

Avaliação do Projeto Piloto de Recuperação do Biogás no Aterro da Muribeca/PE

Felipe J. Maciel, José Fernando T. Jucá e Alcides Codeceira Neto

Resumo – O objetivo principal deste projeto foi a avaliação do potencial de geração de biogás e a análise da produção de energia, a partir do desenvolvimento e implantação de uma Célula Experimental com 36.659 t de resíduos sólidos urbanos e uma Usina Piloto com capacidade de gerar 20 kW no Aterro da Muribeca/PE. Tal projeto foi financiado pela CHESF com apoio operacional da EMLURB. Os resultados encontrados permitiram concluir que em função das características dos resíduos e do clima local a decomposição dos RSU ocorreu de forma mais intensa e acelerada que o previsto na literatura internacional. A eficiência global obtida no gerador está dentro da faixa de valores reportados na literatura. A análise simplificada de viabilidade do empreendimento mostrou que o projeto com venda de energia elétrica é viável com restrições de tarifação, entretanto quando os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs), a viabilidade se torna altamente positiva.

Palavras-chave – Aproveitamento energético, biogás, meio ambiente, resíduos urbanos, biogás e viabilidade.

I. INTRODUÇÃO

A situação dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil ainda é precária, uma vez que existem cerca de 4.000 lixões em operação, os quais contribuem para a contaminação do meio ambiente e a má qualidade de vida da população. De acordo com [1], apenas 36% dos resíduos gerado em todo o País é destinado aos aterros sanitários, enquanto o restante é disposto indevidamente em lixões ou aterros controlados. As emissões fugitivas de biogás são um grave problema de poluição atmosférica de nível local e global que precisa ser mitigado. O gás metano (CH_4) é o segundo maior contribuinte para o aquecimento global, atrás apenas do CO_2 , entre as emissões antrópicas de gases do efeito estufa. Vale lembrar que o CH_4 é cerca de 21 vezes mais eficiente que o CO_2 no aprisionamento de calor na atmosfera [2].

A alternativa de aproveitamento energético do biogás e a redução de emissões nos aterros de RSU, associadas à comercialização dos créditos de carbono e inserção social, podem contribuir para a solução sustentável da gestão dos

RSU. É importante lembrar que as novas fontes de energias renováveis devem apresentar crescimento nos próximos anos, devido aos novos mecanismos de incentivo que vêm sendo oferecidos por entidades governamentais no Brasil e no mundo. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é um dos instrumentos existentes em escala global. Apesar destes incentivos, poucas são as experiências de geração de energia com biogás em escala comercial no Brasil.

O estudo do potencial de biogás em aterros de RSU no Brasil ainda é um desafio para a engenharia nacional, uma vez que, as atuais estimativas são realizadas com base em critérios e experiências internacionais que não vêm apresentando resultados satisfatórios. Os poucos projetos de aproveitamento energético do biogás no Brasil estão localizados no eixo sul-sudeste e alguns estão apresentando dificuldades de ordem técnica em função de falhas na previsão de produção de biogás. Os parâmetros técnicos utilizados como referências nacionais foram desenvolvidos para aterros de países desenvolvidos, onde as características de projeto, operacionais, dos resíduos e as condições climáticas são bem distintas dos aterros existentes no País. Nos últimos anos, o desenvolvimento de novos ensaios laboratoriais e de campo para avaliação do potencial de gás, associado ao estudo da decomposição dos resíduos em diferentes escalas, vêm contribuindo para minimizar este problema.

O “Projeto Piloto para Recuperação Energética do Biogás no Aterro da Muribeca/PE” é um projeto de P & D que teve como objetivo avaliar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos, esclarecendo para a sociedade em que condições é possível obter benefícios financeiros, ambientais e sociais desta fonte energética, além deste objetivo, podemos citar outros de grande importância, como a formação de recursos humanos qualificados e especializados em várias áreas de conhecimento (engenharias civil, mecânica, elétrica e bioquímica) e desenvolvimento de P & D na área de energia limpas ou renováveis. Este trabalho pode ser de grande valia para o desenvolvimento deste tema no Brasil e poderá ser aplicado em diversos aterros de resíduos urbanos, principalmente considerando o porte e a taxa de disposição de resíduos desta célula, que são semelhantes aos de pequenos e médios municípios do Brasil.

O referido Projeto foi submetido e aprovado através do Edital de P&D da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), ciclo de 2002-2003, junto a Agência Nacional de Energia e Eletricidade (ANEEL). O código ANEEL do Projeto é 0048-121/2005. As instituições envolvidas no Projeto são: CHESF – entidade financiadora; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – entidade executora; Universidade

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Os autores agradecem pelo suporte financeiro da Companhia Hidrelétrica do São Francisco – CHESF.

F.J. Maciel e J.F.T. Jucá trabalham na Universidade Federal de Pernambuco (e-mails: maciel2@hotmail.com e jftjucah@gmail.com).

A. Codeceira Neto trabalha na CHESF (e-mail: alcidesc@chesf.gov.br).

de Pernambuco (UPE) – co-executora. Além das entidades citadas, o projeto teve suporte operacional da Empresa de Limpeza Urbana de Recife (EMLURB). A duração do projeto foi de agosto/2006 a novembro/2009, entretanto estudos posteriores estão sendo realizados por parte da UFPE na Célula Experimental.

II. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A Célula Experimental está localizada no Aterro da Muribeca/PE, o qual está situado na Região Metropolitana do Recife (RMR), no município de Jaboatão dos Guararapes/PE, a cerca de 15,0 km do Centro do Recife. As coordenadas geográficas do aterro são: 8° 9' 50" S (latitude) e 34° 59' 00" W (longitude). Esta região possui clima tropical litorâneo, quente e úmido, tipo Ams', comandado por ventos de sudeste com velocidades médias entre 3,1 a 4,2 m/s. A precipitação pluviométrica da região é abundante, com média anual de 2.458 mm e evaporação de 1.390 mm. A temperatura média anual é de 25,5°C e a umidade relativa média do ar é de 79,8%. Tais condições são favoráveis para degradação biológica dos resíduos e produção de biogás.

A Célula Experimental possui uma área de base de 5.993 m² e altura máxima de 9 m de resíduos, distribuída em dois patamares com 3,0 m e 6,0 m de altura. A capacidade de RSU da célula é de 36.659 t. Existem 05 drenos verticais para escoamento dos gases produzidos no interior da massa de lixo, os quais possuem diâmetro (ϕ) externo de 700 mm (camada de pedra britada) e uma tubulação interna de PVC rígido com $\phi = 110$ mm. Toda a rede de coleta de biogás é composta por dutos flexíveis de polietileno de alta densidade (PEAD) com $\phi = 110$ mm (coletor-tronco) e $\phi = 75$ mm (ramais e sub-ramais). O comprimento linear da rede é de cerca de 300 m. A Figura 1 ilustra a Célula Experimental no Aterro da Muribeca/PE.



Figura 1. Ilustração da Célula Experimental no Aterro da Muribeca/PE.

O biogás coletado na célula é direcionado para a Usina Piloto, cujos principais componentes são: (I) gerador de 20 kVA, (II) compressor radial (extrator), (III) filtro de biogás, (IV) sistema trocador de calor, (V) queimador (flare) aberto, (VI) medidor volumétrico de biogás e (VII) dispositivos de segurança para tubulações/equipamentos. O sistema de geração de energia utilizado neste estudo é baseado no princípio de indução eletromagnética (geração assíncrona), onde um motor elétrico funciona como um rotor acoplado ao motor alimentado pelo biogás. O gerador ou “economizador de

energia” possui potência instalada de 20 kVA. O motor a biogás é do fabricante GM, modelo corsa, 1,8, 40 cv a 1800 rpm, 4 cilindros, trifásico, 380 Volts. O compressor radial é responsável pela aplicação de vácuo na rede de coleta de gás de forma que seja possível extrair o biogás com melhor eficiência do interior da massa de lixo. A Figura 2 ilustra os principais equipamentos da Usina Piloto da Muribeca.



Figura 2. Ilustração dos principais equipamentos da Usina Piloto.

Os detalhes da implantação e a metodologia do Projeto Piloto para Recuperação Energética do Biogás no Aterro da Muribeca/PE foram apresentados por [3] no V CITENEL. É importante destacar que a metodologia da pesquisa contemplou:

- Caracterização físico-química dos resíduos: composição gravimétrica, volumétrica, compressibilidade, contaminação por partículas, teor de umidade, teor de sólidos voláteis, calorimetria, celulose, lignina e lipídios.
- Avaliação laboratorial do potencial de produção de biogás por meio de ensaio específico (Biochemical Methane Potential) desenvolvido nesta pesquisa;
- Acompanhamento diário da quantidade de resíduos depositada na célula, incluindo levantamento topográfico para estimativa da densidade do maciço.
- Caracterização da camada de solo de cobertura dos resíduos, incluindo a avaliação de emissões fugitivas de CH₄ para a atmosfera;
- Monitoramento geoambiental da célula: qualidade e quantidade de biogás e chorume produzidos na célula e determinação da temperatura e pressão interna dos resíduos;
- Monitoramento da produção de energia, incluindo avaliação da eficiência do sistema e estudo de viabilidade financeira do projeto.

Os resultados parciais da pesquisa (caracterização dos resíduos, controle de enchimento da célula, ensaios laboratoriais, monitoramento da camada de cobertura e parte do estudo da produção de biogás) foram apresentados por [3]. Desta forma, este artigo tem como objetivo apresentar a avaliação geral do Projeto, contemplando a análise final da produção de biogás, geração de energia e viabilidade financeira.

III. ESTUDO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O monitoramento do biogás consistiu na avaliação semanal da composição, vazão, temperatura e pressão nos cinco drenos verticais existentes na célula e na rede de coleta de biogás. Os principais equipamentos utilizados no monitoramento foram: detector portátil Dragger X-am 7000 (concentração do biogás), termo-anemômetro portátil (velocidade – faixa de 0 a 20 m/s), manômetro digital (pressão - faixa de 0 – 10 kPa) e termômetro digital tipo termopar (faixa 0 – 500°C).

A. Composição e vazão do biogás

A Figura 3 apresenta o resultado médio da composição do biogás até o 550º dia (julho/2009) da conclusão da Célula Experimental. Observa-se que o biogás inicialmente estava com baixa concentração de CH₄, entretanto após o fechamento da célula as condições anaeróbicas se estabeleceram de forma rápida (queda na presença de O₂), indicando que os resíduos estão na fase metanogênica da decomposição dos resíduos com concentrações médias de CH₄ e CO₂ em torno de 55% e 40%, respectivamente.

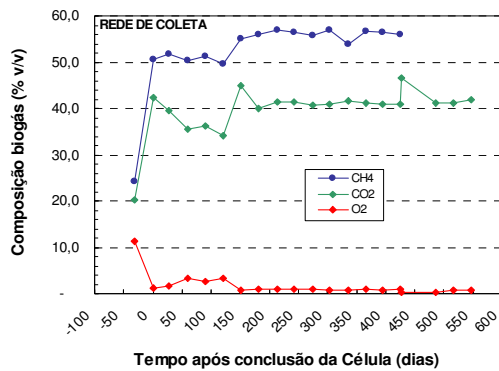


Figura 3. Monitoramento da composição do biogás na rede de coleta com o tempo.

