

Uma avaliação energética, econômica e ambiental das opções de aproveitamento energético do biogás de um aterro sanitário no Brasil.

Ivan Felipe Santos, Regina Mambeli Barros, Geraldo Lúcio Tiago filho

Universidade Federal De Itajubá (MG).

Resumo

A produção de energia elétrica é essencial para o desenvolvimento, e fontes renováveis alternativas de energia, tem sido avaliadas a fim de se diminuir o consumo de combustíveis fósseis e a emissão de gases de efeito estufa. Neste contexto, a conversão energética de resíduos ganha importância, devido à grande geração de resíduos da sociedade contemporânea. Em aterros sanitários, a conversão energética dos resíduos se dá pela combustão do biogás oriundo da digestão anaeróbia dos resíduos nele depositados. O presente trabalho objetiva avaliar, sobre o enfoque econômico, energético e ambiental, 5 opções de gerenciamento do biogás do aterro sanitário da cidade de Itajubá (MG). Os resultados obtidos foram analisados e discutidos.

Palavras Chave: Biogás, Aterro Sanitário, Eletricidade e Comparação.

Abstract

The electric energy production is essential for development, and renewable energy sources, are being evaluated to reduce de fossil fuels consumption and the greenhouse gases emissions. In this context, the wastes energy conversion takes importance due to the larger wastes generation. In Landfills, the energy conversion of wastes occurs by the anaerobic digestion biogas combustion. This paper aims to evaluate, in economic, environmental and energetic terms, five options of biogas management of the landfill of Itajubá, a Southeast Minas Gerais city. The obtained results were analyzed and discussed.

Keywords: Biogas, Landfill, Electricity and Comparison.

1. Introdução

Os aterros sanitários nada mais são do que grandes reatores anaeróbios onde se verifica aporte de resíduos sólidos e a saída de biogás e chorume (MMA, 2014). Este constitui a forma mais barata e mais utilizada para tratamento de resíduos em todo mundo (Kumar e Sharma et al., 2014), e permitem a produção de biogás, gás rico em metano (CH_4), e portanto, de elevado potencial energético. O biogás possui poder calorífico próximo a 22 MJ/m^3 . Quando purificado, seu percentual de metano aumenta e estes valores tendem a crescer alcançando até 35 MJ/m^3 , poder calorífico do CH_4 .

O número de aterros sanitários está em crescimento no Brasil, principalmente devido ao programa Brasil sem Lixões, que busca erradicar os lixões do país por meio da implantação de outras alternativas de disposição e tratamento de resíduos. A tabela 1 apresenta dados de número de lixões, aterros sanitários e aterros controlados no Brasil. Nesta pode se observar, que entre 2000 e 2008, o número de aterros no Brasil quase duplicou, sendo o crescimento concentrado principalmente em pequenos municípios. De acordo ainda com o instituto de pesquisa econômica aplicada (Ipea, 2012a), dentro deste mesmo intervalo de tempo, o Brasil dobrou o volume de resíduos destinados a aterros sanitários, passando de 49,6 para 110 mil de toneladas. Com o aumento do número de aterros, se aumenta também o potencial de produção de biogás.

Tabela 1: Disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil entre 2000 e 2008

Fonte: Ipea (2012b).

Unidade de análise	Lixão		Aterro controlado		Aterro sanitário	
	2000	2008	2000	2008	2000	2008
Brasil	4642	2906	1231	1310	931	1723
Municípios pequenos	4507	2863	1096	1226	773	1483
Municípios médios	133	42	130	78	125	207
Municípios Grandes	2	1	5	6	33	33

O biogás produzido nos aterros sanitários pode ser considerado um combustível renovável e caracteriza um excelente vetor energético para micro e pequenas gerações, colaborando com a geração distribuída, e diminuindo os riscos e perdas características da geração centralizada de extensas linhas de transmissão. A produção de energia a partir de resíduos auxilia ainda a diminuição do consumo líquido empregado justamente na produção destes resíduos (Figura 1). O aumento de aterros em pequenos municípios, apresentado na tabela 1, caracteriza uma informação que demonstra a possibilidade de geração para pequenas demandas.

