

## **Digestão Anaeróbia como Opção para Tratamento Esgotos em Populações Rurais no Brasil: Avaliação Técnica e Econômica<sup>1</sup>**

Jean Agustin Velásquez Piñas<sup>2</sup>; Osvaldo José Venturini<sup>2</sup> e ;Electo Eduardo Silva Lora<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aceito para Publicação no 4º Trimestre de 2015

<sup>2</sup>Núcleo de excelência em Geração Termelétrica e Distribuída – NEST, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Av. BPS, 1303, Itajubá-MG, CEP 37500-903, Brasil. Tel.: +55(35)3629-1493. E-mail: jvelasquez@unifei.edu.br, osvaldo@unifei.edu.br, electo@unifei.edu.br

### **RESUMO**

Na atualidade existe grande preocupação pelo acesso a saneamento universal das populações, em especial nas zonas rurais e de baixa renda, já que gera um impacto ambiental significativo aos corpos de água e outros componentes ambientais, sendo necessário procurar soluções alternativas para o tratamento dos esgotos produzidos por estas populações. O presente artigo apresenta de faz avaliação técnica e econômica comparativa do tratamento de esgotos ou excreta humana comparando sistemas de tipo centralizado (similar a ETAR) e sistema CAMARTEC, ambos com enfoque na geração de energia a partir da biodigestão anaeróbia. A produção de biogás por pessoa ano para o sistema camartec e para o sistema centralizado foi de 2,63 m<sup>3</sup> e de 1,04 m<sup>3</sup> respectivamente; a redução de emissões foi de 0,520 ton CO<sub>2</sub>E para o sistema camartec e de 0,208 ton CO<sub>2</sub>E para o sistema centralizado para um período de 20 anos de projeto, enquanto que a geração de energia para o sistema camartec foi de 8,58 kWh por persona por ano e de 2,03 kWh por pessoa por ano para o sistema centralizado. A análise econômica deu uma VPL de R\$ -581.298 para o sistema centralizado, enquanto que o VPL

para o sistema camartec foi de R\$ 26.191 fazendo que somente o sistema Camartec seja viável economicamente tendo um tempo de recuperação da inversão de 7 anos.

**Palavras-chaves:** Biodigestor Camartec, Esgoto, populações rurais, Energias Renováveis; Biogás.

## **Anaerobic Digestion as an option for wastewater treatment in rural populations in Brazil: technical and economic assessment**

### **ABSTRACT**

At present there is great concern for universal access to sanitation, especially in rural and low-income populations, since it generates a significant environmental impact to the bodies of water and other environmental components, being necessary to seek alternative solutions for treating wastewater produced for these populations. This article presents a comparative makes technical and economic APPRAISAL treatment of sewage or human excreta comparing centralized type systems (similar to WWTP) and CAMARTEC system, both focusing on power generation from anaerobic digestion. Biogas production per person for years camartec system and the centralized system was 2,63 m<sup>3</sup> and 1,04 m<sup>3</sup> respectively; reducing emissions was 0,520 ton CO<sub>2</sub>Efor camartec system and 0,208 ton CO<sub>2</sub>E to the centralized system for a period of 20 years of design, while generating energy for camartec system was of 8,58 kWh per person annually per year and 2,03 kWh per person annually to the centralized system. The economic analysis gave an NPV of R\$ -581.298 to the centralized system, while the NPV for camartec system was R \$ 26.191 doing that only Camartec system is economically viable with a recovery time of reversal 7 years.

**Key words:** Camartec digester, sewer, rural populations, Renewable Energy; Biogas.

## 1. Introdução

No mundo aproximadamente cada ano morrem 1,5 milhões de meninos menores de 5 anos e se perdem 443 milhões de dias letivos a consequência de enfermidades relacionadas com o água e o saneamento (UNITED NATIONS - GENERAL ASSEMBLY; NATIONS, 2010). A Assembleia Geral das Nações Unidas considera a cobertura universal à água e ao saneamento como um direito humano, e em o ano 2010, fez um apelo à cobertura universal, destacando a necessidade de lidar e monitorizar as desigualdades no acesso a água limpa e ao saneamento adequado (UNITED NATIONS - GENERAL ASSEMBLY; NATIONS, 2010). Segundo dados dos objetivos do milênio entre os anos 1990 e 2012, quase mais 2 mil milhões de pessoas no mundo obtiveram acesso a uma estrutura de saneamento melhorada, de 49 por cento em 1990 para 64 por cento em 2012, além disso é pouco provável que a meta dos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) de uma cobertura de 75 por cento seja alcançada até 2015 (MINISTÉRIO DO PLANEAMENTO, 2014).

No Brasil, a porcentagem de população vivendo em domicílios com escoadouro adequado de esgoto vem crescendo a um ritmo acelerado, sendo que o acesso a esgotamento sanitário passou de 53% para o ano 1990 a 77% para o ano 2012 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2010a; INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2014), no entanto, ainda existe disparidade entre o acesso a esgotamento sanitário no âmbito urbano e rural, com margens de 85% e 33% respectivamente (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2010a). Brasil é um país que tem uma população rural de 16 % equivalente a 29.830.007 de personas, na qual a porcentagem mais alta de população rural encontra-se no Norte e Nordeste com 26% e 27% correspondente a 4.199.945 e 14.260.704 milhões de pessoas respectivamente (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2010b). No Brasil, as doenças de transmissão feco-oral relacionadas ao saneamento ambiental inadequado representam uma média de 81% (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2010c).

