

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UMA PROPOSTA COM BASE NA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA TÉRMICA

J. H. B. Silva, jackson.h.b.silva@gmail.com¹

M. R. Mendes, matheus_rmendes@outlook.com¹

F. P. F. Dias, felipe.dias@fanor.edu.br²

A. V. Bueno, bueno@ufc.br¹

¹ Universidade Federal do Ceará - UFC, CE, Brasil, Campus Universitário do PICI, Bloco 714, CEP 60455-760,

² Faculdade do Nordeste – Devry, CE, Brasil, Rua Jornalista Nertan Macedo, nº 165, Cocó, CEP 60192-450,

Resumo: A disposição final dos resíduos sólidos urbanos há muito já é um problema para as grandes metrópoles. Por meio de legislações mais rigorosas, vem-se aumentando o nível de exigência de soluções para esse problema ao mesmo tempo em que ocorre um aumento na demanda por energia elétrica. Nesse contexto, como forma de reduzir o volume de resíduos sólidos urbanos (RSU) e de aproveitar o potencial energético desses materiais, este trabalho tem como objetivo propor um sistema termoeletrico operando em ciclo combinado movido a metano e RSU, aplicável ao município de Fortaleza-CE, e avaliar sua viabilidade através de uma análise do desempenho termodinâmico. Trata-se de uma usina lixo-energia que se propõe a ajudar a resolver dois dos grandes problemas atuais das grandes metrópoles. A análise do sistema proposto indicou que sua eficiência térmica é de aproximadamente 36%, considerado um bom resultado em comparação com a usina de Zabalgardi, a mais moderna e mais eficiente do mundo com uma eficiência de 42%.

Palavras-chave: Resíduos urbanos, recuperação energética, ciclo combinado.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a preservação dos recursos naturais e com a questão de saúde pública associada a resíduos sólidos indica que políticas públicas para tratar desses temas tendem a ser cada vez mais demandadas pela sociedade (Brasil, 2010). No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, lei nº 12.305 de 02/08/2010, estabelece as diretrizes e as responsabilidades para o transporte, tratamento e destinação dos RSU, onde ficam os municípios responsáveis pelo transporte, tratamento e a destinação final desses resíduos, fazendo com que os municípios busquem investir, dentre outras coisas, em tecnologias para tratamento e disposição desse material.

Segundo (Brasil, 2007), estima-se uma evolução do consumo final de energia no período (2004-2030), entre 2,6% a.a. e 4,4% a.a., sinalizando um crescimento acumulado aproximado da demanda total de energia entre 90% e 190% com relação ao ano-base de 2004.

São dois dos grandes desafios que devem ser enfrentados pela atual sociedade; a questão do tratamento dos resíduos sólidos e a geração de energia, que preferencialmente deve ser proveniente de fonte renovável. Uma proposta para ajudar na solução dessas duas questões, simultaneamente, seria a implantação de usinas de incineração de RSU, com um sistema de recuperação energética desses resíduos para a geração de energia elétrica a exemplo da usina Zabalgardi, situada em Bilbao (Espanha). A usina Zabalgardi apresenta-se como uma das mais modernas e eficientes do mundo (Carneiro, 2015).

Este trabalho tem como objetivo propor um sistema termoeletrico aplicável a realidade do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC), localizado na região metropolitana de Fortaleza-CE. O sistema proposto deve operar em ciclo combinado, queimando metano (biometano) produzido no próprio ASMOC e os resíduos destinados a esse aterro. Esse sistema será avaliado por meio de sua eficiência térmica e comparado com o sistema da usina de Zabalgardi para atestar sua viabilidade.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um aterro sanitário para resíduos sólidos é um equipamento indispensável em qualquer cidade, especialmente para cidades do porte e da importância de Caucaia e Fortaleza para o Estado do Ceará. Mesmo que sejam adotadas medidas visando reduzir a quantidade de resíduos, sempre existirão materiais que deverão ser destinados a um aterro sanitário, planejado, projetado e operado dentro dos padrões de eficácia e eficiência (Lima, 2011).

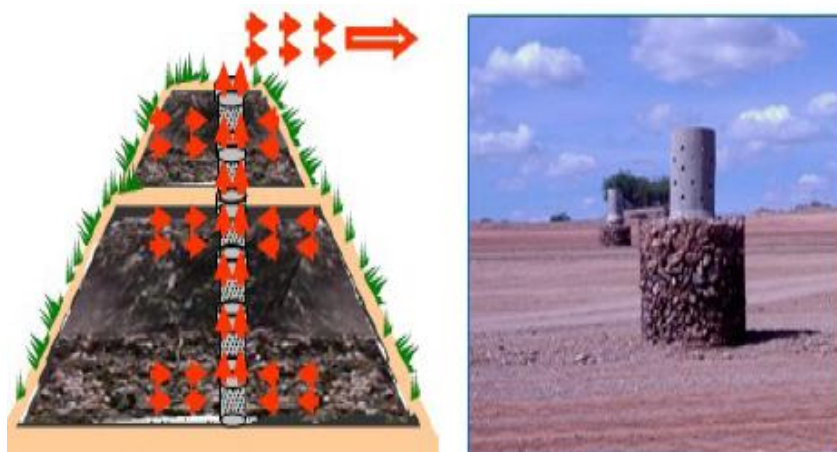


Figura 1 - Desenho esquemático do sistema de Gás (Lima, 2011).

