

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

MAYARA CRISTINA GOMES BRANCO

**PRECIFICAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO POR AUTOPRODUTORES,
CONSIDERANDO SEU TRANSPORTE POR MEIO DE GASODUTOS
EXISTENTES**

Guaratinguetá
2012

MAYARA CRISTINA GOMES BRANCO

PRECIFICAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO POR AUTOPRODUTORES,
CONSIDERANDO SEU TRANSPORTE POR MEIO DE GASODUTOS
EXISTENTES

Trabalho de Graduação apresentado ao
Conselho de Curso de Graduação em
Engenharia de Elétrica da Faculdade de
Engenharia do Campus de Guaratinguetá,
Universidade Estadual Paulista, como parte
dos requisitos para obtenção do diploma de
Graduação em Engenharia de Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula

Guaratinguetá
2012

B816p	Branco, Mayara Cristina Gomes Precificação do biogás produzido por autoprodutores, considerando seu transporte por meio de gasodutos existentes / Mayara Cristina Gomes Branco – Guaratinguetá : [s.n], 2012. 62 f : il. Bibliografia: f. 60-62 Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012. Orientador: Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula 1. Biogás I. Título CDU 662.767
-------	---

**PRECIFICAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO POR AUTOPRODUTORES,
CONSIDERANDO SEU TRANSPORTE POR MEIO DE GASODUTOS
EXISTENTES**

MAYARA CRISTINA GOMES BRANCO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Prof. Dr. Leonardo Mesquita
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. AGNELO MAROTTA CASSULA
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. DURVAL LUIZ S. RICCIULLI
UNESP-FEG


Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO LOTUFO
UNESP-FEG

Dezembro de 2012

DADOS CURRICULARES

MAYARA CRISTINA GOMES BRANCO

NASCIMENTO	19.01.1988 – REGISTRO / SP
FILIAÇÃO	Átila Cabral Branco Regina Célia Gomes Branco
2007/2012	Curso de Graduação Engenharia Elétrica – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campus de Guaratinguetá

à Deus pela vida e pelas bênçãos alcançadas e aos meus pais Regina e Átila pelo amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por guiar-me e fortalecer-me nesta caminhada,
aos meus pais, *Regina* e *Átila*, que sempre me apoiaram em minhas decisões e
incentivaram meus estudos,
aos meus amigos, em especial a *Mayara* pelo apoio e companheirismo,
à *República Puricanas* pelo aprendizado ao longo dos anos,
ao meu orientador *Prof. Dr. Agnelo Marotta Cassula* , pelo incentivo e
orientação, sem os quais este estudo não seria possível,
à PIBIC-CNPq pela oportunidade de desenvolvimento de minha iniciação
científica.

“A humildade é a única base sólida de todas as
virtudes”

Confúcio

BRANCO, M.C.G. **Precificação do biogás produzido por autoprodutores, considerando seu transporte por meio de gasodutos existentes.** 2012. 62 f. Trabalho de graduação. (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

A expansão da matriz energética é um assunto de grande importância visto os recentes problemas enfrentados pelo país nesse setor, como o racionamento mobilizado em 2001. Além disso, há também a preocupação mundial com o desenvolvimento sustentável. No Brasil é produzido cerca de 64 milhões de metros cúbicos de biogás por dia, porém apenas pequena porcentagem deste total é aproveitada como recurso energético. São considerados autoprodutores em potencial, por exemplo, os aterros sanitários energéticos (ASE) e as estações de tratamento de esgoto (ETE), que se adaptados podem produzir biogás e comercializá-los. O trabalho foca seus estudos no biogás produzido por esses pequenos e médios autoprodutores. São propostas e estudadas as seguintes alternativas para o aproveitamento energético do biogás: a geração e comércio de energia elétrica por meio da instalação de uma pequena central elétrica dentro do aterro, e a purificação e comercialização desse gás, cujo preço será uma ponderação sobre o preço do gás natural, levando-se em consideração a porcentagem de metano presente no biogás. O comércio desse gás garante além de um destino ecologicamente adequado ao mesmo, o aproveitamento da sua energia.

Palavras-Chave: Biogás. Autoprodutores. Aterro sanitário. Estação de tratamento de esgoto. Purificação. Comércio.

BRANCO, M.C.G. Estabilishing prices of the biogas produced by self-producers considering its transport through existing pipelines. 2012. 62 f. Undergraduate Final Work. (Bachelor in Electrical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

The expansion of the energy matrix is a matter of great importance since the recent problems facing the country in this sector, such as rationing mobilized in 2001. Moreover, there is also concern with global sustainable development. Brazil is producing about 64 million cubic meters of biogas per day, but only a small percentage of this total is harnessed as an energy resource. Compounders are considered potential, for example, landfill energy (LE) and sewage treatment plants (STP), which can be adapted to produce biogas and market them. The work focuses its studies on biogas produced by these small and medium compounders. Are proposed and studied the following alternatives for the utilization of biogas energy: generation and sale of electricity through the installation of a small power station within the landfill, and purification and marketing of gas, whose price will be a consideration on the price of natural gas, taking into account the percentage of methane present in the biogas. Trade ensures that gas plus a destination ecologically appropriate to it, taking advantage of its energy.

KEYWORDS: Biogas. Self-producers. Landfill. Station of sewage treatment. Purification. Trade.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos e métodos	15
1.2 Estrutura da monografia	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO GÁS NATURAL E DO BIOGÁS	17
2.1 Gás Natural	17
2.1.1 Gás Natural Comercial	18
2.1.2 A lei do gás	19
2.2 Biogás.....	20
2.2.1 Potencial de produção de biogás a partir de aterros sanitários e esgoto	22
2.2.2 Purificação do Biogás.....	23
2.2.3 Vantagens no aproveitamento do Biogás	25
3. ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO EM ATERROS SANITÁRIOS	27
3.1 Estimativas de potência e energia geradas pelo biogás.....	30
3.2 Determinação da vazão do solvente para purificação do biogás	31
3.3 Dimensionamento de bombas utilizadas na purificação do biogás	32
3.4 Análise financeira	35
3.4.1 Valor Presente Líquido.....	35
3.4.2 Taxa Interna de Retorno	38
4. ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO EM ATERROS CONTROLADOS.....	39
4.1 Estimativa do potencial de geração de metano.....	39
4.2 Estimativa do potencial energético desperdiçado quando não há o aproveitamento energético do biogás	41
5. ALTERNATIVAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS	43
5.1 Sistema de geração de energia elétrica em uma pequena central elétrica	43
5.1.2 Análise econômica	44
5.2 Purificação e comércio do biogás.....	48

5.2.1 Venda do biogás através dos gasodutos existentes	50
5.2.2 Venda do biogás através de gasodutos dedicados	51
5.3 Análise dos resultados	56
6. CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS	60

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial e o desenvolvimento tecnológico contínuo exigem uma demanda de energia cada vez maior. Desde o século passado, os principais atores no cenário energético mundial são os combustíveis fósseis, que são fontes não renováveis, e que em um futuro não muito distante, serão incapazes de suprir essa necessidade energética.

A elevação do preço do petróleo, devido entre outros motivos à diminuição das suas reservas, tem estimulado pesquisas de fontes alternativas de energia. Outro aspecto importante é a questão ambiental, assunto de grande destaque, já que a queima de combustíveis fósseis é a responsável pela maior parte da emissão de gases poluentes que intensificam o efeito estufa.

Durante a década de 80 e 90 várias foram as conferências internacionais para a discussão das mudanças climáticas. O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*) estabelecidas em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), tem como função fornecer informações científicas, técnicas e socioeconômicas relevantes para o entendimento dessas mudanças. O IPCC constitui uma fonte confiável que reúne cientistas de todo o mundo, seus relatórios oferecem entre outros itens, evidências científicas para a alteração do clima, bem como análises conclusivas referentes ao aumento da temperatura global e suas consequências, que perdurarão por mais de séculos, ainda que as emissões dos gases do efeito estufa (GEE) sejam estabilizadas. (WIKIPÉDIA, 2012)

No Brasil, país de longa tradição no uso de fontes renováveis, tanto para geração de eletricidade, quanto nos setores de transporte e siderurgia, o elevado destaque para o uso destas fontes, representa uma oportunidade de maior diversificação da matriz energética e consequente diminuição de sua dependência hidrológica na geração de energia elétrica (TOLMASQUIM, 2003). Fato esse evidenciado em 2001, pelo racionamento de energia no país, devido à escassez de chuva e diminuição do nível dos reservatórios, o que expôs a fragilidade do sistema vigente.

Entre as iniciativas para a busca de alternativas energéticas, destaca-se o Gasoduto Brasil-Bolívia como parte do programa de política energética, que marcou na década de 1990 a retomada da exploração das reservas de gás natural.

A Petrobras – Petróleo Brasileiro (2012) define o gás natural como sendo o mais limpo dos combustíveis fósseis e que possui uma baixa emissão de dióxido de enxofre e de resíduos do processo de combustão presentes na fumaça.

Segundo Domenech (2011), nos últimos anos, o consumo de gás natural no país aumentou expressivamente, 42%, estima-se ainda que até 2020 o crescimento seja de 67,3%, o que impulsiona as distribuidoras a incrementar cada vez mais o mercado. Esse investimento no setor constitui um facilitador ao uso do biogás, outra fonte de gás com potencial energético. O biogás é composto principalmente por metano e dióxido de carbono, e seu poder calorífico varia com a porcentagem de metano. No biogás essa porcentagem varia de 40% a 70% do volume do gás enquanto no gás natural é estipulado, pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), um percentual mínimo de 68%, na região norte e 85% nas demais regiões do país.

No Brasil é produzido cerca de 64 milhões de metros cúbicos de biogás por dia, porém apenas pequena porcentagem deste total é aproveitada como recurso energético, conforme Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2000). As duas maiores fontes de produção de biogás são os aterros sanitários e as estações de tratamento de esgoto. Os aterros, por exemplo, são responsáveis pela emissão de 8.069.052,16 m³ de biogás por dia, o que corresponde a um potencial energético diário de 293,00 MW, de acordo com o Centro Nacional de Referência em Biomassa - CENBIO (2010).

A partir das Figuras 1.1 e 1.2, pode-se ter uma estimativa do potencial de geração de energia, no Brasil, a partir do biogás (fração de metano) originado da disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários e do tratamento de efluentes líquidos domésticos e comerciais. O biogás proveniente da disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários constitui a maior fonte desse potencial.

Observa-se na Figura 1.1 que o potencial de energia gerado pelo biogás, proveniente de aterros sanitários, cobre grande parte da extensão do país, sendo a faixa de potência mais predominante a de 0,1 a 1,0 MW, concentrada principalmente na região norte. As faixas de potência maiores (1,1 a 20 MW) cobrem áreas pequenas do mapa, e são praticamente pontuais na região sudeste.

Na Figura 1.2 pode-se observar que o potencial de energia, gerado pelo biogás proveniente do tratamento de efluentes líquidos, cobre áreas pequenas e espaçadas no mapa. As faixas de potência de 0,1 a 0,5 MW são maiores na região noroeste do país enquanto as de 0,6 a 1,5 MW são observadas apenas na região sudeste.



Figura 1.1 - Estimativa do potencial de geração de energia a partir do biogás, proveniente da disposição de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários no Brasil (IBGE¹, 2009 apud COELHO, MONTEIRO, KARNIOL, 2012).



Figura 1.2 - Estimativa do potencial de geração de energia a partir do biogás, proveniente do tratamento de efluentes líquidos doméstico e comerciais no Brasil (IBGE, 2009 apud COELHO, MONTEIRO, KARNIOL, 2012).

Entre os principais gases emitidos na atmosfera e considerados responsáveis pelo efeito estufa tem-se: o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o ozônio (O_3). De acordo com ICLEI – Governos Locais para a Sustentabilidade (do inglês *International Council for Local Environmental Initiatives*), embora a presença do metano seja inferior na atmosfera, seu poder de aquecimento global é vinte e uma vezes maior que o do gás carbônico (ICLEI, 2009).

¹ IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **SIDRA**. 2009 apud COELHO, S. T., MONTEIRO, M. B., KARNIOL, M. R. **Atlas de bioenergia do Brasil**. São Paulo: CENBIO, 2012. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/download/atlasbiomassa2012.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2012.

A produção mundial de metano é resultado de emissões naturais e daquelas provocadas pelo homem. A primeira apresenta 45% da emissão desse gás, enquanto os 55% restantes são oriundos de fontes antropogênicas (LELIEVELD² et al., 1998 apud SANTOS, 2009). Desses 55%, os esgotos domésticos e aterros sanitários representam 15%, ou seja, 8% de todo metano gerado no planeta (SANTOS, 2009).

Assim, o biogás produzido por produtores independentes, se destaca como um apoio a crescente demanda de gás natural, representando ainda um caminho para o controle da poluição ambiental, com uma possível receita adicional advinda da obtenção de créditos de carbono.

A Lei nº 11.909, de 4 de março de 2009, Lei do Gás, regulamentada pelo Ministério de Minas e Energia (MME), trata entre outros itens, do transporte do gás natural, do seu tratamento e comercialização. Introduz ainda as figuras do consumidor livre e do autoprodutor, cuja determinação dos aspectos legais caberá a cada estado. No Brasil, são considerados autoprodutores em potencial, por exemplo, os aterros sanitários energéticos (ASE) e as estações de tratamento de esgoto (ETE), que se adaptados podem produzir biogás, por processos de biodegradação, e comercializá-los. Porém, o gás natural, obtido de ASE's e ETE's, deve ser transportado para os consumidores finais e, para isso, pretende-se utilizar os gasodutos já existentes para o gás natural.

O poder calorífico do biogás é menor que o do gás natural e, para questão de precificação, deve-se fazer um ajuste no valor de venda do biogás. O trabalho apresenta uma adequação no preço considerando a proporção do poder calorífico dos gases, ou a proporção de metano contida em cada um dos gases. A utilização dos dutos deve ser feita mediante pagamento de pedágio a transportadora responsável. Além disso, para a inclusão do biogás produzido por autoprodutores nos gasodutos existentes, o gás em questão deve estar em conformidade com os padrões especificados pelo Regulamento Técnico da ANP (Agência Nacional do Petróleo) nº2/2008, de forma a não interferir na qualidade desse combustível, e conter ainda um agente odorante para ser facilmente detectado em caso de vazamento.

² LELIEVELD, J. et al. *Changing concentration, lifetime and climate forcing of atmosphere methane*. Tellus, 1998 apud SANTOS, A.F. **Estudo de viabilidade de aplicação do biogás no ambiente urbano**. 2009.16f. MBA (Administração) – Faculdade de Economia e Administração de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo - USP, Ribeirão Preto, 2009.

1.1 Objetivos e métodos

O trabalho foca seus estudos no biogás produzido por pequenas e médias ETE's e ASE's e sua proposta consiste em sugerir um destino ecologicamente adequado ao mesmo, e ainda evitar o desperdício energético.