As Tabelas 1 e 2 apresentam a composição e vazão média do biogás em cada dreno da célula, respectivamente. Observa-se que os drenos DV-04 e DV-05 apresentaram maior influência das condições atmosféricas devido à presença de O₂ no biogás. Este fato também alterou a concentração de CH₄, cujos valores foram inferiores a 50%. É importante verificar ainda que as vazões nestes dois drenos foram mais baixas que os demais. Este comportamento está diretamente relacionado com a profundidade útil dos drenos na célula, a qual foi inferior a 4,0 m. Os drenos DV-01, 02 e 03 apresentam profundidades da ordem de 7,0 a 8,0 m. Em função da baixa qualidade do biogás nos DV-04 e 05, além da reduzida vazão, os mesmos foram isolados do sistema de coleta da Usina Piloto da Muribeca para não prejudicar a qualidade do biogás e o desempenho do gerador. Observa-se ainda na Tabela 2 a redução de 76,1% na vazão de biogás num intervalo de cerca de 18 meses (550 dias), reforçando a rápida velocidade de degradação dos resíduos com o tempo. Este fato também se deve a problemas operacionais, como o lento enchimento da célula e a não existência de camadas de cobertura intermediárias.

Tabela 1. Composição do biogás em cada dreno vertical.

Dreno	Composição média do biogás (%) – Dez/07 a Jul/09		
	CH ₄	CO ₂	O ₂
DV-01	55,0 ± 5,7	40,8 ± 3,5	1,0 ± 1,7
DV-02	55,7 ± 4,0	41,0 ± 2,4	0,7 ± 0,8
DV-03	54,3 ± 6,0	40,9 ± 3,8	1,1 ± 1,7
DV-04	49,5 ± 13,0	36,5 ± 8,2	2,8 ± 4,2
DV-05	46,3 ± 15,1	35,0 ± 10,8	3,5 ± 5,1

Tabela 2. Vazão de biogás e CH₄ em cada dreno vertical da Célula Experimental.

Dreno	Captação* (t = 0) (Nm ³ /h)			Captação* (t = 550 dias) (Nm ³ /h)			Redução % no período 550 dias		
	Biogás	CH ₄	Temp.(°C)	Biogás	CH ₄	Temp.(°C)	Biogás	CH ₄	Temp.
DV-01	53,4	30,4	50,3	16,0	9,1	31,8	70,0	70,1	36,8
DV-02	41,0	22,6	48,6	13,1	7,5	32,5	68,0	66,8	33,1
DV-03	58,4	26,8	49,3	17,8	10,2	32,2	69,5	61,9	34,7
DV-04	25,6	9,8	54,4	2,6	1,4	30,7	89,8	85,7	43,6
DV-05	15,1	7,7	54,8	2,5	1,4	31,6	83,4	81,8	42,3
SOMA	193,5	97,3	-----	52,0	29,6	-----	76,1**	73,3**	-----

Obs.: t = 0 (valor médio do mês de jan/08) e t = 550 dias (valor médio do mês de jul/09); ** média.

A Figura 4 apresenta o monitoramento da vazão de biogás captada pelo sistema de coleta da Célula Experimental e as previsões feitas com os modelos do IPCC (2006) e USEPA (Landgem) com base em parâmetros “default”. Observa-se uma elevada captação de gás no início do monitoramento, a qual foi de 4 a 5 vezes superior que previsto pelos referidos modelos. Por outro lado, existe uma queda acentuada da vazão com o tempo, a qual tenderá a ficar menor que o previsto após 2011. Tal fato indica que a velocidade de degradação dos resíduos para as condições climáticas e operacionais da Célula Experimental é muito mais rápida e intensa que o previsto na literatura. [4] estimou que estes valores representam 41,4% da produção total de biogás da célula, haja vista que uma parcela da produção ficou acumulada na célula e outro foi liberada pela camada de cobertura como emissões fugitivas. Quando o compressor está em operação (extração forçada dos gases), a eficiência de coleta atingiu valores da ordem de 60,0% do total de biogás produzido na célula.

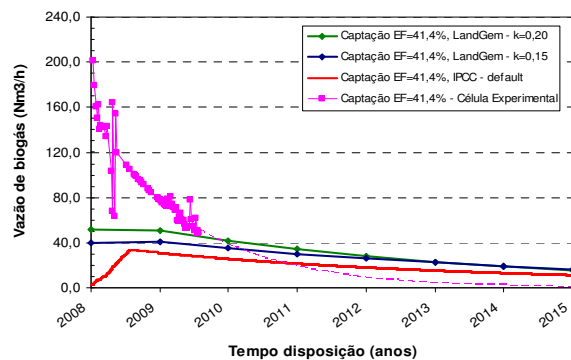


Figura 4. Evolução da captação do biogás na Célula Experimental e previsão teórica IPCC e EPA.

B. Indicadores da captação de biogás

Os indicadores definidos para análise da produção/captação de biogás na Célula Experimental podem ser muito úteis

para futuros projetos de aproveitamento energético do biogás que vierem a ser desenvolvidos no Brasil, tendo em vista que os resultados estão apresentados de forma normalizada em função da altura útil dos drenos (taxa de captação por metro de drenagem) e do peso/tempo de disposição dos resíduos (taxa de captação ao longo do tempo).