Neste contexto o saneamento e o tratamento de adequado de esgotos é indispensável para a supervivência das populações urbanas e especialmente para populações rurais as quais por sua localização tem menos oportunidades de obter saneamento nas condições adequadas, causando em muitas oportunidades impactos ambientais a os diferentes componentes

ambientais, especialmente a corpos de águas onde geralmente são vertidos os esgotos (DA SILVA; NOUR, 2005).

Existem diferentes alternativas para o tratamento de esgotos nas populações rurais, dentre os quais temos, os tanques sépticos, lagoas de estabilização, reatores anaeróbios, , leitos cultivados e outros, ressaltando-se os sistemas de tratamento anaeróbio, que são de baixo custo e constituem uma alternativa economicamente viável (DA SILVA; NOUR, 2005). Além disso, existe outros sistemas para o tratamento de esgotos e aproveitamento energético do mesmo utilizando biodigestores domésticos de baixo porte, os quais podem, além de resolver ao problema de esgotamento nas zonas rurais, produzir energia para gerar diferentes benefícios como, usos como cocção de alimentos, geração de energia nos vivendas rurais, diminuição da pressão florestal, substituição de fertilizantes tradicionais pelo fertilizante orgânico, entre outros (HERRERO; MARTÍN HERRERO, 2008).

O presente artigo mostra uma análise técnico e econômico da utilização do biodigestores domésticos de baixo porte nas populações rurais, comparando aspectos técnicos e econômicos da utilização de biodigestores tipo Camartec e sistemas tradicionais de tratamento de esgotos como são as Estações de Tratamento de Aguas Residuais – ETAR (JORDÃO; PESSÔA, 1995).

O objetivo de este estudo é mostrar as vantagens do tratamento de esgotos em populações rurais utilizando biodigestores de baixo porte, os quais, além de fazer o tratamento de esgotos, podem utilizar-se para geração de biogás com diferentes substratos.

## **2. Metodologia**

O artigo encontra-se dividido em duas partes, a primeira parte faz uma avaliação da produção do biogás dos diferentes cenários assumidos, tanto para o biodigestor de baixo porte, para o qual se utilizara um biodigestor de nome Camartec utilizado nas populações rurais de África para a geração de biogás (NETHERLANDS DEVELOPMENT ORGANISATION SNV, 2009), e o sistema de tratamento de esgotos tradicional o estação de tratamento de esgotos ETAR, ao qual chamaremos Centralizado, e que faz um tratamento e geração de biogás num sistema único construído ademais com tubulações para o transporte de esgotos. A segunda parte faz uma avaliação econômica das duas opções do tratamento,

buscando saber o valor presente líquido e a taxa interna de retorno visando saber a opção mais economicamente viável a nível das populações rurais.

### 2.1. Avaliação da produção de biogás

A avaliação da produção de biogás se faz tendo em consideração diferentes cenários de populações, as quais encontram-se no âmbito rural. Os valores dos habitantes assumidos para os diferentes cenários forem 100 (cenário I), 1.000 (cenário II), 10.000 (cenário III), 100.000 (cenário IV) e 1.000.000 (cenário V). Tem-se consideração que estas populações atualmente não têm tratamento sanitários dos esgotos, os quais na maioria dos casos incrementam a poluição dos rios e corpos de água existentes.

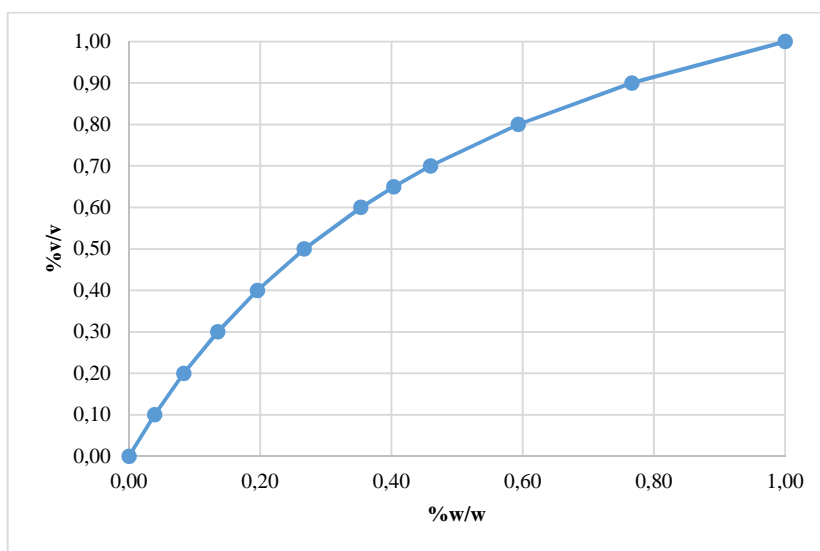


Figura 1. Relação de composição volumétrica versus composição mássica do metano no biogás.