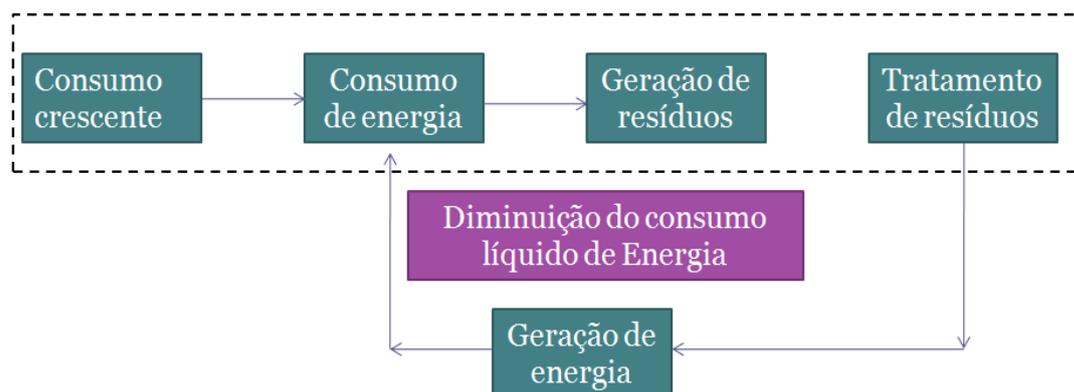


Figura 1: Diminuição do consumo líquido devido obtenção de energia a partir do tratamento de resíduos.

A conversão energética do biogás pode ser feita por meio de diversas tecnologias. Coelho *et al.* (2006) afirmou que os motores de combustão interna do tipo "Ciclo - Otto" e as turbinas a gás são as tecnologias mais utilizadas para conversão energética do biogás.

De acordo com Salomon e Lora (2008), a utilização do biogás ainda apresenta as seguintes vantagens:

- i) Economia financeira devido redução da eletricidade comprada da rede, e possibilidade de venda do excesso não utilizado para companhia de energia;
- ii) Possibilidade de aplicação do biogás em processos de co-geração;
- iii) Redução das emissões de CH₄ (Gás de elevado potencial de aquecimento global – 23 vezes superior ao CO₂) para atmosfera, gerando créditos de carbono, reduzindo os maus odores, etc.

Um dos maiores entraves para o aproveitamento energético de aterros sanitários é a viabilidade econômica. Barros *et al.* (2014), avaliou o potencial anual de energia elétrica de aterros sanitários no Brasil como sendo, nos cenários mais otimistas, igual a 5 TWh. Contudo, segundo os mesmos autores, esta forma de exploração só se torna viável para cidades com população superior a 200.000 habitantes. De acordo com Caserana *et al.* (2011), o aproveitamento energético de aterros sanitários se torna mais rentável quando se aproveita estes por meio de co-geração em motores de Ciclo Otto.

O presente artigo objetiva comparar, em termos energéticos, ambientais e econômicos, vários cenários de aproveitamento energético do biogás produzido na cidade de Itajubá (MG).

2. Metodologia

O aterro sanitário a ser analisado no presente trabalho está presente na cidade de Itajubá (MG), e recebe resíduos dos seguintes municípios: Delfim Moreira, Itajubá, Piranguinho, Piranguçu, São José Alegre e Wenceslau Braz (Silva, 2012).

Os dados de população (P_i) destas cidades foram obtidos por meio do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e estão apresentados na tabela 2. Por meio destes dados, utilizou-se as equações da projeção logística (1 a 4) afim de se prever a projeção populacional destas cidades. De posse da variação temporal da população $P(t)$, e da geração de resíduos per capita média (g) da região Sudeste Brasileira, igual a 0,88 [Kg/hab.dia] (Campos, 2009; Considerada crescente em 1 % ao ano), pode-se calcular a projeção de geração de resíduos ($Gr(t)$) pela equação 5.

Tabela 2: Dados de população das cidades analisadas. Fonte: IBGE (2014).

Ano	Delfim Moreira	Itajubá	W. Braz	São José do Alegre	Piranguç u	Piranguinho	População Total
1992	7860	75014	2487	3320	4581	6370	99632
1996	7902	79569	2357	3358	4757	6528	104471
2000	8032	84135	2596	3802	4974	7399	110938
2007	7834	86673	2509	3908	5113	7849	113886
2010	7971	90658	2553	3996	5217	8016	118411

$$P(t) = \frac{Ks}{1 + e^{-a(t-t_0)}} \quad (1)$$

$$Ks = \frac{2 \cdot P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2(P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2} \quad (2)$$

$$a = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \left[\frac{P_0(Ks - P_1)}{P_1(Ks - P_0)} \right] \quad (3)$$

$$c = \frac{Ks - P_0}{P_0} \quad (4)$$

$$Gr(t) = g \cdot P(t) \cdot 365 \quad (5)$$

Sendo os coeficientes a e c constantes do modelo e Ks = população de saturação.

