

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PATRÍCIA BILOTTA

DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SANTA QUITÉRIA  
EM CURITIBA/PR A PARTIR DO BIOGÁS

CURITIBA

2014

PATRÍCIA BILOTTA

DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SANTA QUITÉRIA  
EM CURITIBA/PR A PARTIR DO BIOGÁS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Especialização em Projetos Sustentáveis, Mudanças Climáticas e Gestão Corporativa de Carbono do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito para obtenção do título de Especialista.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. M.Sc. Bárbara Zanicotti Leite  
Ross

CURITIBA

2014

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	4
<b>ABSTRACT</b> .....	5
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	6
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	8
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	10
<b>3.1 Caracterização do Local de Estudo</b> .....	10
<b>3.2 Metodologia Adotada</b> .....	10
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	12
<b>4.1 Produção de metano e energia disponibilizada</b> .....	12
<b>4.2 Consumo de energia</b> .....	14
<b>4.3 Emissão de metano evitada</b> .....	15
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	16
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	17

# **DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS SANTA QUITÉRIA EM CURITIBA/PR A PARTIR DO BIOGÁS**

Aluna: Dra. Patrícia Bilotta <sup>1</sup>

Orientadora: M. Sc. Bárbara Zanicotti Leite Ross

<sup>1</sup> Mestre e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Atualmente é professora titular do Programa de Mestrado e Doutorado da Universidade Positivo (PGAMB). Rua Prof. Pedro Viriato Parigot de Souza, 5.300, Campo Comprido, Curitiba/PR. Email: pb.bilotta@gmail.com, Tel: (41) 3317-3460

## **RESUMO**

O aproveitamento do biogás proveniente do tratamento de esgoto doméstico, de dejetos animais e da disposição de resíduos sólidos é uma alternativa de geração de energia elétrica com grande potencial de expansão no Brasil. Neste estudo foi investigada a disponibilização de energia a partir do metano gerado na ETE Santa Quitéria (Região Metropolitana de Curitiba) e a emissão de metano evitada pela recuperação do biogás. Essa estação possui vazão e DQO média afluente de 33.220,8 m<sup>3</sup>/d e 14.617,1 kg/d, respectivamente, e atende cerca de 190 mil habitantes. Para os cálculos foram utilizados os dados de monitoramento da estação de Agosto/2012 a Março/2013 e as metodologias descritas por Lobato (2011), Zilotti (2012) e IPCC (2006) para quantificar os seguintes parâmetros: DQO convertida em biomassa; sulfato convertido em sulfeto; DQO convertida em metano; perdas de metano (fase líquida e gasosa); potencial energético disponível; potência elétrica disponível; emissão evitada de metano. Os seguintes resultados foram obtidos: eficiência média de remoção de matéria orgânica de 65,6%; produção de metano de 1.427,2 m<sup>3</sup>/d; energia elétrica média disponível de 70.326,4 kWh/mês (63% da demanda média mensal de energia da estação); emissão real evitada de metano de 946,2 kgCH<sub>4</sub>/d e 17.192,6 kgCO<sub>2 eq</sub>/d (PAG do CH<sub>4</sub> = 21). Pode-se concluir que a recuperação do biogás na ETE Santa Quitéria resulta em benefícios econômicos e ambientais.

Palavras-Chave: Energia renovável; gases de efeito estufa, metano.

## ABSTRACT

The use of biogas from treatment of domestic sewage, animal waste and solid waste disposal is an alternative to generate electricity with great potential for expansion in Brazil. In this study it was investigated the availability of energy generation from methane produced in Santa Quitéria WWTP (region of Curitiba) and the methane emissions avoided by biogas recovery. This WWTP has flow and COD influent average of 33,220.8 m<sup>3</sup>/d and 14,617.1 kg/d, respectively, and serves about 190,000 inhabitants. It was used data from the monitoring station between August/2012 and March/2013 and the methodologies are described by Lobato (2011), Zilotti (2012) and IPCC (2006) to quantify the following parameters: COD converted into biomass; sulfate converted to sulfide; COD converted to methane; methane loss (liquid and gas); potential energy available; electrical power available; avoided emissions of methane. The following results were obtained: average treatment efficiency of 65.6%; methane production of 1,427.2 m<sup>3</sup>/d; average electricity available of 70,326.4 kWh/month (63% of the average monthly energy demand of the WWTP); avoided emissions of 941.9 kgCH<sub>4</sub>/d and 17,189.7 kgCO<sub>2 eq</sub>/d. Therefore, it can be concluded that the biogas recovery of in Santa Quitéria WWTP represents real and direct economic and environmental benefits.