Na concepção de equipamentos como um aterro sanitário, são levados em consideração aspectos tecnológicos que visam a sua operação adequada e segura. Dentre esses aspectos estão os sistemas de drenagem e tratamento de gases, como mostrado na Fig. 1, que tem por finalidade retirar os gases gerados no processo de degradação, de forma a aliviar as pressões internas que ocorrem no maciço, garantindo a estabilidade geotécnica dos taludes e, conseqüentemente, a segurança da estrutura, garantindo a queima desses gases nos níveis superiores e controlando as emissões para atmosfera (Lima, 2011). Os gases que são captados em um aterro sanitário podem ser caracterizados e tratado de forma a torná-los aptos a serem utilizados em processos de recuperação energética (Campuzano, 2016).

A exemplo do que ocorre em outras usinas de biogás no país, o gás captado no ASMOC passa por um processo de purificação, gerando o biometano, que é um gás essencialmente composto por metano e pode substituir o gás natural. O biogás gerado no aterro, que seria simplesmente queimado, passa por um processo que lhe agrega valor e o torna um produto que poderá ser utilizados com diversas finalidades na indústria e nas residências (Meyohas, 2014).

Em relação à quantidade de RSU e de biogás produzido, de acordo com Thales Motta, gerente de implantação de projetos da Ecometano, uma das empresas responsável pelo empreendimento, o ASMOC recebe cerca de 5000 toneladas de resíduos e produz aproximadamente 150 mil metros cúbicos de biometano diariamente (Mezzedimi, 2017).

Outro fator que limita bastante a vida de um aterro sanitário está relacionado à quantidade e à qualidade dos resíduos que os são destinados. Diferentemente dos processos de geração de energia através da digestão anaeróbica e da incineração, o aproveitamento do gás de aterro não traz redução significativa do volume de lixo acumulado, de modo que a deposição contínua de resíduos acaba por esgotar a capacidade de acumulação do aterro sanitário (EPE, 2014).

Uma forma de aumentar a vida útil desses aterros é incinerando os resíduos sólidos. Desde que essa incineração seja feita de forma adequado, pode-se reduzir em até 90% em volume e até 75% em massa de resíduos (Carneiro, 2015). Esses resíduos também podem ser tratados, reutilizados, reduzidos e recuperados energeticamente (Ma, 2016).

Lombardi (2015) realizou um estudo das principais tecnologias utilizadas com o objetivo de se promover a recuperação energética de RSU, abordando principalmente as tecnologias para combustão/incineração de RSU.

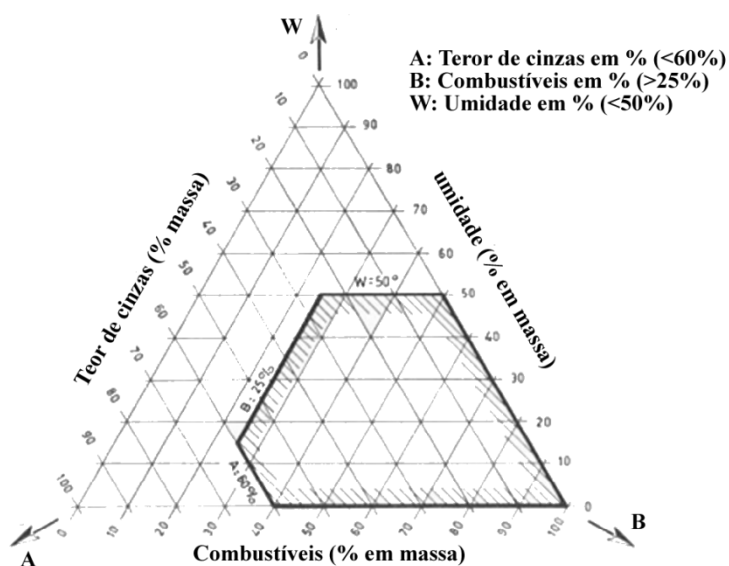


Figura 2 - Diagrama utilizado para avaliar a autocombustão de RSU na incineração (Lombardi, 2015).

Segundo (Lombardi, 2015), a combustão pode ser realizada com a introdução direta do RSU no combustor, ou esses resíduos podem passar por um processo anterior com o objetivo de aumentar sua qualidade de combustível ou seu poder energético, reduzindo a umidade e o teor de cinzas. Em alguns casos o RSU pode ser incinerado sem a utilização de um combustível auxiliar, que ocorre quando as características do RSU se encontram dentro da área destacada na Fig. 2, que corresponde ao RSU com teor de cinzas menor que 60%, umidade menor que 50% e características de combustível maior que 25%.