Um estudo de caso é feito para determinar o potencial energético do biogás gerado em aterros sanitários controlados, e analisadas alternativas para o aproveitamento dessa energia.

Paralelamente pretende-se desenvolver uma metodologia para quantificar o preço desse biogás. Como referências para o preço do biogás são utilizadas as mesmas bases para a precificação do gás natural, porém é aplicada uma ponderação em relação às características caloríficas do biogás, pois se sabe que o poder calorífico do gás natural é maior que o do biogás, justamente devido a maior concentração de metano.

1.2 Estrutura da monografia

A monografia é dividida em seis capítulos, apresentados da seguinte maneira:

O capítulo dois apresenta dados referentes ao gás natural, sua origem, composição, características comerciais, e uma breve descrição da Lei do Gás. Trata também do biogás e os processos necessários para sua purificação.

O capítulo três apresenta as ferramentas matemáticas e os métodos que são utilizados para o desenvolvimento do trabalho, a saber: a metodologia proposta pelo IPCC para a quantificação de gás metano produzida por aterros sanitários, os cálculos necessários para determinação da potência e energia elétrica que podem ser geradas por determinado volume de biogás, os cálculos necessários à determinação do volume de água que deve ser empregado para retirada de CO₂ do biogás, uma metodologia para o dimensionamento de bombas e dois métodos para análise da viabilidade financeira do sistema para aproveitamento do biogás.

O capítulo quatro descreve um estudo de caso, em que se avalia a quantidade de biogás produzido, para um aterro sanitário que atende uma população de 200 mil habitantes, e ainda a potência e energia presente nesse biogás.

O capítulo cinco propõe um destino ecologicamente correto, e que visa o aproveitamento energético do biogás proveniente de um aterro sanitário controlado de uma cidade com 200 mil habitantes. É analisada a viabilidade econômica das seguintes propostas para aproveitamento do biogás: geração de energia elétrica para respectiva venda a concessionária de energia, e comércio desse combustível, mediante sua purificação e

precificação, cujas bases são as mesmas utilizadas para o gás natural, porém ponderada ao poder calorífico do biogás. No último caso são analisadas as seguintes alternativas: inserção do biogás em dutos de gás natural, adequando-o as normas da ANP; inserção do biogás em dutos dedicados ao biogás, que dever ser vendido para concessionárias, responsáveis pelos biogasodutos, ou ainda a interligação do aterro sanitário a unidades produtivas, próximas ao aterro, que possam comprar e utilizar a energia térmica presente no biogás.

O capítulo seis apresenta as conclusões obtidas no desenvolvimento do trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO GÁS NATURAL E DO BIOGÁS

Nesse capítulo primeiramente é realizada uma descrição do gás natural, sua composição e características comerciais. São apresentados também dados referentes à composição do biogás, seu potencial de produção no Brasil, quando considerando aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto e ainda os processos de purificação necessários para seu uso como combustível.

2.1 Gás Natural

O gás natural (GN) é um combustível fóssil, portanto originado da decomposição de matéria orgânica fossilizada ao longo de milhares de anos, composto por uma mistura de hidrocarbonetos gasosos, principalmente o metano. Outros componentes existentes, mas em quantidades variadas são o dióxido de carbono (CO_2), o nitrogênio (N_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), água (H_2O), ácido clorídrico (HCl), metanol e impurezas mecânicas. A proporção destes elementos depende fundamentalmente da localização do reservatório e do tipo de matéria orgânica da qual se originou (GASNET, 2007).

Os reservatórios desse gás são subterrâneos em muitos lugares do planeta, tanto em terra quanto no mar, tal qual o petróleo, sendo relativamente grande o número de reservatórios que contém o gás natural associado ao petróleo. Nestes casos, o gás recebe a designação de gás natural associado, caso contrário é dito não associado (GASNET, 2007).

O gás natural possui uma gama de aplicações, sendo as principais como combustível industrial, comercial e residencial, e na recuperação secundária de petróleo em campos petrolíferos, por meio da sua reinjeção. Nas indústrias petroquímicas, de fertilizantes e minério de ferro é utilizado como matéria prima. Outra aplicação é como combustível na geração de eletricidade em regime de cogeração, produção combinada de vapor e eletricidade, e ainda substituindo o GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) nas residências, que exige complexa infraestrutura de transporte e armazenamento. Já no segmento de transporte coletivo e cargas o GN assume considerável importância na redução de agentes poluentes (GASNET, 2007).

A produção do gás natural se dá na maioria das vezes junto ao petróleo, através da extração nas bacias sedimentares da crosta terrestre. Após sua extração o mesmo é tratado para a remoção de impurezas, como por exemplo, a água, sendo posteriormente transportado por gasodutos para as zonas de consumo e refino (GASNET, 2007).

Usualmente o gás natural é transportado através de dutos, mas pode ser transportado em cilindros de alta pressão, na forma de gás natural comprimido (GNC), ou em estado líquido (GNL).

2.1.1 Gás Natural Comercial

O gás natural comercializável é quase completamente metano. No Brasil o órgão que define as normas para especificação do gás natural a ser comercializado é a ANP, por meio da Resolução nº16, de 17 de junho de 2008. O regulamento técnico contido no mesmo aplica-se ao gás natural processado, de origem nacional ou importado e define entre outros aspectos que a porcentagem mínima de metano (CH_4) no gás natural deve ser de 85% e dióxido de carbono (CO_2) máximo de 3%, exceto para região norte, em que a porcentagem mínima do primeiro deve ser de 68%, já que nesse caso, não se destina a uso veicular.

O gás natural deve apresentar também concentrações limitadas de componentes corrosivos, tais quais o ácido sulfídrico (H_2S), o enxofre e a água (H_2O), de modo que a segurança e a integridade dos equipamentos sejam preservadas. Outro aspecto importante é a adição de um agente odorante na distribuição, atendendo as exigências específicas de cada agência reguladora estadual.

Plantas elétricas e algumas indústrias podem utilizar o gás natural diretamente, captado dos gasodutos. Residências e pequenas indústrias adquirem o gás de empresas distribuidoras. As empresas distribuidoras adicionam substância odorante ao gás por medida de segurança, para facilitar a identificação de vazamentos (GASNET, 2007).

O preço de referência do gás natural foi estabelecido pela Portaria ANP nº45, de 15 de março de 2000, como sendo o preço do gás natural na entrada do gasoduto de transporte (P_{GT}), fixado pela Portaria Interministerial (Ministérios de Minas e Energia da Fazenda) nº3, de fevereiro de 2000. A Portaria Interministerial nº3/2000 estabelece o preço máximo (P_m) de venda do gás natural do produtor (concessionário) para a companhia estadual de distribuição de gás, a ser praticado no ponto de transferência de custódia (*city gate*), e decompõe esse preço em duas parcelas: o preço do gás natural na entrada do gasoduto de transporte (P_{GT}) e a tarifa de transporte e referência (T_{Ref}) entre os pontos de recepção e de entrega do gás. Em outras palavras, o preço do gás no *city-gate* (P_m) é a soma do preço da *commodity* (P_{GT}) com a tarifa de transporte (T_{Ref}), (CASSULA;GODOY JUNIOR;SILVEIRA, 2010 p.5).

A equação (2.1) representa o preço do gás natural no city-gate:

$$P_m = P_{GT} + T_{Ref} \quad (2.1)$$

O preço da commodity (P_{GT}) é reajustado trimestralmente e a tarifa de transporte (T_{ref}) anualmente.

2.1.2 A Lei do Gás

A lei nº11.909, de 4 de março de 2009, a Lei do Gás, trata de aspectos como o transporte, tratamento, processamento, estocagem e comercialização do gás natural.

Segundo a Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres – ABRACE (2009), esta lei, regulamentada pelo MME (Ministério de Minas e Energia) em 2011, oferece novas possibilidades de investimentos no setor. Estabelece entre outros itens, um planejamento das instalações e das redes dos gasodutos e introduz as figuras do consumidor livre, autoprodutor e auto importador, que devem ser definidas por cada estado. A incorporação dessas duas últimas figuras permite que o investidor não mais necessite pagar para a distribuidora transportar o gás para ele, podendo importar GNL, regaseifica-lo e fazer uso do gás na sua térmica, reduzindo assim os custos.

Para os novos gasodutos nacionais são realizados processos de concorrência pública para concessão do transporte de gás natural, envolvendo a construção e a operação do duto. Vence aquele que propõe a menor tarifa de transporte, tendo como balizador uma tarifa máxima definida pelo MME (ABRACE, 2009).

Ao transportador são garantidos contratos de longo prazo com os carregadores, que podem ser produtores, consumidores livres, comercializadores, autoprodutores, distribuidores ou outra pessoa jurídica que atenda aos requisitos estabelecidos pela ANP (ABRACE, 2009).

É prevista também a troca operacional, o que possibilita a qualquer carregador trocar uma quantidade de gás com outro carregador.

A Figura 2.1, esquemático da regulação do preço do gás natural, descreve a relação verticalizada que existia antes da regulamentação da Lei do Gás e depois da regulamentação, que permitiu uma maior interação entre os elementos dessa cadeia.

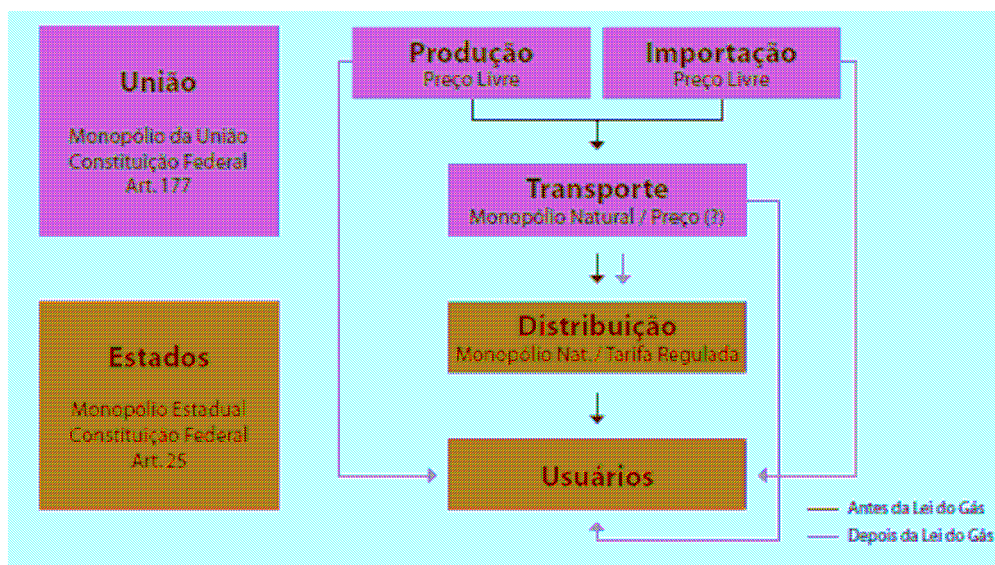


Figura 2.1 - Regulação de Preço do Gás Natural (ABRACE, 2009).

2.2 Biogás

O biogás é uma mistura gasosa combustível, formada a partir da degradação de material orgânico, através da digestão anaeróbica, na ausência de oxigênio, realizada por alguns tipos de bactérias. Apesar de poder ser encontrado na natureza, a formação do biogás pode ser feita por meio de biodigestores a partir de uma grande variedade de resíduos orgânicos, como lixo doméstico, resíduos de atividades agrícolas e pecuárias, suinocultura, lodo de esgoto, entre outros. Daí sua composição ser difícil de ser definida, variando com o material orgânico utilizado e também com o tipo de tratamento anaeróbico que sofre. De qualquer forma, esta mistura é essencialmente constituída de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2).

A quantidade de biogás gerado varia sob a influência de fatores como:

- Composição dos resíduos: quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior o potencial de geração de metano e vazão de biogás;
- Ambiente anaeróbico: para que haja produção de biogás, a matéria orgânica deve sofrer decomposição em ambiente sem oxigênio. No caso do aterro sanitário, pode-se cobrir os resíduos com terra, criando condições anaeróbicas nas camadas inferiores dos Lugares de Deposição dos Resíduos Sólidos Urbanos ou LDRS. No caso do tratamento de esgoto, o lodo deve permanecer em compartimentos denominados biodigestores;
- Umidade: a umidade é essencial à vida das bactérias decompositoras. Ela depende da umidade inicial do resíduo e da água produzida na decomposição;

- Acidez e temperatura: as bactérias metanogênicas atingem maior produtividade a pH entre 6,8 e 7,2, e temperaturas entre 32 e 35°C. (COSTA³ et al., 2001, apud COSTA, 2006 p. 42).

Outro aspecto importante do biogás é o seu teor ácido, a maioria dos digestores anaeróbicos produz um biogás que contém entre 0,3 e 2% de H₂S e significantes quantidades de mercaptanas, observando-se também a presença de traços de nitrogênio e hidrogênio (AJAX ENGINES⁴, 1999 apud ALVES, 2000 p.56). A Tabela 2.1 descreve a composição do biogás em termos gerais.

O potencial energético do biogás varia em função da presença de metano em sua composição, ou seja, quanto mais metano, mais rico é o biogás. Entretanto, quando comparado com o gás natural cuja composição varia de 85 a 95% de metano, apresenta menor poder calorífico, em consequência do menor conteúdo de metano (CENBIO, 2001).

Além de energia elétrica, o biogás pode ser utilizado em todas as aplicações destinadas ao gás natural. Entretanto, nem todos os dispositivos utilizam os mesmos padrões de gás, sendo necessária à diminuição ou mesmo remoção de certos componentes e ainda a elevação da pressão. Os principais componentes a terem suas concentrações alteradas, para viabilizar o uso do biogás são: a água (presente devido à umidade, característica do processo de geração do biogás), o ácido sulfídrico (H₂S), as partículas e o dióxido de carbono (CO₂), (COSTA, 2006).

³ COSTA, et al. **Produção de Energia Elétrica a partir de Resíduos Sólidos Urbanos**. Trabalho de Graduação (Interdisciplinar) – FAAP, São Paulo, 2001 apud COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2006.

⁴ AJAX ENGINES. 1.999. Disponível em: <<http://dspace.dial.pipex.com/town/terrace/acl98/sourgaz.html>>. Acesso em: 23 mai. 1.999 apud ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbica de resíduos**. 2000. 142f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2000.

Tabela 2.1 - Composição média do biogás (AZEVEDO⁵, 2000 apud SANTOS, 2009 p.6).

Substância	Percentual de Volume Molar (%)	Percentual de Volume Molar Caso conservador (%)
(CH ₄)	55 a 75	55,0
(CO ₂)	25 a 45	42,2
(N ₂)	0 a 3	1,5
(O ₂)	0 a 1	0,5
(H ₂ S)	0 a 1	0,5
(NH ₃)	0 a 0,5	0,25
(CO)	0 a 0,1	0,05

2.2.1 Potencial de produção de biogás a partir de aterros sanitários e esgotos

As duas maiores fontes de produção do biogás são os aterros sanitários e as estações de tratamento de esgoto.