Adaptado de (AIR LIQUIDE, 2013a, 2013b, 2013c)

Para fazer a estimativa da produção do biogás utilizarem modelos desenvolvidos pela Secretaria do Meio Ambiente e Ministério da Ciência e Tecnologia, SP (CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2006). Estes modelos foram adaptados tendo em consideração critérios técnicos e de standardização de unidades, as quais ficavam erradas ao momento de fazer as estimativas da geração do biogás utilizando o software.

A Figura 1 serve para fazer o ajuste de porcentagem que deve ser ingressado ao momento de utilizar o software de Biogás: Efluentes v1 da CETESB, lembrando que a porcentagem volumétrica de biogás é diferente da porcentagem mássica de biogás para as mesmas co

Tabela 1. Parâmetros utilizados para avaliação da produção do biogás

Parâmetro	Unidade	Valor
Excreta humana	m <sup>3</sup> /ton	18,27
Produção de biogás	m <sup>3</sup> /kgDBO	0,12
Produção de esgoto área rural	L/dia	120
Lodo de ETAR	m <sup>3</sup> /ton	30
Lodo concentrado de ETAR	m <sup>3</sup> /ton	102
Porcentagem de metano no biogás	%	60

Fonte: (BERRUTO et al., 2012; DEUBLEIN; STEINHAUSER, 2008; ISAT/GTZ, 1999; JORDÃO; PESSÔA, 1995; RODRIGUES, 2011; RODRIGUEZ; AQUINO; ESTEVAM, 2011; SULABH INTERNATIONAL ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SANITATION AND PUBLIC HEALTH (SIAESPH), 2010)

A composição do biogás pode variar dependendo do tipo de processo, matéria prima utilizada e outros fatores, mas pelo geral encontram-se na faixa de 50-80% de metano, 20-40% de dióxido de carbono, 1-% de hidrogeno, 0,5-3% de nitrogênio e 1-5% de gás sulfídrico e outros gases (COLDEBELLA, 2006).

Para o cálculo de vazão de metano se utiliza a formula seguinte que relaciona produção de biogás, quantidade de unidades geradoras (pessoas), matéria total que tem uma unidade geradora e concentração do metano no biogás em porcentagem volumétrico.

$$Q_{CH_4} = Pb \times Qt \times Mt \times Conc \quad (1)$$

Onde:

$Q_{CH_4}$  : Vazão de metano por dia [m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/dia];

Pb : Produção de biogás [m<sup>3</sup>/ton];

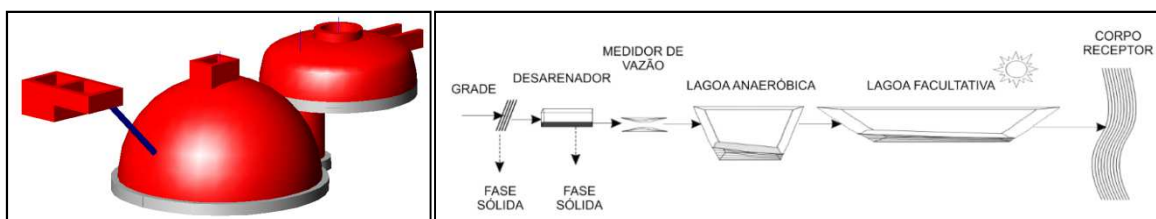
Qt : Quantidade de unidades geradoras de efluente [unidade geradora]

Mt : Matéria total [kg<sub>M</sub>/ (dia.unidade geradora) ];

Conc : Concentração do metano no biogás [%v/v];

Para avaliação da produção de biogás utilizando biodigestores rurais de baixo porte se utilizo o biodigestor tipo camartec que é um biodigestor que se utiliza nas populações rurais de África (NETHERLANDS DEVELOPMENT ORGANISATION SNV, 2009). O

biodigestor a diferencia de outros biodigestores existentes como os biodigestores de geomembrana (Canadense) ou biodigestores de PVC, a carga de água que se ingressa para seu trabalho é na relação de 1 partes de água por 1 partes de matéria orgânica, tendo outros modelos que utilizam uma quarta parte de este valor.



**Figura 2.** Biodigestor tipo Camartec e Sistema de tratamento de esgotos tradicional ETAR

Fonte: (NETHERLANDS DEVELOPMENT ORGANISATION SNV, 2009; POLIDO, 2013)

Estes tipos de biodigestores têm facilidade para sua limpeza devido a que tem a câmara de saída grande, a qual facilita a manutenção que se pode fazer. Os parâmetros utilizado para a operação de este biodigestores são, tempo de retenção 50-60 dias, para rangos de temperaturas entre 20-30°C, proporção de mescla de matéria orgânica e urina/água em relação de 1:1 e capacidade de armazenamento de biogás do digestor entre 60 % (NETHERLANDS DEVELOPMENT ORGANISATION SNV, 2009).