A taxa de captação por metro de drenagem foi calculada com base na vazão de biogás e nas alturas (profundidade) de cada dreno no interior da Célula Experimental. Os resultados da taxa de captação de biogás por metro de drenagem variaram de 3,4 Nm³/h.m a 8,5 Nm³/h.m (quando da conclusão da célula, onde a produção de biogás era mais intensa) e de 0,1 Nm³/h.m a 0,3 Nm³/h.m (após 550 dias de monitoramento). Observou-se ainda que a eficiência da captação do biogás por metro de drenagem independe da profundidade do dreno. O DV-04, com apenas 3,0 m de profundidade, foi o que apresentou a maior taxa de captação unitária (8,5 Nm³/h.m). Desta forma, pode-se afirmar que a eficiência de captação do biogás está mais relacionada com fatores internos do aterro (ex.: nível de líquidos) e/ou estruturais dos drenos (ex.: colmatação, ruptura, desmonte de peças sobrepostas etc) à altura útil dos mesmos. Este tipo de análise é relevante para o dimensionamento de drenos verticais em aterros de RSU.

A taxa de captação de biogás por tonelada de resíduos aterrados na Célula Experimental variou de 12,4 Nm³/t.ano (t = 550 dias) a 46,2 Nm³/t.ano (t = 0) – base úmida. Estes valores foram obtidos dividindo-se a vazão captada de biogás da célula pela quantidade de resíduos aterrada (36.659,8 t). [5] coletaram dados de 86 aterros sanitários de diferentes países e constataram que a taxa de captação de biogás situa-se entre 0,8 e 10,0 m³/t.ano a depender da idade dos resíduos, embora resultados de até 20,0 m³/t.ano tenham sido observados. O estudo conduzido por [6] em 05 células experimentais no Reino Unido permitiu concluir que a taxa máxima de geração ocorreu após 5 e 7 anos com valores da ordem de 13 a 22 m³/t.ano. Conclui-se, portanto, que os valores obtidos na Célula Experimental são superiores ao reportado na literatura técnica internacional, considerando os dados de aterros sanitários e células piloto de grandes dimensões, os quais citam taxa máxima de até 22,0 Nm³/t.ano. Entre os fatores que contribuíram para esta potencialização do biogás, pode-se citar: características físico-químicas dos resíduos da célula e condições climáticas favoráveis para decomposição dos resíduos na RMR.

IV. TRATAMENTO DO BIOGÁS

O tratamento do biogás foi realizado com o objetivo de reduzir a condensação do vapor de H₂O do biogás e evitar a presença do H₂S no gerador. No que se refere ao condensado, vale destacar que mesmo com a presença do separador de condensado e de drenos ao longo de toda rede de coleta de PEAD, não foi possível evitar a presença do mesmo na Usina Piloto da Muribeca. A presença do condensado na usina estava relacionada com as variações da temperatura do biogás antes e após a passagem pelo compressor. A temperatura média do biogás determinada na sucção e recalque do compressor no período de fevereiro a julho/2009 na Usina Piloto da Muribeca foi de 36,1 ± 4,5°C e de 37,4 ± 3,6°C, respectivamente, sendo esta faixa de valores superiores à temperatura ambiente (29,5 ± 1,0°C), que seria a mesma

temperatura do gerador. Desta forma, foi instalado um trocador de calor antes do filtro de H₂S para minimizar este problema. Observou-se que houve uma redução média de 2,9°C na temperatura do gás, entretanto o mesmo não foi eficiente para baixar a temperatura para a faixa de temperatura ambiente.

O tratamento secundário do biogás, o qual foi concebido para remover o H₂S por adsorção em esponja de aço, foi monitorado durante os meses de fevereiro a junho/2009. A Figura 5 apresenta os resultados obtidos na pesquisa. Observa-se que a concentração do H₂S no biogás na entrada do filtro variou de 37,0 a 352,0 ppm (média de 108,7 ± 81,1 ppm), enquanto a presença do H₂S no biogás tratado variou de 6,0 a 143,0 ppm (média de 52,5 ± 35,0 ppm). A eficiência média de remoção do H₂S no período foi de 46,7% ± 14,6%. Apesar da remoção percentual de H₂S ter sido relativamente baixa, verifica-se que existe uma tendência de crescimento da eficiência do sistema com o tempo.

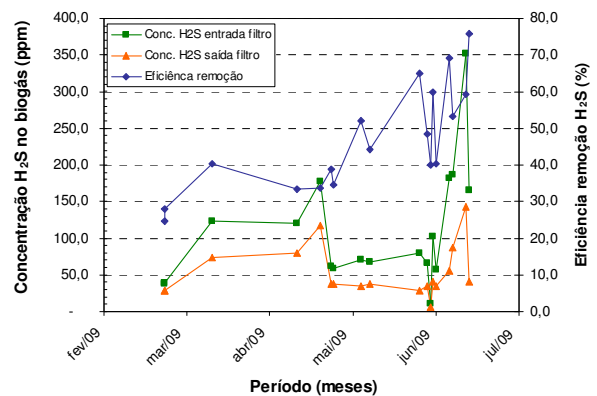


Figura 5. Monitoramento da eficiência do filtro para remoção do H₂S do biogás.

