

Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção de Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás de Resíduos/Efluentes Líquidos dentro de um Modelo com Biodigestores Dispersos

Paulo H. R. P. Gama, Nathália M. P. R. e Silva, Maria A. de O. Rodrigues, Guilherme C. G. de Lima, Sérgio P. R. da Silva, Maria de L. A. P. F. Palha, Pedro H. C. de Oliveira, Edson M. Flores, Thiago D. Caires, Eduardo A. Rodrigues, Luis H. P. da Silva, Leonie A. Sarubbo, Dorel S. Ramos, Elias J. da Silva e Juliana M. de Luna

Resumo – O artigo apresenta as atividades executadas até o momento visando permitir uma análise pormenorizada do potencial de geração de energia dispersa através da biodigestão. Esta análise será a base para posteriormente ser desenvolvido um modelo para geração de energia com biodigestores dispersos, de forma a poder ser comparável a sua aplicabilidade frente aos benefícios que este modelo poderá trazer quando considerada a redução de custos com coleta, transporte, tratamento, seja de esgoto ou de lixo, dentro do modelo tradicionalmente existente hoje. Parcerias com empresas do setor público e privado viabilizam a execução do projeto e possibilitam a obtenção de dados experimentais. Acredita-se na ideia de que se o lixo ou esgoto puder ser utilizado de maneira adequada no local de geração, os custos associados à toda a cadeia de coleta, transporte, tratamento, etc., tanto para um como para outro será reduzida a ponto de se ter um ganho final.

Palavras-chave – Biodigestor, Energia, Estação de Tratamento de Efluente, Geração Distribuída, Modelo de Gestão.

I. INTRODUÇÃO

O Brasil passa por um momento crítico com relação a produção de energia tendo recentemente o valor do PLD chegado a patamares de R\$850,00/MWh. Todas as usinas termelétricas foram despachadas, mesmo as que foram conce-

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VIII CITENEL), realizado na cidade de Salvador /BA, no período de 17 a 19 de agosto de 2015. Este trabalho foi financiado pela Companhia de Eletricidade de Pernambuco (CELPE) com apoio da Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA) e pela Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco (SRHEPE).

Paulo H. R. P. Gama, coordenador do projeto, trabalha na 'B&G Pesquisa e Desenvolvimento em Sistemas Elétricos Ltda' (e-mail: paulogama@bgpesquisa.com.br).

Sérgio P. R. da Silva trabalha na 'Universidade de Pernambuco – UPE' e 'Sustente – Energias Sustentáveis Ltda' (e-mail: sergperes@gmail.com).

Thiago D. Caires, trabalha na 'Companhia de Eletricidade de Pernambuco (CELPE)' (e-mail: thiago.aires@celpe.com.br).

Luis H. P. da Silva, trabalha na 'Companhia de Saneamento de Pernambuco (COMPESA)' (e-mail: luishenrique@compesa.com.br).

Eduardo A. Rodrigues, trabalha na 'Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco (SRHEPE)' (e-mail: eduardo.azevedo@seinfra.pe.gov.br).

bidas para operarem por um pequeno período de tempo dentro de um ano.

A figura 1 a seguir ilustra a evolução dos preços da energia para clientes livres.

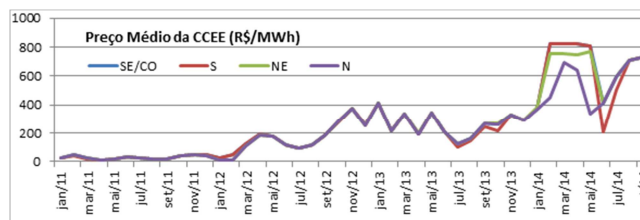


Figura 1. Preços de energia para clientes livres (jan. 2011- set.2014)

Neste cenário a dívida das distribuidoras chegou em 2014 a valores próximos de 17 bilhões de Reais em virtude dessa variação do PLD. Esse custo está sendo repassado às tarifas que deverá subir nos próximos 3 anos apenas para cobrir esse déficit. Em abril de 2014 a Companhia Elétrica de Pernambuco - CELPE obteve autorização para reajuste tarifário onde o custo com energia para o setor de saneamento subiu 17,89%. Estando o sistema de saneamento público dentro do Ambiente de Contratação Regulada - ACR, as tarifas das distribuidoras são definidas pela ANEEL. Se a expectativa de falta de chuva se mantiver, isso só agravará o problema, pois além de serem cobrados os déficits já existentes, as distribuidoras repassarão também o alto custo em virtude da necessidade futura de uma maior geração termelétrica. Nesse cenário ações que visem minimizar os impactos do custo da energia nos negócios torna-se extremamente importante e rentável.

Através da Chamada Pública da ANEEL nº 14/2012 foi proposto pela CELPE o desenvolvimento do projeto PD-0043-0512/2012 intitulado "Arranjos técnicos e comerciais para inserção de geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos/efluentes líquidos dentro de um modelo com biodigestores dispersos". Este projeto está sendo desenvolvido pela CELPE, como financiadora, através das seguintes entidades:

Executoras:

1. B&G Pesquisa e Desenvolvimento em Sistemas Elétricos Ltda – B&G
2. Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação - CGTI

3. Sustente - Energias Sustentáveis Ltda - Sustente
 4. Universidade de Pernambuco – UPE

Co-participante e financiadora:

1. Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA

Apoio:

1. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos de Pernambuco – SRHEPE

O objetivo principal do projeto é propor arranjos técnicos e comerciais para projetos de geração de energia elétrica a partir do biogás de resíduos/efluentes líquidos, de forma Integrada e sustentável, buscando criar condições para o desenvolvimento de base tecnológica e infraestrutura técnica e tecnológica para inserção da geração utilizando biogás na matriz energética nacional.