## 2.2. Avaliação econômica e estimativa das emissões de gases de efeito estufa

Em esta etapa se faz uma avaliação econômica das duas alternativas propostas para o tratamento dos esgotos nas zonas rurais, visando ter em conta parâmetros de avaliação econômica que permitam ver a comparação da viabilidade dos sistemas centralizado e camartec. Para realizar a avaliação econômica dos projetos se assumiram dados dos principais equipamentos utilizados para geração de energia com biogás. A avaliação econômica se faz tendo em consideração uma população rural de 10.000 pessoas.

Na

Tabela 2 tem-se os valores dos custos dos sistemas de geração de biogás utilizando biodigestores tipo camartec, os quais são utilizados para o momento de fazer a avaliação econômica do projeto. Para fines de comparação se considera que para os biodigestores de baixo porte tem instalado um gerador para diminuição de custos pela geração de energia elétrica.

Tabela 2. Custos da construção de biodigestores tipo camartec

Parâmetros	4 m <sup>3</sup>	6 m <sup>3</sup>	9 m <sup>3</sup>	13 m <sup>3</sup>
Custo Materiais (BRL)	1524	1889	2590	3363
Custo Mano de Obra (BRL)	1840	1840	2220	2600
Total (BRL)	3364	3729	4810	5963
Total (USD)	1103	1223	1578	1956

Fonte: Adaptado de (SERVICIO HOLANDES DE COOPERACION AL DESARROLLO, 2012, 2013)

A Tabela 3 mostra os custos adicionais dos equipamentos que deveriam implementar-se para projetos de construção de plantas de tratamento de esgotos e geração de biogás doméstico, os quais variam em função do custo unitária do kW gerado e do volume de biogás produzido pelo processo anaeróbio. O custo da energia elétrica que seria gerado a partir da poupança por custos evitados o custo de R\$ 0,50 por kWh, o qual é um valor assumido para fazer a comparação das alternativas. O custo das toneladas equivalente de dióxido de carbono utilizado é o valor da última leilão registrada “Leilões de Crédito de Carbono” na qual o preço de venda foi de 3,30 euros por tonelada equivalente de dióxido de carbono (BM&FBOVESPA, 2012). A taxa de desconto a utiliza para avaliação foi de 12%, esta taxa tem tendência a variar pelo qual também se faz um análise de sensibilidade para determinar há que ponto é viável as alternativas. O tempo de avaliação corresponde ao tempo de vida do projeto para o qual foi utilizado o tempo de 20 anos.

Tabela 3. Principais custos dos equipamentos para geração de biogás do esgoto

Parâmetros	Unidade	Valor
Grupo gerador otto nacional	R\$/kW instalado	1.000
Grupo gerador diesel nacional	R\$/kW instalado	2.000
Grupo gerador motor a gás importado	R\$/kW instalado	3.000
Microturbina	R\$/kW instalado	3.500
Turbina a gás	R\$/kW instalado	2.500
Queimador	R\$/unidade	10.000
Gasômetro	R\$/m <sup>3</sup>	90
Compressor de baixa pressão	R\$/m <sup>3</sup> /h	500
H <sub>2</sub> S filtro coalescente	R\$/m <sup>3</sup>	0,010
H <sub>2</sub> S/Siloxina	R\$/m <sup>3</sup>	0,010
CO <sub>2</sub>	R\$/m <sup>3</sup>	0,010
Preço de dióxido de carbono	R\$/tonCO <sub>2</sub> E	11,26
Preço de energia	R\$/kWh	0,5

Fonte: Adaptado de (BM&FBOVESPA, 2012; CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2006)

### 3. Resultados e análises

#### 3.1. Produção do biogás

A avaliação da produção do biogás diário para as diferentes alternativas propostas dá como resultados valores de 0,73 m<sup>3</sup> (cenário I), 7,31 m<sup>3</sup> (cenário II), 73 m<sup>3</sup> (cenário III), 731 m<sup>3</sup> (cenário IV) e 7.307 m<sup>3</sup> (cenário V) para a utilização do biodigestor tipo CAMARTEC e valores de 0,288 m<sup>3</sup> (cenário I), 2,88 m<sup>3</sup> (cenário II), 28,8 m<sup>3</sup> (cenário III), 288 m<sup>3</sup> (cenário IV) e 2.880 m<sup>3</sup> (cenário V) para a utilização de um sistema centralizado do tratamento de esgotos como é mostrado na Figura 3.

Pode-se ver que a opção da utilização dos biodigestores tipo camartec gera mais quantidade de biogás para a mesma quantidade de pessoas com valores de 2,63 m<sup>3</sup>/pessoa por ano e 1,04 m<sup>3</sup>/pessoa por ano de biogás para as alternativas camartec e centralizado respectivamente. Estes valores são calculados tendo em consideração condições padrão de geração de biogás para ambas alternativas propostas em diferentes cenários.