Keywords: Renewable energy; greenhouse gas; methane.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com o último balanço energético nacional, publicado pela Empresa de Pesquisa Energética, o consumo de energia primária aumentou em cerca de 72% nos últimos 10 anos no Brasil (EPE, 2013a). Além disso, em termos de energia elétrica, foi registrado um aumento em torno de 87% no consumo nacional no período de 2008 a 2012 (EPE, 2013b). Para atender a demanda crescente, outras fontes renováveis têm sido incorporadas à matriz energética brasileira, como eólica, biomassa, centrais hidrelétricas de pequeno porte e biogás (EPE, 2013a).

O gás metano ( $\text{CH}_4$ ) é o componente responsável pela capacidade calorífica do biogás e sua formação ocorre durante a degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica, juntamente com a formação de amônia, dióxido de carbono, hidrogênio, monóxido de carbono, nitrogênio, oxigênio, compostos orgânicos voláteis, sulfetos e fosfatos (COSTA, 2006; GARCILASSO *et al.*, 2008a). A proporção dos componentes dessa mistura depende do tipo de biodigestor, ou reator biológico, e do substrato utilizado, que pode ser resíduo sólido urbano, esgoto doméstico, lodo de tratamento de esgoto, dejetos animais, dentre outros (GARCILASSO *et al.*, 2008a; VENKASTESH e ELM, 2013).

No caso do esgoto sanitário, quanto maior a eficiência do tratamento biológico, maior será a produção de  $\text{CH}_4$  pelo sistema e maior será a capacidade de obtenção de energia (JIANG *et al.*, 2013; DENG *et al.*, 2014). Alguns fatores podem interferir no poder calorífico (PCI) do biogás, como: temperatura ambiente (faixa ideal 32 a 37°C), qualidade do esgoto sanitário (biodegradabilidade dos compostos orgânicos, presença de nitrogênio, enxofre, fósforo, pH entre 6,0 e 8,0) e quantidade de vapor de água e  $\text{CO}_2$  (quanto maior a parcela de vapor de água e  $\text{CO}_2$  menor o poder calorífico) (COSTA, 2006; FARIA, 2012). Segundo Zilotti (2012), o PCI do metano pode passar de 465 para 11.661 kcal/kg quando a concentração de  $\text{CO}_2$  é reduzida de 90 para 10% no biogás.

A legislação brasileira prevê a concessão de direito de exploração da eletricidade proveniente do biogás, seja para autoprodutores (energia destinada ao consumo próprio) ou produtores independentes (energia excedente comercializada). A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) autoriza essas

ações nos termos das Leis n° 9.427/96 e n° 9.074/95, bem como da Resolução n° 390/09 (BRASIL, 1995; BRASIL, 1996; ANEEL, 2009; MMA, 2010).

A geração de energia elétrica a partir do biogás é uma alternativa com grande potencial de expansão no Brasil. Isso se deve a alguns fatores, como: ampliação nos serviços de coleta e tratamento de esgoto sanitário no território nacional (atualmente apenas cerca de 25% da população brasileira é beneficiada por esses serviços) e de coleta e destinação adequada de resíduos sólidos urbanos (SNIS, 2012); aumento da fiscalização por parte dos órgãos ambientais para o cumprimento da legislação de descarte de efluentes domésticos e industriais em cursos d'água (BRASIL, 2011); aumento do consumo de energia elétrica no país nos próximos anos, aumentando a pressão sobre a oferta nacional e sobre o custo da energia elétrica fornecida (EPE, 2013b).

Neste contexto, será investigada neste trabalho a capacidade de geração de energia elétrica a partir do gás metano produzido por uma estação de tratamento de esgoto (ETE) de médio porte. A pesquisa será um estudo de caso realizada na ETE Santa Quitéria, localizada na região metropolitana de Curitiba, que beneficia uma população de aproximadamente 190 mil habitantes. Para alcançar o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Quantificar a geração de metano na ETE Santa Quitéria;
- b) Calcular a energia teórica a ser disponibilizada pela ETE Santa Quitéria;
- c) Estimar a redução no consumo de energia com o aproveitamento do biogás; e
- d) Calcular a quantidade de metano evitada pela recuperação do biogás.

