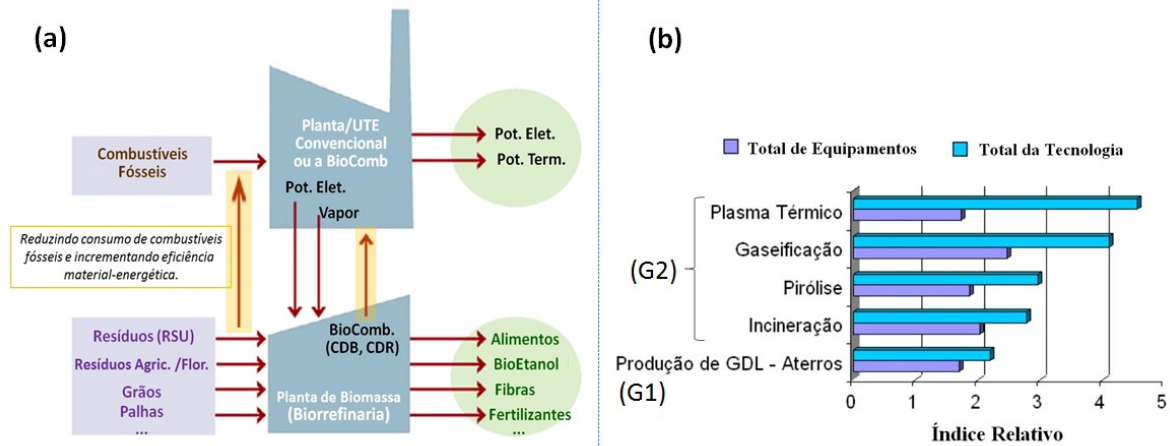


FIGURA 1 – (a) Representação esquemática simplificada acerca das possibilidades de conjugação e integração de plantas termelétricas (UTE), operando com combustíveis convencionais (fósseis), resíduos (CDR) ou biomassas (CDB), com plantas de processamento de biomassas e resíduos biomássicos (RBAI, RSU) para fins diversos. O foco está em otimizar a integração material-energética promovendo incremento de eficiência e redução de emissões. (b) Resultados da avaliação acerca do conjunto de equipamentos principais e do investimento relativo associados às plantas de processamento de RSU que empregam diferentes tecnologias de processamento (11).

Também os processos termoquímicos (G2) apresentam grande diversidade de opções tecnológicas em função, principalmente, dos tipos de resíduos processados e do tipo de forno/reactores empregado (rotativos, horizontais, leito fixo ou fluidizado). A principal forma de aproveitamento energético mediante a incineração por queima controlada de RSU é a utilização de sistemas à base de turbinas a vapor, características de centrais termoeletricas convencionais, mas com sistemas mais sofisticados 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), CO₂, NO_x, SO_x, derivados halogenados, dioxinas, furanos e material particulado, contribuindo para a elevação do investimento e dos custos operacionais e de manutenção das plantas (8, 11).

Em trabalhos anteriores (8, 10) avaliações tecnológica acerca das principais possibilidades de processamento de RSU em plantas específicas foram efetuadas, especialmente quanto às rotas por incineração, pirólise, gaseificação e plasma térmico, concluindo-se que a maior complexidade tecnológica das plantas de gaseificação e plasma térmico fazem com que estas opções apresentem os maiores índices de investimento/custo relativo frente à alternativa G1 em aterros sanitários, cf. Figura 1(b), ocasionando os maiores custos da energia elétrica gerada. Contudo, pode-se depreender que num cenário regulatório mais favorável à geração alternativa (renovável) de energia, e tendo em vista as limitações e restrições a novos aterros sanitários, tais tecnologias possam vir a sobressair em função das maiores eficiências de geração e de suas grandes possibilidades de contribuir para a integração material-energética, notadamente no âmbito de complexos químicos e biorrefinarias (9).

De fato, tanto as tecnologias de pirólise controlada e gaseificação, quanto as tecnologias de plasma térmico, 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 a 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 alcançar 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, possibilitando inclusive a obtenção de sub/coprodutos (como bio-óleos, gás de síntese, hidrogênio, etc.) que podem apresentar significativos valores no mercado (9).