Os requisitos de qualidade do biogás apresentados pela [7] mostram que os motores Deutz (Alemanha) exigem concentrações de H₂S inferiores a 0,15% em volume, ou seja, menor que 1.500 ppm. De acordo com [8] a vida útil dos motores de combustão e o custo de manutenção das unidades de aproveitamento são influenciados diretamente pela concentração de H₂S no biogás. O biogás com ausência de gás sulfídrico apresenta um intervalo de troca de óleo em torno de 1.000 horas e aquele com 200 ppm de H₂S são necessários trocas a cada 360 horas. Em relação ao custo de manutenção, o mesmo é três vezes maior quando a presença do H₂S é de 200 ppm. Observa-se que a concentração média de H₂S no biogás tratado na Usina Piloto da Muribeca foi de 52,5 ppm, sendo este valor ¼ do limite estabelecido por [8] e muito inferior ao limite superior dos motores Deutz. Conclui-se, portanto, que o tratamento do biogás na Usina Piloto da Muribeca não conseguiu eliminar totalmente a presença do H₂S do biogás, entretanto pode ser extremamente válido para aumentar a vida útil do motor e reduzir os custos de manutenção do gerador.

V. AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA

Os testes de pré-operação da Usina Piloto da Muribeca foram realizados em dezembro/2008 e janeiro/2009. A falta de

parâmetros de referência para operacionalizar o equipamento com biogás de aterros de RSU foi um grande desafio para o desenvolvimento da pesquisa. Vale ressaltar que este tipo de gerador nunca tinha sido aplicado em aterros sanitários no Brasil, mas sim em projetos de suinocultura onde as condições do biogás são distintas.

A avaliação da eficiência elétrica do sistema foi realizada comparando-se o poder calorífico teórico do combustível e a energia elétrica produzida no sistema. O poder calorífico inicial do biogás foi calculado multiplicando-se o potencial teórico do CH_4 de $35,9 \text{ MJ/m}^3$ [9] pela vazão requerida pelo gerador. A Figura 6 apresenta as vazões de CH_4 requeridas pelo gerador para as três configurações testadas na fase inicial da pesquisa. A Figura 7 ilustra as intervenções realizadas no gerador para garantir um melhor rendimento e eficiência elétrica do sistema.

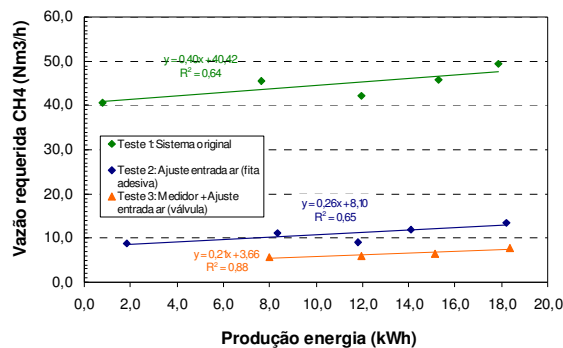


Figura 6. Vazão de CH_4 requerida pelo gerado em função da produção de energia.



Figura 7. Ilustração das intervenções no gerador para melhoria da eficiência elétrica.

No primeiro teste, com a configuração original do motor (Teste 1), a vazão de CH_4 requerida para atingir a carga máxima do sistema foi de $49,3 \text{ Nm}^3/\text{h}$. A eficiência do sistema neste teste foi de apenas 3,6%. Após os ajustes preliminares de regulagem da entrada de ar com fita adesiva (Teste 2) a eficiência elétrica do gerador aumentou para 13,5% e a vazão de metano requerida decresceu para $13,6 \text{ Nm}^3/\text{h}$. O Teste 3 foi realizado após a instalação da válvula de controle da entrada de ar e de mais duas válvulas de ajuste fino e um medidor volumétrico do biogás. A vazão de CH_4 requerida decresceu para $7,8 \text{ Nm}^3/\text{h}$, a produção de energia de $18,4$

kWh e a eficiência elétrica de 23,5%.

Após o ajuste definitivo do sistema (Teste 3), foram realizados, numa segunda etapa, mais dois testes de produção de energia. Os resultados obtidos nestes testes (Teste 4 e 5) foram melhores que o Teste 3 e estão consolidados na Tabela 3, a qual indica que a vazão de CH_4 requerida pelo sistema reduziu para patamares da ordem de $5,0 \text{ Nm}^3/\text{h}$ para produção de $17,4 \text{ kWh}$. Com base nestes valores, a eficiência final do sistema nos Testes 4 e 5 variou de 23,7% a 34,9% para o limite superior de produção de energia obtido na pesquisa (cerca de $17,4 \text{ kWh}$, algo em torno de 87% da potência instalada do gerador = 20 kW). Este estudo permitiu determinar ainda que existe uma faixa de produção de energia onde o rendimento do gerador foi mais eficiente, a qual ficou em torno de 15 kWh (75% da potência instalada) e a eficiência elétrica variou de 33,6% a 41,1%.

Tabela 3. Resultados dos cinco testes de produção de energia.

Teste	Máx. potência produzida (kW)	% potência nominal – 20 kW	Vazão CH_4 requerida (Nm^3/h)	Consumo (Nm^3/kWh)	Eficiência global (%)	
01	Conf. inicial	17,9	89,5	49,3	2,761	3,6
02	Fita adesiva	18,2	91,0	13,6	0,746	13,5
03	Válvulas + medidor	18,4	92,0	7,8	0,427	23,5
04	Válvulas + medidor	17,5	87,5	7,4	0,423	23,7
05	Válvulas + medidor	17,4	87,0	5,0	0,287	34,9

A literatura técnica [10], [11] e [2] ressalta que os motores de combustão interna (MCI) utilizados como geradores síncronos de energia apresentam eficiência elétrica variando de 20% a 45%. [12] obteve eficiência da ordem de 38,0 a 40,0% e está desenvolvendo um projeto específico de motores para obter 50,0% de eficiência. Por outro lado, estudo desenvolvido por [13] em um sistema de geração assíncrono (gerador de indução) obteve eficiência elétrica de 4,17% e 10,3% com biogás da bovinocultura e suinocultura, respectivamente.