Um dos objetivos secundários é o de implantar uma Usina piloto de geração de energia com o mínimo de 200kW (elétricos) usando biogás de uma Estação de Tratamento de Esgoto, definida recentemente como sendo a ETE Caruaru em virtude do potencial de geração de biogás esperada para a mesma e considerando ainda a parceria previamente estabelecida com a Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA.

Desta forma, este artigo apresenta a evolução do projeto com resultado parciais obtidos dentro do desenvolvimento do mesmo e também apresenta os elementos necessários para a implantação do projeto demonstrativo disperso na Reserva Camará e da Usina Piloto considerando as informações atualmente existentes na ETE Caruaru.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A. Inventário

Para a realização do inventário da produção de biogás no Estado de Pernambuco foram consideradas as 5 mesorregiões: Região Metropolitana do Recife (RMR), Zona da Mata, Agreste, região do São Francisco e Sertão (Figura 2).



Figura 2. Mesorregiões de Pernambuco.

Estas mesorregiões por sua vez se dividem em microrregiões, que são representadas pelas principais cidades e cidades adjacentes destas. A partir da produção agrícola e pecuária de cada cidade nas mesorregiões e utilizando coeficientes de conversão encontrados na literatura (Tabelas I e II) calculou-se a geração de resíduos, e pode-se estimar a geração de biogás por cidade, mesorregião e para o estado de Pernambuco.

Tabela I. Dados para estimar a produção de biogás [1].

Potencial de produção de esterco por 450 kg de Peso Vivo	
Animal	Dejeto por animal (ton/ano)
Gado de corte	8,5
Vaca Leiteira	12
Ovinos	6
Suínos	16
Equinos	8
Galináceos	4,5

Tabela II. Tabela de produção volumétrica do Biogás [2].

DEJETOS	Geração de Biogás
Pecuária	0,037 m ³ CH ₄ / kg
Bovinos	0,048 m ³ CH ₄ / kg
Equinos	0,037 m ³ CH ₄ / kg
Bubalinos	0,048 m ³ CH ₄ / kg
Asininos	0,048 m ³ CH ₄ / kg
Muare	0,048 m ³ CH ₄ / kg
Suínos	0,062 m ³ CH ₄ / kg
Caprinos	0,048 m ³ CH ₄ / kg
Ovinos	0,048 m ³ CH ₄ / kg
Galos, Frangos e Pintos	0,055 m ³ CH ₄ / kg
Galinhas	0,055 m ³ CH ₄ / kg
Vacas Ordenhadas	0,037 m ³ CH ₄ / kg
Resíduos Sólidos Urbanos	75,78 m ³ CH ₄ / ton
Resíduos domiciliares	0,07 m ³ CH ₄ / ton

Alguns cálculos de desperdícios foram realizados utilizando os seguintes conceitos:

- A manipeira é um coproduto da produção de fécula de mandioca e da farinha de mandioca. Este efluente possui uma DBO de 14.000 mg/L a 34.000 mg/L e o volume pode variar de 300 L (casa de farinha) e 3.000 L (fecularia) [3].
- A vinhaça é o subproduto da produção de etanol. Segundo Chinelato, para cada litro de etanol produzido são produzidos 13L de vinhaça. A sua DBO varia de 20.000 mg/l a 35.000 mg/l.
- Foi utilizado o coeficiente de produção de biogás de 204 m³/ton de silagem. A quantidade de resíduos gerados por tipo de cultura foi obtida do IBGE (2013).
- Esterco Bovino. Foi considerado que numa noite são produzidos 7 kg de esterco animal e a produção de biogás por quilograma de esterco é de 0,049 m³ para bovinos de leite [2].
- Caprinos e ovinos. Foi considerado que numa noite são produzidos 0,5 kg de esterco animal e a produção de biogás por quilograma de esterco é de 0,065 m³ [2].
- Suínos - Foi considerada a produção diária de 4 kg de esterco animal e a produção de biogás por Quilograma de esterco é de 0,075 m³ [2].
- Galináceos - Foi considerado a produção diária de 0,09 kg de esterco animal e a produção de biogás por quilograma de esterco é de 0,1 m³ [2].

Os dados da agricultura, ETE's, Centros de Distribuição estão sendo levantados para todo o estado e serão apresentados posteriormente.

Os resultados do Inventário estão ilustrados na tabela III abaixo:

Tabela III. Potencial de geração de biogás por região

Reba- nho/ Messorregião	RMR ^a	Z M ^b	Agreste	São Fran- cisco	Ser- tão	Total
Bovinos – corte	4.105	14.9	42.769	147.1	56.0	264.9 6
Bovinos – leiteiros	1.476		51.343	10.71	9.74	73.26 5
Suínos	2.064	7.72	46.461	4.579	13.7	74.52
Caprinos	84	324	6.253	67.13	12.5	86.33
Ovinos	145	386	11.349	71.7		83.57
Galinhas- poedeiras	3.876	14.5	5.46	1.14	2.74	27.71
Frangos de corte	5.815	15.0	6.35	1.23	1.49	29.9
Equinos			46.46	22.66		69.13
Total (m³.dia⁻¹)	17.565	52.904	216.449	326.3	96.2	709.38

^aRMR – Região Metropolitana do Recife

^bZM – Zona da Mata

B. Estado da Arte de Novas Opções Tecnológicas

Entende-se por conversão energética, o processo que transforma um determinado tipo de energia em outro.

No caso do biogás, existem diversas tecnologias para efetuar a sua conversão energética, através da energia química contida em suas moléculas, que é convertida em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um conjunto gerador que a converte em energia elétrica [4].

Neste processo controlado de combustão do biogás, destacam-se duas tecnologias, Motor x Turbina, cada um com suas vantagens e especificidades.