(EPE, 2014) classifica o RSU, quanto às características físicas, podendo ser:

- i) Materiais inertes: vidros, metais, terras e cinzas e restos inertes; ou
- ii) Materiais combustíveis: papéis, cartões, plásticos, madeira, gomas, couro, alimentos e outros.

E realiza uma caracterização dos RSU gerados no Brasil, apresentada na Tab. 1, onde se nota que quase 60% do RSU gerado são de matéria orgânica. Sua composição é mais rica em restos alimentares, o que representa menor poder calorífico.

Tabela 1 - Composição Média e Produção de RSU (EPE, 2014).

		<i>Papel</i>	<i>Plástico</i>	<i>Vidro</i>	<i>Metal</i>
Matéria Orgânica	59,0%	-	-	-	-
Recicláveis	36,0%	18,5%	12,3%	3,1%	2,1%
Outros	5,0%	-	-	-	-
Produção de RSU [Mt]	62,87	11,63	7,76	1,94	1,32

Várias pesquisas já foram desenvolvidas, com objetivo de se identificar técnicas de destinação adequada para os resíduos entregues no ASMOC (Maia, 2013), tendo em mente a responsabilidade social e o conceito de sustentabilidade. Um levantamento para caracterização gravimétrica do RSU destinado ao ASMOC foi realizado por (Santos, 2010), apresentado na Tab. 2, que fornece dados mais próximos das características reais do RSU deste aterro.

Tabela 2 - Composição Média dos Resíduos Sólidos Domiciliares Depositados no Aterro Sanitário de Caucaia/CE.

Tipo de Material	Percentual (em massa)
Material orgânico (ex.: restos de alimentos, cocos, podas domésticas)	47,5%
Papel/Papelão	14,2%
Plástico filme (ex.: sacos de supermercados, invólucros de alguns alimentos)	8,7%
Plástico rígido	7,0%
Metais	3,3%
Trapos (ex: couro, pano)	3,2%
Borracha	3,0%
Embalagem tetra pak	2,6%
Madeira	2,2%
Vidro	2,1%
Outros	6,4%

Nesse cenário, uma opção para destinação adequada desses resíduos seria a incineração dos mesmos em uma usina de recuperação energética, que utiliza o potencial energético desse material para a produção de energia elétrica. Essa usina poderia ser estruturada para operar em ciclo combinado, queimando RSU e metano, que já é produzido no aterro.

A produção de energia é conseguida recuperando parcialmente o teor de calor dos produtos de combustão, tipicamente por meio de um gerador de vapor (uma caldeira), na maioria dos casos, integrado a um combustor/incinerador, onde ocorre a queima do RSU, (Lombardi, 2015). O processo de geração de energia elétrica pela incineração dos RSU é semelhante ao de usinas térmicas convencionais, cuja capacidade de geração depende diretamente do poder calorífico do material incinerado. Este sistema pode ofertar entre 350 e 600 kWh/t dos RSU, explica (EPE, 2014).

De fato, a incineração dos RSU com poder calorífico inferior a 1.675 kcal/kg apresenta dificuldades técnicas e exige a adição de combustível auxiliar. (EPE, 2014) recomenda que o poder calorífico inferior (PCI) dos resíduos sólidos, expresso em kcal/kg, seja calculado a partir da expressão matemática:

$$PCI = \frac{(18500 \cdot Y_{\text{combustível}} - 2636 \cdot Y_{\text{H}_2\text{O}} - 628 \cdot Y_{\text{vidro}} - 544 \cdot Y_{\text{metais}})}{4,185} \quad (1)$$

Onde as variáveis $Y_{\text{combustível}}$, $Y_{\text{H}_2\text{O}}$, Y_{vidros} e Y_{metais} representam a proporção de cada elemento em uma unidade de massa dos RSU. (PEP, 2014) esclarece ainda, que do peso da fração orgânica combustível (putrescíveis, folhas e

madeira) deve ser descontado o percentual de água. O peso do percentual de água desses orgânicos corresponde à variável Y_{H_2O} . Na ausência de dados específicos, utiliza-se o valor típico de 60% como estimativa do teor de água nesses componentes do RSU.

Em seu trabalho Lombardi (2015) aborda as vantagens e desvantagens das principais tecnologias utilizadas para combustão do RSU, que são as tecnologias de combustores com grelha móvel/fixa, fornos rotativos e de leito fluidizado. De onde se destaca que os fornos rotativos não é a tecnologia mais utilizada, mas tem a vantagem de poder processar qualquer tipo de lixo e geralmente suportam altas temperaturas na ordem 1400°C, que pode ser uma opção, tendo-se em vista as características do RSU depositado no ASMOC. Lombardi (2015) também sugere uma produção combinada de calor e energia com um sistema para gerar vapor superaquecido como mostrado na Fig. 3, considerado como a melhor técnica para recuperação energética do RSU.