Os números de pesquisa divulgada em IBGE (2000) permitem uma estimativa sobre a quantidade coletada de lixo diariamente. Nas cidades com até 200 mil habitantes, são recolhidos de 450 a 700 gramas por habitante; nas cidades com mais de 200 mil habitantes, essa quantidade aumenta para uma faixa entre 800 e 1.200 gramas por habitante.

Em relação ao lixo, os brasileiros produzem todos os dias 125.281 toneladas, sendo que 47,1% são destinados a aterros sanitários, 22,3% a aterros controlados e apenas 30,5% a

⁵ AZEVEDO, M.H. **Características, Produção e Utilização do Biogás Produzido a partir de Resíduos Orgânicos**. 2000. Tese (Mestrado, Promec), Porto Alegre, 2000 apud SANTOS, A.F. **Estudo de viabilidade de aplicação do biogás no ambiente urbano**. 2009.16f. MBA (Administração) – Faculdade de Economia e Administração de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo - USP, Ribeirão Preto, 2009.

lixões, de forma que mais de 69% de todo lixo coletado está tendo um destino final adequado, em aterros sanitários ou controlados, conforme IBGE (2000).

Dos 5057 municípios brasileiros, 4026, ou seja, 73,1% tem população até 20.000 habitantes. Nestes municípios, 68,5% dos resíduos gerados são vazados em lixões e em alagados. Se tomarmos, entretanto, como referência, a quantidade de lixo por eles gerado, em relação ao total da produção brasileira, a situação é menos grave, pois em conjunto coletam somente 12,8% do total brasileiro (20.658 t/dia). Isto é menos do que o gerado pelas 13 maiores cidades brasileiras, com população acima de um milhão de habitantes. Só estas coletam 31,9% (51.635 t/dia) de todo lixo urbano brasileiro, e tem seus locais de disposição final em melhor situação. Apenas 1,8% (832 t/dia) são destinados a lixões, o restante sendo depositado em aterros controlados ou sanitários (IBGE, 2000 p.52).

No caso das águas residuais, o volume de esgoto gerado por pessoa depende da quantidade de água consumida, correspondendo normalmente a 80%. A região Sudeste, por exemplo, distribuiu um volume de água de $0,36 \text{ m}^3$ per capita em 2000, conforme citado em SANTOS (2007). Assim pode-se considerar um volume gerado de esgoto de $0,288 \text{ m}^3$ diariamente por habitante.

Outra informação importante é que 52,2% dos municípios e 33,5% dos domicílios brasileiros tem serviço de coleta de esgoto. Dos 52,2% dos municípios que têm esgotamento sanitário, 32% têm serviço de coleta e 20,2% coletam e tratam o esgoto. Em volume, no país, diariamente, 14,5 milhões m^3 de esgoto são coletados, sendo que 5,1 milhões m^3 são tratados, segundo IBGE (2000).

No país existe, portanto um grande potencial para aproveitamento energético do biogás considerado.

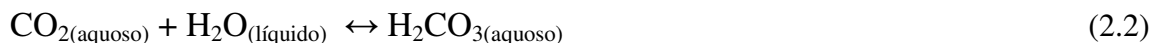
2.2.2 Purificação do biogás

A purificação gasosa envolve a remoção de impurezas gasosas, sendo cada processo uma operação unitária em que um componente de uma mistura é dissolvido num líquido (MAGALHÃES et al., 2006). Os processos desenvolvidos para purificar gases variam desde operações com uma única lavagem, até sistemas complexos com múltiplas etapas e correntes de reciclagem. Em casos mais complexos há a necessidade de recuperar as impurezas e/ou de

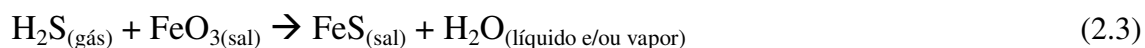
reutilizar os materiais empregues para a sua remoção (KAHL; NIELSEN⁶, 1997 apud EDEN, 2007 p.7). Os custos desses processos de purificação variam de acordo com a tecnologia e materiais utilizados

Uma das formas utilizadas para a melhoria do aproveitamento do biogás consiste em eliminar de sua composição substâncias corrosivas, como o H₂S, e que diminuam seu poder calorífico, como CO₂, já que este tem um efeito de diluição no biogás (MAGALHÃES et al., 2006). Seguindo essas premissas neste trabalho adota-se o uso de colunas de absorção de CO₂, cujo funcionamento baseia-se na solubilidade do mesmo em água, e de filtros de limalha de ferro, que reagem com o H₂S presente no biogás, retendo-os.

A remoção do CO₂ presente no biogás é realizada por meio de uma torre de absorção. Nesta torre, a água pressurizada é transformada em pequenas gotículas para facilitar a absorção do CO₂. Esse processo resulta na dissolução do CO₂, formando o ácido carbônico, H₂CO₃, composto instável e que se mantém no equilíbrio representado pela equação (2.2). Posteriormente o H₂CO₃ é enviado para uma caixa de eliminação, cuja finalidade é separar o gás carbônico da água, onde o CO₂ é liberado para a atmosfera. A água é então recalçada para a torre de absorção e o biogás purificado é armazenado (COSTA, 2006).



O processo de remoção do H₂S, também conhecido como processo da esponja de ferro, é um dos métodos mais simples e mais comumente usados nas plantas para purificação do biogás. O biogás é introduzido na parte inferior do filtro, constituído basicamente por um tubo, que pode ser de policloreto de vinilideno (PVC), preenchido com limalha de ferro (óxido de ferro). O fluxo do biogás é ascendente, e o H₂S presente no mesmo reagirá com a limalha de ferro para formar o sulfeto férrico, conforme representado na equação (2.3). Após esta reação o biogás é captado na parte superior, livre do H₂S em sua composição (AZEVEDO; SILVA; TAUCHEST, 2004).



⁶ KAHL, A. L.; NIELSEN, R. **Gas Purification**. 1997 apud **Relatório de execução material: tarefa E3.7 - PPS 5 - Purificação**. 2007. Disponível em: < <http://www.slideshare.net/h2portugal/tarefa-e-37-purificacao>>. Acesso em: mar. 2012.

No entanto, para que o biogás seja interligado aos dutos de gás natural é necessária além de sua purificação, tornando sua composição o mais próxima da desse gás, a adequação de sua pressão por meio de compressores.

Em projetos envolvendo o transporte, armazenamento e purificação do biogás é muito comum o uso de PVC, ainda que mundialmente seja mais utilizado e adequado o uso do polietileno (PE), (GODOY JUNIOR, 2011).

Segundo Godoy Junior (2011) o PVC não é ideal para a condução do biogás devido a características físicas e químicas, que o tornam altamente permeável à passagem de gases pela sua parede, sendo adequado apenas para líquidos. Dentre os problemas acarretados por seu emprego destacam-se:

- redução do poder calorífico do biogás: devido à contaminação com o ar atmosférico;
- redução na eficiência dos filtros de retenção de H_2S : a contaminação com oxigênio promove uma apassivação sob a camada de óxido de ferro que recobre a limalha de ferro e impede a retenção do H_2S ;
- riscos de segurança: pode ocorrer o vazamento de biogás através da porosidade e fissuras do tubo de PVC, que quando enterrados, por exemplo, podem formar bolsões de gás.
- decomposição, dissolução, inchamento e perda de ductilidade do PVC: devido a reação entre o PVC e o CH_4 presente no biogás.

Ainda segundo Godoy Junior (2011) o uso do polietileno para aplicações com biogás torna-se, além de mais seguro, mais atrativo economicamente, pois na cadeia de transformação dos termoplásticos oriundos de derivados de petróleo, o PE vem antes do PVC. Portanto, devido a essas características apresentadas, é sugerido o uso PE no biogasoduto, conforme proposto por Godoy Junior (2011) e nos sistemas montados para a purificação do biogás.

2.2.3 Vantagens no aproveitamento do biogás

O biogás é considerado uma fonte de energia renovável, logo sua recuperação e uso energético oferecem vantagens ambientais, sociais e estratégicas significativas. Os lixões, por exemplo, apresentam geração de biogás (metano) que sem captação e destino adequado resultam em impactos importantes no aquecimento global do planeta e na contaminação do lençol freático a nível regional (CENBIO, 2001).

A geração de energia a partir do biogás corresponde a um forte candidato a projetos que envolvem a comercialização de carbono, o que é evidenciado pelos investimentos, por parte

de diversos países da União Europeia, em projetos de geração de energia com o biogás e consequente redução na emissão de gases do efeito estufa, (CENBIO, 2001).

É importante ressaltar também a característica de descentralização na geração de energia, já que todo adensamento populacional é também um centro importador de energia e a recuperação do biogás permite a diminuição dessa necessidade de importação. Independente do tipo de adensamento (residencial, industrial ou rural), ocorre nesses ambientes a geração de resíduos que com a aplicação de tecnologias anaeróbicas adequadas permitem a produção do biogás, (CENBIO, 2001).

3. ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO EM ATERROS SANITÁRIOS

O metano é o gás com maior poder calorífico presente no biogás, para sua comercialização como combustível é mais interessante conhecer a quantidade de metano gerada ao invés do volume de biogás.

O IPCC apresenta uma metodologia de fácil aplicação para o cálculo de emissão de metano a partir de resíduos sólidos para determinados países ou regiões. Esse método, definido pela equação 3.1, é variante do Método de Decaimento de Primeira Ordem, que relaciona a disponibilidade de dados relacionados à disposição dos resíduos sólidos domésticos (RSD) depositados em aterros sanitários (IPCC⁷, 1996 apud MONTILHA, 2005).

$$Q_{CH_4} = k \times R_x \times L_0 \times e^{-k(X-x)} \quad (3.1)$$

Onde:

- Q_{CH_4} : metano gerado [$m^3 CH_4$ /ano];
- k : constante de decaimento [ano^{-1}];
- R_x : fluxo de resíduos [kg RSD/ano]
- L_0 : potencial de geração de metano do lixo [$(m^3 \text{ de } CH_4) / \text{kg de RSD}$];
- X : ano atual;
- x : ano de início de operação no aterro.

Para se obter um valor coerente para obtenção do fluxo de resíduos (R_x) que irá gerar o metano é importante se levar em conta a fração de resíduos sólidos domésticos (RSD_f) que é depositada em locais de disposição de resíduos sólidos. O valor desse fluxo de resíduos será dado então pela equação (3.2):

$$R_x = RSD_f \times TaxaRSD \quad (3.2)$$

Onde:

- RSD_f : fração de RSD que é depositada em locais de disposição de resíduos sólidos [%];

⁷ IPCC – INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Inventories**: reference manual. 1996. v.3 apud MONTILHA, F. **Biogás – Energia Renovável**. 2005. 73f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil com ênfase em Ambiental) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2005.

- TaxaRSD: taxa de geração de RSD por habitante por ano [kg de RSD/ habitante.ano];

O potencial de geração do metano (L_0) corresponde à produção total de metano (m^3CH_4) por tonelada de lixo, que depende da composição do resíduo e em particular, da fração de matéria orgânica presente. O cálculo de L_0 é realizado com base no conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e num fator de conversão estequiométrica. Valores típicos desse parâmetro variam de 125 m^3 a 310 m^3 de tonelada de CH_4 por tonelada de resíduo.

A maior compactação do resíduo não tem efeito direto no parâmetro de L_0 , porém a compactação e a densidade do lixo interferem na massa do mesmo num dado volume, logo interferem na qualidade do gás de aterro, bem como nas características de desempenho dos sistemas que serão necessários para coletar o biogás.

O potencial de geração de metano a partir do lixo (L_0) pode ser obtido pela metodologia apresentada em IPCC⁶ (1996 apud MONTILHA, 2005), utilizando-se a equação (3.3):

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times (16/12) \quad (3.3)$$

Onde:

- FCM: fator de correção de metano [adimensional];
- COD: carbônico orgânico degradável [kg de C/ kg de RSD];
- COD_f : fração de COD dissociada [adimensional];
- F: fração de volume de metano no biogás [%];
- (16/12): fator de conversão de carbono em metano [kg de CH_4 / kg de C].

A unidade do L_0 calculado a partir da Equação 3.3 é dada em [kg de CH_4 /kg de RSD], para que a unidade seja transformada para [$m^3 CH_4$ /kg de RSD] e então possa ser aplicada na equação (3.1) para se obter o metano gerado em [$m^3 CH_4$ /ano] , deve-se dividir o valor de L_0 pela densidade do metano, que é 0,7168 [kg de CH_4 / m^3].

Tabela 3.1 - Valores para o FCM (IPCC, 1996).

Tipo de local de disposição	FCM
Lixão	0,4
Aterro controlado	0,8
Aterro sanitário	1,0
Locais sem categoria	0,6

O fator de correção de metano (FCM) varia em função do tipo de local, classificado em quatro categorias diferentes segundo IPCC: Aterros Inadequados, Aterros Controlados, Aterros Sanitários e Aterros sem Classificação. Para cada um das categorias o FCM assume um valor diferente, conforme mostra a Tabela 3.1.

O cálculo da quantidade de carbono orgânico degradável (COD) é calculada pela equação (3.4). Este cálculo é baseado na composição do lixo e na quantidade de carbono em cada componente de massa de resíduo, conforme IPCC (1996). Na Tabela 3.2, encontra-se os valores de COD para diferentes componentes do lixo.

Tabela 3.2 - Teor de Carbono orgânico degradável para cada componente do lixo (ENSINAS⁸, 2003 apud MONTILHA, 2005).

Componente	% COD (massa)
A) Papel e papelão	40
B) Resíduos de parques e jardins	17
C) Restos de alimentos	15
D) Tecidos	40
E) Madeira ⁹	30

$$\text{COD} = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,40 \times D) + (0,30 \times E) \quad (3.4)$$

⁸ ENSINAS, A.V. **Estudo da Geração do Biogás no Aterro Sanitário Delta em Campinas**. São Paulo: 2003.129 f. apud MONTILHA, F. **Biogás – Energia renovável**. 2005. 73f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil com ênfase em Ambiental) – Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2005.

⁹ Excluindo a fração de lignina que se decompõe lentamente.

Onde:

- A: fração de papel e papelão no lixo;
- B: fração de resíduos de parques e jardins no lixo;
- C: fração de restos de alimentos no lixo;
- D: fração de tecidos no lixo;
- E: fração de madeira no lixo.

A fração de COD dissociada (COD_f), segundo Montilha (2005), indica a fração de carbono disponível para a decomposição bioquímica, e pode ser obtida pela equação (3.5).

$$COD_f = 0,014 \times T + 0,28 \quad (3.5)$$

Onde:

- T: temperatura na zona anaeróbica [°C].