B.1. Turbinas a gás para biogás (Figura 3)

1. Maior valor investido se comparado com motores de combustão interna
2. Potência de 500 kW – 150 MW
3. Rendimento em torno de 20 a 30% (pode aumentar se utilizar sistema de cogeração)
4. Emissões de NOx menores se comparadas com motores de combustão interna
5. Média em torno de 35 a 50 ppm
6. Maior tolerância a impurezas do biogás
7. Suporta trabalhar mais horas por dia
8. Pode apresentar maior eficiência (sistema de cogeração)
9. Menos se comparado com motores de combustão interna manutenção

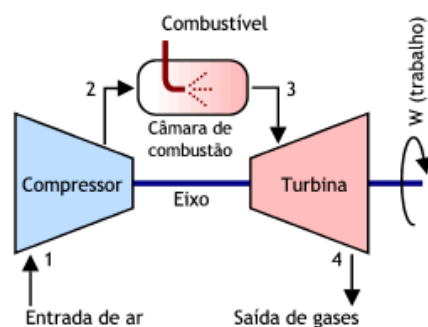


Figura 3. Ciclo de Trabalho da Turbina a Gás.

B.2. Motores para biogás (Figura 4)

1. Menor investimento inicial se comparado com a Turbina
2. Potência de 30 kW – 20 MW
3. Rendimento com biogás em torno de 30 a 34%
4. Emissões de NOx relativamente mais altas que nas Turbinas: menores que 3.000 ppm [5]
5. Motores com baixa emissão: menores que 250 ppm

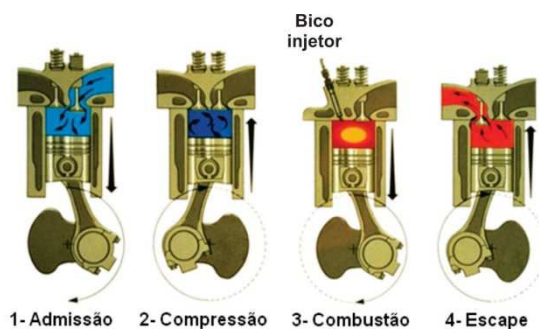


Figura 4. Ciclo de Trabalho - Motor Ciclo Diesel 4 tempos.

B.3. Incentivos Fiscais Voltados ao Setor Energético (Fontes Alternativas)

A grande maioria dos equipamentos e máquinas aplicados na produção de energia elétrica eólica e solar possuem alíquota zero de IPI. Além deles, alguns itens se enquadram no setor de biomassa, como o aproveitamento de resíduos para obtenção de biogás.

Como exemplo, podemos citar alguns produtos classificados no grupos/subgrupos a seguir, onde se observa alíquota zero e mais especificamente neste caso, o equipamento com uma faixa de potência de 200KW que atende ao projeto:

1. Isenção de IPI
2. Incentivos estaduais voltados aos Projetos de P&D - Incentivos e favores fiscais ou financeiro-fiscais dos quais resultem redução ou eliminação, direta ou indireta, do respectivo ônus de ICMS.

B.4. Empresas Disponíveis e Detentoras de Tecnologia

Diante da gama de empresas nacionais e multinacionais, atuantes no setor, que foram levantadas, foi possível fazer uma triagem e chegar a um padrão de dimensionamento e orçamento, que foca em alguns pontos chave do processo, como a seguir:

1. Conjunto Gerador

Deve conter os equipamentos pertinentes a geração de energia propriamente dita, ou seja, conversão do Biogás em Energia Elétrica, e infraestrutura envolvida na instalação do mesmo, como por exemplo:

- Tipo de Motor;
- Sistema de lubrificação;
- Base para instalação do motor;
- Sistema de refrigeração;
- Sistema de trocador de calor;
- Sensores;
- Sistema de escape;

- Transporte e instalação.

2. Quadro de Comando

Envolve todo o sistema de comando dos equipamentos e indicação através displays, como:

- IHM com display;
- Indicação de potência elétrica gerada;
- Indicação de energia elétrica em KWh;
- Horas de funcionamento;
- Temperatura;
- Nível de água;
- Nível de óleo do equipamento;
- Alarmes.

3. Telemetria

Engloba o sistema de controle online da geração de Biogás, no local e a distância:

- Telemetria online;
- Hardware e Software;
- Ramais telefônicos (se necessário);
- Sensores de medição.

4. Regulagem e Medição do Biogás

Sistema de medidas e controle da produção do Biogás, através de:

- Sopradores para garantir a pressão constante no moto gerador;
- Válvulas de alívio;
- Controlador de vazão;
- Analisador de qualidade do Biogás;
- Analisador de concentração de Biogás.

5. Tratamento e Filtragem do Biogás

Sistema que certifica a qualidade do Biogás antes de usá-lo como combustível no gerador:

- Resfriador de Biogás;
- Dreno de condensado;
- Abertura para limpeza;
- Filtro de Biogás;
- Sistema de aquecimento (caso necessário).

6. Conexão com a Rede Elétrica

Ciclo que fecha o processo, ao inserir a energia elétrica gerada na rede elétrica para ser distribuída:

- Sistemas de proteção à rede;
- Chave de acionamento;
- Sistema de interligação em paralelo;
- E todos outros equipamentos necessários, ao atender as normas da concessionária.

7. Honorários, Viagens e Deslocamento

Custos em embutidos durante a concepção do projeto, como honorários e viagens, e/ou durante a instalação dos equipamentos:

- Horas técnicas;
- Custos de viagens e hospedagem;
- Acompanhamento durante o Startup.