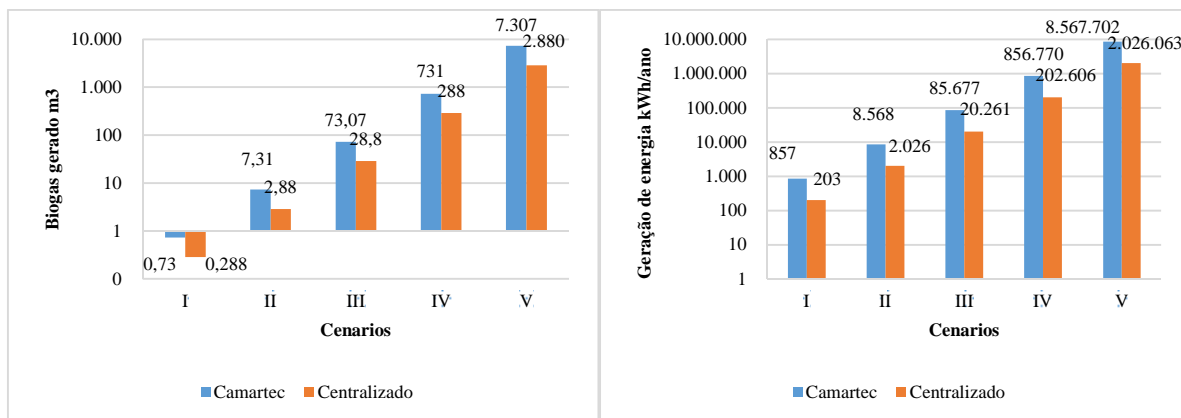


Figura 3. Produção anual de biogás para os diferentes cenários e geração anual de energia para os diferentes cenários.

O biogás produzido pela digestão anaeróbia dos esgotos ainda resulta ser muito baixa, isto limita que a produção de biogás utilizando só esgoto não seja muito rentável. Para biodigestores anaeróbios de baixo porte no âmbito rural é melhor incorporar no biodigestor resíduos orgânicos biodegradáveis da preparação de alimento e esterco de animais como gado e porco os quais tem produção entre 31 m<sup>3</sup>/ton e 80 m<sup>3</sup>/ton respectivamente, a diferença de excreta humana que tem uma produção de biogás de 18,27 m<sup>3</sup>/ton (SULABH INTERNATIONAL ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SANITATION AND PUBLIC HEALTH (SIAESPH), 2010).

Para o sistema centralizado a produção de biogás resulta muito mais baixa que para o sistema camartec devido a que para o sistema centralizado o esgoto que chega à planta de tratamento vem muito diluído, fazendo incrementar o tamanho de sistema de geração de biogás. Pelo geral o sistema de tratamento centralizado gera biogás de outras formas nas quais são mais eficientes e tem menos custos de geração de biogás, uma alternativa é o sistema de tratamento RAFA, visando ao tratamento sanitários de efluentes líquidos para redução de poluição em zonas rurais, mais não é enfocado a geração de biogás (JAVAREZ JÚNIOR; PAULA JÚNIOR; GAZZOLA, 2007). É melhor para redução do volume e para otimizar tratamento de esgotos visando a geração de biogás nos sistemas centralizados a processamento de lodos, os quais tem valores de produção de biogás entre 30 m<sup>3</sup>/ton – 102 m<sup>3</sup>/ton dependendo se são lodos concentrados (BIOEXELL -EUROPEAN BIOGAS CENTRE OF EXCELLENCE, 2008).

O incremento de energia tem que ver diretamente com a produção de biogás, tendo que a geração de energia para o sistema camartec é de 8,57 kWh por persona por ano, comparado com o sistema centralizado que a geração de energia é de 2,03 kWh por pessoa por ano. Os dados de geração anual de energia podem ver-se com mais detalhe na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

### 3.2. Redução de emissões, avaliação econômica e análise de sensibilidade

La redução de emissões de dióxido de carbono é algo inerente a projetos de esta índole, ainda mais quando é pela redução de emissões associadas ao metano que tem 25 vezes mais potencial de aquecimento global que o dióxido de carbono (SOLOMON et al., 2012). A redução de emissões apara projetos de biodigestão de esgotos tem um incremento lineal dependendo da quantidade da população que se que a diferença de projetos em aterros sanitários onde no início incremento das emissões de metano há chegar a um ponto máximo para depois diminuir depois de alguns anos (MAMBELI BARROS; TIAGO FILHO; DA SILVA, 2014).

Os valores de redução de emissões para cada alternativa são de 0,520 ton CO<sub>2</sub>E (0,026 ton CO<sub>2</sub>E/pessoa/ano) para a utilização de biodigestores tipo camartec e de 0,208 (0,0104 ton CO<sub>2</sub>E/pessoa/ano) ton CO<sub>2</sub>E por cada habitante para sistemas centralizada, um período estimado de 20 anos, tempo no qual foi estimado o funcionamento do projeto. Angonese e Campos et al. (ANGONESE; CAMPOS; WELTER, 2007), reportam valores de redução de emissões para a geração de biogás como resíduos suínos de 0,54 ton CO<sub>2</sub>E por cada animal por ano o qual resulta entre 20-50 vezes mais elevado comparado com os valores de emissões reduzidas para esgotos humanos para ambas alternativas camartec e centralizado.