3.1 Estimativas de Potência e Energia geradas pelo biogás

Para a determinação da potência e energia geradas a partir do biogás sugere-se utilizar as equações (3.6) e (3.7):

$$P = \frac{Q_{CH_4} \times PCI \times \eta}{860} \quad (3.6)$$

$$E = P \times R_{end} \times t \quad (3.7)$$

Onde:

- Q_{CH_4} : metano gerado [m^3CH_4/h];
- P: potência gerada [kW];
- PCI: poder calorífico inferior do metano. Caso o aterro não possua o valor real do PCI do metano, pode-se adotar 5.500 [kcal/ m^3CH_4], valor adotado para 50% de metano presente no biogás de aterro;
- η : eficiência de motores a combustão (estimado em 30%=0,30);
- 860: conversão de kcal para kw.

- E^* : energia disponível [kWh];

- R_{end} : rendimento de geradores elétricos operando a plena carga (estimado em 87%=0,87);

- t : tempo de operação do motor [horas].

O metano gerado (Q_{CH_4}) obtido na secção anterior é dado na unidade de [$\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$], no entanto, especialmente para dimensionamento de motores e geradores, é mais interessante saber a potência que pode ser gerada por hora, sendo para isso necessário a determinação da vazão por hora do biogás, obtida pela divisão do metano gerado anualmente (Q_{CH_4}) por 8760 (número de horas em um ano).

3.2 Determinação da vazão do solvente para purificação do biogás

Por meio da solubilidade e da composição do biogás a ser purificada, a determinação da circulação do solvente necessária no sistema é obtida através da equação (3.8). O sistema de purificação adotado no trabalho é o proposto por Magalhães et al. (2006), onde o solvente utilizado é a água.

A Tabela 3.3 apresenta a solubilidade dos gases que constituem o biogás em água:

Tabela 3.3 - Solubilidade dos gases constituintes do biogás em água. (Centro para Conservação de Energia - CCE¹⁰ 2000 apud Magalhães et al., 2006).

Temperatura [°C]	Volume de gás dissolvido em água		
	CO ₂	H ₂ S	CH ₄
20	$8,665 \times 10^{-6}$	$2,548 \times 10^{-5}$	$3,336 \times 10^{-7}$
25	$7,501 \times 10^{-6}$	$2,252 \times 10^{-5}$	$2,961 \times 10^{-7}$
35	$5,843 \times 10^{-6}$	$1,807 \times 10^{-5}$	$2,507 \times 10^{-7}$

$$V_L = \frac{V_G \times N}{100 \times S \times P^*} \quad (3.8)$$

Onde:

- V_L : vazão da água [$\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$];

- V_G : vazão do biogás [$\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$];

- S : solubilidade do gás carbônico em água [$\text{m}^3 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}$];

¹⁰ CCE – CENTRO PARA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA. **Guia Técnico de Biogás**. Portugal: Amadora, 2001 apud MAGALHÃES, E. A. et al. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de purificação de biogás: influência da pressão e razão líquido/gás na absorção de CO₂. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.14, n.4, 226-237, out/dez, 2006.

- P^* : pressão de operação [kPa];
- N: porcentagem do gás carbônico no biogás [%].

3.3 Dimensionamento de bombas utilizadas na purificação do biogás

Nos métodos para purificação do biogás propostos neste trabalho são utilizadas bombas, que devem ser dimensionadas de acordo com as características da planta em estudo.

Nesta seção é descrita uma metodologia elaborada de forma simplificada pela Schneider Motobombas (2011) para o dimensionamento de uma motobomba centrífuga residencial. Esse método é utilizado para o cálculo da estimativa da potência necessária da bomba para o processo de purificação do biogás.

Para os cálculos devem-se ter além da vazão do líquido que será succionado, as medidas da altura de recalque (AR), altura de sucção (AS) e do comprimento total da tubulação (CT), conforme representado na Figura 3.1:

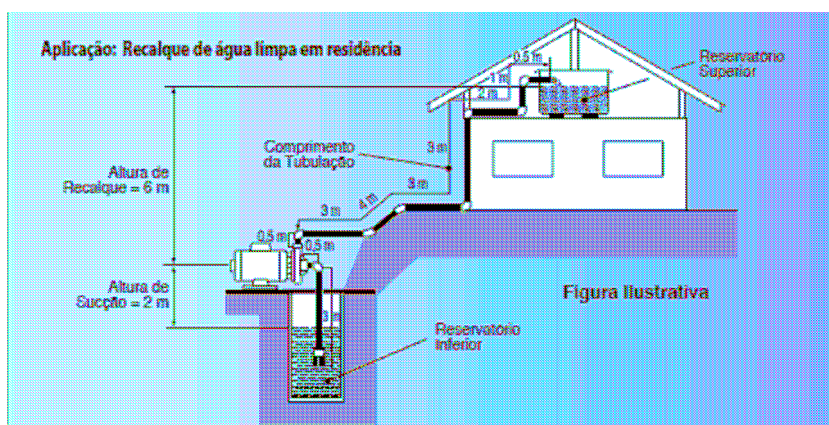


Figura 3.1- Figura ilustrativa da instalação hidráulica e medidas necessárias ao dimensionamento da bomba. (SCHNEIDER MOTOBOMBAS, 2011).

A escolha do diâmetro da tubulação é feita através de uma tabela de perda de carga em tubulações, que relaciona a vazão desejada com o material, PVC ou tubo de ferro fundido ou galvanizado, obtendo-se um percentual de perda de carga ao longo de uma tubulação de cem metros bem como a tubulação mínima necessária para o recalque. Nessa tabela, cujo trecho é representado na Tabela 3.4, localiza-se a linha onde está o valor de vazão desejado e segue-se para a direita até o primeiro valor depois da linha vertical, fator percentual de perda de carga (F_{pc}). A partir desse valor, sobe-se a coluna até encontrar o diâmetro mínimo indicado. Para uma vazão de 2 [m³/h], por exemplo, obtém-se o valor de uma polegada da tubulação de recalque e 5,4% de F_{pc} , se o material escolhido for o PVC. É importante ressaltar que devido

aos problemas relacionados ao uso do PVC, citados no capítulo dois, no projeto é adotado o uso do polietileno (PE).

Sugere-se que a escolha do diâmetro da tubulação de sucção seja feita mediante uso de uma tabela de sugestão de diâmetro de tubulação por vazão, também apresentado pela Schneider Motobombas (2011), conforme Tabela 3.5. Para o exemplo, vazão de 2 [m³/h] o diâmetro escolhido para a tubulação de sucção deve ser de uma polegada.

Tabela 3.4 - Tabela de perda de carga em tubulações (SCHNEIDER MOTOBOMBAS, 2011).

Vazão [m ³ /h]	PVC	F°F°	PVC	F°F°	PVC	F°F°
	¾" (25 mm)		1" (32 mm)		1 ¼" (40 mm)	
0,5	1,5	1,3	0,5	0,4	0,1	0,1
1,0	4,9	4,8	1,6	1,6	0,4	0,4
1,5	10,0	10,1	3,3	3,4	0,9	0,9
2,0	16,5	17,2	5,4	5,8	1,4	1,5
2,5	24,4	26,1	8,0	8,8	2,1	2,3
3,0	33,6	36,5	11,0	12,3	2,9	3,2
3,5	44,0	48,6	14,4	16,4	3,8	4,2
4,0	55,6	62,2	18,2	21,0	4,8	5,4

A determinação da altura manométrica total (AMT) é realizada através da equação (3.9):

$$AMT = (AS + AR + PC) + 5\% \quad (3.9)$$

Onde:

- AMT: altura manométrica total [m c.a.];
- AS: altura de sucção, desnível entre a bomba e a lâmina de água do reservatório inferior [m];
- AR: altura de recalque, desnível entre a bomba e o ponto mais alto da instalação [m];
- PC: perda de carga [m c.a.];
- 5%: acréscimo feito para considerar as perdas de carga nas conexões.

Conforme se pode observar pelas unidades, descritas anteriormente, é comum o uso da unidade [m c.a.], cujo significado é metros de coluna de água.

Tabela 3.5 - Tabela de sugestão de diâmetro de tubulação por vazão (SCHNEIDER MOTOBOMAS, 2011).

		Recalque			
Vazão [m ³ /h]		0 a 1,5	1,5 a 3,0	3,0 a 6,5	6,5 a 8,5
Diâmetro	Polegadas	¾	1	1 ¼	1 ½
	Milímetros	25	32	40	50

A perda de carga (PC) é obtida através da equação (3.10) representada por:

$$PC = CT \times F_{pc}$$

(3.10)

Onde:

- CT: comprimento da tubulação, comprimento da tubulação de sucção mais a de recalque [m];

-F_{pc}: fator de perda de carga [%].

Para o exemplo mostrado na Figura 3.1, tem-se os seguintes parâmetros:

AS= 2,0 [m]

AR= 7,0 [m]

CT=20,5 [m]

Para a vazão de 2 [m³/h], conforme citado anteriormente tem-se o fator de perda de carga de 5,4%. Substituindo os valores de comprimento da tubulação e do fator de perda de carga, determina-se a perda de carga usando a equação (3.10):

$$PC=20,5 \times 0,054$$

$$PC=1,1 \text{ [m.c.a.]}$$

O valor de perda de carga (PC) calculado é então substituído na equação (3.9), juntamente com os valores de AS e AR, para se determinar a altura manométrica total.

$$AMT=(2,0+7,0+1,1) + 5\%$$

$$AMT= (10,1) +5\%$$

O acréscimo de 5% é feito sobre o valor obtido da altura manométrica total, portanto deve-se realizar a seguinte operação:

$$AMT= (10,1) + (10,1) \times 0,05$$

Obtendo-se um valor da AMT igual a 10,6 [m.c.a.]

Esse valor pode ser aproximado de forma conservadora para 11 [m.c.a.].

Tabela 3.6 - Tabela para seleção da potência da motobomba (SCHNEIDER MOTOBOMBAS, 2011).

		Características Hidráulicas										
Modelo	Potência	Altura Manométrica Total [m c.a.]										
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Vazão em m³/h válida para sucção de 0 m.c.a										
BCR- 2000	¼	3,5	3,4	3,2	3,1	2,9	2,7	2,6	2,4	2,2	2,0	1,2
	1/3	-	-	3,6	3,5	3,3	3,2	3,0	2,9	2,7	2,5	2,3
	½	-	-	-	4,1	3,9	3,7	3,6	3,4	3,2	3,0	2,8

A seleção da bomba deve então ser feita por meio da relação entre a altura manométrica desejada e a vazão, sendo esses valores relacionados em tabelas de especificações de bombas. Para o exemplo citado, utilizando-se da Tabela 3.6, para uma altura manométrica total (AMT) de 11 [m c.a.] e vazão da água de 2 [m³/h] a potência da motobomba sugerida é de ¼ [CV].

3.4 Análise financeira

Na fase de avaliação das diversas possibilidades de aproveitamento do biogás, têm-se disponíveis normalmente ordens de grandezas de investimentos. Nesta fase, a análise financeira utilizada consiste no cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) e da Taxa Interna de Retorno (TIR). (ICLEI, 2009).

É importante ressaltar que esta análise de viabilidade é simplificada e aplicável apenas para estudos preliminares. No caso de projetos de extração do biogás, na escolha entre alternativas de projetos, deve-se comparar os VPL's de cada um. O projeto que apresentar o maior VPL é o mais viável. (ICLEI, 2009).

3.4.1 Valor Presente Líquido

O VPL é um dos métodos mais empregados para a análise da viabilidade econômica de empreendimentos, consiste em trazer todos os fluxos financeiros do projeto para um único período (normalmente o período zero) e soma-los, tanto fluxos positivos quanto negativos. A partir do momento em que todos os fluxos tenham sido ajustados a mesma referência no tempo, obtém-se seu valor líquido que representa o resultado atual do investimento. (CORREIA NETO, 2007).

O cálculo do VPL é feito através da equação (3.11), sendo a equação (3.12) uma simplificação da anterior para o caso em que há apenas um investimento inicial (ICLEI, 2009).

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{F_j}{(1+i)^j} - \sum_{j=0}^n \frac{I_j}{(1+i)^j} \quad (3.11)$$

$$VPL = \sum_{j=0}^n \frac{F_j}{(1+i)^j} - I \quad (3.12)$$

Onde:

- VPL: Valor presente líquido [R\$];
- j: período analisado [geralmente em anos];
- n: é a duração total do período analisado [anos];
- I_j: diversas parcelas de investimentos [R\$];
- F_j: diversas parcelas de fluxo de caixa [R\$];
- i: taxa de retorno [%];
- I: investimento inicial [R\$].

O fluxo de caixa (F_j) é dado pela seguinte expressão:

$$F_j = R_j - C_j \quad (3.13)$$

Onde:

- R_j: diversas parcelas de receitas [R\$];
- C_j: diversas parcelas de custos [R\$];

No projeto será considerada apenas uma parcela de investimento, de forma que a equação a ser utilizada para os cálculos é a Equação 3.12.

Para analisar se um empreendimento deve ou não ser aplicado mediante a análise do seu valor de VPL, deve-se considerar rejeitado caso seja menor que zero e economicamente viável caso maior que zero. O valor de VPL negativo significa que sua rentabilidade é inferior ao retorno mínimo exigido (TMA). Quando se deseja, por outro lado, comparar dois ou mais projetos, opta-se pelo que tem o maior VPL absoluto, ou seja, aquele que gera maior riqueza ao investidor (CORREIA NETO, 2007).

A taxa de desconto (i) é normalmente considerada como a taxa mínima de atratividade (TMA), que corresponde a menor taxa que o investidor espera, de forma a considerar o investimento atrativo.

A Tabela 3.7 apresenta a VPL para os fluxos de caixa de um investimento inicial de R\$50.000,00, o período considerado é de seis meses (n) e a taxa mínima que o investidor deseja para seu investimento é de 2% (i) ao mês. Pode-se observar que o fluxo de caixa (F_j) é variável ao longo dos meses, sendo igual a R\$8.000,00 no segundo e terceiro mês, a R\$9.000,00 no quarto e quinto mês, e a R\$10.000,00 nos dois últimos meses.

Tabela 3.7 - Exemplo de análise de investimento utilizando o VPL (CORREIA NETO, 2007).

Mês	Fluxos	Fluxos Ajustados
0	-\$50.000,00	-\$50.000,00
1	\$8.000,00	\$7.843,14
2	\$8.000,00	\$7.689,35
3	\$9.000,00	\$8.480,90
4	\$9.000,00	\$8.314,61
5	\$10.000,00	\$9.057,31
6	\$10.000,00	\$8.879,71
Soma	ou VPL	\$265,02

É fácil verificar que para o mês em que o investimento é feito ($j=0$) não existe nenhum fluxo de caixa, e o fluxo ajustado é apenas -\$50.000,00. No primeiro mês ($j=1$), o fluxo de caixa ($F_j=F_1$) é igual a \$8.000,00, e seu fluxo ajustado ($FA_j=FA_1$) é dado pela expressão (3.14), retirada da equação (3.12):

$$FA_j = \frac{F_j}{(1+i)^j} \quad (3.14)$$

Sabendo que a taxa de retorno considerada é de 2% ao mês e substituindo os demais parâmetros na equação (3.14), tem-se:

$$FA_1 = \frac{8000}{(1+0,02)^1}$$

O valor de fluxo ajustado para o primeiro mês (FA_1) equivale, portanto, a \$7.843,14. O mesmo procedimento deve ser efetuado para todos os meses seguintes, e ao final, aplicando-se a equação (3.12), que nada mais é do que a soma desses valores de fluxos ajustados menos o valor do investimento inicial, obtém-se o VPL do empreendimento, de R\$265,02.