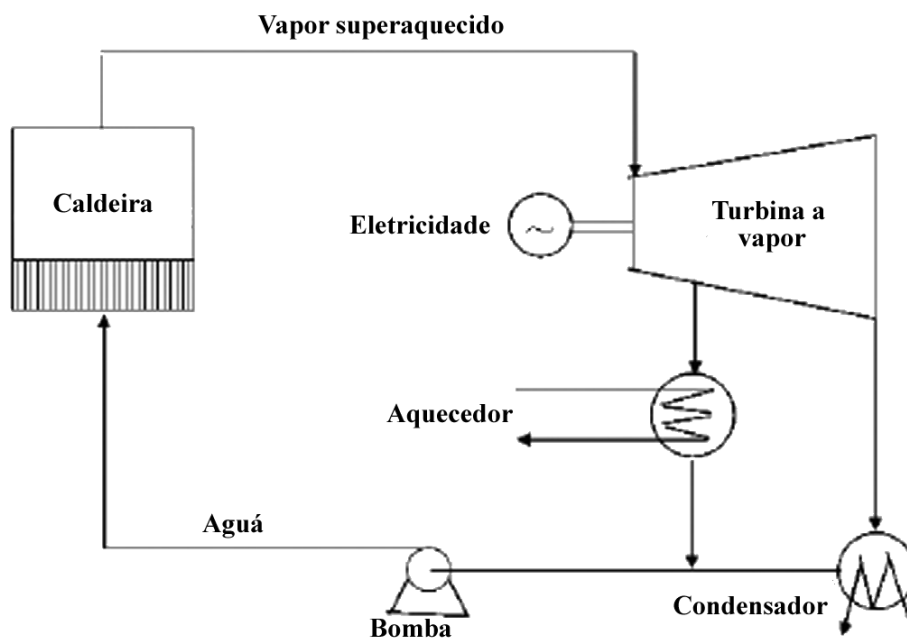


Figura 3 - Layout simplificado do ciclo de vapor para cogeração de calor e eletricidade (Lombardi, 2015).

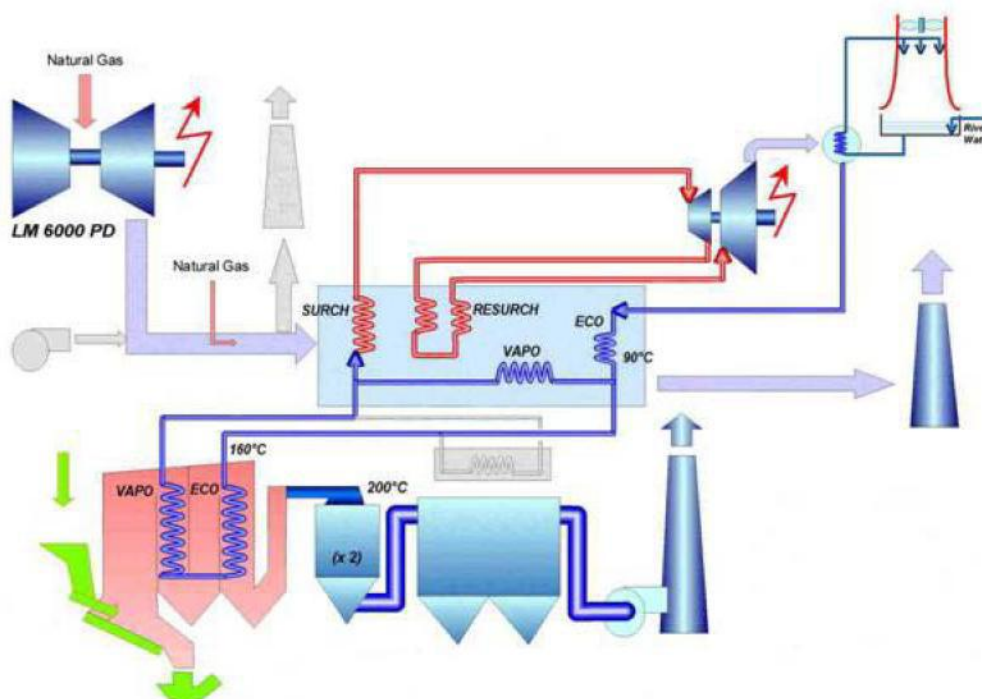


Figura 4 - Ciclo combinado com queima de biomassa bruta da usina Zabalgarbi (Carneiro, 2015).

Lombardi (2015) aponta que as usinas termoeletricas de recuperação energética de RSU, normalmente apresentam um desempenho inferior em comparação às usinas termoeletricas convencionais, devido a alguns pontos como:

- i) O tamanho das plantas, que são geralmente pequenas;

- ii) Parâmetros conservadores para o vapor (isto é, pressão de evaporação e temperatura de superaquecimento);
- iii) Pressão de condensação relativamente alta;
- iv) Configuração de ciclo simples (sem aquecimento a vapor, apenas alguns pré-aquecedores de água);
- v) Baixo aproveitamento da energia liberado com os gases de escape;
- vi) Grande taxa de consumo de energia na planta.