De posse dos resultados de projeção de resíduos utilizou-se o software LandGEM®, Desenvolvido pela USEPA (2005), para modelagem do potencial de produção de biogás no aterro. O LandGEM® modela o problema da produção de gás como um problema cinético de primeira ordem, conforme a equação 6. Por fim, pode-se calcular a potência instalada pela equação 7.

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L0 \cdot \left(\frac{Mi}{10}\right) \cdot e^{-ktij} \quad (6)$$

$$P = Ec \cdot Q_{CH_4} \cdot \eta \cdot Pc \quad (7)$$

Onde: P = potência disponível, k = taxa de decaimento da produção de metano [1/ano], L0 = Potencial de geração de metano [m³/ton], adotados respectivamente iguais a 0,05 e 170; Mi = massa de resíduos aportada ao aterro no ano i; Ec = Eficiência de coleta do biogás no aterro adotada igual a 70 %, η = Rendimento da tecnologia de conversão energética e Pc = poder calorífico do gás. Considerou-se 50% de concentração em volume do metano no biogás.

No presente trabalho, foram definidos cinco cenários de gerenciamento do biogás produzido. Estes estão apresentados na tabela 3. A avaliação ambiental de cada cenário foi realizada por meio de emissões de CO₂e NO_x, enquanto que as análises econômicas foram realizadas por meio dos parâmetros tradicionais VPL (Valor presente líquido, que indica a viabilidade do empreendimento quando se torna positivo) e TIR (Taxa interna de retorno, que indica a atratividade financeira do empreendimento, quando supera a T.M.A, equações 8 e 9).

Tabela 3: Caracterização dos cenários analisados no presente trabalho.

Cenário	Caracterização
C1	Queima do biogás em Flare sem aproveitamento energético
C2	Refino e aproveitamento energético do biogás em Motores de Ciclo Otto, utilizando-se uma potência de base ao longo de todos os 20 anos. ¹
C3	Refino e aproveitamento energético do biogás em Motores de Ciclo Otto, utilizando-se a potência de máxima produção energética e seu tempo característico ² .
C4	Refino e aproveitamento energético do biogás em Microturbinas a gás, utilizando-se uma potência de base ao longo de todos os 20 anos. ¹
C5	Refino e aproveitamento energético do biogás em Microturbinas a gás, utilizando-se a potência de máxima produção energética e seu tempo característico ² .

* Neste estudo não foram contabilizadas as emissões de gases do processo de refino.

** Todos os estudos foram desenvolvidos apenas para os 20 iniciais de funcionamento do aterro (Até o início do decaimento da produção de gás), a fim de que não se prolongasse o tempo de análise de investimentos.

*** Em todos os casos, considerou-se a tecnologia de conversão energética do biogás

operando de modo contínuo e a plena carga somente durante o tempo em que a potência do equipamento fosse suprida pelo gás produzido.

1 – Denominou-se potência de base como sendo aquela potência obtida ao longo de todos os primeiros 20 anos do aterro.

2 – A potência de máxima energia só pode ser obtida após um tempo de produção de gás. A diferença entre o ano de pico de produção de gás (20 anos) e este ano inicial denominou-se tempo característico.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} - I \quad (8)$$

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+TIR)^j} - I = 0 \quad (9)$$

Onde: FC_i = Valor relativo ao fluxo de caixa no ano j , I = investimento inicial e j = valor do ano entre 1 e n .

3. Resultados

Os resultados de projeção populacional das cidades contribuintes ao aterro de Itajubá e a avaliação da produção de gás no aterro (Com início em 2015) estão apresentados nas figuras 2 e 3 abaixo.