Esse valor de VPL informa que além do retorno de 2% ao mês obtido com o investimento, o investidor ainda ganhou R\$265,02 no período. Ou seja, sua riqueza aumentou acima da taxa mínima desejada, (CORREIA NETO, 2007).

3.4.2 Taxa Interna de Retorno

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa i quando o VPL é igual a zero e indica qual a taxa a ser aplicada ao fluxo de investimentos de modo que, trazidos aos valores atuais, se igualem ao valor das receitas. Em outras palavras a TIR representa a taxa máxima que o projeto suporta, antes da VPL se tornar negativa, ou seja, não viável. Portanto, quanto maior o TIR, melhor será o investimento em termos de rentabilidade, (ICLEI, 2009).

Para calcular a TIR, deve-se usar a técnica de aproximação por tentativa e erro. Uma taxa (i) deve ser estimada e calcula-se o VPL para o período desejado, se o valor for maior que zero, deve-se repetir o processo com uma taxa de desconto maior, caso contrário adota-se uma taxa de desconto menor. Esse procedimento deve ser feito até um resultado muito próximo de zero, para o valor de VPL, ser obtido (CORREIA NETO, 2007).

Esse método só pode ser usado como critério de aceitação de projetos de investimento quando houver outra taxa para fins de comparação. Como a TIR representa o retorno percentual do projeto em si, ela deve ser superior a uma taxa mínima de atratividade (TMA) esperada pelo investidor. Dessa forma o projeto só deve ser aceito se a TIR for maior que a TMA, (CORREIA NETO, 2007).

Para o exemplo citado anteriormente, o valor da TIR é de 2,1504%, ou seja, o VPL é igual à zero para essa taxa de retorno. Como a TIR é maior que a TMA, de 2%, o projeto deve ser aceito, (CORREIA NETO, 2007).

4. ESTIMATIVA DO POTENCIAL ENERGÉTICO EM ATERROS CONTROLADOS

Neste trabalho se realiza uma estimativa da geração de metano apenas através de aterros sanitários controlados, porém um desenvolvimento análogo pode ser realizado para obter sua produção em estações de tratamento de esgoto. É determinado também o potencial energético desperdiçado quando não há o aproveitamento energético do biogás produzido por esses aterros.

4.1 Estimativa do potencial de geração de metano

Segundo números divulgados por IBGE (2000), cidades com até 200 mil habitantes recolhem de 450 a 700 gramas de lixo por habitante; em cidades com mais de 200 mil habitantes, essa quantidade aumenta para a faixa de 800 a 1200 gramas por habitante.

É considerada uma cidade com 200 mil habitantes e adota-se que cada habitante produz em média 0,575 kg de resíduos sólidos domésticos (RSD) por dia, o que gera em um ano aproximadamente 210 kg de RSD por habitante, o equivalente a 42.000.000 quilogramas de RSD no ano. Portanto tem-se:

$$\text{- TaxaRSD} = 42.000.000 \text{ [kg RSD/ano]}$$

Segundo IBGE (2000) de todo lixo produzido diariamente no Brasil, 47,1% é destinado a aterros sanitários, portanto a fração de resíduos sólidos domésticos (RSD_f) para esse caso é de 0,471. Assim a equação (3.2) fica:

$$\text{- } R_x = \text{TaxaRSD} \times \text{RSD}_f = 42.000.000 \times 0,471 = 19.782.000,00 \text{ [kg RSD/ano]}$$

Em média o período de funcionamento de um aterro desse porte é de 20 anos, será considerado então que seu funcionamento iniciou em 2002 e calcula-se seu potencial de geração de metano para o ano de 2012. Considera-se que o lixo será depositado em um aterro controlado e, portanto possui um fator de correção de metano (FCM) igual a 0,8, conforme Tabela 3.1. Logo:

$$\text{- } X: 2012$$

$$\text{- } x: 2002$$

$$\text{- } \text{FCM} = 0,8$$

Para o valor de carbono orgânico degradável (COD) serão utilizadas as seguintes proporções de material que compõe o lixo (Tabela 3.2):

$$\text{- } A = 22,0\%$$

$$\text{- } B = 18,0\%$$

$$- C = 30,0\%$$

$$- D = 0,5\%$$

$$- E = 2,0\%$$

O restante, da composição do lixo, considera-se como constituída por qualquer outro tipo de material. Substituindo estes valores na Equação 3.4, tem-se:

$$- \text{COD} = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,4 \times D) + (0,30 \times E)$$

$$- \text{COD} = 0,172 \text{ [kg C/kg RSD]}$$

Para a fração de COD dissociada (COD_f) adota-se uma temperatura na zona anaeróbica dos resíduos de 35°C, e através da equação (3.5) tem-se:

$$- \text{COD}_f = 0,014 \times T + 0,28$$

$$- \text{COD}_f = 0,77$$

A fração em volume de metano no biogás (F) pode ser obtida a partir de medições no local. Nesta avaliação é adotado um valor conservador de 45% de metano (CH_4) no biogás, com pouca diluição de ar. Portanto:

$$- F = 0,45$$

Com os valores calculados de FCM, COD, COD_f e F, e utilizando a Equação 3.3 é possível obter o potencial de geração de metano do lixo (L_0):

$$- L_0 = \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{COD}_f \times F \times (16/12)$$

$$- L_0 = 0,0635712 \text{ [kg CH}_4\text{/ kg RSD]}$$

Considerando a densidade do CH_4 como 0,7168 [kg/m^3], divide-se o valor de L_0 encontrado e obtem-se:

$$- L_0 = 0,0886875 \text{ [m}^3\text{ CH}_4\text{/ kg RSD]}$$

De acordo com COELHO, ALENCAR, OLIVEIRA (2011) considerando a composição do lixo como contendo papel, resíduos orgânicos, têxteis e madeira, e realizando uma média dos seus respectivos valores da constante de decaimento k para clima tropical úmido (IPCC¹¹, 1996 apud COELHO, ALENCAR, OLIVEIRA 2011), obtém-se o seguinte valor:

$$- k: 0,09$$

Por fim, ao se utilizar a Equação 3.1 obtém-se o valor do volume de metano gerado anualmente:

$$- Q_{\text{CH}_4} = 64.196,30 \text{ [m}^3\text{ CH}_4\text{/ano]}$$

¹¹ IPCC – INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guia para inventários nacionais de gases do efeito estufa**. 1996. v.2: Livro de trabalho apud COELHO, T. C.; ALENCAR, R.; OLIVEIRA, R. M. S. **Estimativa da produção teórica do metano gerado no aterro sanitário de Palmas – TO**. 12. Ed. v.7, 13p.

Como apenas parte do biogás gerado é recuperada, no caso considera-se um índice de recuperação de 75%, o volume de metano gerado anualmente será de aproximadamente:

$$- Q_{CH_4} = (64.196,30 \times 0,75) = 48.147,23 \text{ [m}^3 \text{ CH}_4\text{/ano]}$$

Essa vazão de metano (Q_{CH_4}) pode ser descrita também sob a forma de vazão mensal, diária e por hora, respectivamente:

$$- Q_{CH_4} = 3.957,30 \text{ [m}^3 \text{ CH}_4\text{/mês]}$$

$$- Q_{CH_4} = 131,91 \text{ [m}^3 \text{ CH}_4\text{/dia]}$$

$$- Q_{CH_4} = 5,49 \text{ [m}^3 \text{ CH}_4\text{/h]}$$

Sabendo a fração de metano presente no biogás, 45%, pode-se determinar o volume de biogás que será recuperado:

$$- V_{\text{BIOGÁS}} = 106.993,85 \text{ [m}^3 \text{ biogás/ano]}$$

4.2 Estimativa do potencial energético desperdiçado quando não há o aproveitamento energético do biogás

O poder calorífico inferior (PCI) sugerido para o biogás com 45% de metano em sua composição é de 5.500 [kcal/m³ CH₄], de forma que, fazendo o produto desse valor pelo volume de metano já calculado, 5,49 [m³ CH₄/h], obtém-se a potência disponível por hora de 30.195,00 [kcal]. Dividindo essa potência disponível por 860, fator de transformação de quilocalorias (kcal) para quilowatts (kW), resulta em 35,11 [Kw].

A energia disponível é então obtida pelo produto da potência pelo tempo. É considerado o período de um ano, ou seja, 8760 horas. A energia presente no biogás produzido pelo aterro é, portanto de 307,56 [MWh/ano].

A partir da lista de cidades, com seus respectivos números de habitantes, fornecida pelo IBGE¹² (2012 apud WIKIPÉDIA, 2012) pode-se determinar um número aproximado de 200 cidades brasileiras cuja população varia entre 100 e 300 mil habitantes. Ao considerar-se que os aterros dessas cidades produzem o mesmo volume de metano calculado anteriormente, de 5,49 [m³ CH₄/h], pode-se determinar um potência equivalente a 7.022 [kW] e uma energia disponível de 61.512,72 [MWh/ano].

¹² IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente nos municípios brasileiros com data de referência em 1 julho de 2012.** 2012 apud WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. **Anexo:** lista de municípios do Brasil acima de cem mil habitantes. 2012. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Anexo:Lista_de_munic%C3%ADpios_do_Brasil_acima_de_cem_mil_habitantes#Refer.C3.AAncias. Acesso em: 10 dez. 2012.

A energia, presente no biogás, quando transformada em energia elétrica é reduzida devido à eficiência do motor e do gerador usado para essa conversão. Adotando uma eficiência de 30% do motor, e 87% do gerador, a energia elétrica (E^*) resultante desse processo de transformação será, portanto de:

$$E = 0,3 \times 0,87 \times 61.512,72$$

$$E = 16.054,82[\text{MWh/ano}].$$

Adotando-se um consumo de 100[kWh/mês] para uma residência, o que equivale a 1200 [kWh/ano], pode-se concluir que essa energia gerada, de 16.054,82 [MWh/ano], é suficiente para abastecer aproximadamente 14 mil residências.

O capítulo cinco sugere alternativas para o aproveitamento desse potencial energético oferecido pelo biogás, que além de ser desperdiçado quando jogado *in natura*, sem tratamento algum, na atmosfera, colabora também para a poluição e intensificação do efeito estufa.

5. ALTERNATIVAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

Segundo ICLEI (2009) existem basicamente quatro opções para o aproveitamento do biogás provenientes de aterros, dentre elas tem-se: a geração de energia elétrica, a geração de energia térmica, o uso do biogás como combustível veicular e para a iluminação a gás. O trabalho visa propor um destino ecologicamente correto para esse biogás, de forma a disponibilizar o uso dessa energia através do seu comércio. Portanto, as propostas estudadas nas seções 5.1 e 5.2 são referentes aos dois primeiros tipos de aproveitamento citados: geração de energia elétrica e geração de energia térmica.

As alternativas e análise econômica de projetos são para o aproveitamento energético do biogás gerado em aterro controlado para uma cidade com cerca de 200 mil habitantes.

Para o estudo algumas premissas importantes são adotadas, tais quais:

- O aterro é considerado como já contendo uma estrutura de captação do biogás e um sistema necessário para sua desumidificação e posterior queima em um *flare*¹³.
- O ano atual é tomado como referência para os anos posteriores, ou seja, o crescimento populacional não é contabilizado nos cálculos, e a produção de metano é considerada constante ao longo dos anos.

5.1 Sistema de geração de energia elétrica em uma pequena central elétrica

Nessa seção é analisada a possibilidade de aproveitamento do biogás transformando a energia química desse combustível em energia elétrica, por meio da instalação de uma pequena central elétrica dentro do aterro, e posterior venda dessa energia para a concessionária local.

Para a queima do biogás é adotado o uso de um sistema composto por motor de combustão interna (ciclo Otto) e gerador elétrico.

De acordo com ICLEI (2009) o motor Ciclo Otto é o equipamento mais utilizado para a queima do biogás devido ao maior rendimento elétrico e menor custo quando comparado a outras tecnologias.

¹³ Segundo ICLEI (2009) os *flares* são estruturas com queimadores internos, ligados aos dutos de biogás, e sua função é garantir que em caso de falha no sistema de geração de energia ou outro tipo de aproveitamento do biogás, não ocorra à emissão de metano para a atmosfera. A queima do metano resulta em dióxido de carbono e água. O poder calorífico do metano é vinte e uma vezes maior que do dióxido de carbono. Portanto, a emissão de dióxido de carbono é menos agravante para o efeitos estufa, quando comparada a emissão de metano.

O rendimento do motor para os cálculos é estabelecido em 30% e o valor de PCI sugerido para o biogás, conforme já citado é de 5.500 [kcal/m³CH₄]. Dessa forma através da equação (3.6) obtém-se uma potência gerada de 10,54 [kW], que pode ser satisfeita por um grupo motor gerador de potência nominal 15 [kW].

Substituindo o valor de potência encontrado, na equação (3.7), considerando que o tempo de operação em um ano seja de 8.760 horas, e o rendimento do gerador igual a 87%, a energia disponibilizada é de 80.327,45 [kWh/ano].

5.1.2 Análise econômica

O custo unitário do grupo motor gerador para a ordem de potência nominal de 15[kW] é estimado em R\$20.000,00 (ICLEI, 2009). No entanto, para a implantação dessa central elétrica, dentro do aterro, outros custos devem ser considerados, como por exemplo, os custos referentes ao abrigo do motor gerador, a mão de obra e a implantação de uma unidade elevadora de tensão.

O investimento necessário para a implantação de um sistema de geração de energia elétrica em uma pequena central elétrica, para um aterro que atende uma população de 650 mil habitantes, é de R\$11.117.820,00 (ICLEI, 2009). Para se obter um valor mais conservador para o custo do investimento, é adotado o valor mínimo de potência gerada por esse aterro, de forma a se obter o máximo custo por quilowatt gerado. A potência desse aterro é 90[kW], de forma que o custo para implantação da central elétrica resulta em R\$123.531,33 por quilowatt gerado. De forma análoga, para um custo de manutenção e operação anual de R\$216.356,00, referente a uma energia disponível de 660.650 [kWh/ano], obtém-se o custo de R\$0,32748 [kWh/ano].

A partir dos valores citados anteriormente para uma potência gerada de 10,54 [kW] obtém-se um custo de investimento de R\$1.302.020,21 e de operação e manutenção anual de R\$26.305,63. O custo para adaptações necessárias à implantação do sistema proposto a planta já existente é considerado arbitrariamente como 30% desse investimento, cujo valor atualizado será de R\$1.692.626,30.