C. Projeto Demonstrativo

De forma a atender o objetivo, no qual consta o desenvolvimento de um modelo de geração distribuída de energia

baseada em soluções de biodigestores dispersos, visando atender a melhorias socioambientais em comunidades não atendidas por sistemas de tratamento de esgoto ou energia, através do desenvolvimento de modelos reduzidos, foi concebido um projeto demonstrativo. Durante os dois primeiros meses do segundo ano do projeto, foi realizada uma pesquisa de locais que se encaixassem nesse perfil. Desta forma, foi selecionado um empreendimento localizado na Região Metropolitana do Recife, reuniões foram realizadas entre os membros da Celpe, CGTI e Instituto Camará, onde foi aprovada a parceria entre as empresas.

A Reserva Camará (Figura 5) ainda está em fase de implantação e, portanto, ainda é desprovido de saneamento básico via COMPESA, o que fez da mesma ter que tratar o seu próprio esgoto, além de possibilitar a utilização de resíduos orgânicos e vegetais provenientes de restos de comida, poda de árvores, etc., existentes no local.



Figura 5. Projeto Reserva Camará – Camaragibe, Pernambuco.

Para estimar a quantidade de biogás que pode ser gerado na comunidade foi usado o método que considera o valor da DBO. De acordo com ref. [6] a DBO para o esgoto doméstico antes de tratado pode variar de 0,2 a 0,3 kg/m³. Para fins de cálculo o valor adotado foi o de 0,3 kg/m³.

A referência [7] apresenta uma fórmula para estimar a produção diária de biogás, onde:

$$P = FQ_e D \quad (1)$$

P é a produção diária de biogás; F é a constante experimental que relaciona o volume de biogás com a DBO, tem como valor $F = 0,12$ m³ de biogás/ kg de DBO; Q_e é a vazão de esgoto gerada por pessoa, valor adotado como sendo de 50 L/dia; D é o valor da DBO inicial para o esgoto doméstico, o valor adotado foi de 300 mg/L (0,3 kg/m³).

Assim, estimando uma possível produção de biogás para as 40 pessoas que trabalham diariamente no escritório localizado no canteiro de obras, teríamos aproximadamente 0,072 m³ por dia.

Ainda de acordo com a ref. [7] o percentual de metano no biogás é de 65%, desta forma, a produção de metano chegaria a 0,047 m³ por dia. Caso o metano gerado venha a ser usado para fins de produção de energia elétrica, o metano tem PCI = 33.440 kJ, assim tem-se que 1 m³ de CH₄ gera aproximadamente 9,3 kWh. Com os 0,047 m³ de CH₄ seriam gerados aproximadamente 0,437 kWh.

Em paralelo, estudos em laboratório de produção de biogás a partir de resíduos orgânicos foram realizados, consta-

tando que a produção de biogás média a ser obtida a partir de 50 kg de resíduos de alimentos (80% de umidade) será em torno de 4 m³/dia, com um tempo de retenção que pode variar de 8 a 30 dias. Já para os resíduos provenientes de folhagens, por se tratar de matéria lignocelulósica, a fermentação é mais lenta e pode durar até 150 dias, em média gera-se 0,6 m³ de biogás a cada 1kg de matéria seca. Portanto, o potencial de geração de energia elétrica será da ordem de 60 kWh.

Com base nos dados citados anteriormente, foi elaborado um esquema preliminar do sistema de biodigestão a ser instalado na Reserva Camará (Figuras 6 e 7).

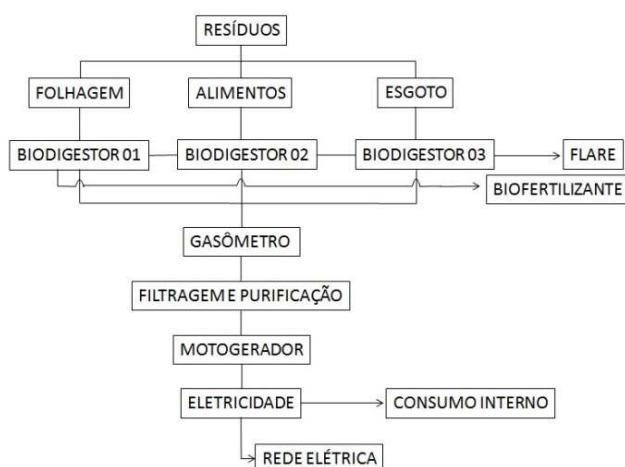


Figura 6. Fluxograma do sistema de biodigestão.

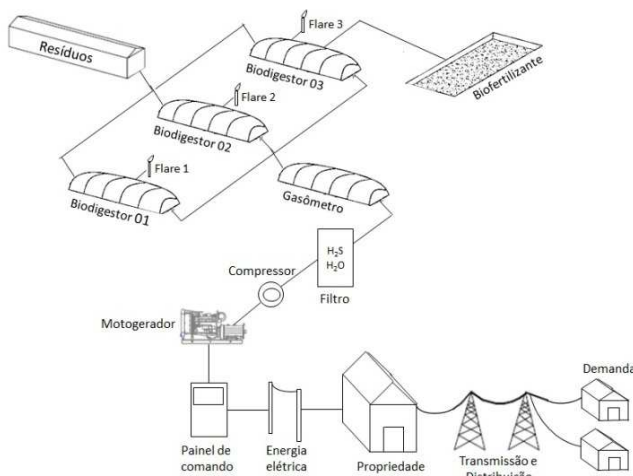


Figura 7. Projeto Demonstrativo.