A justificativa para a realização deste estudo se apoia em três aspectos principais:

- 1) crescente demanda urbana por energia elétrica, que requer fontes alternativas;
- 2) potencial energético intrínseco do biogás gerado em ETEs anaeróbias, ainda pouco aproveitado no estado do Paraná; 3) possibilidade de atender demandas urbanas de energia elétrica localizadas nas proximidades da fonte geradora.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O biogás é uma mistura de gases resultantes de reações bioquímicas que ocorrem na decomposição biológica anaeróbica da matéria orgânica presente no esgoto doméstico (Figura 1). Nesse processo, compostos orgânicos complexos, como proteínas, carboidratos e lipídeos, são convertidos em  $H_2$  e  $CO_2$  ou acetato, os quais são levados a  $CH_4$  e  $CO_2$ , pela ação de bactérias específicas, denominadas hidrogenotróficas e acetoclásticas (LOBATO, 2011; FARIA, 2012).

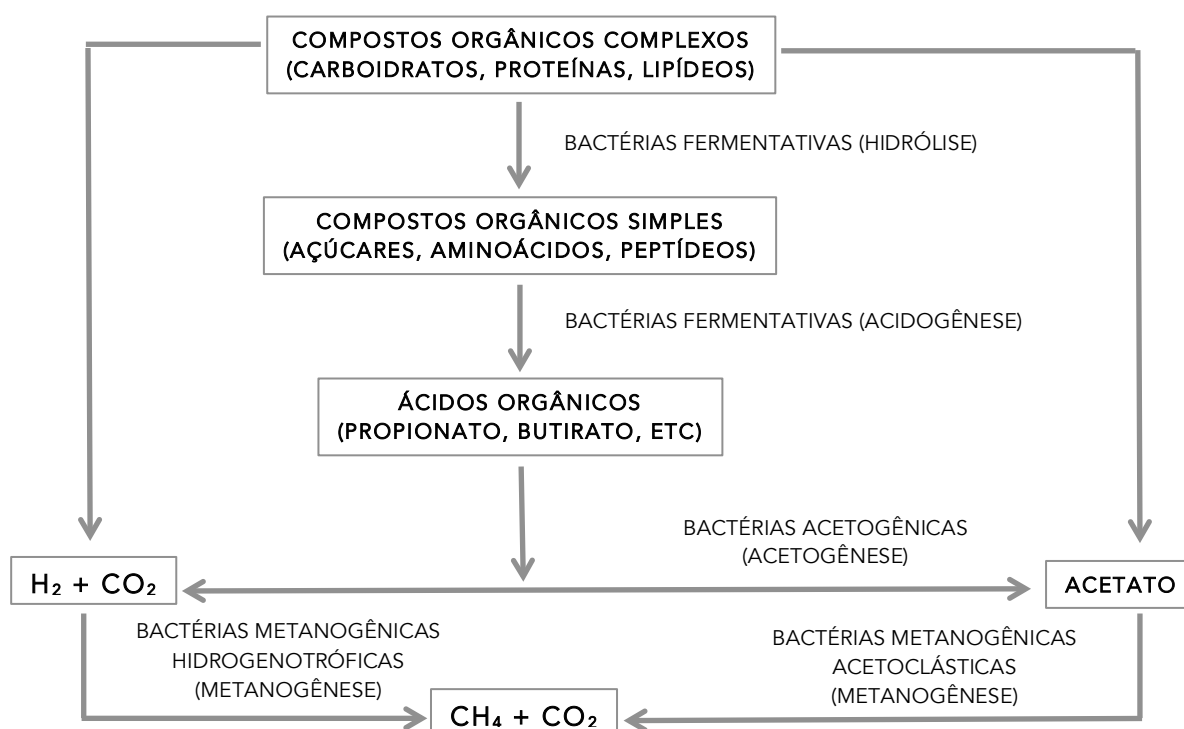


Figura 1. Rotas metabólicas no tratamento de esgoto doméstico.