Em princípio, como forma básica para incrementar a eficiência energética dos processos G2/WTE tem-se a utilização de um combustível em conjunto com os resíduos, representando a hibridização dos ciclos termodinâmicos. O gás natural (GN) se constitui na escolha básica para este combustível, mas isso também dá

margem ao incremento das emissões de CGEE em função da necessidade da planta operar continuamente para processar os resíduos e assim também consumir grandes volumes de GN. O trabalho de Ribeiro e Tisi (4) mostrou o emprego do ciclo combinado otimizado (CCO) em sistemas WTE como forma de reduzir o consumo de GN de 75 a 92%, mediante o uso de uma turbina a GN em conjunto com uma caldeira de grande volume operando a alta pressão e com superaquecimento externo, que aproveita a exaustão da turbina a gás, além de ar pré-aquecido (ar de condensação) e um queimador de duto queimando o gás suplementar, de forma a economizar GN. A utilização de motores em substituição à turbina a gás ou mesmo sem ele, envolvendo apenas o queimador, o pré-aquecedor e o superaquecedor, permite reduzir significativamente o consumo de GN e incrementar a eficiência energética global. Além disso, como o volume consumido de GN é muito menor, este pode também ser substituído pelo biogás/biometano, geralmente disponível em menores quantidades, o que, dependendo dos tipos de resíduos empregados (RSU, RBAI), reduz drasticamente a emissão de GCEE ou mesmo torna nulo o ciclo do carbono.

Com efeito, aperfeiçoamentos ainda mais significativos nos processos G2/WTE podem ser obtidos substituindo-se a queima direta da abordagem WTE clássica pelos processos supracitados de gaseificação, pirólise e tocha a plasma, usando-se, também de forma combinada, os recursos biomássicos e os RSU (5, 8). Num trabalho anterior (9), para uso exclusivo de biomassas, foi empregado o ciclo combinado BIGCC (*Biomass Integrated Gasification Combined Cycle*) em conjunto com um arranjo ou ciclo suplementar (CS) formado por um sistema de CaC de baixa temperatura de operação (CaC-bT) e um sistema de CaC de alta temperatura de operação (CaC-AT), esta com respectiva turbina a gás secundária (do sistema híbrido), que aproveita a exaustão da CaC-AT. Este sistema híbrido foi avaliado no âmbito de uma biorrefinaria à base de biomassa lignocelulósica, na qual o foco não era apenas a geração de EE. Contudo, seus resultados caracterizados pela elevada eficiência, de 57 a 66% (9), permitem considerá-lo como alternativa tecnológica a ser conjugada ao processamento de RSU.

3.0 - SISTEMA INTEGRADO: METODOLOGIA E RESULTADOS

Assim, com base na discussão anterior, a Figura 2 mostra a representação simplificada do sistema completo constituído pelo ciclo BIGCC (sequência dos gases produzidos pelos sistemas de gaseificação e pirólise), pelo CS que aproveita e purifica o GS, produzindo hidrogênio para uso no próprio ciclo (na CaC-bT) ou para exportação (p. ex. em veículos a hidrogênio ou para uso industrial), empregando assim H₂ e GS purificado para uso nas respectivas CaC (bT e AT); mas agora acoplado aos processos de incineração/WTE, inclusive considerando a possibilidade da utilização de reatores de tocha a plasma térmico, de forma a produzir diretamente GS a partir dos RSU, em consonância com o produzido no ramo do processamento das biomassas/RBAI, por pirólise e gaseificação, de forma que, no limite, toda a planta pode operar com GS como vetor energético.

De fato, 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 GS produzido (impuro) 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.

Na gaseificação ocorre a conversão dos materiais 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 resfriado e tratado (limpo), sendo então um CDR, pode, p. ex., ser alimentado a um motor a combustão interna acoplado a um gerador elétrico (motogerador). 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. Os processos IGCC/BIGCC aperfeiçoam a configuração básica supracitada, aproveitando de forma mais significativa a energia dos insumos e/ou resíduos, ainda que a um custo mais elevado em função dos novos equipamentos (cf. Figura 2).