D. Projeto Piloto

D.1. Metodologia para Estimativa de Produção de Biogás e geração de eletricidade

Este projeto objetiva a produção de energia elétrica utilizando biogás proveniente de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) com geração mínima de 200 kW. Para determinação da ETE onde será desenvolvido o projeto, foi o levantamento junto a COMPESA do número de estações, da quantidade de esgoto afluente e do tipo de tecnologia utilizada para o tratamento do esgoto. Apesar das maiores ETE's estarem localizadas na Região Metropolitana do Recife (RMR), estas não puderam ser utilizadas devido a um con-

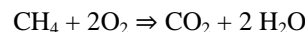
trato de parceria público-privada de readequação das ETE's com uma empresa privada que impossibilitou a realização do convênio na velocidade necessária para atendimento aos prazos estabelecidos pela ANEEL no Edital 14 que trata da introdução do biogás na matriz energética brasileira. Dois tipos de metodologia foram utilizados para o cálculo do potencial de geração de biogás numa ETE: uma utilizando a tecnologia UASB (Upflow Anaerobic Blanket Digestion), ou em português, tecnologia RAFA (Reator anaeróbio de fluxo ascendente) (Figura 7); e outra utilizando o sistema convencional de tratamento de esgoto com decantadores primários e secundários onde são produzidos lodo de esgoto (primários e secundários), que podem ser tratados num biodigestor para geração de biogás e, posterior utilização em grupos geradores para produção de energia elétrica.

Para tal foram selecionadas apenas 4 ETE's instaladas no interior do estado: Caruaru, Petrolina, Rio Formoso e Salgueiro, que possuem tecnologia UASB. Destas, a ETE de Caruaru, apresentou as melhores condições técnicas e de logística para desenvolvimento do projeto.

A metodologia utilizada para as análises do potencial de biogás é encontrada na ref. [8]. Esta metodologia é baseada na estimativa a partir da demanda química de oxigênio (DQO) removida.

A DQO acidificada é uma parcela da DQO biodegradável que estará disponível para as bactérias metanogênicas (geradoras de metano), pois uma parte desta é convertida em novas células bacterianas. Assim, a quantidade de DQO biodegradável afluente que pode ser acidificada é o somatório das parcelas convertidas em ácidos graxos voláteis e em metano. A DQO_{cel} refere-se ao substrato que é consumido pelos micro-organismos fermentativos e convertido em células. Dessa forma, nem toda a DQO estará disponível para as bactérias metanogênicas, uma vez que parte da mesma é convertida em novas células bacterianas. A DQO recalcitrante refere-se à parcela de substrato orgânico que não pode ser degradada pelos micro-organismos fermentativos. É devida aos substratos complexos, submetidos ao tratamento em reatores anaeróbios contendo biomassa ainda não adaptada aos mesmos, ou aos substratos considerados biologicamente inertes [8].

Portanto, a produção do metano implica na remoção de DQO do despejo. Para oxidação do metano produzido são necessários dois moles de oxigênio, como mostra a reação química:



Assim, para cada mol (16 g) de CH₄ produzido são removidos 2 moles (64 g) de DQO do despejo. Nas condições normais de temperatura e pressão isso corresponde a 350 ml de CH₄ para cada grama de DQO degradada.

A estimativa teórica de produção de metano em função da demanda química de oxigênio (DQO), definida por [8], é dada por:

$$V_{\text{CH}_4} = \text{DQO}_{\text{CH}_4} \cdot K(T)^{-1} \quad (2)$$

Onde:

V_{CH_4} = volume de metano produzido, em litros;

DQO_{CH_4} = DQO removida do reator e convertida em metano, em g_{DQO} ;
 $K(T)$ = fator de correção para temperatura de operação do reator UASB.

O fator de correção para temperatura é dado por (3):

$$K(T) = P.COD.[R.(273+T)] \quad (3)$$

Onde:

P = pressão atmosférica (101.325 Pa)

COD = carbono orgânico dissolvido por mol de $CH_4 = 64 g_{DQO}/mol$

R = constante universal dos gases = 8,31 J/mol.K

T = temperatura de operação do reator em °C

A produção de metano pode ser avaliada pela medição da vazão média do biogás e do teor de metano, em porcentagem volumétrica. O teor de metano no biogás real é medido por cromatografia gasosa usando padrões de gases presentes no biogás, enquanto a vazão de biogás é medida na saída do flare de cada linha de tratamento.

D.2. Metodologia de Cálculo do Potencial de biogás e eletricidade para a ETE que utilizam tecnologia UASB

Para ETE's que utilizam tecnologia UASB foi calculado o potencial teórico, baseados na eficiência da ETE na redução do DQO e na vazão de esgoto afluente.

A vazão de esgoto afluente na ETE- Caruaru no início do projeto era de 62 litros por segundo ($L.s^{-1}$), passando para 150 $L.s^{-1}$ há poucos meses atrás. Há perspectiva de aumento desta vazão para 250 $L.s^{-1}$ com a entrada em operação de mais estações elevatórias, sendo a vazão máxima de 450 $L.s^{-1}$. Logo, foram calculados os potenciais de geração de biogás e de energia elétrica para estas vazões, considerando os dados médios de remoção de DQO, que é de 495 $mg O_2.L^{-1} = 0,495 g.L^{-1}$.

D.2.1 Produção teórica de metano

A pressão considerada nos cálculos foi a atmosférica, ou seja, 1 atm (101,325 kPa). A temperatura do esgoto no reator pode variar e isto afeta a produção de metano. Para Caruaru, foi considerada a temperatura de 25°C (298 K).

O fator $K(T)$ foi calculado através de:

$$K(T) = (1 atm . 64g_{DQO}/mol)/(R . T(K)) \quad (4)$$

Onde:

$R = 0,08206 atm.L/mol.K$ (constante universal dos gases)

A produção diária de metano pode ser estimada através de:

$$Q_{CH_4} = DQO_{CH_4} \times Q (L/dia) / K(T) \quad (5)$$

O poder calorífico inferior do metano a 25°C e 1 atm é 50,02 MJ/kg e a densidade do metano é de 0,7174 kg/m³ (Nunes, 2012). Logo, o PCI do metano é de 35,884 MJ/kg.

Também foi considerado que cerca de 30% do biogás produzido fica retido no lodo de esgoto. Logo, apenas 70% do biogás produzido será utilizado para geração de energia.