Fonte: Adaptado de Faria (2012).

O biogás é composto por  $CH_4$  (40 a 90%),  $CO_2$  (10 a 50%),  $H_2$  (0 a 3%),  $N_2$  (0 a 2,5%),  $O_2$  (0 a 1%),  $H_2S$  (0 a 3%),  $NH_3$  (1 a 0,5%) e  $CO$  (0 a 0,1%). A proporção em volume de cada componente depende das condições de operação da ETE e das características físico-químicas do esgoto bruto, principalmente, tempo de retenção, temperatura, pH e da relação carbono-nitrogênio-fósforo (COELHO *et al.*, 2004; COSTA, 2006; LOBATO, 2011).

O metano (gás incolor, inodoro e combustível) é o principal responsável pelo potencial energético do biogás e pode ser obtido em diferentes configurações



de tratamento anaeróbio (reator de manta de lodo, reator de leite fluidizado, filtro biológico, entre outras) (METCALF; EDDY, 2003). Chernicharo (2007) afirma que no tratamento anaeróbio a carga orgânica afluente é convertida nas seguintes parcelas: biogás (50-80%), efluente (0-30%) e lodo (10-20%). Farias (2012) relata que a relação máxima é 0,25 kg CH<sub>4</sub> por 1 kg DBO<sub>5</sub> removida<sup>1</sup>. Lobato (2011) destaca ainda que a perda de CH<sub>4</sub> dissolvido no efluente e a parcela que escapa para a atmosfera pode variar de 20 a 50% do metano total. Essas informações auxiliam na estimativa da produção quando não há dados de medição.

Para aumentar o rendimento energético e a vida útil do sistema de conversão do CH<sub>4</sub> em energia elétrica são necessários filtros purificadores de biogás na saída de gás do reator biológico. Os filtros removem umidade (vapor de água que absorve parte da energia gerada na combustão do CH<sub>4</sub>), H<sub>2</sub>S (responsável por corrosão no sistema) e CO<sub>2</sub> (gás inerte que reduz o poder calorífico do biogás) (COELHO *et al.*, 2004; COELHO *et al.*, 2006; FRANÇA Jr., 2008; VARNERO *et al.*, 2012). Zilotti (2012) mostra que a combustão de 1 m<sup>3</sup> de biogás libera 23.400 kJ de calor, enquanto 1 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> produz 36.000 kJ.

Vários trabalhos relatam os benefícios econômicos da utilização de biogás na geração de energia em pequenas e grandes cidades (FRANÇA Jr., 2008; GARCILASSO *et al.*, 2008a; GARCILASSO *et al.*, 2008b; DENG *et al.*, 2014). Na ETE Barueri (São Paulo), o aproveitamento do biogás responde por 25% da demanda mensal de energia para o funcionamento da estação (COSTA, 2006). Na ETE Rio das Antas (Cascavel/PR), a geração de energia elétrica pelo biogás foi estimada em 35.459 kWh mensal, valor suficiente para atender a demanda elétrica da estação de tratamento de água do município (ZILOTTI, 2012).

O aproveitamento energético do biogás também promove a redução de emissão de gases de efeito estufa (GEEs). O Potencial de Aquecimento Global (PAG) do CH<sub>4</sub> é 21 vezes superior ao CO<sub>2</sub>, assim, a combustão do CH<sub>4</sub> para produzir energia pode reduzir a tonelada de CO<sub>2eq</sub> lançado para a atmosfera (IPCC, 2013). Além disso, é possível adquirir e comercializar certificados de redução de emissão de GEEs (RCE) para aumentar a atratividade econômica dessa tecnologia (GARCILASSO *et al.*, 2008b).

---

<sup>1</sup> DBO<sub>5</sub> removida: medida do consumo de oxigênio em ensaios de laboratório para estimar atividade biológica durante a degradação da matéria orgânica presente no esgoto sanitário.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho apresenta uma abordagem de estudo de caso e foi organizado em duas etapas: 1) estimativa da produção de metano e da energia disponibilizada pela ETE Santa Quitéria; 2) cálculo de emissão evitada de GEEs.