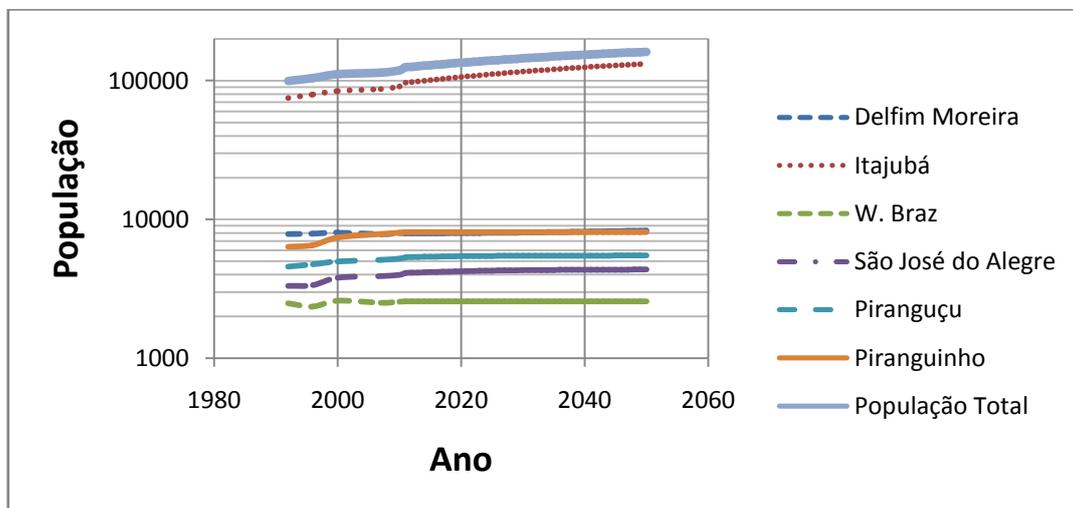


Figura 2: Projeção populacional das cidades contribuintes ao aterro de Itajubá.

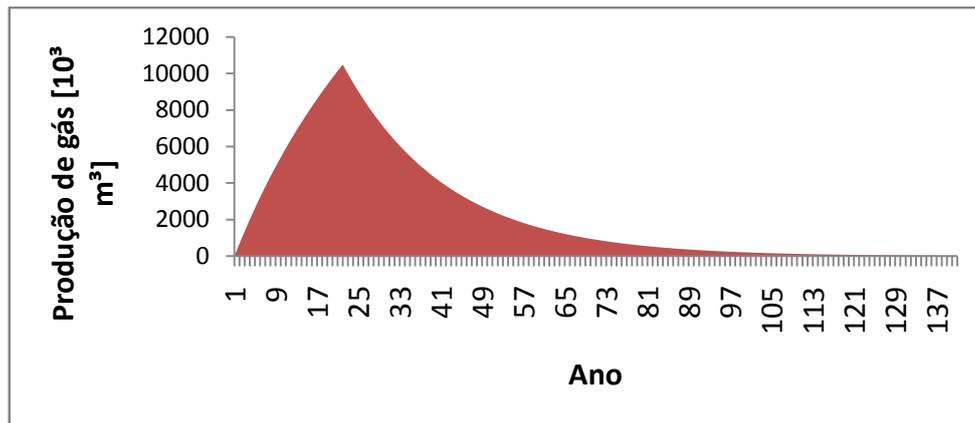
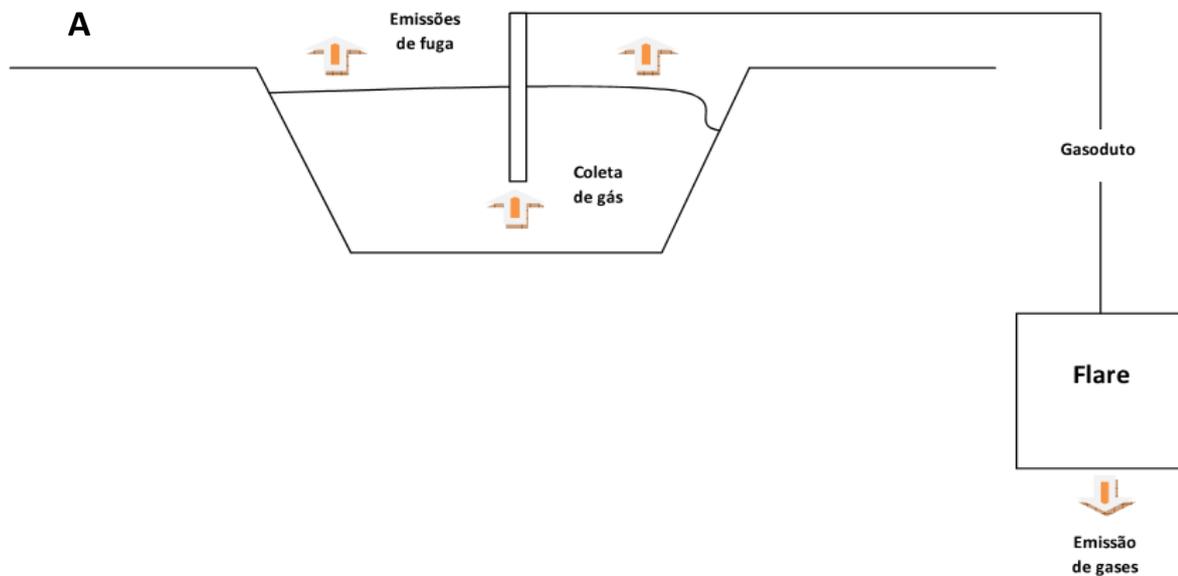


Figura 3: Evolução da produção de gás.