Com a agitação do lodo há possibilidade de uma maior liberação do metano.

D.2.2. Estimativa de produção de energia elétrica a partir do biogás

A produção de energia, em kJ, é calculada pelo produto da Energia disponível x η gerador.

Para estes cálculos foram considerados a eficiência média dos motores de ciclo Otto de 30%. Para cálculo da energia foi utilizada a equivalência: 1 kWh = 3,600 MJ.

Os resultados das estimativas diárias de produção de metano e energia elétrica em função da vazão de afluentes para a ETE-Caruaru estão ilustrados nas tabelas IV e V.

Tabela IV. Estimativas de produção de metano e energia disponível ETE Caruaru.

Vazão ($L.s^{-1}$)	Produção Metano (m^3)	Energia Disponível (MJ)
62	1.012.067	25.421.913
150	2.448.550	61.504.628
250	4.080.916	102.507.714
450	7.345.649	184.513.884

Tabela V. Estimativas de produção de eletricidade na ETE-Caruaru.

Vazão ($L.s^{-1}$)	Energia (kWh)	Potência (kW) x tipo de operação	
		24 h	3h (ponta)
62	2.118	88,27	706,16
150	5.125	213,56	1.708,46
250	8.542	355,93	2.847,44
450	15.376	640,67	5.125,39

A figura 8 ilustra um gráfico com a geração de eletricidade (kW) em função da vazão ($L.s^{-1}$) e forma de operação (horas por dia), no qual se obtém uma visão geral do comportamento da geração de eletricidade da ETE-Caruaru.

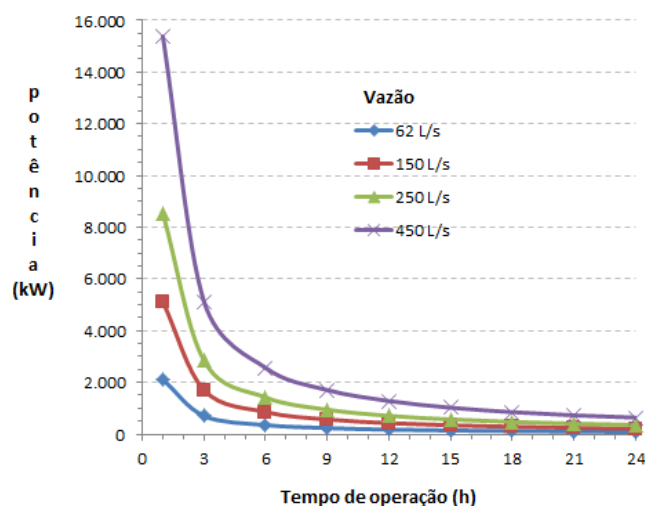


Figura 8. Estimativa de produção de eletricidade utilizando biogás da ETE-Caruaru em função da vazão de esgoto e tempo de operação do grupo gerador.

Como a geração mínima estabelecida pela ANEEL é de 200 kW (Edital 14), a ETE-Caruaru atende mesmo na condição de baixa vazão de afluentes de 62 $L.s^{-1}$, já que esta condição é obtida com uma operação de aproximadamente 10 horas diárias. Ainda, a ETE-Caruaru tem um potencial de

geração de eletricidade estimado em até 350 kW com operação contínua e de 2,8 MW com operação no horário de ponta com a vazão de 250 L.s-1, que é a vazão de projeto.

E. Análise dos Impactos com a Rede Elétrica

E.1. Tributos

Os tributos que incidem sobre a energia elétrica produzida no Brasil são o ICMS, a contribuição para o Pis/Pasep e a Confins. Incide ainda sobre a geração de energia hidrelétrica a Compensação Financeira pela Utilização de Recursos Hídricos para a Geração de Energia Elétrica. Outros encargos são também suportados pelo setor, compondo a tarifa de energia elétrica paga pelo consumidor final: Quota da Reserva Global de Reversão - RGR, Quotas da Conta de Consumo de Combustíveis - CCC, Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica - TFSEE, Conta de Desenvolvimento Energético - CDE, Rateio de Custos Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia Elétrica - Proinfra, investimento obrigatório em Pesquisa e Desenvolvimento e Encargo de Serviços do Sistema - ESS.

Os encargos e tributos ultrapassam 30% do valor da tarifa de energia elétrica.

Observa-se que a maioria dos equipamentos utilizados para a geração de energia elétrica a partir do biogás já não estão sujeitos ao pagamento de IPI. No entanto, alguns equipamentos, ainda, sofrem a incidência do imposto. De maneira que poderiam ser zeradas as alíquotas de IPI dos motores a pistão de explosão e diesel estacionários movidos a biogás, bem como das turbinas a biogás destinadas a geração de eletricidade.

Com relação ao PIS/Pasep e COFINS, não constam regimes especiais relacionados a equipamentos utilizados na produção de energia a partir do biogás. Pode-se, portanto, propor a criação de regimes especiais, com alíquotas diferenciadas, para serem aplicados a tais produtos. A venda de aeronaves no mercado interno, por exemplo, é uma atividade econômica em que as alíquotas de PIS/Pasep e COFINS foram reduzidas a zero.

Quanto ao ICMS, a regulamentação da eventual instituição de imposto sobre valor agregado, que adotasse alíquotas uniformes em todas as Unidades da Federação, poderia atribuir tratamento diferenciado, com alíquotas mais baixas, aos equipamentos utilizados na produção de energia gerada a partir do biogás, como forma de incentivar tal modalidade energética.

E.2. Comercialização

Apurados os custos de geração da energia a partir do biogás, para os dois projetos pilotos que serão implantados no P&D, há que se avaliar que tipos de incentivos adicionais, entre aqueles propostos acima, serão necessários para viabilizar a comercialização desta energia com a distribuidora local, lembrando, ainda, que ela concorre com gerações distribuídas de outras fontes de energia como geração e cogeração termelétrica a gás, quando do processo de chamada pública.