Considera-se que energia gerada é vendida para a concessionária local. Para isso adota-se o preço médio do leilão de energia, oriunda de biomassa, equivalente a R\$0,10306 por [kWh] (ANEEL, 2011). A receita obtida pelo comércio da energia produzida, durante o período de um ano, é então de R\$8.278,54. A Tabela 5.1 abaixo apresenta os valores de investimento, custos e receitas determinados até então para o projeto:

Tabela 5.1 - Investimento, custos e receitas para o cenário avaliado

Investimento	R\$1.692.626,30
Custos com operação e manutenção	R\$26.305,63
Receita obtida pela venda de energia elétrica	R\$8.278,54

O fluxo de caixa (F_j) é considerado constante ao longo dos anos e calculado pela diferença entre a receita anual obtida pela venda de energia elétrica e os custos referentes à operação e manutenção do sistema, conforme equação (3.13):

$$F_j = R_j - C_j$$

$$F_j = R\$8.278,54 - R\$26.305,63$$

$$F_j = -R\$18.027,09$$

A análise financeira do empreendimento é feita através dos métodos do valor presente líquido (VPL) e da taxa interna de retorno (TIR), descritos no capítulo três. No entanto, apenas pela análise do fluxo de caixa, negativo ao longo dos anos, pode-se facilmente perceber que o projeto não será pago.

Para aplicação dos métodos do VPL e da TIR é necessário definir alguns parâmetros tais quais a taxa mínima de atratividade (TMA), adotada como 8% ao ano, e o período em que será feita a análise financeira do projeto (n), equivalente a 15 anos. O ano atual do investimento é o ano de 2012 ($j=0$). Relembrando que o índice (j) varia de $n=0$ (ano inicial do investimento, 2012) até $n=15$, último ano em que se espera que o projeto possua algum retorno financeiro, no caso, o ano de 2027. No primeiro ano de investimento a taxa de juros para ajustes (8%) não se aplica.

Para se obter o fluxo de caixa ajustado (FA_j) do primeiro ano após o investimento, ano 2013 ($j=1$), aplica-se a equação (3.14):

$$FA_j = \frac{F_j}{(1 + i)^j}$$

A taxa de ajuste (i) será igual a TMA, 8% ao ano. Substituindo os demais parâmetros na equação (3.13), tem-se que:

$$FA_1 = \frac{-18.027,09}{(1 + 0,08)^1}$$

Resolvendo a expressão anterior, obtém-se o valor de fluxo ajustado para o primeiro ano, o que equivale a $-R\$16.691,75$. O mesmo procedimento deve ser efetuado para todos os anos seguintes, ou seja, até $j=15$. E finalmente, aplicando-se a Equação 3.14, que nada mais é do que a soma desses valores de fluxos ajustados menos o valor do investimento inicial

(R\$1.692.626,30), obtém-se o VPL do empreendimento, de -R\$1.846.928,80. Como esse valor é negativo pode-se concluir que o projeto não se paga durante o período de análise do investimento, e que a dívida aumenta em 0,09% em relação ao investimento inicial.

A Figura 5.1 representa o gráfico do VPL ao longo dos 15 anos analisados, ou seja, do ano 2012 até o ano 2027. Pode-se observar pela análise da curva que o projeto não pode ser pago, e que a dívida só aumenta ao longo dos anos.

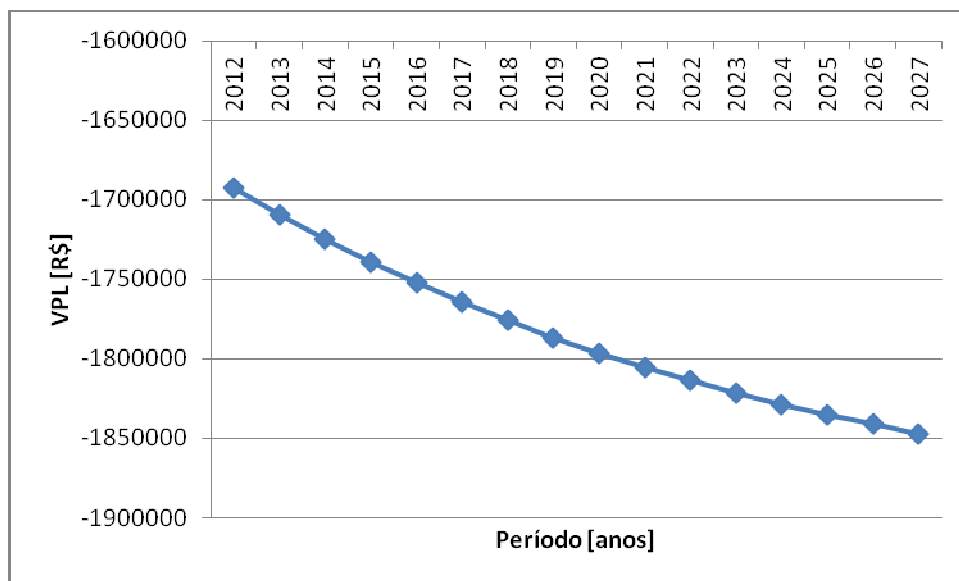


Figura 5.1- Gráfico VPL x Anos – Geração de energia elétrica em uma pequena central elétrica.

O método da taxa interna de retorno (TIR) apresenta como resultado o valor da taxa (i) necessária para que a VPL seja igual à zero, o que representa o pagamento da dívida (investimento mais gastos anuais de operação e manutenção), durante o período (n) de tempo estipulado.

A taxa interna de retorno (TIR) conforme descrita no capítulo três é obtida através de técnicas iterativas, de forma que para os fluxos de caixa apresentados anteriormente (-R\$18.027,09) e um horizonte de 15 anos, a TIR não existe, ou seja, o projeto não pode ser pago.

Em relação à venda de créditos de carbono, sabe-se que cada tonelada de metano queimada equivale a 21 créditos de carbono, justamente por seu potencial de aquecimento na atmosfera ser 21 vezes maior que a do carbono.

O valor do preço do crédito de carbono é admitido como de R\$20,315 por tonelada (ÁVILA, 2012). A partir da densidade do metano, aproximada para $0,717[\text{kg}/\text{m}^3]$ e sabendo-se seu volume produzido anualmente, $48.147,23 [\text{m}^3 \text{CH}_4]$, obtém-se um valor de 34.521,56

[kg CH₄], o que equivale a aproximadamente 34,52 [t CH₄]. Em posse desses valores, a receita obtida pela venda de créditos de carbono é:

$$= 21 \times 20,315 \times 34,52$$

$$= \text{R\$}14.726,74 / [\text{m}^3 \cdot \text{ano}]$$

Acrescentando essa receita ao fluxo de caixa anual do projeto, tem-se:

$$F_j = -\text{R\$}18.027,09 + \text{R\$}14.726,74$$

$$F_j = -\text{R\$}3.300,35$$

Refazendo então os cálculos para o VPL, levando-se em consideração o mesmo período (n) de 15 anos, o mesmo valor de TMA (8% ao ano) e de investimento inicial (R\$1.692.626,30), o valor do VPL, ao final dos 15 anos, é de -R\$1.720.875,57, ou seja, o projeto não se paga.

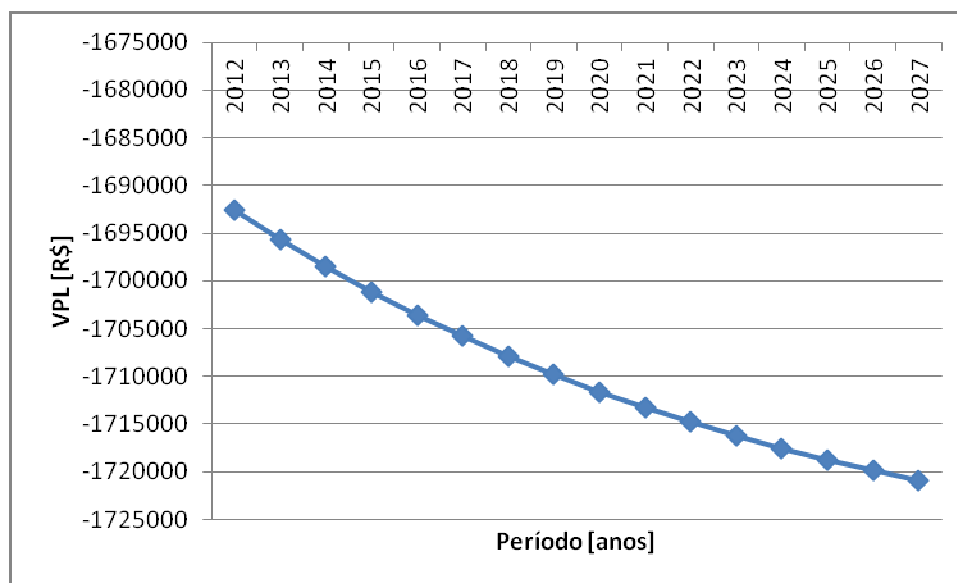


Figura 5.2 - Gráfico VPL x Anos – Geração de energia elétrica em uma pequena central elétrica considerando a venda de créditos de carbono.

A receita obtida pela venda de créditos de carbono aumenta o fluxo de caixa, mas não o suficiente para torná-lo positivo. A dívida referente ao investimento e gastos com a manutenção e operação da central elétrica continua a aumentar ao longo dos anos, mesmo considerando a venda de créditos de carbono, porém com uma taxa menor que o cenário anterior (sem considerar a venda de créditos de carbono). Essa diferença pode ser observada ao se analisar o decaimento das curvas na Figura 5.1 e Figura 5.2. A curva do VPL da Figura 5.1 atinge valores negativos maiores quando comparada a curva da Figura 5.2.

A TIR para esse novo cenário apresentado, assim como no caso analisado anteriormente, em que a receita advinda da venda de créditos de carbono não é contabilizada, também não existe. Ou seja, não existe taxa (i) que torne o VPL igual à zero.

5.2 Purificação e comércio do biogás

A purificação do biogás proposta é feita mediante a retirada de CO_2 e H_2S da sua composição, componentes que, conforme descrito anteriormente, são os principais causadores de problemas quando no uso desse gás como combustível. Como o preço de venda será uma ponderação no preço do próprio gás natural, levando-se em conta a porcentagem de metano existente no mesmo, ou seja, seu poder calorífico, a ideia é aproximar as porcentagens de metano e gás carbônico às propostas pela ANP. O valor mínimo da composição de metano no gás natural, exigido pela ANP, é de 85%, enquanto que para o gás carbônico exige-se uma porcentagem máxima de 3% no gás natural.

A retirada do H_2S é realizada a partir da instalação de um filtro de limalha de ferro oxidada que retém esse gás. Para a melhoria da eficiência do mesmo sugere-se o uso de PE para a tubulação de biogasoduto, conforme proposto por Godoy (2011). Como a quantidade de ácido sulfídrico presente no biogás não é muito alta, será admitido como suficiente o uso de apenas um filtro para tornar a porcentagem de H_2S insignificante, e que não influencie na qualidade do biogás produzido.

Feito isso, o biogás segue então para um sistema de retenção de CO_2 , que consiste no uso de colunas de absorção proposto por Magalhães et al. (2006), trocando apenas o recheio de PVC por PE. Seu funcionamento é contracorrente, o soluto entra na parte inferior da coluna enquanto o solvente, água entra na parte superior. Para a determinação do volume de água necessária utiliza-se a equação (3.8). A temperatura considerada é de 25°C , conforme a Tabela 3.3 e a solubilidade do CO_2 será $7,501 \times 10^{-6} [\text{m}^3 \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1}]$. A vazão do biogás para o aterro proposto é de $12,21 [\text{m}^3/\text{h}]$ ou $0,2035 [\text{m}^3/\text{min}]$, e a porcentagem de CO_2 equivalente a 40%, valor conservador. A pressão de operação adotada será de $480 [\text{kPa}]$, acima desse valor se tornaria um empreendimento de grande porte exigindo peças mais onerosas (MIKEN¹⁴ et al, 2001 apud MAGALHÃES et al.,2006), o que não é o objetivo do trabalho

¹⁴ MYKEN, A. et al. **Adding gas from biomass to the gas grid: final report**. 2001 apud MAGALHÃES, E. A. et al. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de purificação de biogás: influência da pressão e razão líquido/gás na absorção de CO_2 . **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.14, n.4, 226-237, out/dez, 2006.

Substituindo os parâmetros citados anteriormente na equação 3.8 é obtida uma vazão de água igual a 22,60 [L/min], o que equivale 0,0226 [m³/min] ou 1,35 [m³/h]. A implantação dessas colunas de absorção requer a utilização de bombas, cujo dimensionamento deve ser feito de acordo com a vazão de solvente que se deseja trabalhar, no caso a água. A metodologia para dimensionamento de bombas é descrita no capítulo três, e os valores adotados (conservadores) para altura de sucção (AS), altura de recalque (AR) e comprimento da tubulação (CT) são:

- AS= 2 [m]
- AR=15 [m]
- CT=15 [m]

A partir da Tabela 3.5, que sugere o diâmetro de tubulação por vazão da água, obtém-se para uma vazão de 1,35 [m³/h], o diâmetro da tubulação equivalente a 3/4 de polegada. Esse diâmetro é adotado tanto para tubulação de recalque quanto para a de sucção. Em posse desse valor e da vazão de água, pode-se obter também a porcentagem de perda de carga através da Tabela 3.4, no caso 10%.

Substituindo os valores de comprimento da tubulação e da porcentagem de perda de carga na equação (3.10), obtém-se um valor de perda de carga equivalente a 1,50 [m c.a.], que será inserido na equação (3.9) juntamente com a altura de sucção (AS) e de recalque (AR), resultando em uma altura manométrica total de 19,42 [m c.a.]. O modelo de bomba BC-91 S/T (SHNEIDER MOTOBOMBAS, 2011) é tomado como referência. Adotando-se uma altura manométrica maior que a calculada, de 20 [m c.a] e também maior valor de vazão de água, 3,4 [m³/h], com a intenção de dar uma boa margem de erro para os cálculos, chega-se em uma potência de 1/2 [CV].

Para se obter uma porcentagem adequada de CO₂, é necessário que o biogás passe por três colunas de absorção, cada coluna absorve 63,45% do CO₂ de forma que ao fim do processo o biogás terá reduzido seu volume em 38,04%, sua composição será de 3,0% de CO₂, mesmo valor estipulado pela ANP para a composição do gás natural. Visto isso se sabe também a porcentagem restante de CH₄, de 73%, menor que a porcentagem mínima de 85% estipulado pela ANP.

O preço de venda do biogás é obtido através das equações (5.1) e (5.2):

$$P_B = R \times P_{GN} \quad (5.1)$$

$$R = \frac{\%_{CH_4BIOGÁS}}{\%_{CH_4GN}} \quad (5.2)$$

Onde:

- P_B : preço de venda do biogás [R\$/m³];

- R : relação entre a porcentagem de metano no biogás e a porcentagem de metano no gás natural [%];

- P_{GN} : preço do gás natural [R\$/m³].