Tabela 4. Custos evitados pela geração de biogás

	Parâmetros	Unidade	Cenários				
			I	II	III	IV	V
CAMARTEC	Total de metano gerado	ton/ano	0,106	1,058	11	106	1.058
	Total de CO <sub>2</sub> E	ton CO <sub>2</sub> E/ano	2,64	26,44	264	2.644	26.438
	Credito de carbono pela queima	R\$/ano	30	298	2.977	29.769	297.691

	Custo evitado por ano (Poupança de energia elétrica)	R\$/ano	428	4.28 4	42.8 39	428.3 85	4.283.8 51
CENTRALIZADO	Total de metano gerado	ton/ano	0,04 2	0,41 7	4	42	417
	Total de CO <sub>2</sub> E	ton CO <sub>2</sub> E/ano	1,04	10,4 2	104	1.042	10.420
	Credito de carbono pela queima	R\$/ano	12	117	1.17 3	17.73 3	117.32 8
	Custo evitado por ano (Poupança de energia elétrica)	R\$/ano	101	1.01 3	10.1 30	101.3 03	1.013.0 31

Dos resultados para a avaliação econômica das duas alternativas com tem-se que para a alternativa da utilização de um sistema centralizado para o tratamento de esgotos o custo de implementação do sistema é muito elevado devido a que o sistema de processamento de biogás tem que tratar esgotos altamente diluídos, repercutindo nos custos das coberturas para armazenamento dos esgotos líquidos para atraparilhar biogás. Estes custos fazem que a geração centralizada não seja rentável economicamente tendo em conta a viabilidade do ponto de vista de geração de biogás, mas do ponto de vista ambiental e sanitário no sistema pode resultar viável já que deixara de poluir as águas e rios.

Os resultados para o tratamento de esgotos utilizando biodigestores de baixo porte como o biodigestor camartec resulta viável devido a que utiliza excremento humano quase diretamente fazendo só a diluição para o processamento anaeróbio ao interior do biodigestor.

A VPL para o sistema centralizado é de R\$ -581.298 enquanto que a VPL para o sistema camartec é de R\$ 26.191 para uma taxa de desconto de 12% para um período de 20 anos, fazendo só viável o sistema camartec. Para estas avaliações inclui-se como ingressos os custos pela venda de Redução Certificada de Emissões (RCE) e custo evitado pela poupança de energia elétrica que não estão utilizando da rede elétrica.

Tabela 5. Avaliação econômica das duas alternativas

Tempo	Ano	CENTRALIZADO		CAMARTEC	
		Fluxo de caixa	Fluxo acumulado	Fluxo de caixa	Fluxo acumulado
0	2015	-660.345	-660.345	-230.092	-230.092
1	2016	10.583	-649.762	34.311	-195.781
2	2017	10.583	-639.180	34.311	-161.471
3	2018	10.583	-628.597	34.311	-127.160
4	2019	10.583	-618.014	34.311	-92.849
5	2020	10.583	-607.432	34.311	-58.538
6	2021	10.583	-596.849	34.311	-24.227
7	2022	10.583	-586.266	34.311	10.084
8	2023	10.583	-575.684	34.311	44.394
9	2024	10.583	-565.101	34.311	78.705
10	2025	10.583	-554.518	34.311	113.016
11	2026	10.583	-543.936	34.311	147.327
12	2027	10.583	-533.353	34.311	181.638
13	2028	10.583	-522.770	34.311	215.948
14	2029	10.583	-512.188	34.311	250.259
15	2030	10.583	-501.605	34.311	284.570
16	2031	10.583	-491.022	34.311	318.881
17	2032	10.583	-480.440	34.311	353.192
18	2033	10.583	-469.857	34.311	387.502
19	2034	10.583	-459.274	34.311	421.813
20	2035	10.583	-448.692	34.311	456.124
VPL		-581.298		26.191	
Taxa de desconto		12%			

O tempo de recuperação da inversão tem que ver com tempo no qual o projeto vai recuperar completamente a inversão realizada. Para o caso da utilização de biodigestores camartec o tempo de recuperação da inversão para uma população de 10.000 pessoas é para o ano 7, tem-se que para os projetos quando menor seja o tempo de recuperação da inversão, mas viável vai ser o projeto.

O análise de sensibilidade se faz com a finalidade de ver como a iniciativa vai variar com valores da taxa de desconto, as quais são variáveis que podem variar muito rápido no tempo na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** podemos ver que vai ser só factível há taxas de desconto de 14%, depois de isso o projeto é inviável, pelo contrário taxas de desconto

menores favorecem o projeto e fazem que tenha maior viabilidade e diminuição também do tempo de retorno da inversão.