A eficiência elétrica obtida na Usina Piloto da Muribeca está na mesma faixa de valores da literatura técnica internacional para motores de geração síncrona (20% a 45%) e foi mais satisfatória que o reportado no estudo de [13]. No que se refere ao consumo de biogás do gerador, os valores obtidos variaram de $0,287$ a $0,427 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{kWh}$ para a faixa de produção de $17,4 \text{ kWh}$ e de $0,244$ a $0,298 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{kWh}$ para faixa de produção de melhor rendimento (em torno de $15,0 \text{ kWh}$). Estes valores estão coerentes com a literatura técnica internacional que reportou valores da ordem de $10,920 \text{ kJ/kWh}$ (ou $0,30 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/\text{kWh}$) para motores MCI.

Conclui-se, portanto, que os parâmetros de operação do gerador na Usina Piloto da Muribeca foram: (I) pressão de entrada no motor < $0,25 \text{ kPa}$, (II) rotação do motor = 1880 rpm , (III) intensidade média de corrente elétrica = 32 a 34 A , (IV) vazão de CH_4 requerida no sistema em torno de $5,0 \text{ Nm}^3/\text{h}$ e (V) tensão gerada na rede = 360 Volts . Tais parâmetros garantem uma produção de energia superior a $17,0 \text{ kWh}$ (acima de 85% da capacidade instalada da Usina) e uma eficiência elétrica de 23,7 a 34,9%.

A Figura 8 apresenta a produção de energia acumulada na Usina Piloto da Muribeca no período de janeiro a julho/2009. Observa-se que o valor acumulado até final de

jul/09 foi de 6.559 kWh durante 190 dias corridos, o que representa uma média de 34,5 kWh/dia. Este baixo valor deve-se ao fato da operação da Usina Piloto da Muribeca ser realizada em dias úteis e quando não existe nenhum ensaio do monitoramento na Célula Experimental. Se for considerado apenas as horas de operação do gerador neste período (349,2 horas), obtêm-se uma produção de 428,5 kWh/dia, ou simplesmente, 17,8 kW de potência útil. Este valor representa um percentual de 89,3% da capacidade instalada da Usina (20 kW) e está coerente com os parâmetros de operação da usina obtidos nos testes de pré-operação.

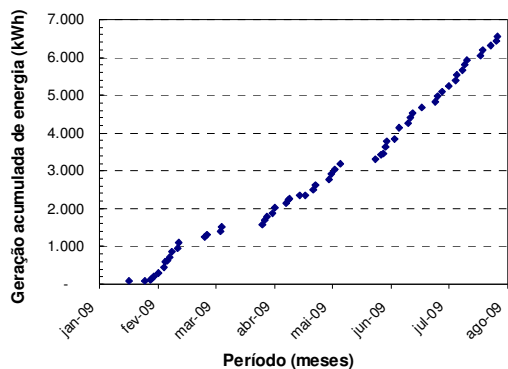


Figura 8. Produção de energia acumulada no período de jan/09 a jul/09.

VI. VIABILIDADE FINANCEIRA DO APROVEITAMENTO

A análise simplificada de viabilidade do aproveitamento do biogás teve como objetivo verificar os resultados econômico-financeiros do projeto a partir de parâmetros experimentais de produção de biogás e de operação da Usina Piloto da Muribeca. Esta análise foi baseada na metodologia apresentada por [14], levando em consideração a previsão de receitas e despesas do empreendimento e a determinação do Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), os quais são indicadores usuais de avaliação financeira de empreendimentos. O período de análise do investimento foi de 10 anos a partir de março/2008, quando já existiam condições para operar o sistema de queima do biogás e de geração de energia elétrica.

Os tipos de projetos analisados foram: Tipo I – projeto exclusivo com geração de energia elétrica, Tipo II – projeto exclusivo com queima do biogás para obtenção de Certificados de Emissões Reduzidas (CERs) e Tipo III – projeto combinado com geração de energia e queima do biogás para obtenção de CERs.

As despesas envolvidas no empreendimento contemplaram: (i) custos administrativos (projeto básico e executivo, PDD e taxas); (ii) investimento de capital para os sistemas de captação do biogás, geração de energia elétrica e queima do biogás. Não foram considerados os custos de construção/implementação da célula (impermeabilização de base, sistema de drenagem, disposição e espalhamento dos resíduos, cobertura etc), pois tais etapas deveriam ser executadas independentemente da existência do aproveitamento do biogás; (II) custos de operação e manutenção (O & M) da unidade. O detalhamento das despesas ao longo do período de

implantação do projeto está apresentado em [4].

As receitas do projeto seriam provenientes de: (i) venda da energia elétrica produzida na Usina Piloto da Muribeca e/ou (ii) venda dos CERs, os quais poderiam ser gerados pela queima do biogás no gerador e em flare enclausurado. Em função de possíveis oscilações de preços da tarifa de energia elétrica e no valor unitário dos CERs foram considerados três valores de referência para cada variável.