(Carneiro, 2015) apresenta em seu trabalho o caso da usina de Zabalgardi/Bilbao (Espanha), que funciona em ciclo combinado a gás natural e incinera resíduos, aproveitando seu conteúdo energético para produzir eletricidade. Essa usina apresenta-se como uma das mais modernas e eficientes do mundo. No sistema adotado nesta usina, mostrado na Fig. 4, vapor saturado a uma temperatura de 311°C e pressão de 100 bar é produzido no boiler do incinerador, cujo processamento é de 28 a 33,08 t/h de resíduos com PCI de 8000 KJ/kg. A queima de gás natural na planta ocorre em três pontos: no combustor do ciclo a gás, na entrada da caldeira de recuperação e dentro do incinerador. É feita uma extração do vapor expandido na turbina de alta pressão para ser reaquecido na caldeira de recuperação antes de adentrar na turbina de baixa pressão. A potência total máxima a ser obtida nas turbinas a gás e a vapor é de 99,5 MW, entretanto, a potência real lida (enviada para a rede) é 94 MW.

Esse trabalho propõe um sistema termoeletrico para operar em ciclo combinado queimando RSU e biometano produzido no ASMOC para a geração de energia elétrica, conforme apresentado na Fig. 5 e detalhado na seção seguinte.

3. METODOLOGIA

3.1. O Sistema Proposto

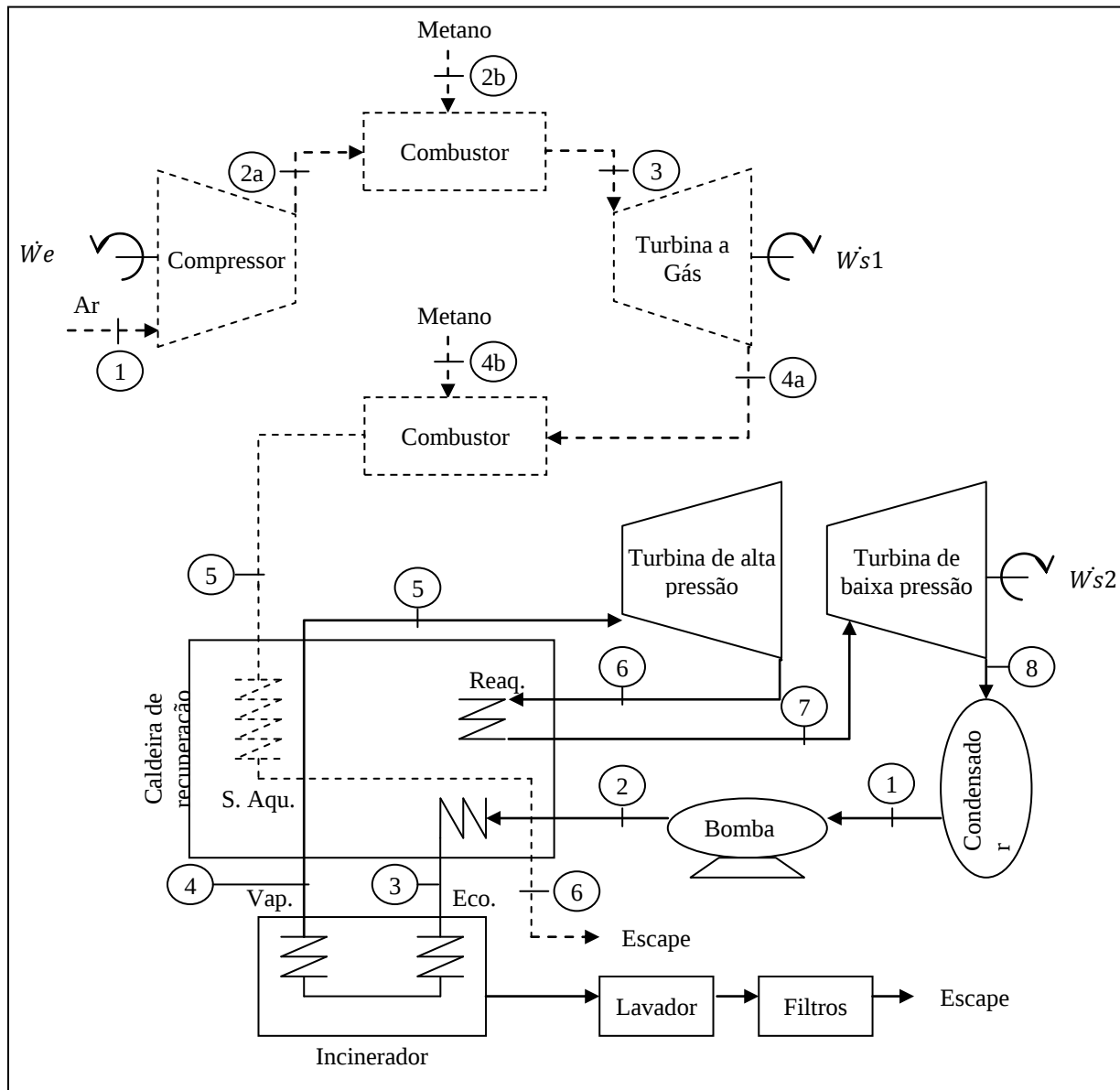


Figura 5– Sistema termoeletrico proposto.