#### 3.1 Caracterização do Local de Estudo

A ETE Santa Quitéria está localizada no Bairro Campo Comprido (Curitiba), nas coordenadas 25°27'46"S e 49°19'14"W, e ocupa uma área de 10.000 m<sup>2</sup>. A estação atende cerca de 190.000 habitantes e sua configuração é composta por tratamento preliminar (remoção de sólidos grosseiros – lixo e areia), tratamento secundário (remoção de carga orgânica), linhas de coleta e tratamento do lodo e espuma e de saída de biogás<sup>2</sup>, como ilustra a Figura 2.

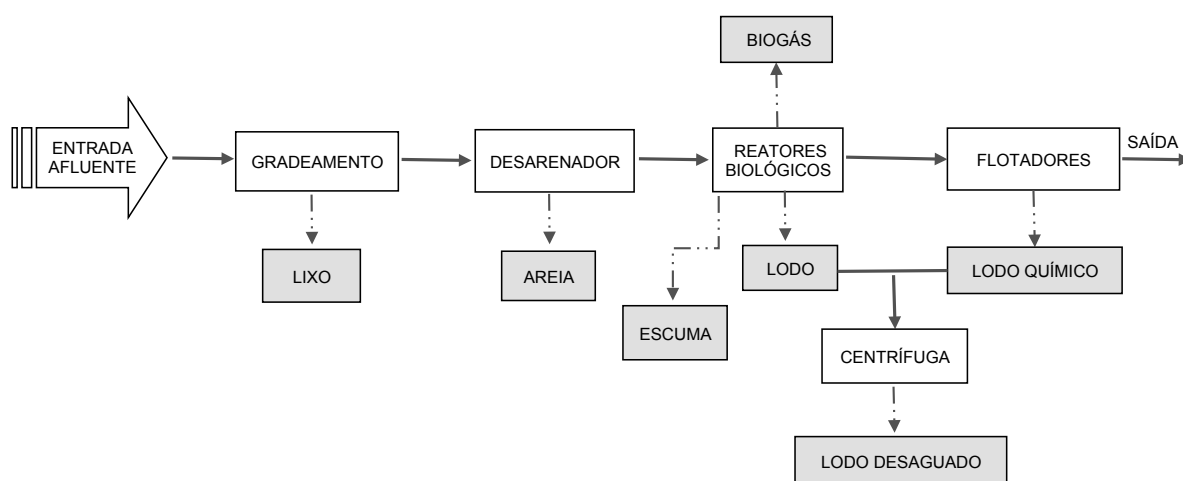


Figura 2. Fluxograma da ETE Santa Quitéria. Fonte: Autor.

#### 3.2 Metodologia Adotada

A produção de metano foi estimada a partir do relatório de monitoramento de vazão (afluente), DQO (afluente e efluente) e temperatura ambiente entre os meses de Agosto/2012 a Março/2013. Os dados foram disponibilizados pela Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Nos cálculos de produção de metano e estimativa de geração de energia foram adotadas as metodologias descritas por Lobato (2011) e Zilotti (2012), já a emissão de metano evitada foi determinada pelo método IPCC (2006), como mostra a Tabela 1.

<sup>2</sup> Informações fornecidas pela Sanepar.

Tabela 1. Equações utilizadas nos cálculos de produção de metano, geração de energia e emissão de metano evitada.