Além da comercialização com as distribuidoras, a energia elétrica gerada a partir do biogás, pode ser comercializada com empresas cujo consumo seja igual ou superior a 500 kW (quilowatts).

A resolução 482 de 2012 da ANEEL estabelece um sistema de compensação de energia, permitindo ao consumidor instalar pequenos geradores em sua propriedade e trocar energia com a distribuidora local.

No caso dos dois projetos de geração a partir do biogás que fazem parte do P&D em pauta, o menor pode ser classificado como microgeração e o maior como minigeração e, com isso, utilizar o sistema de compensação de energia.

Outro ponto importante é que os investimentos nos dois projetos de geração podem ser feitos com recursos do Programa de Eficiência por se tratar de geração de energia de fontes incentivadas com potência instalada menor ou igual a 100 kW, no caso de microgeração, ou com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW, para o caso de minigeração, desde que as ações de eficiência energética economicamente viáveis e apuradas em diagnóstico energético nas instalações do consumidor beneficiado, sejam ou já tenham sido implementadas.

E.3. Conexão de Micro e Minigeradores ao Sistema de Distribuição da Celpe

Conforme as especificações obtidas da Reserva Camará, não haverá potencial de geração de energia elétrica favorável à conexão desse sistema de GD à rede elétrica da Celpe. A tensão de distribuição padronizada pela Celpe, nesse caso, com potência instalada menor ou igual a 75 kW, é a tensão entre fases com valor eficaz igual ou inferior a 1 kV (baixa tensão), estando a potência instalada da microgeração limitada à carga instalada da unidade consumidora. Estão sendo analisadas as possibilidades de utilização da energia gerada para uso interno da reserva como, por exemplo, no acendimento de lâmpadas.

Para o projeto piloto na planta da ETE Caruaru, foi analisada a ref. [9] conforme nível de potência almejado. Tal norma tem como propósito concentrar e sistematizar os requisitos de informações técnicas pertinentes às novas conexões ou alteração de conexões existentes, de consumidores que façam a adesão ao sistema de compensação de energia. Alguns critérios e padrões técnicos devem então ser obedecidos. Não serão tratados neste trabalho os trâmites legais para aprovação e instalação do projeto perante a distribuidora, dando ênfase apenas às questões técnicas envolvidas no projeto.

1. Características do Sistema de Distribuição da Celpe

A tensão padronizada para média tensão (MT), com potência instalada menor ou igual a 1000 kW, através de fontes renováveis com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, deve ser a tensão entre fases cujo valor eficaz é igual ou inferior a 15 kV.

2. Formas de Conexão

O ponto de conexão do sistema de GD às instalações da Celpe deve ser o mesmo da unidade consumidora. A potência instalada da geração fica limitada à demanda contratada dessa unidade, sendo considerada menor ou igual a 1000 kW para uma demanda contratada menor ou igual a 2500 kW. A conexão do sistema de GD deve se basear no esquema da Figura 9.

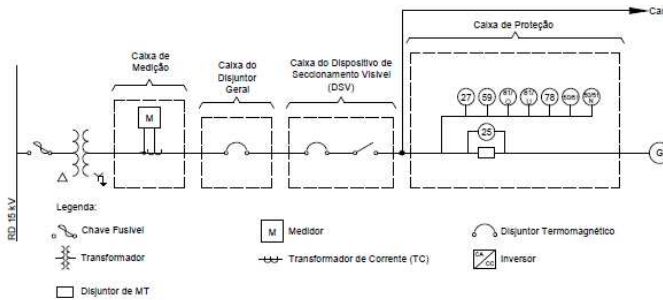


Figura 9. Forma de conexão do acessante à rede de MT.

3. Sistema de Medição

O sistema de medição de energia utilizado nas unidades consumidoras deve ser 4 quadrantes, ou seja, medir a energia ativa e reativa injetada na rede e a energia ativa e reativa consumida da rede.

4. Dispositivo de Seccionamento Visível (DSV)

O DSV é uma chave seccionadora sob carga, abrigada por um invólucro utilizado para garantir a desconexão da geração durante manutenção no sistema Celpe. Deve ter capacidade de condução e abertura compatível com a potência da unidade consumidora.

5. Padrão de Entrada

O padrão de entrada da unidade consumidora deve estar de acordo com as normas de conexão de geradores ao sistema de distribuição, e com as versões vigentes das normas internas de fornecimento de energia elétrica da distribuidora.

6. Requisitos de Proteção para a Conexão

São requisitos de proteção exigidos para consumidores com minigeração de até 500 kW: elemento de desconexão; elemento de interrupção automático acionado por proteção; proteção de subtensão (27) e sobretensão (59); proteção de sub e sobrefrequência (81); proteção de sobrecorrente (50/51 e 50N/51N); relé de sincronismo (25); anti-ilhamento (78 ou Rocoff df/dt). Os ajustes recomendados das proteções são disponibilizados no decorrer do processo de aprovação do sistema de GD pela distribuidora.

7. Requisitos de Proteção e Qualidade

A qualidade da energia fornecida pelos sistemas de minigeração às cargas locais e à rede elétrica da Celpe é regida por práticas e normas referentes aos parâmetros de qualidade de energia: tensão em regime permanente, faixa operacional de frequência, distorção harmônica, fator de potência, e

injeção de componente em corrente contínua na rede elétrica. Todos esses parâmetros devem ser medidos na interface do ponto de conexão comum, exceto quando houver indicação de outro ponto.