O preço dos CERs no mercado internacional é da ordem de €15,0/tCO₂eq (<http://www.pointcarbon.com/>, consulta em 14/07/09). Desta forma, este preço foi considerado como o referencial para o cenário de implantação do empreendimento e foram considerados mais dois cenários (\pm €10,0/tCO₂eq) que simulariam as flutuações já ocorridas no mercado de carbono nos últimos anos. Para a tarifação de energia elétrica foram considerados os seguintes cenários:

- Cenário I: R\$ 0,448/kWh, tarifa de energia elétrica fornecida pela CELPE no Aterro da Muribeca/PE e que vem sendo paga pela EMLURB (Resolução ANEEL n° 815/2009).
- Cenário II: R\$ 0,229/kWh, limite máximo de preço da energia proveniente de biogás de aterros sanitários definido pela Resolução ANEEL n° 335/2008;
- Cenário III: R\$ 0,132/kWh, o qual foi o preço de venda de energia produzida no Aterro Sanitário São João/SP obtido no 2° Leilão de Energia Nova – ANEEL em 2009;

É importante citar que foi realizado um estudo para definir a quantidade de geradores que poderiam operar simultaneamente na Usina Piloto da Muribeca ao longo dos 10 anos do Projeto. A Figura 9 apresenta graficamente o resultado desta avaliação, a qual foi baseada na disponibilidade de CH₄ ao longo do tempo, na vida útil dos geradores (cerca de 2,5 anos) e no consumo de CH₄ de um gerador de 20 kW (39.420 Nm³/ano). Observa-se que nos primeiros 2,5 anos do projeto (1° ciclo de vida útil dos geradores), a vazão de CH₄ disponível na Célula Experimental seria de aproximadamente 250.000 Nm³/ano, a qual é suficiente para operar 6,0 geradores de 20 kW similares ao existente na usina. Desta forma, a potência instalada firme da usina seria de 120 kW. No segundo (até 2013) e terceiro (até 2015) ciclo de troca dos motores, a quantidade de CH₄ disponível seria suficiente para operar 4,0 geradores, ou seja, uma potência instalada firme de 80 kW. Finalmente, no último ciclo troca dos geradores, a disponibilidade de CH₄ daria para operar apenas 3,0 geradores (60 kW). Desta forma, pode-se concluir que a otimização da produção de energia elétrica na Usina Piloto da Muribeca contribuirá positivamente nos resultados financeiros do Projeto haja vista que parte das despesas administrativas, do custo de O & M e do investimento podem ser diluídos para uma maior escala de produção de energia.

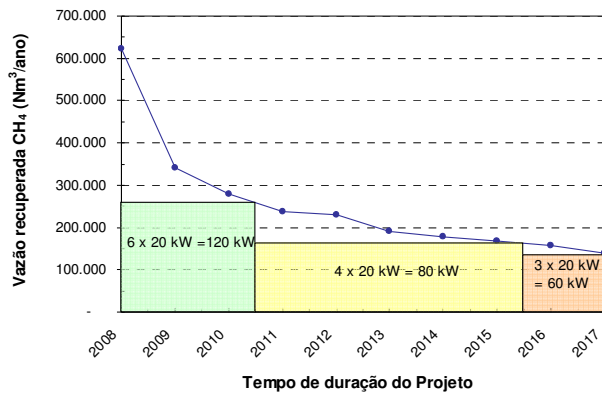


Figura 9. Otimização da produção de energia elétrica na Usina Piloto da Muribeca.

Os indicadores financeiros obtidos nesta análise simplificada de viabilidade estão apresentados a seguir em função do tipo do projeto:

- O projeto Tipo I (apenas com geração de energia elétrica) só se tornou viável financeiramente se estiver dimensionado para produção de energia plena da Usina Piloto e se houver um acordo de compra da energia produzida com base na tarifação de fornecimento ao consumidor (R\$ 0,448/kWh). Para esta situação, o investimento inicial necessário foi de R\$ 294.564,00, o VPL de R\$ 86.660,70 e a TIR de 17,5%.
- O projeto Tipo II, o qual envolve apenas a queima do biogás para obtenção de CERs, é o mais atrativo financeiramente entre os tipos de projetos analisados. O investimento inicial previsto foi de R\$ 163.206,50. O VPL e a TIR deste empreendimento podem chegar a R\$ 547.398,60 e 154,1%, respectivamente. Esta alta viabilidade pode contribuir para a sustentabilidade da gestão de RSU de pequenos e médios municípios do País, onde as condições operacionais dos aterros podem ser semelhantes às deste projeto.
- O projeto Tipo III (geração de energia e queima do biogás para obtenção de CERs) também dependerá da tarifação de venda da energia elétrica para se tornar viável. Quando se considera a tarifação mais baixa (R\$ 0,132/kWh), o projeto é inviável, entretanto a situação se inverte quando se considera as tarifas de R\$ 0,229/kWh e de R\$ 0,448/kWh. O VPL e TIR deste projeto podem chegar a R\$ 682.351,30 e 65,9%, respectivamente. O investimento inicial previsto para este projeto foi de R\$ 343.126,50.

Os resultados apresentados permitem concluir que para o porte da Célula Experimental e o cenário de mercado de 2010, o empreendimento se torna mais atrativo se for considerado apenas a obtenção dos CERs pela queima do biogás. Nesta situação, o TIR pode chegar a um valor máximo de 154,1% (€25,0/tCO₂eq). Se houver produção e venda de energia elétrica simultaneamente, o projeto continua sendo viável, mas com restrições de tarifação. Atualmente, observa-se que a tendência de mercado dos projetos MDL existentes no Brasil é de considerar apenas a queima do biogás com validação dos créditos de carbono. Os projetos de energia estão mais restritos aos grandes aterros de RSU ou a si-

tuções específicas de negociação de melhor tarifa para venda da energia elétrica gerada no empreendimento. Esta situação pode ser alterada para aterros localizados em regiões remotas ou distantes de grandes centros produtores de energia elétrica, onde a energia elétrica pode ter uma valorização mais expressiva, devido também ao custo de transmissão.

VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa realizada na Célula Experimental do Aterro da Muribeca/PE permitiu desenvolver novas metodologias para caracterização físico-química dos resíduos e avaliação do potencial de biogás, as quais contribuíram para definir parâmetros locais da degradação dos resíduos. Tais parâmetros são fundamentais para garantir previsões mais realistas da produção de biogás e, conseqüentemente, do potencial energético dos aterros de RSU no Brasil. Vale ressaltar que alguns projetos de recuperação de biogás já implantados no País apresentaram falhas nos critérios de previsão da geração de gases, uma vez que foram baseados em parâmetros internacionais que não se aplicam bem a realidade brasileira.

Os resultados deste estudo indicam que a geração de biogás ocorre de forma mais acelerada e em maior quantidade que o previsto na literatura internacional. Este fato deve ser considerado para futuros estudos de viabilidade de projetos de aproveitamento do biogás em aterros sanitários. A geração de energia elétrica deve sempre ser analisada em projetos de aproveitamento do biogás, considerando os fatores locais de disponibilidade de energia na região, além dos condicionantes econômico-financeiros e sócio-ambientais. A eficiência global obtida na Usina Piloto da Muribeca está enquadrada dentro da faixa de valores reportados na literatura.

A análise de viabilidade financeira do empreendimento mostrou que o projeto com venda de energia elétrica é viável com restrições de tarifação, entretanto quando os Certificados de Emissões Reduzidas (CERs) são considerados por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), a viabilidade do empreendimento se torna ainda mais atrativa. Por fim, destaca-se que este trabalho pode ser de grande valia para o desenvolvimento de uma matriz energética renovável que vem sendo pouco explorada no Brasil, a qual pode ser aplicada em vários aterros, principalmente considerando o porte e a taxa de disposição de resíduos desta célula, que são semelhantes às de pequenos e médios municípios brasileiros.

Além dos resultados técnico-científicos alcançados na pesquisa, vale destacar a formação de recursos humanos especializados nas instituições de ensino envolvidas (UFPE e UPE), elaboração de novos procedimentos e metodologias para ensaios de campo e laboratório, estabelecimento de critérios mais realistas para previsão de geração de biogás e energia em aterros, publicação de vários artigos técnicos nos principais congressos do país e do exterior e ampla divulgação do Projeto na sociedade por meio de jornais, televisão, visitas técnicas, etc. Esta importância foi reconhecida por meio de premiações de artigos em congressos nacionais e da tese de doutoramento de Maciel (2009) que venceu o Prêmio Brasileiro de Engenharia em 2010.

VIII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo suporte financeiro da Companhia Hidrelétrica do São Francisco – CHESF e o apoio operacional da Prefeitura de Recife, por intermédio da Empresa de Limpeza Urbana de Recife – EMLURB, a qual não mediu esforços para o sucesso na etapa de implantação do Projeto.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. “Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB)”. 2000.
- [2] Intergovernmental Painel on Climate Change – IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2001.
- [3] Maciel, F.J, Jucá, J.F.T, Codeceira Neto, A. e Carvalho Neto, P.B. Recuperação de Biogás em Aterros de Resíduos Urbanos – Projeto Piloto da Muribeca. Anais do V Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – V CITENEL, Belém/PA. 2009.
- [4] Maciel, F.J. Geração de biogás e energia em um aterro experimental de resíduos sólidos urbanos. Tese de doutorado. Engenharia Civil/UFPE. 2009.
- [5] Willumsen, H.C.; Bach, L. Landfill gas utilization overview, In: Proceedings Sardinia 1991. The Third International Landfill Symposium, Sardinia, Itália, Vol.1, pp.329-348. 1991.
- [6] Knox, K.; Braithwaite, P.; Caine, M.; Croft, B. Brogborough landfill test cells: The final chapter. A study of the landfill completion in relation to final storage quality criteria, In: Proceedings Sardinia 2005, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, Cagliari, Itália, 2005. CD
- [7] Environmental Agency. Guidance on monitoring landfill gas surface emissions, Landfill Directive vol. 07, Bristol, UK. Setembro, 2004
- [8] Chambers, A. K.; Porter, I. Gas utilization from sewage waste. Carbon and Energy Management, Alberta Research Council, Edmonton, Alberta, T6N1E4, Canadá, 2002.
- [9] Environmental Agency. Guidance on the management of landfill gas, Bristol, UK. November, 2002.
- [10] United States Environmental Protection Agency – USEPA. Turning a liability into an asset: A Landfill gas-to-energy Project development handbook. Landfill Methane Outreach Program (LMOP), EPA 430-B-96-0004. 1996.
- [11] Bove, R.; Lunghi, P. Electric power generation from landfill gas using traditional e innovative technologies. Energy Conversion and Management. ed. Elsevier, vol. 47, pp. 1391-1401, 2006.
- [12] Devine, M. A. New paradigms in efficiency, emissions and power cost in landfill gas fuel generators. In 27th Landfill Gas Symposium, SWANA, San Antonio, Texas, March, 2004.
- [13] Coldebella, A. Viabilidade do uso de biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais. Dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Unioste. 2006.
- [14] Rodrigues, T. S. N. Estudo da viabilidade do aproveitamento energético do biogás gerado em uma Célula Experimental no Aterro Controlado da Muribeca/PE. Dissertação de Mestrado. Engenharia Civil/UFPE. 2009.