-%_{CH₄BIOGÁS}: porcentagem de metano no biogás [%];

-%_{CH₄GN}: porcentagem de metano no gás natural [%];

5.2.1 Venda do biogás através dos gasodutos existentes

Para que o biogás seja passível de ser inserido em dutos de gás natural é necessário primeiramente que seu poder calorífico seja alto, fato esse que está diretamente relacionado a porcentagem de metano existente em sua composição. Conforme descrito na Seção 5.2 a porcentagem máxima obtida através do processo de purificação proposto é de 73% de metano, inferior aos 85% estipulados pela ANP. O trabalho propõe como uma solução a esse problema o enriquecimento do biogás através de sua mistura com gás natural. Porém, é importante mencionar ainda que as empresas de gás requerem que as injeções de gás em seus sistemas de gasodutos atendam a altos padrões de qualidade, o que pode demandar controles de qualidade adicionais, além da diminuição do nível de CO₂ (para 3%) e a retirada de H₂S, propostas até então.

Outro aspecto importante para o transporte do biogás em dutos de gás natural é em relação à pressão necessária para sua inserção nos dutos. Fato esse que pode encarecer muito o projeto.

A depuração do gás exigirá significativa compressão para atender a pressão do gasoduto no ponto de conexão. Gasodutos de alta pressão requerem de 20 a 34 atm, enquanto os de média e baixa podem requerer de 0,7 a 2 atm (CETESB, 2006).

Para se ter uma ideia da ordem do investimento envolvido, segundo o Artigo 4º da Resolução ANP nº41, de 5 de dezembro de 2007, o investimento mínimo necessário para que um agente econômico possa exercer a atividade de distribuição de gás natural comprimido (GNC), o que abrange entre outros itens o recebimento e compressão do gás natural, é de

R\$2.000.000,00. Supondo-se que apenas 30% desse valor sejam referentes ao custo para compressão do biogás, ou seja, R\$600.000,00, ainda sim o investimento é alto, para um aterro de pequeno porte cujo volume biogás gerado não é tão elevado.

O projeto, portanto só terá custo-efetividade para aterros sanitários com substancial recuperação do biogás, isto é, pelo menos 113.000 m³ por dia (CETESB, 2006), valor esse muito maior que a produção diária de 293,13 m³ para a qual nosso estudo está direcionado.

5.2.2 Venda do biogás através de gasodutos dedicados

Visto os problemas encontrados para a inserção do biogás em dutos de gás natural, o trabalho sugere a venda desse biogás purificado para indústrias, próximas ao aterro, que se utilizem do processo de cogeração.

Outra sugestão é a existência de dutos dedicados ao biogás, não existindo assim a preocupação com níveis específicos de metano na sua composição, ou mesmo com a pressão em que o biogás é inserido nesses dutos. A proposta é de vender esse biogás para as concessionárias responsáveis pelos biogasodutos, que poderão posteriormente revende-los a consumidores potenciais, como por exemplo, unidades industriais como a citada acima, distantes do aterro. Obviamente um estudo deve ser feito para analisar a viabilidade do financiamento desses biogasodutos pelas transportadoras, o que não é o foco do trabalho.

5.2.2.1 Análise econômica

O preço de venda do gás natural nacional no *city gate* será considerado como US\$ 8,14/MMBTU, valor esse que é a média dos preços apresentados pela Petrobrás (2012) para o gás natural nacional. Segundo COMGÁS (2012), 1 m³ de gás natural, possui em média 9.400 [kcal]. Sabendo-se que 1[kcal] equivale a $3,968320 \times 10^{-6}$ [MMBTU], então o poder calorífico do gás natural é de 0,037302 [MMBTU/m³], multiplicando-se o poder calorífico encontrado pelo preço do gás natural (US\$8,14/MMBTU) resulta no seguinte preço para o gás natural: US\$0,30364/m³. A taxa de câmbio utilizada é de US\$1,00 equivalente a R\$2,031. O preço do gás natural (P_{GN}) convertido para a taxa adotada é, portanto R\$0,61669/m³.

A porcentagem de metano presente no gás natural será adotada como 85%. Conforme visto anteriormente a porcentagem de metano no biogás purificado é de 73%. Desta forma a equação (5.2) fica:

$$p=0,73/0,85$$

$$p=0,85882$$

Substituindo a relação (p) determinada e o preço do gás natural no *city gate*, R\$0,61669/m³ na equação 5.1, obtém-se, o preço do biogás purificado:

$$P_B = p \times P_{GN}$$

$$P_B = 0,85882 \times R\$0,61669$$

$$P_B = R\$ 0,52963/\text{m}^3$$

O preço do biogás (P_B) calculado é então R\$0,52963/m³. Tomando-se a produção anual de biogás de 106.993,85[m³ biogás/ano], no aterro considerado, e que após passar pelo processo de purificação seu volume é reduzido em 38,04%, obtém-se um volume anual de biogás igual a 66.293,38 [m³]. Portanto, o valor anual obtido com sua venda será de R\$35.110,96.

O presente trabalho visa que o projeto deva ser lucrativo em curto prazo, até mesmo porque o funcionamento do aterro é restrito a alguns anos, bem como sua produção de biogás. O investimento considerado para o cálculo da viabilidade do projeto é a instalação das colunas de absorção e do filtro para a retirada do H₂S, estimados respectivamente em R\$7.800,00 (MAGALHÃES et al., 2006) e R\$3000,00 (GODOY JUNIOR¹⁵, 2012), sendo o último baseado na vazão de biogás coletada no aterro.

O armazenamento do biogás purificado é feito em um gasômetro. Segundo Azevedo (2004) um gasômetro de elastômero com capacidade para armazenar 70 m³ de biogás por dia custa R\$ 5.850,00. O volume diário de biogás a ser armazenado é de aproximadamente 182 m³, e sabendo-se que o preço do gasômetro varia com seu volume é estimado um custo de R\$15.000,00 para o armazenamento desse biogás.

Outro custo que é incluído no projeto é o referente ao abrigo para o sistema de purificação e armazenamento desse biogás purificado. É tomado como base o investimento, apresentado por Cervi, Esperancini e Bueno (2010), necessário a construção de um abrigo para um grupo gerador de potência nominal 40 [kW]. Esse custo (R\$7.666,40) engloba a construção do abrigo, gastos com instalações elétricas e mão de obra. O abrigo para se instalar o sistema de purificação e armazenamento será maior quando comparado a um abrigo para o grupo motor gerador citado, de forma que é considerado, conservadoramente, um custo de R\$9.000,00 para construção dessa estrutura.

Portanto o valor total do investimento será de R\$ R\$34.800,00.

O custo para adaptações necessárias à implantação do sistema proposto a planta já existente é considerado arbitrariamente como 30% desse investimento, cujo valor atualizado é

¹⁵ GODOY JUNIOR, E. Professor Dr. membro do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

de R\$45.240,00. A Tabela 5.2 apresenta a discriminação dos custos considerados para o investimento inicial do projeto proposto.

Ainda segundo Godoy Junior¹⁶ (2012) no caso do filtro de limalha de ferro, para a retirada do H₂S, o custo de operação e manutenção (O&M) é de R\$510,00 por ano, ou seja, equivale a aproximadamente 17% do valor referente à sua implantação. Fazendo um paralelo para o caso das colunas de absorção, estima-se um custo R\$1.500,00 por ano para gastos referentes à manutenção e operação das colunas.

Tabela 5.2- Investimento inicial

Itens de custo	[R\$]
Colunas de absorção	7.800,00
Filtro de limalha de ferro	3.000,00
Gasômetros	15.000,00
Construção do abrigo	9.000,00
Custo referente as adaptações	10.440,00
Total	45.240,00

Outro custo a ser considerado é o referente ao consumo de energia das bombas necessárias as colunas de absorção de CO₂, como são três colunas o sistema necessita de três bombas, conforme dimensionadas anteriormente, todas com potência de 1/2 [CV]. Há ainda a presença de um compressor responsável por injetar o biogás no sistema, conforme citado por Magalhães et al. (2006). Sua potência é adotada como de 1 [CV], já que o autor não menciona. Para o filtro de limalha de ferro é considerada a presença de uma bomba de mesma potência das demais, ou seja, 1/2 [CV]. Como 1 [CV] corresponde a 0,7355[kW], e considerando o funcionamento pleno desse sistema durante o ano, ou seja 8760 horas, tem-se então um consumo de energia equivalente a 19.328,94 [kWh/ano]. Os aterros sanitários como um todo são localizados na periferia das cidades, portanto é adotada no estudo sua classificação como consumidor classe B rural. Nesse caso a tarifa cobrada por quilowatt-hora é de R\$ 0,20252 (AES - ELETROPAULO, 2012), assim o gasto pelo consumo de energia elétrica desse sistema será de R\$3.914,50 por ano. A Tabela 5.3 apresenta a discriminação dos gastos anuais para projeto proposto:

¹⁶ GODOY JUNIOR, E. Professor Dr. membro do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Tabela 5.3 - Gastos anuais contabilizados para o projeto

Itens de custo	[R\$/ano]
O&M referente às colunas de absorção	510,00
O&M referente ao filtro de limalha de ferro	1.500,00
Consumo energia elétrica	3.914,50
Total	5.924,50

O fluxo de caixa (F_j) será considerado constante ao longo dos anos e é calculado pela diferença entre a receita anual obtida pela venda do biogás purificado (R\$35.110,96) e os gastos anuais contabilizados para o projeto (R\$5.924,50), conforme Equação 3.13:

$$F_j = R_j - C_j$$

$$F_j = 35.110,96 - 5.924,50$$

$$F_j = 29.186,46$$

A análise financeira do empreendimento é feita através dos métodos do valor presente líquido (VPL) e da taxa interna de retorno (TIR), descritos no capítulo três. São adotados TMA de 8% e um horizonte de financiamento de 15 anos (n). O fluxo de caixa (F_j) e o investimento inicial do projeto são respectivamente R\$29.186,46 por ano e R\$45.240,00, de forma que o VPL ao longo de 15 anos é de R\$204.580,90, ou seja, positivo, o que torna o projeto economicamente viável. A Figura 5.3 apresenta o VPL ao longo dos anos em que se pode observar a rentabilidade do projeto. O custo de investimento é quitado em meados de 2014, ou seja, praticamente dois anos e meio após sua implantação.

A taxa interna de retorno (TIR) considerando o período de 15 anos para o fluxo de caixa de R\$29.186,46 por ano é de 64,5%, muito maior que taxa mínima de atratividade (TMA) esperada para o projeto. O que confirma a alta rentabilidade do empreendimento para o investidor.

O volume de biogás purificado vendido é de 66.293,38 [m³/ano]. Sabendo-se que a porcentagem de metano presente no biogás após sua purificação é de 73%, o volume de metano presente no biogás purificado é de 48.394,16 [m³/ano]. Volume esse que é igual ao utilizado para o cálculo da receita proveniente da venda de créditos de carbono, quando se considera a proposta de aproveitamento do biogás para a geração e venda de energia elétrica (Seção 5.2). Portanto, a receita obtida pela venda de créditos de carbono é a mesma, ou seja, R\$14.726,74 por ano.

Acrescentando essa receita ao fluxo de caixa anual, já calculado do projeto (R\$29.186,46), tem-se:

$$F_j = R\$29.186,46 + R\$14.726,74$$

$$F_j = R\$43.913,20$$

O novo fluxo de caixa (F_j) quando se considera a venda de créditos de carbono é de R\$43.913,20 por ano.

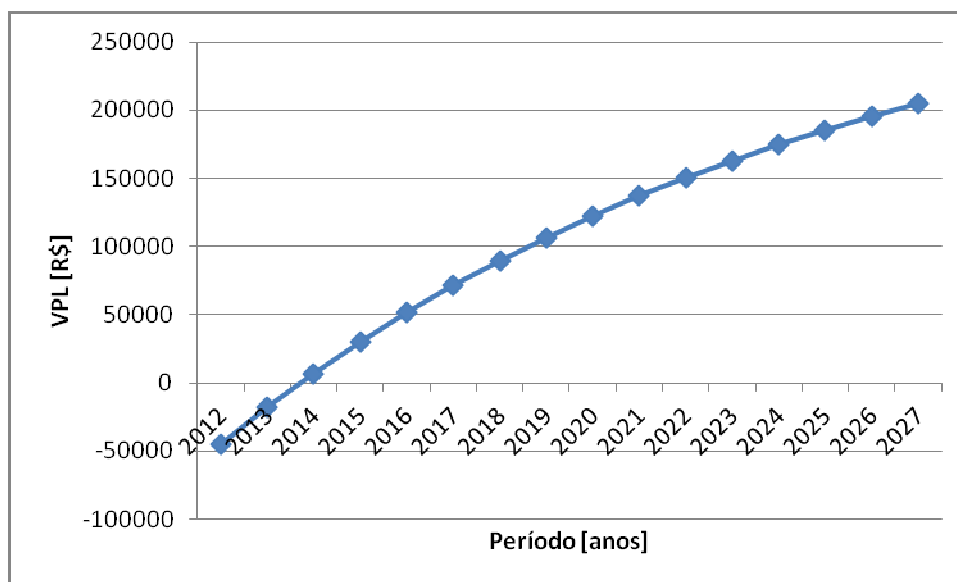


Figura 5.3 - Gráfico VPL x Anos – Proposta de venda do biogás purificado através de biogásodutos.

Refazendo então os cálculos para o VPL, levando-se em consideração o mesmo período (n) de 15 anos, o mesmo valor de TMA (8% ao ano) e de investimento inicial (R\$45.240,00), o valor de VPL será de R\$330.634,09.

A Figura 5.4 apresenta o VPL ao longo dos anos para esse novo cenário apresentado, que inclui a venda de créditos de carbono. Pode-se observar que o projeto é mais rentável quando comparada análise anteriormente, sem a receita advinda da venda dos créditos de carbono. Há uma diminuição de praticamente um ano no tempo de pagamento da dívida, que será quitada em meados de 2013, um ano e meio após a implantação do projeto.

A partir do novo fluxo de caixa calculado (R\$43.913,20 por ano) e considerando o mesmo período de 15 anos, obtém-se uma TIR de 97%, valor esse maior que a TMA adotada para o projeto, de 8% ao ano. O que confirma a atratividade do investimento.