No presente estudo, a partir das operações unitárias e dos equipamentos típicos envolvidos na representação da Figura 2 (8, 14) foi possível estimar as capacidades e os balanços materiais e energéticos nas diferentes etapas. Para a determinação do teor total de água envolvida no processo considerou-se que, no Brasil, o teor de umidade

nos RSU é da ordem de 60% sobre a parcela orgânica/biomassa (5, 6, 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%) (6, 8). 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*), tendo em vista a base de cálculo segundo os valores e parâmetros apresentados na Tabela 1, para um módulo do caso base capaz de processar mil toneladas por dia de RSU, supostas com composição média igual a $C_{0,339}H_{0,462}O_{0,192}N_{0,002}Cl_{0,005}$ e poder calorífico de 82 a 95 MJ/kg, e biomassas/RBAI na faixa de 25 a 30 t/h, com poder calorífico na faixa de 18 a 22 MJ/kg, supostas de base lignocelulósica (8, 9).

O modelo econômico base para a simulação considera a vida útil da planta global e de suas variantes igual a vinte e cinco anos a partir da inicialização da planta, depreciação linear em uma década e com valor residual igual a zero, correspondendo o capital de giro a 10% do valor total de investimento fixo determinado a partir dos equipamentos principais, segundo a metodologia dos métodos de faturação em consonância com a representação anteriormente mostrada na Figura 1(b) (11, 15), além de taxa de juros padrão do mercado igual a 12,00%aa, tributos em situação padrão e valores de comercialização dos produtos em valores de mercado no primeiro trimestre de 2019.

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 e teria que ser compatibilizado com a logística de fornecimento das biomassas de forma que os custos de transporte não se tornem decisivos, sendo, portanto, indicadas para cidades que têm proximidade com áreas de atividades agrícola ou agroindustriais (8). Em função das configurações da planta seria possível gerar de 950 a 1.200 MWh/dia, com níveis de eficiência energética muito superiores a faixa de 18-22% das WTE convencionais, com o CEE na faixa de 145 a 295 US\$/MWh. Num cenário com incentivos em termos de tratamento de RSU, redução de emissões (ganho ambiental) 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 específico da Tabela 1, o valor do CEE poderia estar na faixa de valores da ordem de 105-230 US\$/MWh.

Além dos resultados obtidos para o caso base (caso 1), a configuração completa representada na Figura 2, na Tabela 1 são também mostrados os resultados obtidos para simulação de variantes reduzidas e/ou modificadas da planta do caso base, especialmente considerando apenas o conjunto do BIGCC e do CS (caso 2), sem a conjugação com a utilização dos RSU, o próprio BIGCC (caso 3) sob a mesma condição, e a alternativa do ramo do processamento dos RSU por WTE convencional (caso 4) e pelo emprego da tocha a plasma (caso 5).