A figura 4 apresenta uma esquematização dos cenários definidos na tabela 2. Os dados de investimento em cada cenário foram calculados pela soma individual dos custos de cada componente. A análise econômica foi realizada com auxílio da tabela 3, que apresenta os custos e as funções de cada componente necessário para o funcionamento da usina. Adotou-se para a confecção das mesmas uma tarifa de venda de energia de $T = 0,13$ [R\$/kWh] e uma taxa de juros $i = 9\%$. Calculou-se ainda a tarifa mínima de venda de energia (T_{min}) que garantia a viabilidade, variando-se os valores de T até que o VPL se tornasse superior a zero. Os custos de operação e manutenção foram sempre adotados como sendo 5% do investimento inicial em todos os casos e, devido às incertezas sobre sua continuidade, não foram considerados créditos de carbono. Já o desempenho energético e ambiental de cada cenário foi realizado utilizando-se as tabelas 4 e 5.



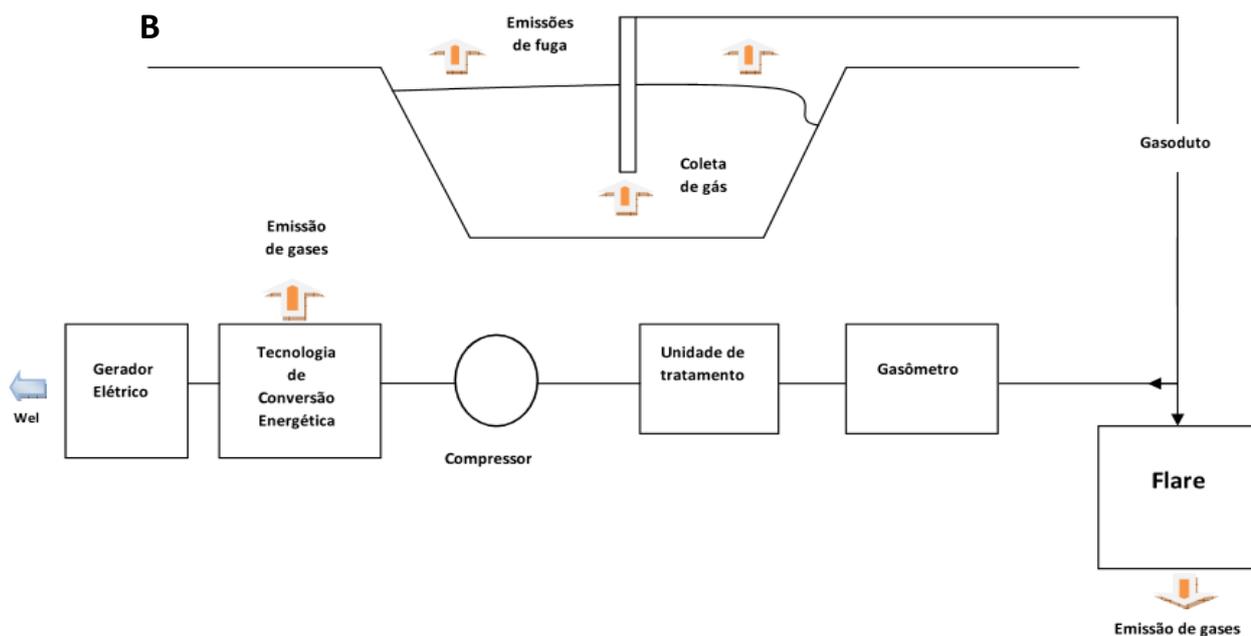


Figura 4: Esquemática do gerenciamento do biogás. A) Cenário sem Recuperação de energia elétrica – C1; B) cenários com recuperação de energia elétrica - C2 a C5.

Tabela 3: Custos dos componentes necessários ao funcionamento da usina.

Componente	Custo corrigido (2014)
Queimador	320.000 [R\$/unit]
Gasômetro	144 [R\$/m ³]
Compressor	800 [R\$/m ³ hr]
Gasoduto de Transporte / Tubulação de coleta	400 [R\$/m]
Drenos	1600 [R\$/unidade]
Tratamentos/ purificação do biogás	
H ₂ S – Siloxina	0,016 [R\$/m ³]
H ₂ O – Resfriamento	0,016 [R\$/m ³]
CO ₂	0,016 [R\$/m ³]

* Adotou-se, para as análises econômicas, 30 drenos, um queimador, um máximo de comprimento de gasodutos de 500 m e um gasômetro capaz de armazenar 10% da

produção mensal de gás.