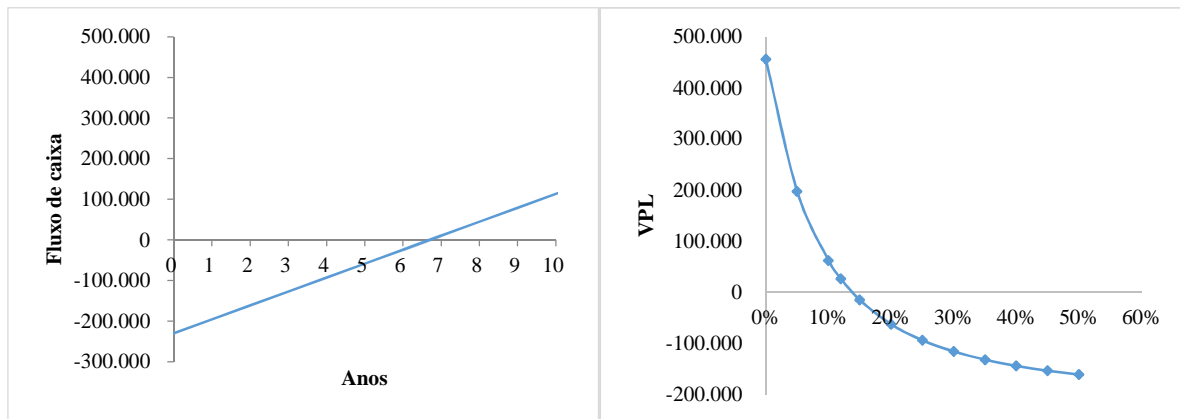


Figura 4. Tempo de recuperação da inversão e análise de sensibilidade - Biodigestores Camartec

#### 4. Conclusões

Nas populações rurais a melhor alternativa do tratamento é a utilização de biodigestores de baixo porte como os biodigestores camartec com produção de biogás 2,5 vezes maior, com valores de 2,63 m<sup>3</sup> de biogás por pessoa ao ano e para sistemas centralizados de 1,04 m<sup>3</sup> por pessoa ao ano, sendo que pelo geral os biodigestores utilizam água para seu funcionamento a qual não aporta matéria orgânica para a biodigestão fazendo diminuir a produção de biogás em relação ao água incorporada no processo de biodigestão.

Os valores de redução de emissões para cada alternativa são de 0,528 ton CO<sub>2</sub>E para a utilização de biodigestores tipo Camartec e de 0,208 ton CO<sub>2</sub>E por cada habitante para um período estimado de 20 anos de projeto, enquanto que a geração de energia para o sistema camartec é de 8,58 kWh por pessoa por ano e de 2,03 kWh por pessoa por ano para o sistema centralizado. Enquanto que o custo por pessoa pela venda de Redução Certificada de Emissões (RCE) é de R\$ 0,012 por pessoa por ano e o custo evitado pela poupança energética é de R\$ 1,01 por pessoa por ano.

A avaliação econômica para as duas opções mostra que a opção de geração de biogás num sistema centralizado não é economicamente viável devido aos altos custos de investimento inicial, os quais fazem que o projeto não possa recuperar a inversão no período estimado de 20 anos, sendo que o análise econômico tem valor presente líquido VPL de R\$ - 581.298 para o sistema centralizado, enquanto que o VPL para o sistema camartec é de R\$ 26.191 ambos para uma taxa de desconto de 12%, este último tem um tempo de recuperação da inversão para o ano 7 e não seria rentável se a taxa de desconto supera o 14%.

O sistema camartec utiliza diluições de água 1:1 para a produção de biogás partir de excretas humanas, tanto enquanto que o esgoto no sistema centralizado é altamente diluído pelo aporte de água adicional que recebe das chuvas em seu trajeto há planta de tratamento, fazendo que os custos de implementação do sistema se incrementem sedo que o maior custo corresponde à fase de inversão na qual há inviável o sistema centralizado.

### **Agradecimentos**

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Fundação de Apoio da Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Núcleo de Excelência Em Geração Térmica e Distribuída (NEST) por sua colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

### **Referências**

AIR LIQUIDE. **Enciclopedia de los gasesPropiedades físicas y químicas del sulfuro de hidrogeno**, 2013a. Disponível em:

<<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?LanguageID=9&CountryID=19&Formula=h2s&btnFormula.x=15&btnFormula.y=5&GasID=41&UNNumber=&EquivGasID=41&VolLiquideBox=1&MasseLiquideBox=&VolGasBox=&MasseGasBox=&RD20=29&RD9=8&RD6=64&RD4=2&RD3=22&RD8=27&RD2>>. Acesso em: 10 maio. 2015

AIR LIQUIDE. **Enciclopedia de los gasesPropiedades físicas y químicas del metano**, 2013b. Disponível em:

<<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?LanguageID=9&CountryID=19&Formula=&GasID=41&UNNumber=&EquivGasID=41&VolLiquideBox=1&MasseLiquideBox=&btnLiquidToGas=Calcular&VolGasBox=1&MasseGasBox=&RD20=29&RD9=8&RD6=64&RD4=2&RD3=22&RD8=27&RD2=20&RD18=>>>. Acesso em: 10 maio. 2015

AIR LIQUIDE. **Enciclopedia de los gases Propiedades físicas y químicas del dióxido de carbono**, 2013c. Disponível em:

<<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?languageid=9&GasID=26&CountryID=19>>. Acesso em: 10 maio. 2015

ANGONESE, A. R.; CAMPOS, A. T.; WELTER, R. A. Potencial de redução de emissão de equivalente de carbono de uma unidade suinícola com biodigestor. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 3, p. 648–657, 2007.