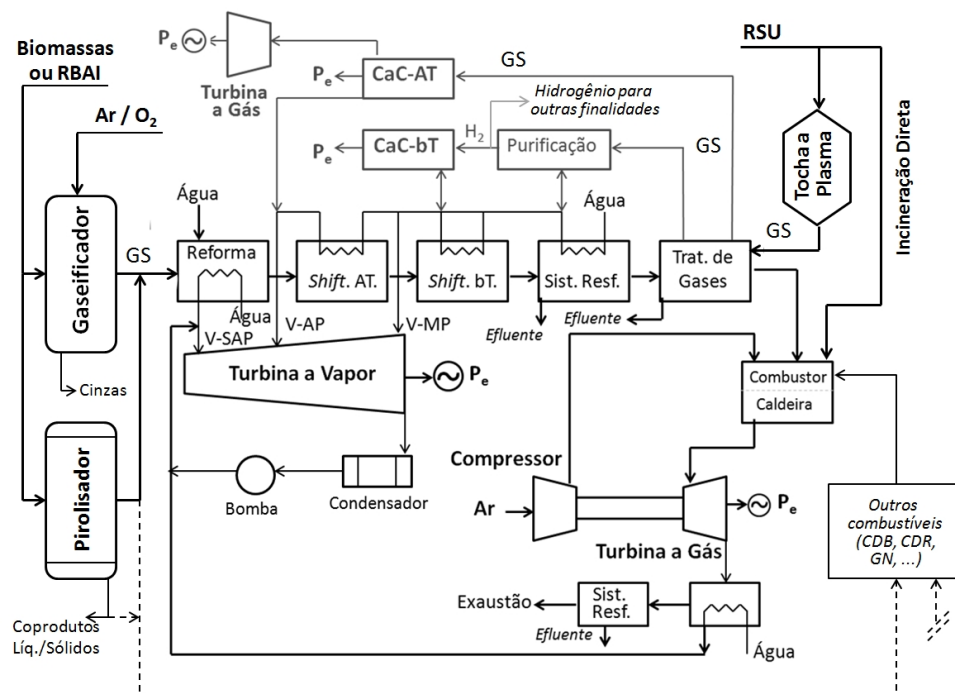


Figura 2 – Esquema conceitual da planta integrada (e variantes) de cogeração a partir de biomassas e de RSU.

Verifica-se, com base nos resultados apresentados na Tabela 1, que as opções tecnológicas consideradas são, de fato, caracterizados por elevados valores de investimento, o que, de resto, já é apontado pela própria rota convencional WTE; daí muitas vezes se considerar a alternativa do aterro sanitário gerando GDL (gás de lixo, biogás bruto). Contudo, essa opção pode inicialmente apresentar menor investimento, mas os custos tendem a aumentar em termos de manutenção e das consequências ambientais, bem como em função da baixa eficiência, daí não serem mais passíveis de instalação em muitos países. Já as rotas G2/WTE promovem a eliminação da matéria orgânica dos aterros sanitários e ainda possibilitam a reciclagem dos metais (nas cinzas) e da geração de energia que é significativamente maior do que aquela gerada pelo biogás dos aterros, pois inclui a energia térmica oriunda do processamento dos plásticos, papeis e outros materiais combustíveis.

Ainda com base nos resultados da Tabela 1 nota-se que em termos de CEE a planta do caso base se ressentiu do elevado investimento, ainda que com ganho em termos de eficiência, pois o CEE igual a 145,6 US\$/MWh é cerca de 18% e 24% maior do que os valores característicos, respectivamente, dos casos 2 e 3 analisados; sendo, no entanto, inferiores àqueles dos casos 4 (menor eficiência) e 5 (maior investimento, menor integração ou aproveitamento energético). Com efeito, as características de integração energética se fazem sentir de forma mais intensa para o caso 1, pois a configuração da planta permite melhor aproveitamento do material, ainda que o investimento seja elevado, justificando inclusive seu melhor desempenho quanto às receitas secundárias (reciclagem de metais, hidrogênio, etc.) e as possibilidades de bônus/incentivos, de forma que o respectivo CEE, nesse caso, se torna o menor. Na prática, o desempenho econômico-energético do caso 4 pode ser mesmo melhorado conforme previamente discutido, aproximando-se assim dos resultados dos casos 1, 2 e 3.

Mas, tudo somado, verifica-se que os valores de CEE para todos os casos considerados são elevados frente aos da faixa típica anteriormente mencionada (R\$ 470-780/WWh, 117-195 US\$/MWh), excetuando-se o caso 3, tornando-se mais próximos no hipotético cenário de bônus/incentivos, o que também indica que tais processos, no Brasil, ainda precisam ser bem equacionados e vistos também sob a ótica dos ganhos indiretos, em virtude de proporcionarem a melhor destinação para RSU pós-reciclagem, sem os riscos dos aterros sanitários acerca da contaminação do meio ambiente por longos períodos de tempo, ao mesmo tempo que pode reduzir ou eliminar a utilização de combustíveis fósseis em termelétricas de menor porte. Tais questões certamente dão margem a se discutir mudanças no marco regulatório na área e corroboram as observações e análises de diversos trabalhos recentes (4, 12, 16-18).