O sistema proposto, conforme apresentado na Fig. 5, é um ciclo combinado, o qual é constituído de um ciclo a gás (representado em linhas tracejadas), utilizando metano como combustível, e um ciclo a vapor (desenhado com linhas contínuas), que utiliza uma turbina de duplo estágio, um incinerador, para queima dos RSU, e uma caldeira de recuperação.

Para a análise desse sistema, consideraram-se as seguintes hipóteses gerais:

- i) O sistema opera em regime permanente;
- ii) Cada um dos componentes do sistema apresentado na Fig. 5 é modelado como um volume de controle;
- iii) O fluido de trabalho do ciclo a gás e os gases de exaustão do incinerador são modelados ar e gás ideal;
- iv) A variação da energia cinética e potencial dos fluidos percorrendo o sistema são desprezíveis;
- v) Considera-se a combustão completa, nos dois combustores e no incinerador;
- vi) A temperatura ambiente e a pressão atmosférica utilizadas foram $T_{ref} = 26,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $P_{ref} = 0,101\text{ MPa}$, que é a temperatura média anual e a pressão atmosférica do município de Caucaia, conforme informado por CLIMATE-DATA (2017).

Para a análise do sistema foram considerados os parâmetros descritos na Tab. 3, que dizem respeito ao ciclo a gás, e Tab. 4 para o ciclo a vapor. Em seguida, com base nesses parâmetros, calcularam-se as demais variáveis do problema.

Tabela 3 – Parâmetros de entrada para o ciclo a gás.

Parâmetro	Valor
Razão ar-combustível para a queima de gás natural	56,87
Razão de massa entre o gás natural na caldeira e no queimador adicional	0,76
Eficiência isentrópica da turbina a gás	97%
Eficiência isentrópica do compressor	80%
Queda de pressão a caldeira de recuperação	0,03 MPa
Queda de pressão na câmara de combustão	0,015 MPa
Taxa de compressão	28
Temperatura no ponto 3	1400°C
Pressão no ponto 4	0,131 MPa
Temperatura no ponto 5	592°C
Pressão no ponto 6	0,101 MPa
Temperatura no ponto 6	150°C
Potência da turbina a gás	43000 KW

Tabela 4 – Parâmetros de entrada para o ciclo a vapor.

Parâmetro	Valor
Eficiência da turbina de alta pressão	90%
Eficiência da turbina de baixa pressão	90%
Eficiência isentrópica da bomba	80%
Eficiência isentrópica da caldeira de recuperação	80%
Eficiência do incinerador	79%
Queda de pressão entre os pontos 2 e 3	0,2 MPa
Queda de pressão entre os pontos 3 e 3'	0,2 MPa
Queda de pressão entre os pontos 3' e 4	0,3 MPa
Queda de pressão entre os pontos 4 e 5	0,3 MPa
Queda de pressão entre os pontos 6 e 7	0,1 MPa
Queda de pressão entre os pontos 8 e 1	0,005 MPa
Temperatura no ponto 1	45 °C
Título no ponto 1	0,0
Temperatura no ponto 3	90°C
Título no ponto 3'	0,0
Pressão no ponto 4	10 MPa
Título no ponto 4	1,0
Temperatura no ponto 5	534°C
Temperatura no ponto 6	0,3 MPa
Temperatura no ponto 8s	45°C
Temperatura no ponto 10	40°C
Pressão no ponto 10	0,101 MPa

Para o ciclo a gás, consideram-se as seguintes hipóteses:

- i) O processo no compressor e na turbina no ciclo a vapor são adiabáticos;
- ii) O compressor possui uma eficiência isentrópica de 80%;
- iii) O compressor possui uma taxa de compressão de 28;
- iv) A turbina pertencente ao ciclo a gás possui eficiência isentrópica de 97%;

Para o ciclo a vapor considerou-se as seguintes hipóteses:

- i) As turbinas de alta e baixa pressão possuem uma eficiência isentrópica de 90%;
- ii) A bomba apresenta uma eficiência isentrópica de 80%;
- iii) A caldeira de recuperação apresenta uma eficiência isentrópica de 80%;
- iv) O incinerador apresenta eficiência de 79%;

3.2. A Análise Termodinâmica do Sistema

Buscou-se analisar a viabilidade da instalação do sistema de incineração de resíduos do ponto de vista energético. Para tal, utilizou-se, conforme abordado na seção 2, um critério baseado na composição dos RSU, no qual se espera que para o poder calorífico superior a 1675 kcal/kg o sistema não apresente dificuldades técnicas ou mesmo necessidade de adição de combustível auxiliar.

OPCI dos resíduos foi determinado utilizando-se a Eq. (1), considerando-se a composição média dos RSU no ASMOC, conforme o levantamento feito por (Santos, 2010), ver a Tab. 2. Além disso, conforme sugerido por (EPE, 2014), um valor típico para o teor de umidade de 60% da fração orgânica do lixo foi utilizado.