BERRUTO, R. et al. **Biogas: Handbook**. [s.l: s.n.].

BIOEXELL -EUROPEAN BIOGAS CENTRE OF EXCELLENCE. **Biogas from AD - BIOEXELL Training Manual**, 2008. Disponível em: <<http://lemvigbiogas.com/>>

BM&FBOVESPA. **Leilões de Crédito de Carbono**. Disponível em: <<http://www.bmfbovespa.com.br/Consulta-Leiloes/leiloes-de-credito-de-carbono-login.aspx?idioma=pt-br>>. Acesso em: 13 maio. 2015.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Biogás: geração e uso energético - versão 1.0/CETESB**. São Paulo, 2006. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Softwares/16-Softwares#>>. Acesso em: 12 nov. 2014

COLDEBELLA, A. **Viabilidade do Uso do Biogás da Bovinocultura e Suinocultura para Geração de Energia Elétrica e Irrigação em Propriedades Rurais**. [s.l: s.n.].

DA SILVA, G. H. R.; NOUR, E. A. A. Reator compartimentado anaeróbio/aeróbio: sistema de baixo custo para tratamento de esgotos de pequenas comunidades. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 2, p. 268–275, 2005.

DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.

HERRERO, J. M.; MARTÍN HERRERO, J. **Biodigestores familiares. Guía de diseño y manual de instalación**, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Tabela 1956 - Domicílios particulares permanentes e Moradores em domicílios particulares permanentes, por classes de rendimento mensal domiciliar, situação do domicílio e esgotamento sanitário**, 2010a. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=pnad&o=3&i=P&c=1956#nota>>. Acesso em: 4 maio. 2015

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Tabela 1.11 - População residente, por situação do domicílio e sexo, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação**, 2010b. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/sinopse/sinopse\\_tab\\_brasil\\_z](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/sinopse/sinopse_tab_brasil_z)>

ip.shtm>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Doenças relacionadas ao saneamento ambiental inadequado - DRSAI**, 2010c. Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=13&op=0&vcodigo=AM38&t=doencas-relacionadas-saneamento-ambiental-inadequado-drsai>>. Acesso em: 4 maio. 2015

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Objetivos de Desenvolvimento do Milênio: Relatório Nacional de Acompanhamento**, 2014.

ISAT/GTZ. Biogas Digest: Application and Product Development. v. II, p. 80, 1999.

JAVAREZ JÚNIOR, A.; PAULA JÚNIOR, D. R. DE; GAZZOLA, J. Avaliação do desempenho de dois sistemas modulares no tratamento anaeróbio de esgotos em comunidades rurais. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 3, p. 794–803, 2007.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**, 1995.

MAMBELI BARROS, R.; TIAGO FILHO, G. L.; DA SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 150–164, fev. 2014.

MINISTÉRIO DO PLANEAMENTO. **Relatório sobre os Objectivos de Desenvolvimento do Milênio**, 2014.

NETHERLANDS DEVELOPMENT ORGANISATION SNV. **The Modified - “CAMARTEC” Biogas Plants Construction Training Manual**, 2009.

POLIDO, L. H. Proposta de projeto e estimativa de custos de uma estação de tratamento de esgoto para o campus ecoville da utfpr. 2013.

RODRIGUES, D. L. Faculdades Adamantinenses Integradas ( FAI ) RODRIGUES , Dayse Laine ; AQUINO , Camila Ferreira ; ESTEVAM , Guiliano Pierre . Produção de biogás a partir dos esgotos utilizando reatores anaeróbicos do tipo rafa seguido por lodos ativados numa estação de t. p. 103–109, 2011.

RODRIGUEZ, D. L.; AQUINO, C. F.; ESTEVAM, G. P. produção de biogás a partir dos esgotos utilizando reatores anaeróbicos do tipo rafa seguido por lodos ativados numa estação de tratamento de esgoto. v. 4, n. 2, p. 103–109, 2011.

SERVICIO HOLANDES DE COOPERACION AL DESARROLLO. Estudio de Factibilidad para un Programa Nacional de Biogás Doméstico en Perú. 2012.

SERVICIO HOLANDES DE COOPERACION AL DESARROLLO. **Plan del Programa Nacional de Biodigestores en Perú**, 2013.

SOLOMON, S. et al. **Climate change 2007: The Physical Science Basis. The Working Group I contribution to the IPCC Fourth Assessment Report Mitigation of climate change - Errata (15 junio 2012)**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.worldcat.org/oclc/603555098> TS - WorldCat>.

SULABH INTERNATIONAL ACADEMY OF ENVIRONMENTAL SANITATION AND PUBLIC HEALTH (SIAESPH). **Sanitation and Energy** New Delhi, India, 2010.

UNITED NATIONS - GENERAL ASSEMBLY; NATIONS, U. 64/292. The human right to water and sanitation. v. 1249, n. 20378, p. 3, 2010.