Excetuando-se o caso 4, do WTE convencional, nos demais é sempre preciso a adoção de pré-tratamentos para os RSU, uma vez que se necessita otimizar a formulação dos materiais que serão alimentados aos processos de forma a se ter tanto o melhor desempenho energético quanto a redução de emissões de poluentes, conforme foi discutido de forma mais detalhada no estudo prévio (8). Quando se conjuga tal sistema ou planta num quadro mais complexo, como é o caso de uma biorrefinaria, passa-se a considerar também possibilidades não energéticas que, em geral, estarão baseadas em parte das biomassas, de forma que os RSU tendem a ser a base energética mais forte. Tais condicionantes também são responsáveis pelo incremento do investimento associado a cada caso, mas no balanço global os ganhos em eficiência tendem a ser mais fortes atuando no sentido de reduzir o CEE.

Adicionalmente, para os casos 1 e 2, se verifica a partir da Tabela 1, 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 com o aumento da capacidade do sistema de purificação de gases, tem-se significativo incremento do investimento fixo e, conseqüentemente, do CEE, mas que também passa a depender da destinação do hidrogênio produzido e de sua possível receita (9). Já o GS com teores médios de hidrogênio pode mesmo ser processado em sistemas termelétricos mais convencionais, tal como os combustíveis ricos em metano.

Tabela 1 – Principais parâmetros utilizados na simulação e resultados acerca da simulação do projeto conceitual de uma planta de geração de energia a partir do aproveitamento de resíduos sólidos urbanos e de biomassas

Parâmetro/Indicador	caso 1	caso 2	caso 3	caso 4	caso 5
Potência instalada no pré-tratamento [MW]	1,7-1,9	1,6-1,8	1,4-1,5	-	1,2-1,8
Energia Elétrica gerada líquida [MWh/dia]	1.476	1.310	1.162	890	1.230
Eficiência de Geração [%]	69,5	65,7	57,4	22,0	42,0
Investimento Total na Planta [milhões US\$]	288,5	233,5	202,4	167,8	309,2
CEE (US\$/MWh)	145,6	123,5	117,5	247,8	295,5
CCE (US\$/MWh) com receitas sec. e bônus	103,8	114,3	110,8	192,4	223,5

Os significativos ganhos em termos de eficiência em função dos casos estudados, cf. a Tabela 1, mostram que as possibilidades de aperfeiçoamento dos sistemas WTE mediante a coparticipação de combustíveis podem ainda se tornar mais significativas quando se considera as possibilidades de integração energética mediante a inserção de ciclos ou arranjos contemplando os processos de gaseificação-pirólise com simultânea utilização de recursos biomássicos, ainda mais quando outras possibilidades de coprodutos ou subprodutos são consideradas. Dentre tais combustíveis, o próprio biogás se apresenta como uma possibilidade importante, pois seu uso em tais sistemas de geração termelétrica resulta em ganhos muito maiores do que aqueles de sua simples utilização em aterros

sanitários; sendo particularmente importantes quanto este é oriundo de biodigestores de alto desempenho, ainda que isso também represente um incremento do respectivo investimento total.

4.0 - CONCLUSÃO

No cenário atual os processos de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos tendem a ganhar importância. O presente trabalho analisou modificações (em termos de rotas de processos, integração dos mesmos e inserção de geradores mais eficientes nos respectivos ciclos e processos) em plantas WTE, (*Waste-to-Energy*) conjugando-as ainda ao processamento de biomassas e resíduos biomássicos, de forma que a utilização auxiliar de combustíveis derivados de biomassa, substituindo os combustíveis fósseis convencionalmente empregados (diesel, gás natural), proporcionando assim significativos ganhos de eficiência energética, resultando também no aumento da economicidade dessas usinas de geração de EE e simultâneo ganho ambiental em virtude tanto da redução das emissões provenientes dos aterros sanitários quanto da substituição dos combustíveis fósseis nesse tipo de geração termelétrica.