** Valores obtidos relativos à 06/2006 em CETESB (2006) e convertidos para 01/2014 por meio da Calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil (2014).

Tabela 4: Custo e rendimento das tecnologias de conversão energética.

Tecnologia	Custo [R\$/kW]	Rendimento (%)
Microturbinas a gás	3276	25
Motores Ciclo Otto	1600 ¹	30

* Fonte: CETESB (2006), Carvalho et al. (2007) e Garcilasso e Vescovo (2012).
1 – Valor corrigido para 2014 com base na calculadora do cidadão do banco Central do Brasil (2014).

Tabela 5: Emissões de gases nos sistemas de combustão.

Componente	Motor de Ciclo Otto	Microturbinas a gás	Flare
Emissão CO ₂	0,177 [tCO ₂ /MWh] ¹	0,177 [tCO ₂ /MWh] ¹	1,69 ² [kg CO ₂ /m ³ Biogás]
Emissão NO _x	1077 ⁴ [ug/kJ]	0,223 ³ [gNO _x /kWh]	19,3 ⁴ [ug/kJ]

1 – Fonte: USEPA (2014)

2 – Fonte: Calculado pelos autores

3 – Fonte: Capstone (2000)

4 – Fonte: USEPA (2008, *apud* Leme et al. 2014)

De posse dos valores de rendimento das microturbinas e dos motores ciclo Otto, bem como da produção de gás (Figura 3), pode se calcular as potências passíveis de serem implantadas, qual o tempo de aproveitamento destas e por fim, qual a energia gerada pelas mesmas. O gráfico da figura 5 apresenta estes resultados, relacionando-os em função da tecnologia de conversão energética.