8. Requisitos de Segurança

Condições anormais compreendem variações de tensão acima ou abaixo dos limites definidos para a tensão em regime permanente, variações de frequência acima ou abaixo dos limites definidos para a faixa operacional de frequência e a desconexão completa da rede, representando um potencial para a formação de ilhamento de geração. É preciso considerar ainda a reconexão do sistema de geração, a conexão do sistema de geração a um sistema de aterramento na unidade consumidora, a proteção contra curto-circuito, o método de isolamento e seccionamento visível do equipamento de interface com a rede, o religamento automático da rede, e a sinalização de segurança, a ser pintada na caixa do DSV.

F. Modelo do Sistema de Biodigestão Dispersa

O modelo em construção para análise e viabilização de projetos de geração a biogás distribuídos irá comparar o custo de geração a biogás no local onde exista a geração dos resíduos orgânicos/efluentes líquidos com o custo de uma geração centralizada, para onde são transportados os resíduos de várias fontes geradoras através de redes de esgoto ou outros meios de transporte no caso de material sólido.

Fazem parte do modelo a quantidade de resíduos orgânicos gerados no local, a geração de biogás possível, a quantidade de esgoto evitada, a quantidade de lixo orgânico evitada, a energia elétrica substituída, área ocupada, possibilidade de redução de IPTU, custos com coleta e tratamento de esgoto e lixo, geração de adubo, redução de taxa de esgoto, créditos possíveis de carbono, custos de implantação, manutenção e operação da geração do biogás e da eletricidade, custos de proteção, conexão, controle, comando e medição elétrica, entre outros. Este modelo está por ser desenvolvido dentro deste projeto e terá como elementos base de comparação de sua performance os dois sites previamente apresentados neste artigo, o projeto demonstrativo da Reserva Camará e o Projeto Piloto da Estação de Tratamento de Esgoto de Caruaru/PE.

III. CONCLUSÕES

O Projeto de P&D que norteou este artigo vem sendo desenvolvido de forma a se obter um modelo no qual seja possível avaliar os benefícios de se gerar energia elétrica a biogás de maneira dispersa, comparada com a forma tradicional. Pôde-se observar até o momento que as gerações de energia para sites de pequeno porte só se viabilizarão caso os custos de investimento sejam reduzidos. O aumento da demanda por soluções de pequeno porte em biodigestão tem feito com que o custo da tecnologia alcance valores mais atraentes, fazendo com que o m^3 fique em torno de R\$600,00 [10] e [11]. Por outro lado, os custos com o tratamento do biogás e sua conversão em energia elétrica tem se

mostrado de maior peso no custo total do investimento, fazendo com que as soluções dispersas tenham que ter tamanhos mais atraentes para poderem apresentar benefícios frente a estruturas tradicionais. Por outro lado, o modelo de geração de energia a biogás que está sendo desenvolvido busca inserir elementos antes não considerados na avaliação da viabilidade técnica econômica, como por exemplo a redução do IPTU da unidade geradora de insumo orgânico que utilizar esse resíduo para gerar energia elétrica. O mesmo conceito é válido para a água tratada frente a que é descartada no sistema tradicional de esgoto. Frente a estas possibilidades e às atividades apresentadas neste artigo, espera-se que o resultado de um modelo disperso para geração de energia elétrica possa ser implantado como um Programa Nacional.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Lucas Júnior and A. C. Amorim, "Manejo de dejetos: Fundamentos para a integração e agregação de valor", Anais do ZOOTEC, Campo Grande – MS, 2005. Disponível em: http://www.abz.org.br/files.php?file=documentos/Jorge_978987058.pdf
- [2] Winrock International Brazil, "Manual de Treinamento em Biodigestão", 2008. Disponível em: http://www.ieham.org/html/docs/Manual_Biodigestao.pdf
- [3] M. S. Botelho, C. M. Poltroniere; E. L. F. J. Rodrigues, "Manipueira: um adubo orgânico para a agricultura familiar", XIII Congresso Brasileiro de Mandioca, Botucatu-SP, 2009.
- [4] V. Pecora, "Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do Biogás de tratamento do esgoto residencial", Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, CENBIO, 2005.
- [5] Environmental Protection Agency (EPA), "Turning a liability into an asset: A landfill gas-to-energy project development handbook", 1996. Disponível em: <http://www.epa.gov/Imop/res/pdf/handbook.pdf>
- [6] C. M. M. Campos, E. T. Mochizuki, L. H. S. Damasceno, C. G. Botelho, "Avaliação do potencial de produção de biogás e da eficiência de Tratamento do reator anaeróbico de manta de lodo (UASB) alimentado com dejetos de suínos", *Ciência e Agrotecnologia*, v.29, pp.848-856, 2005.
- [7] D. L. Rodrigues, C. F. Aquino and G. P. Estevam, "Produção de biogás a partir de esgotos utilizando reatores anaeróbicos do tipo RAFA seguido por lodos ativados numa estação de tratamento de esgoto", *Omnia Exatas*, v.4, n.2, pp. 103-109, 2011.
- [8] C. A. L. Chernicharo, *Reatores Anaeróbicos*, 2nd ed., SEGRAC, Belo Horizonte, 1997, pp. 246.
- [9] Conexão de Microgeradores e Minigeradores ao Sistema de Distribuição de Média Tensão, Código VM 02.00-00.005, 2ª edição, Nov. 2013.
- [10] P. H. R. P. Gama et al., "Desenvolvimento de Modelo para Gestão e Geração de Energia em Favelas Visando Subsidiar os Programas de Eficiência Energética das Distribuidoras", SMARS, 2010.
- [11] R. Mattos; P. H. C. Oliveira; "Desenvolvimento de Metodologia para Geração de Crédito de Carbono através de Modelo para Gestão de Estrume em Fazendas de Gado com uso de Sistemas de Biodigestão", Projeto de P&D Termope, código 2290-003/2007.