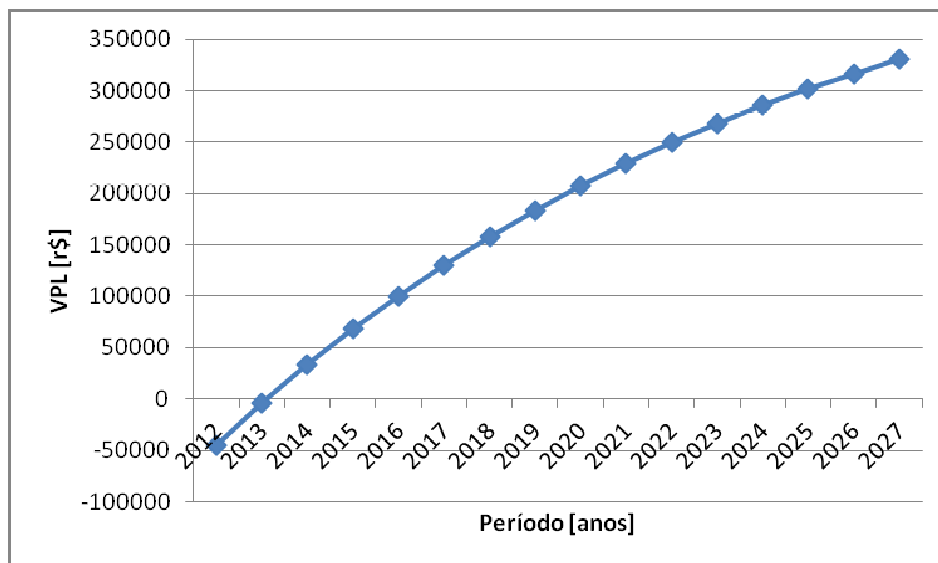


Figura 5.4 - Gráfico VPL x Anos – Proposta de venda do biogás purificado através de biogasodutos e considerando a venda de créditos de carbono.

5.3 Análise dos resultados

O estudo apresenta basicamente duas propostas para o aproveitamento energético do biogás: geração e venda de energia elétrica, e purificação e comércio do biogás. Nesse último caso, foi considerado seu transporte por meio de gasodutos (destinados ao transporte de gás natural), ou por meio de dutos dedicados ao biogás.

A opção de comércio do biogás purificado considerando sua injeção nos gasodutos existentes pode ser muito onerosa devido aos altos padrões de qualidade exigidos pelas distribuidoras de gás natural, não possuindo, portanto, custo-efetividade para os pequenos autoprodutores de biogás (ASE's e ETE's) focos do trabalho. Dessa forma o estudo foi direcionado para a análise da viabilidade de comércio do biogás purificado considerando seu transporte por meio de biogasodutos.

A Tabela 5.4 apresenta os valores obtidos de VPL para as propostas de aproveitamento do biogás. O período analisado é de 15 anos e a TMA de 8% ao ano para os dois casos. O VPL1 corresponde ao resultado sem a contabilização da receita da venda de créditos de carbono e o VPL2 considerando essa receita.

Conforme já citado anteriormente, para a escolha de empreendimentos por meio da análise de seus respectivos VPL's, deve-se optar pelo que possui o maior valor de VPL.

Pode-se observar na Tabela 5.4 que a opção de geração e venda de energia elétrica não é viável. O projeto não se paga ao longo dos anos (VPL negativo), ainda que se considere a

receita advinda da venda de créditos de carbono. Portanto, dentre as propostas para o aproveitamento do biogás apresentadas até então, a que se mostrou mais atrativa economicamente é a purificação e comercialização do biogás em dutos dedicados ao próprio biogás.

Essa alternativa apresenta um *payback*, período de tempo para que o investimento seja recuperado, de aproximadamente dois anos. De forma que, passados quinze anos após a sua implantação, o retorno financeiro obtido (VPL) equivale a R\$204.580,90. Valor esse praticamente cinco vezes maior que o investimento inicial de R\$45.240,00. A TIR para essa alternativa equivale a 64,5% ao ano, muito maior que a TMA desejada, de 8% ao ano.

Tabela 5.4 - Tabela comparativa dos valores de VPL e TIR obtidas para o aproveitamento do biogás

Tipo de aproveitamento	VPL1 [R\$]	VPL2 [R\$]
Geração e venda de energia elétrica	-1.846.928,79	-1.720.875,57
Purificação e comércio do biogás ¹⁷	204.580,90	330.634,09

A receita advinda da venda de créditos de carbono (R\$14.726,74 por ano) torna esse cenário apresentado ainda mais atrativo, esse valor quando acrescentado ao fluxo anual de caixa diminui o período de *payback* de dois e meio para um ano e meio. Os valores do VPL e TIR obtidas são de respectivamente R\$330.634,09 e 97% ao ano.

Pode-se observar que a inclusão da receita advinda da venda de créditos de carbono não é fator determinante para a viabilidade econômica para implantação do projeto, sendo apenas um atrativo maior ao retorno do investimento.

¹⁷ Opção referente ao transporte do biogás purificado por meio de dutos dedicados ao mesmo.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho direciona seus estudos ao biogás produzido por pequenas e médias ETE's e ASE's, que quando adaptadas podem produzir biogás e proporcionar ao mesmo um destino energético adequado.

O estudo apresenta basicamente duas propostas para o aproveitamento energético do biogás: geração e venda de energia elétrica para as concessionárias de energia locais, por meio da instalação de uma pequena central elétrica dentro do aterro; e purificação e comércio do biogás. Nesse último caso, é considerado seu transporte por meio de gasodutos (destinados ao transporte de gás natural), ou por meio de dutos dedicados ao biogás, biogasodutos.

Dentre as alternativas sugeridas para o aproveitamento do biogás, a que se mostrou economicamente viável é a purificação e comércio do biogás considerando seu transporte por meio de dutos dedicados ao biogás.

As premissas adotadas para o estudo da viabilidade do empreendimento são: o aterro é do tipo controlado e atende uma população de 200 mil habitantes; a estrutura do aterro já possui um sistema de captação e queima para o biogás, portanto se houver algum tipo de problema no sistema de aproveitamento energético, garante-se a queima do metano através de *flares*; o ano atual é tomado como referência para os anos posteriores, ou seja, o crescimento populacional não é contabilizado nos cálculos, e a produção de metano será considerada constante ao longo dos anos.

A estimativa do potencial de geração de metano pelo aterro é realizada por um método, variante do método de Decaimento de Primeira Ordem proposto pelo IPCC (1996). O volume de metano determinado para o caso analisado é de 48.147,23 [m³CH₄/ano]. Admiti-se uma porcentagem de metano de 45% no biogás, de forma que o volume de biogás gerado é de 106.993,85[m³ biogás/ano].

A purificação do biogás sugerida tem como objetivo a retirada de componentes causadores de problemas quando no seu uso como combustível, que são basicamente o CO₂ e o H₂S. Pretende-se aproximar as porcentagens de CH₄ e CO₂ para, respectivamente 3% e 85%, referentes às estipuladas para a ANP para a composição do gás natural. No entanto, ao fim dos processos de purificação sugeridos, as porcentagens finais estimadas no biogás, já purificado, são de 73% de CH₄ e 3% de CO₂.

A análise econômica é realizada através dos métodos do valor presente líquido (VPL) e da taxa interna de retorno (TIR). A taxa mínima de atratividade (TMA) é de 8% ao ano, e o período em que se espera algum retorno financeiro para o investidor é de quinze anos.

Para o preço do biogás purificado é utilizado como referência o preço do gás natural na *city gate* (R\$0,61669/m³). A porcentagem de CH₄ no gás natural é de 85%, enquanto no biogás purificado a porcentagem de CH₄ é de 73%. Para determinar o preço do biogás purificado é feita uma ponderação do preço do gás natural em relação à porcentagem de metano de ambos os gases, o que resulta em R\$ 0,52963, por metro cúbico de biogás. O volume de biogás gerado no aterro sanitário, após o processo de purificação, é reduzido em 38,04%, restando, portanto 66.293,38 [m³ biogás/ano], que comercializado resulta em uma receita anual de R\$35.110,96.

Determina-se um investimento inicial necessário para a proposta de purificação e comércio do biogás de R\$45.240,00, conforme custos apresentados. O fluxo de caixa é de (R\$29.186,46/ano), o que inclui gastos com operação e manutenção dos sistemas de purificação (-R\$2.010), gastos referentes ao consumo de energia elétrica dos sistemas de purificação (-R\$3.914,50/ano) e a receita obtida pela venda do biogás purificado (R\$35.110,96/ano). O projeto apresenta um VPL de R\$204.580,90, uma TIR de 64,5% e um tempo de *payback* de dois anos e meio. O investidor possui um retorno, ao final de quinze anos após a implantação do projeto, de aproximadamente cinco vezes o investimento feito.

Quando considerada a inclusão da receita obtida pela venda de créditos de carbono (R\$ 14.726,74), o cenário é ainda mais favorável, o VPL é R\$330.634,09, a TIR de 97% e o tempo de *payback* de apenas um ano e meio.

A venda de créditos de carbono apesar de tornar o investimento mais atrativo, não interfere na sua viabilidade, fato importante, já que qualquer crise no mercado de carbono, como a existente atualmente, apresentaria dificuldades para a viabilidade do empreendimento.

A proposta de purificação do biogás considerando seu transporte por meio de dutos dedicados ao biogás apresenta um resultado financeiro excelente. Essa alternativa oferece um aproveitamento do potencial energético presente no biogás, que quando apenas jogado *in natura* na atmosfera, representa, além de um desperdício energético, um agravante ao efeito estufa.

É relevante citar, que dependendo do tipo do aterro outros custos e adaptações deverão ser incorporados e o projeto vai se tornando além de mais caro, mais complexo, o que nem sempre é interessante para o autoprodutor, que deseja apenas dar um destino ecologicamente correto a esse biogás.

REFERÊNCIAS

WIKIPÉDIA, a enciclopédia livre. **Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas.** 2012. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=Especial:Citar&page=Painel_Intergovernamental_sobre_Mudan%C3%A7as_Clim%C3%A1ticas&id=33090220>. Acesso em: 10 mar. 2012.

TOLMASQUIM, M.T. **Fontes renováveis de energia no Brasil.** Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 515 p.

PETROBRAS – PETRÓLEO BRASILEIRO. **Gás Natural.** 2012. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/energia-e-tecnologia/fontes-de-energia/gas-natural/>>. Acesso em: 10 mar. 2012.

DOMENECH, L. **Gás Natural:** forte elemento de desenvolvimento econômico para o Brasil. Rio de Janeiro: ABEGÁS, 2011. Disponível em: <<http://www.abegas.org.br/2milhoes/palavrapresidente.html>>. Acesso em: 10 mar. 2012.

CENBIO - CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Produção Municipal de Metano através de biogás de aterro.** 2010. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/tabelasbiomassa/metano_aterro.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2012.

CENBIO - CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Geração de Energia a partir do Biogás Gerado por Resíduos Urbanos Rurais.** 2001. Florianópolis, 2001. Nota técnica VII. Disponível em: < www.cenbio.org.br>. Acesso em: 15 mar. 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico.** 2000. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/27032002pnsb.shtm>>. Acesso em: 12 mar. 2012.

ICLEI (Brasil) – GOVERNOS LOCAIS PELA SUSTENTABILIDADE. **Manual para o aproveitamento do biogás.** 2009. v.1, 80p.

SANTOS, A.F. **Estudo de viabilidade de aplicação do biogás no ambiente urbano.** 2009.16f. MBA (Administração) – Faculdade de Economia e Administração de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo - USP, Ribeirão Preto, 2009.

ABRACE – Associação Brasileira de Grandes Consumidores Industriais de Energia e de Consumidores Livres. **Cartilha do Gás Natural**. 2009. 44p. . Disponível em: <<http://abrace.org.br/>>. Acesso em: mar.2010.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2006.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbica de resíduos**. 2000. 142f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2000.

CASSULA, A. M.;GODOY JUNIOR, E.; SLVEIRA, J. L. Proposta de precificação do biogás proveniente de aterro sanitário e estação de tratamento de esgoto que atuam como agentes autoprodutores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 18., 2010. Bonito. **Tutoriais...** Ilha Solteira: Cultura Acadêmica, 2010. 2128-2135p.

SANTOS, B. S. A Introdução ao Federalismo das Águas: interfaces entre gestão de bacias hidrográficas e saneamento básico. **Cadernos UniFOA**, Volta Redonda, v.2, n.4, p.41-56, 2007. Disponível em: <<http://www.unifoa.edu.br/pesquisa/caderno/edicao/04/41.pdf>>. Acesso em: set.2010.

MAGALHÃES, E. A. et al. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de purificação de biogás: influência da pressão e razão líquido/gás na absorção de CO₂. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.14, n.4, 226-237, out/dez, 2006.

AZEVEDO, M.; SILVA, M. C.; TAUCHEST, O. I. **Coogeração de energia utilizando o biogás do esgoto sanitário**. 2004.100f. Dissertação (Graduação em Tecnólogo em Eletromecânica – Ênfase em Operação e Manutenção Industrial) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Unidade de Medianeira, Medianeira, 2004.

GODOY JUNIOR, E. et al. Dimensionamento de biogasodutos para uso energético e saneamento ambiental do biogás. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO GENERECIÓN Y TRANSPORTE DE ENERGIA ELÉCTRICA, 9., 2011. Mar Del Plata. **Proceedings...**Guaratinguetá: Unesp. 2011.

GASNET - O site do gás natural. **Gás Natural**. 2007. Disponível em: <http://www.gasnet.com.br/novo_gas_natural.asp>. Acesso em: 10 mar. 2012.

MONTILHA, F. **Biogás - energia renovável**. 2005. 73f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil com ênfase em Ambiental) – Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2005.

SCHNEIDER MOTOBOMBAS. **Tabela para seleção de bombas e motobombas**: 2011-B. Joinville: 2011. 64 p.

CORREIA NETO, J. F. **Excel para profissionais de finanças**: manual prático. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 283 p.

ÁVILA, F. **O mercado de carbono entre 24 e 30 de outubro**. [S.I.]: INSTITUTO CARBONO BRASIL, 2012. Disponível em: http://www.institutocarbonobrasil.org.br/analise_financeira/noticia=732264. Acesso em: 10 set. 2012.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resultados dos leilões regulares de compra de energia elétrica (A-3, A-5 e energia de reserva)**. 2011. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/acoes/Energia/Leiloes_de_Geracao_-_resultados_2011_xfinal_x4x.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2012.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Biogás: pesquisas e projetos no Brasil**. São Paulo: 2006. 184 p. Disponível em: <www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 10 mar. 2012.

COMGÁS – COMPANHIA DE GÁS DE SÃO PAULO. **Tarifas de gás natural canalizado**. São Paulo: 2012. Disponível em: <<http://www.comgas.com.br/tarifas.asp>>. Acesso em: 10 dez. 2012.

PETROBRÁS – PETRÓLEO BRASILEIRO. **Preço de venda do gás natural no city gate para as distribuidoras**. 2012. Disponível em: <<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/destaques-operacionais/custos-e-tributos/preco-de-venda-do-gas-natural-no-city-gate-para-as-distribuidoras/preco-de-venda-do-gas-natural-no-city-gate-para-as-distribuidoras.htm>> Acesso em: 10 dez. 2012.

CERVI, R. G.; ESPERANCINI, M.S.T.; BUENO, O. C. Viabilidade econômica da utilização do biogás produzido em granja suinícola para geração de energia elétrica. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v.30, n.5, 831-844, set/out. 2010.

AES – ELETROPAULO. **Tarifas de energia**. 2012. Disponível em: <<http://www.aesetropaulo.com.br/clientes/PoderPublico/Informacoes/Paginas/TarifasdeEnergia.aspx>>. Acesso em: 10 ago. 2012.