Este trabalho fundamentou-se em uma pesquisa inicial para fundamentação teoria da proposta do sistema termoeletrico, com a definição do arranjo e dos componentes desse sistema. Em seguida, procedeu-se com um processo de iteração computacional para se atingir o melhor desempenho termodinâmico com base nas análises recomenda por (Moran, 2009).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com base nos parâmetros já pré-estabelecidos na seção anterior, determinaram-se as demais variáveis do sistema. As Tab. 5 e Tab. 6 apresentam os valores obtidos para os ciclos a gás e a vapor respectivamente.

Tabela 5 – Determinação das variáveis do ciclo a gás.

Parâmetro	Valor
Pressão no ponto 1	0,101 MPa
Temperatura no ponto 1	26,3 °C
Entalpia específica no ponto 1	299,9 kJ/kg
Entropia específica no ponto 1	5,701 kJ/kg.K
Entalpia específica no ponto 2	893,2 kJ/kg
Entropia específica no ponto 2	5,847 kJ/kg.K
Pressão no ponto 3	2,813 MPa
Entalpia específica no ponto 3	1846 kJ/kg
Entropia específica no ponto 3	6,623 kJ/kg.K
Entalpia específica no ponto 4	837,1 kJ/kg
Entropia específica no ponto 4	6,662 kJ/kg.K
Pressão no ponto 5	0,131 MPa
Entalpia específica no ponto 5	894,1 kJ/kg
Entropia específica no ponto 5	6,73 kJ/kg.K
Entalpia específica no ponto 6	424,7 kJ/kg
Entropia específica no ponto 6	6,05 kJ/kg.K
Vazão mássica de metano no combustor 1	0,7362 kg/s
Vazão mássica de metano no combustor 2	0,5595 kg/s
Potência do compressor	24,84 MW
Eficiência do ciclo a gás	44,0 %

Tabela 6 – Determinação das variáveis do ciclo a vapor.

Parâmetro	Valor
PCI dos resíduos	11,446 MJ/kg
Pressão no ponto 1	0,0096 MPa
Entalpia específica no ponto 1	188,3 kJ/kg
Entropia específica no ponto 1	0,6382 kJ/kg.K
Pressão no ponto 2	10,7 MPa
Entalpia específica no ponto 2	201,8 kJ/kg
Entropia específica no ponto 2	0,6466 kJ/kg.K
Pressão no ponto 3	10,5 MPa
Entalpia específica no ponto 3	385 kJ/kg
Entropia específica no ponto 3	1,185 kJ/kg.K
Pressão no ponto 3'	10,3 MPa
Temperatura no ponto 3'	313,2 °C
Entalpia específica no ponto 3'	1420 kJ/kg
Entropia específica no ponto 3'	3,38 kJ/kg.k
Temperatura no ponto 4	311 °C
Entalpia específica no ponto 4	2725 kJ/kg
Entropia específica no ponto 4	5,614 kJ/kg.k
Pressão no ponto 5	9,7 MPa
Entalpia específica no ponto 5	3464 kJ/kg
Entropia específica no ponto 5	6,724 kJ/kg.k
Temperatura no ponto 6	133,5 °C
Título no ponto 6	0,9887
Entalpia específica no ponto 6	2701 kJ/kg
Entropia específica no ponto 6	6,932 kJ/kg.k
Pressão no ponto 7	0,2 MPa
Temperatura no ponto 7	235,2 °C
Entalpia específica no ponto 7	2941 kJ/kg
Entropia específica no ponto 7	7,65 kJ/kg.k
Temperatura no ponto 8	53,38 °C
Pressão no ponto 8	0,0146 MPa
Título no ponto 8	0,9635
Entalpia específica no ponto 8	2510 kJ/kg
Entropia específica no ponto 8	7,751 kJ/kg.k
Vazão mássica de resíduos	15,27 kg/s
Potência da bomba	0,795 MW
Potência da turbina de alta pressão	45,05 MW
Potência da turbina de baixa pressão	25,40 MW
Eficiência do ciclo a vapor	26,7%

A Tab. 7 apresenta os principais resultados obtidos para o sistema proposto. Além disso, faz-se também um comparativo entre a proposta apresentada neste artigo com a usina de Zabalgarbi.

Tabela 7 – Comparativo dos resultados do Sistema proposto versus Zabalgarbi.

Parâmetro	Usina Zabalgarbi	Sistema proposto
Capacidade de processamento de resíduos	33 t/h	55t/h
Vazão de gás consumido	13870 m ³ /h	7169 m ³ /h
PCI dos resíduos	8000 kJ/kg	11446 kJ/kg
PCI do gás utilizado	38992 kJ/m ³	50020 kJ/m ³
Potência elétrica da turbina a gás	43 MW	43MW
Potência elétrica total gerada	99,18 MW	87,8MW
Temperatura do ar ambiente (entrada do compressor)	~7°C	26,3°C
Eficiência térmica do ciclo combinado	42%	~36%

Pode-se verificar que apesar do processamento superior de resíduos, o sistema proposto sugere um consumo consideravelmente inferior de biogás e apresenta-se em quantidade compatível com os 150.000 m³ produzidos diariamente no ASMOC. Além disso, o sistema proposto fornece potência elétrica total de 87,8 MW, próxima à potência gerada pela usina de Zabalgarbi (diferença relativa de aproximadamente 11%).