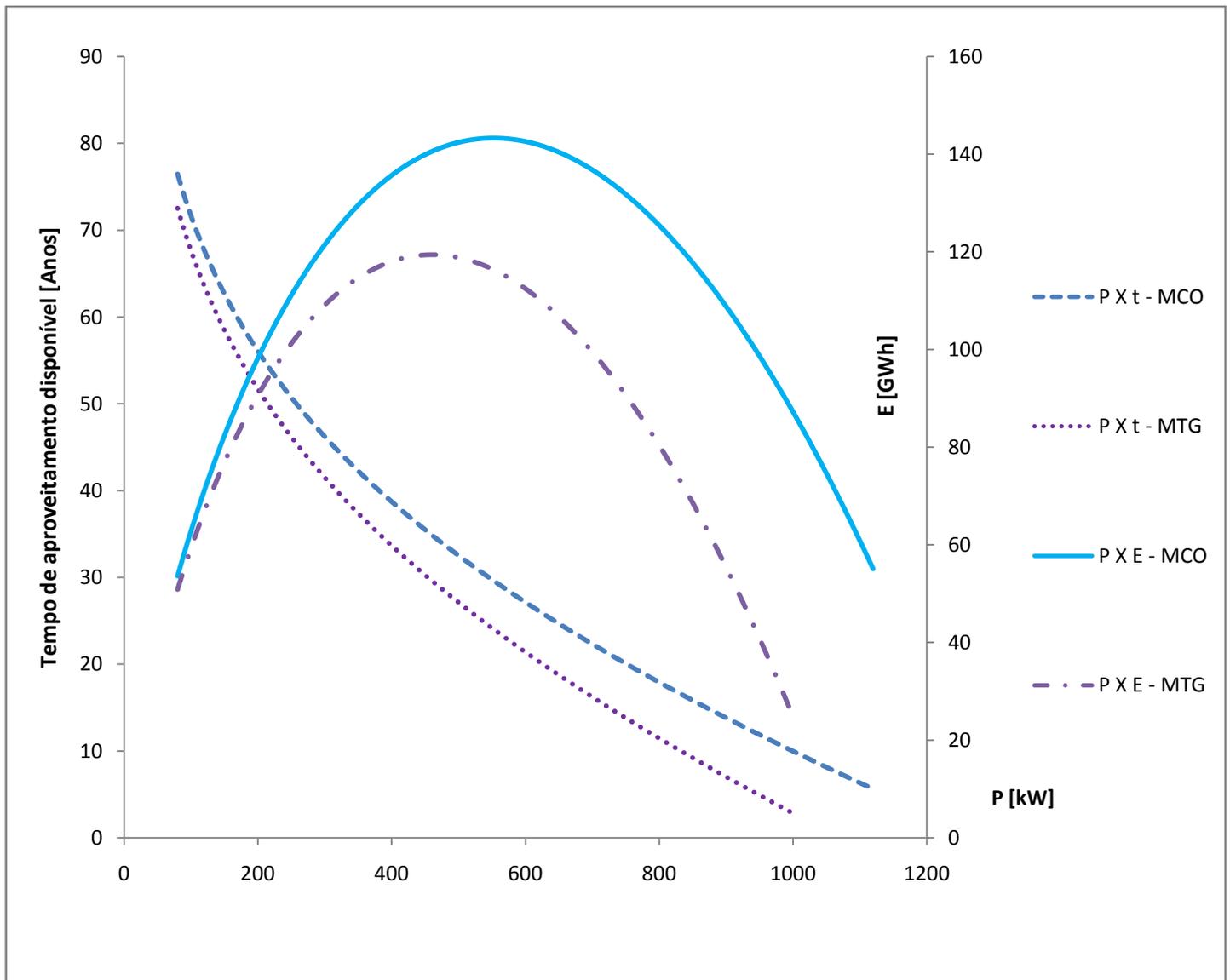


Figura 5: Variação do tempo de aproveitamento e energia total pela potência nas Microturbinas (MTG) e nos Motores de Ciclo Otto (MCO).

Os resultados finais obtidos para os parâmetros econômicos, ambientais e energéticos estão apresentados na tabela 6. Por meio da análise desta pode-se observar que as microturbinas são melhores ambientalmente, devido a menor emissão de NO_x , contudo, estas são mais caras e apresentam menor rentabilidade. Observa-se ainda que o custo unitário de implantação e o custo da energia produzida da usina cai consideravelmente, em todos os casos, quando se opta por utilizar como capacidade instalada a potência de máxima produção energética. Desta forma os cenários de aproveitamento deste tipo apresentam maior rentabilidade e são os únicos em que foi obtida a viabilidade dos empreendimentos, apesar do menor tempo de aproveitamento. Ainda por meio da tabela 6 pode-se observar que as emissões devido à produção de energia elétrica são bem menores que as emissões totais (Onde se considera as emissões da combustão na tecnologia de conversão energética e combustão do gás não aproveitado no flare).

Tabela 6: Comparações entre os cenários estudados.

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5
Potência [kW]	*	100	550	100	460
Energia Total					
E_{total} [GWh]	*	16,64	57,82	16,64	44,33
Tempo [anos]	*	20	12	20	11
$Q_{aprov.}$ [10^3 m ³ /ano]	*	429,06	2359,84	514,87	2368,42
Investimento I [10^6 R\$]	0,32	0,73	1,45	0,9	2,08
C_{un} [R\$/kW]	*	7285,54	2638,27	8962,65	4517,43
Custo da energia (I/E) [R\$/MWh]	*	43,9	25,1	54,1	46,9
Emissões devido geração de eletricidade E_{el}					
[10^3 tCO ₂]	*	2,95	10,23	2,95	7,85
Emissões totais E_{tot}					
[10^3 tCO ₂]	217,74	103,64	48,2	100,58	45,59
Emissões devido geração de eletricidade E_{el}					
[10^3 tNO _x]	*	0,32	1,07	0,00371	0,099
Emissões totais					
E_{tot} [10^3 tNO _x]	54,49	0,36	1,09	0,037	0,0305
VPL [R\$]	-320.000	-261.507,00	684.192,62	-543.365,97	210.869,40
TIR	*	3,48%	23,22%	*	12,86%
T_{min} [R\$/kWh]	*	0,164	0,0955	0,202	0,1155

4. Conclusões

O desenvolvimento econômico implica em uma maior geração de resíduos sólidos. Com o aumento da geração de resíduos sólidos, aumenta também o potencial de obtenção de energia a partir destes. A conversão energética dos resíduos sólidos caracteriza uma ação sustentável e traz benefícios como: i) Produção de energia por meio de uma fonte renovável; ii) Geração descentralizada de riscos e perdas menos intensas e iii) Diminuição da emissão de gases de efeito estufa.

No presente artigo realizou-se uma avaliação, contemplando fatores econômicos, energéticos e ambientais, do gerenciamento do biogás no aterro sanitário de Itajubá (MG). Por meio dos resultados obtidos pode-se classificar os melhores cenários com relação a cada um dos quesitos avaliados:

- 1) Cenário de melhor desempenho energético: Aproveitamento por meio de moto Ciclo Otto utilizando-se uma potência de 550 [kW] por 12 anos (Potência de máxima produção energética) - C3.