PARÂMETROS	EQUAÇÕES	VARIÁVEIS
DQO convertida em biomassa	$DQO_{Lodo} = DQO_{Remov} \cdot Y$ (Equação 1)	$DQO_{Lodo}$ : DQO convertida em biomassa (kgDQO <sub>Lodo</sub> /d) $DQO_{Remov}$ : DQO removida do afluente (kgDQO <sub>Remov</sub> /d) $Y$ : Coeficiente de produção de sólidos (kgDQO <sub>Lodo</sub> /kgDQO <sub>Remov</sub> )
DQO utilizada na redução de sulfato	$DQO_{SO4} = CO_{SO4-Conv} \cdot K_{DQO-SO4}$ (Equação 2)	$DQO_{SO4}$ : DQO utilizada por bactérias redutoras de SO <sub>4</sub> (kgDQO <sub>SO4</sub> /d) $CO_{SO4-Conv}$ : Concentração de SO <sub>4</sub> convertido em sulfeto (kgSO <sub>4</sub> /d) $K_{DQO-SO4}$ : DQO consumida na redução de sulfato (kgDQO <sub>SO4</sub> /kgSO <sub>4</sub> )
Sulfato convertido em sulfeto	$CO_{SO4-Conv} = Q_{Média} \cdot C_{SO4} \cdot Ef_{SO4}$ (Equação 3)	$Q_{Média}$ : Vazão média de esgoto afluente (m <sup>3</sup> /d) $C_{SO4}$ : Concentração de SO <sub>4</sub> no afluente (kgSO <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> ) $Ef_{SO4}$ : Eficiência de redução de sulfato (%)
DQO convertida em CH <sub>4</sub>	$DQO_{CH4} = DQO_{Remov} - DQO_{Lodo} - DQO_{SO4}$ (Equação 4)	$DQO_{CH4}$ : DQO convertida em CH <sub>4</sub> (kgDQO <sub>CH4</sub> /d) $DQO_{SO4}$ : DQO utilizada por bactérias redutoras de SO <sub>4</sub> (kgDQO <sub>SO4</sub> /d)
	$Q_{CH4} = \frac{DQO_{CH4} \cdot R \cdot (T + 273)}{P \cdot K_{DQO} \cdot 1000}$ (Equação 5)	$Q_{CH4}$ : Produção volumétrica máxima de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /d) $R$ : Constante dos gases (0,08206 atm.L.mol <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ) $T$ : Temperatura operacional do reator (°C) $P$ : Pressão atmosférica (atm) $K_{DQO}$ : DQO para 1 mol de metano (kgDQO <sub>CH4</sub> /mol)
Perdas de CH <sub>4</sub>	$Q_{W-CH4} = Q_{CH4} \cdot p_W$ (Equação 6)	$Q_{W-CH4}$ e $Q_{O-CH4}$ : Perdas de CH <sub>4</sub> na fase gasosa (m <sup>3</sup> /d)
	$Q_{O-CH4} = Q_{CH4} \cdot p_O$ (Equação 7)	$p_W$ e $p_O$ : Perdas de CH <sub>4</sub> na fase gasosa (%)
	$Q_{L-CH4} = \frac{Q_{Média} \cdot p_L \cdot f_{CH4} \cdot R \cdot (273 + T)}{P \cdot K_{DQO} \cdot 1000}$ (Equação 8)	$Q_{L-CH4}$ : Perda de CH <sub>4</sub> dissolvido no efluente (m <sup>3</sup> /d) $p_L$ : Perda de CH <sub>4</sub> dissolvido no efluente (kg/m <sup>3</sup> ) $f_{CH4}$ : Fator de conversão teórico de DQO em CH <sub>4</sub> (kgDQO/kgCH <sub>4</sub> )
Produção de CH <sub>4</sub>	$Q_{Real-CH4} = Q_{CH4} - Q_{W-CH4} - Q_{O-CH4} - Q_{L-CH4}$ (Equação 9)	$Q_{Real-CH4}$ : CH <sub>4</sub> disponível para recuperação de energia (m <sup>3</sup> /d)
Potência elétrica disponível	$PCI_D = PE_{CH4} \cdot PCI_{CH4} \cdot K$ (Equação 10)	$PCI_D$ : Poder calorífico inferior disponível do CH <sub>4</sub> (kWh/m <sup>3</sup> ) $PE_{CH4}$ : Peso específico do CH <sub>4</sub> (kg/Nm <sup>3</sup> ) $PCI_{CH4}$ : Poder calorífico inferior do CH <sub>4</sub> (kcal/kg)
	$PE = Q_{Real-CH4} \cdot PCI_D \cdot Ef$ (Equação 11)	$K$ : 4,19 kWh/3600 (fator de conversão de unidades) $PE$ : Potência elétrica disponibilizada pelo CH <sub>4</sub> (kWh/d) $Ef$ : Eficiência de conversão de máquinas térmicas (0,25)
Emissão de CH <sub>4</sub>	$E_{CH4} = F_E \cdot (DQO_{Remov} - DQO_{Lodo}) - R_{CH4}$ (Equação 12)	$E_{CH4}$ : Emissão de CH <sub>4</sub> (kgCH <sub>4</sub> /d) $F_E$ : Fator de emissão calculado (kgCH <sub>4</sub> /kgDQO <sub>Remov</sub> ) $R_{CH4}$ : CH <sub>4</sub> removido no aproveitamento energético (kgCH <sub>4</sub> /d)
Equação dos gases ideais	$P \cdot V = \frac{m \cdot R \cdot (T + 273)}{MM_{CH4}}$ (Equação 13)	$V$ : Volume de CH <sub>4</sub> (L); $m$ : Massa de CH <sub>4</sub> (kgCH <sub>4</sub> /d) $MM_{CH4}$ : Massa molar do CH <sub>4</sub> (16 g/mol)