Vale ressaltar, que os RSU, destinados ao ASMOC, apresentam PCI superior ao utilizado na usina de Zabalgardi e superior à média nacional que é de 10970 kJ/kg.

5. CONCLUSÃO

O sistema proposto apresenta eficiência de 36%, relativamente alta quando comparado com outras usinas ao redor do mundo que operam entre 20 e 40%. Além disso, tendo-se em vista o PCI de aproximadamente 11,446 MJ/kg para esses resíduos, nota-se que estes apresentam um elevado conteúdo energético, sendo, portanto, seu aproveitamento fortemente recomendado.

A potência gerada pelo sistema proposto de 87,8 MW evidencia que a incineração dos RSU, além de fornecer uma solução para o tratamento térmico e redução do volume e massa dos materiais nos aterros sanitários, apresenta-se como uma alternativa interessante para a geração de energia elétrica, contribuindo para a diversificação da matriz energética do estado do Ceará.

6. REFERÊNCIAS

- Brasil., 2012, “[Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010]. Política nacional de resíduos sólidos [recurso eletrônico]”, 2. ed. – Brasília : Câmara dos Deputados, Edições Câmara.
- Brasil, M. M. E., 2007, “Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia”, Colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE.
- Carneiro, M. L. N. M., 2015, “Análise termoeconômica e ambiental de uma usina de aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos - Estudo de caso da planta de Zabalgardi/Bilbao adaptada para a realidade brasileira”, Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.
- Campuzano, R., Martínez, S. G., 2016, “Characteristics of the organic fraction of municipal solid waste and methane production: A review”, Waste Management, v. 54 (2016), p. 3–12.
- EPE, 2014, “Nota Técnica DEA 18/14: Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos.”, Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia.
- Ma, H., Cao, Y., Lu, W., Ding, Z., Zhou, W., 2016, “Review of Typical Municipal Solid Waste Disposal Status and Energy Technology”, Energy Procedia, v. 88 (2016), p. 589 – 594.
- Maia, F., 2013, “O gigante solitário”, Disponível em: <<http://diariodonordeste.verdesmares.com.br/cadernos/regional/o-gigante-solitario-1.437609>>, Acesso em: 17 de novembro de 2007.
- Meyohas, M., 2014, “Após inaugurar primeira usina de biogás, Ecometano planeja mais dois projetos até 2016.”, Disponível em: <<https://petronoticias.com.br/archives/61095>>, acesso em: 17 de novembro de 2007.
- Mezzedimi, L., 2017, “Nutech articula com GNR para produzir biogás a partir do lixo.”, Disponível em: <<http://www.ceara.gov.br/2017/07/17/nutech-articula-com-gnr-para-produzir-biogas-partir-do-lixo/>>. Acesso em: 15 novembro de 2017.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., 2009, “Princípios de Termodinâmica para Engenharia.”, Rio de Janeiro: LTC.
- Lima, J. D., *et al*, 2011, “Projeto de implantação para a ampliação do aterro sanitário metropolitano de Caucaia – CE”, Relatório de Impacto Ambiental (RIMA).
- Lombardi, L., Carnevale, E., Corti, A., 2015, “A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste”, Waste Management, v. 37 (2015), p. 26–44
- Santos, G. O., Mota, F. S. B., 2010, “Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares de Fortaleza/CE Dispostos no Aterro Sanitário de Caucaia/CE.” Revista Tecnologia, Fortaleza, v. 31, p.39-50.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

ENERGY RECOVERY OF URBAN SOLID WASTE: A PROPOSAL BASED ON THERMAL EFFICIENCY ANALYSIS

J. H. B. Silva, jackson.h.b.silva@gmail.com¹

M. R. Mendes, matheus_rmendes@outlook.com¹

A. V. Bueno, bueno@ufc.br¹

¹ Universidade Federal do Ceará - UFC, CE, Brasil, Campus Universitário do PICI, Bloco 714, CEP 60455-760,

Abstract. *The final disposal of urban solid waste has long been a problem for large cities and today's society. By means of more rigorous legislation, the level of demand for solutions to this problem has been increasing, while there is an increase in demand for electricity. In this context, as a way to reduce the volume of urban solid waste (MSW) and to take advantage of the energy potential of these materials, this work aims to propose a thermoelectric system operating in a combined cycle with methane and MSW, applicable to the city of Fortaleza- EC and to assess its feasibility through an analysis of thermodynamic performance. It is a garbage-energy plant that aims to help solve two of the great problems of today's large metropolises. The analysis of the proposed system indicated that its thermal efficiency is approximately 36%, considered a good result compared to the Zabalgardi plant, the most modern and efficient in the world with an efficiency of 42%.*

Keywords: *Urban waste, energy recovery, combined cycle.*