- 2) Cenário de melhor desempenho econômico: Aproveitamento por meio de moto Ciclo Otto utilizando-se uma potência de 550 [kW] por 12 anos (Potência de máxima produção energética) - C3.
- 3) Cenário de melhor desempenho ambiental: Aproveitamento por meio de microturbinas a gás utilizando-se uma potência de 460 [kW] por 11 anos (Potência de máxima produção energética) – C5.

Os custos (Custo unitário e Custo da energia produzida) caíram consideravelmente, e os parâmetros de análise de atratividade econômica, tais como: VPL e TIR cresceram consideravelmente entre os cenários em que se utilizou uma potência de base e a potência de máxima produção energética. Este fato demonstra a necessidade de se realizar otimizações entre o número de grupos geradores, a potência de cada um e o tempo de aproveitamento total a fim de se alcançar a viabilidade da geração elétrica em aterros sanitários de cidades menos populosas, dado que esta geração é descentralizada e pode ampliar o benefício ambiental do Programa Brasil Sem lixões, que prevê o crescimento de número de aterros sanitários no Brasil nos próximos anos.

O cenário com motores de ciclo Otto (C3), se destacaram em dois dos três quesitos analisados, o econômico e energético. Contudo, devido à melhor eficiência ambiental, revela-se a necessidade de implantação de mecanismos de desenvolvimento que incentivem o uso de as microturbinas a gás, tornando menos dispendiosas. Permanece ainda como sugestões para futuros trabalhos a análise de cenários que considere ainda como tecnologia de conversão energética ciclos a vapor e processos de co-geração, que podem ampliar, pela produção combinada de energia elétrica e térmica, a eficiência energética das tecnologias consideradas.

5. Referências

- Barros, R. M. et al. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. *Energy Policy*. V. 65, p. 150-164, Ed. Elsevier, 2014.
- Banco Central do Brasil. Calculadora do Cidadão, 2013. Disponível em: < <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPUBLICO/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores&aba=1>>. Acesso em: 15/09/2014.
- Capstone Turbine Corporation, 2014. Capstone Low Emissions MicroTurbine Technology. Disponível em < http://www.bioturbine.org/Publications/PDF/Capstone-White_Paper.pdf>. Acesso em: 15/09/2014.
- Carvalho, A.M. et al. Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída. Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – Citenel, 2007. Disponível em < <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/citenel2007/pdf/it96.pdf>>. Acesso: 15/09/2014.
- Caserana, F. et al. Energy Production from landfill gas: An italian case. *Biomass and Bioenergy*, V. 35, p. 4331- 4339, 2011.
- Coelho, T., S. et al. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. Encontro de Energia no Meio Rural - Agrener, 2006.

- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB. Aterro: Geração de Biogás e uso energético, versão 1.0 / CETESB, Departamento ambiental, Ministério brasileiro de ciência e tecnologia. São Paulo, 2006: SMA: CETESB: MCT. CD-ROM. Manual do usuário v. 1-2.

- Ipea, 2012a. Instituto Econômico de Pesquisa aplicada. Disponível em <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=13929&Itemid=75>. Acesso: 13/09/2014.

- Ipea, 2012b. Instituto Econômico de Pesquisa aplicada. Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos, 2012. Disponível em <http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso: 13/09/2014.

- Garcilasso, V., P. e Vescovo, E. Geração de energia elétrica a partir de biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando microturbina a gás. Apresentação realizada no 4º Congresso de Cogeração de Energia, São Paulo (SP), 2012. Disponível em:<http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/apresentacoes/4ocongressocogerao_workshop.pdf>. Acesso em: 15/09/2014.

- Kumar, A. e Sharma, M. P. Estimation of GHG emission and energy recovery potential from MSW landfill sites. Sustainable Energy Technologies and Assessments, V.5, p. 50-61, Ed. Elsevier, 2014.

- Leme, M. M. V.; Rocha, M. H.; Lora, E. E. S.; Venturini, O. J.; Lopes, B. M.; Ferreira, C. H. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. Resources, Conservation and Recycling, V. 87, p. 8-20, 2014.

- MMA. Ministério Brasileiro do Meio Ambiente, 2014. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>>. Acesso: 29/01/2014.

- Salomon, K., R. Lora, E. E. S Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. Biomass and Bioenergy, v. 33, p. 1101-1107, 2009.

- USEPA - United States Environmental Protection Agency. Landfill Gas Emissions Model. (LandGEM). Version 3.02 User's Guide. USEPA, May 2005. EPA-600/R-05/047.

- USEPA - United States Environmental Protection Agency. Emission Gases for Greenhouse Gas inventory. 2014.