Os principais resultados mostram custos da energia elétrica gerada na faixa de 145 a 296 US\$/MWh, com perspectivas de se atingir a faixa reduzida de 104 a 224 US\$/MWh em cenários e condições mais favoráveis, notadamente quanto a um marco regulatório que efetivamente contabilize os ganhos indiretos de tais processos. Tais resultados evidenciaram ainda que os sistemas mais complexos de geração termelétrica usando simultaneamente resíduos sólidos urbanos e biomassas, ainda que representando mais investimentos, podem resultar em significativos ganhos em termos de eficiência energética.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NACIF, L. A., BESSA, M. R. Modelo de Otimização Para Sistemas Hidrotérmicos Considerando a Elasticidade da Demanda. XIV SEPOPE, CIGRÉ- Brasil, Recife, 2018.
- (2) EDUCACLIMA, Panorama das emissões de gases de efeito estufa e ações de mitigação no Brasil. <http://educaclima.mma.gov.br/2018/04/panorama-das-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-e-acoes-de-mitigacao-no-brasil/> (Acesso em abril de 2019).
- (3) ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2017.
- (4) RIBEIRO, S. V. G., TISI, Y. S. A. B. Projeto de planta de Waste-to-Energy no Brasil com alta eficiência mediante consumo de pequena quantidade de gás natural ou biogás. XXIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, 2017.
- (5) EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos, Nota Técnica DEA 16/14, Rio de Janeiro, 2014.
- (6) EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos, Nota Técnica DEA 18/14, Rio de Janeiro, 2014.
- (7) CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, Preços Médios, www.ccee.org.br/ (Acesso em dezembro de 2019).
- (8) FURTADO, J. G. M., WANDERLEY, R. R. Concepção e avaliação técnico-econômica de uma usina integrada de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos. XXIII SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu, 2015.
- (9) FURTADO, J. G. M. Eficiência e integração energéticas na conjugação de biorrefinarias e geração distribuída de energia elétrica a partir de fontes renováveis. XXIV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, 2017.
- (10) FURTADO, J. G. M., SERRA, E. T. Avaliação tecnológica sobre a geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos. XX SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, 2009.

- (11) FURTADO, J. G. M., SERRA, E. T. Análise de opções tecnológicas para geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU). XIII CBE - Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 2010.
- (12) RIBEIRO, S. V. G., Comentários sobre biogás como fonte de energia para o Brasil. Canal Energia, <http://canalenergia.com.br/artigos/53044690/comentarios-sobre-biogas-como-fonte-de-energia-para-o-brasil>, 2017.
- (13) BOMTEMPO, J. V. A Bioeconomia e os produtos-plataforma. GGN - O Jornal de Todos os Brasis, 2015.
- (14) WILLIAMS, P. T. Waste Treatment and Disposal. John Wiley & Sons, Ltd., 2 ed, 2005.
- (15) AMSTERDAM, M. F. Factorial Techniques applied in Chemical Plant Cost Estimation: A Comparative Study based on Literature and Cases. MSc Thesis, Faculty of Applied Sciences - Delft University of Technology, The Netherlands, 2018.
- (16) MONTENEGRO, S. Potencial energético levanta polêmica sobre gestão de resíduos. Canal Energia, <https://www.canalenergia.com.br/especiais/53061712/potencial-energetico-levanta-polemica-sobre-gestao-de-residuos>, 2018.
- (17) TSILYANNIS, C. A. Energy from waste: Plant design and control options for high efficiency and emissions' compliance under waste variability. Energy, v. 176, p. 34-57, 2019.
- (18) LIMA, P. M., COLVERO, D. A., GOMES, A. P., et al. Environmental assessment of existing and alternative options for management of municipal solid waste in Brazil. Waste Management, v. 78, p. 857-870, 2018.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Abigail Noemi Esquivel Ojeda

Nascida na Colômbia, em 23 de dezembro de 1995.

Graduanda em Engenharia Química na Universidade Federal Fluminense (UFF).

Estagiária do Departamento de Materiais, Eficiência Energética e Geração Complementar (DME), do CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, atuando, nos anos de 2018 e 2019, na área de sistemas de cogeração, modelagem e avaliação de processos energéticos.



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 (Universidade Federal do Rio de Janeiro). Graduação (1997) em Engenharia Química: UFRJ.

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

Pesquisador do Departamento de Materiais, Eficiência Energética e Geração Complementar (DME), atuando nas áreas de materiais e sistemas energéticos, modelagem e simulação de processos de cogeração, eletroquímica, sistemas de armazenamento de energia, baterias, tecnologias do hidrogênio e células a combustível, bioenergia, cogeração e ciências térmicas.