Fonte: Adaptado de Lobato (2011), Zilotti (2012) e IPCC (2006).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Produção de metano e energia disponibilizada

Algumas variáveis necessárias para se estimar a produção de metano e o potencial energético disponibilizado por estações de tratamento de esgoto não são monitoradas pela ETE Santa Quitéria. Por essa razão, para essas variáveis foram adotados valores médios obtidos da literatura (Tabela 2).

Tabela 2. Variáveis não monitoradas pela ETE Santa Quitéria.

VARIÁVEIS	VALORES ADOTADOS <sup>(a)</sup>
Concentração de SO <sub>4</sub> no afluente (CO <sub>SO4</sub> )	0,06 kgSO <sub>4</sub> /m <sup>3</sup>
Eficiência de redução de sulfato (Ef <sub>SO4</sub> )	75,0%
Coefficiente de produção de sólidos (Y)	0,15 kgDQO <sub>Lodo</sub> /kgDQO <sub>Remov</sub>
Perda de CH <sub>4</sub> na fase gasosa (p <sub>W</sub> )	5,0%
Outras perdas de CH <sub>4</sub> na fase gasosa (p <sub>O</sub> )	5,0%
Perda de CH <sub>4</sub> dissolvido no efluente (p <sub>L</sub> )	0,020 kg/m <sup>3</sup>
DQO consumida na redução de sulfato (K <sub>DQO-SO4</sub> )	0,667 kgDQO <sub>SO4</sub> /kgSO <sub>4</sub>
DQO corresponde a 1 mol de metano (K <sub>DQO</sub> )	0,064 kgDQO <sub>CH4</sub> /mol
Fator de conversão teórico de DQO em CH <sub>4</sub> (f <sub>CH4</sub> )	4,0 kgDQO/kgCH <sub>4</sub>

<sup>(a)</sup> Valores obtidos a partir de estudos realizados por Lobato (2011).

As variáveis monitoradas pela ETE Santa Quitéria, e seus respectivos valores médios, são apresentados na Tabela 3. O cálculo de produção de metano e estimativa energética se baseia no levantamento de dados da estação de tratamento entre os meses de Agosto/2012 a Março/2013.

Tabela 3. Variáveis monitoradas pela ETE Santa Quitéria.

VARIÁVEIS	VALORES MEDIDOS <sup>(a)</sup>
Temperatura do reator biológico (T)	21,1 ± 2,1 °C
Pressão ambiente (P)	1,0 atm
Vazão média afluente (Q <sub>Média</sub> )	33.220,8 ± 3.896,6 m <sup>3</sup> /d
DQO média afluente – entrada (DQO <sub>e</sub> )	14.617,1 ± 4.508,1 kgDQO <sub>e</sub> /d
DQO média do efluente – saída (DQO <sub>s</sub> )	5.022,4 ± 1.410,1 kgDQO <sub>s</sub> /d

<sup>(a)</sup> Informações fornecidas pela Sanepar.

Utilizando-se as equações 1 a 11 (Tabela 1) e as informações indicadas nas Tabelas 2 e 3 foi possível calcular as variáveis requeridas na estimativa da produção de metano e da energia disponibilizada pela ETE Santa Quitéria.

A Tabela 4 mostra o resultado do cálculo das variáveis utilizadas nesta etapa da pesquisa. A parcela que corresponde à DQO removida ( $DQO_{Remov}$ ) no sistema de tratamento foi determinada subtraindo-se a DQO média efluente ( $DQO_s$ ) da DQO média afluyente ( $DQO_e$ ).

Tabela 4. Resultado das variáveis calculadas.

VARIÁVEL	VALOR OBTIDO <sup>(a)</sup>
DQO removida do afluyente ( $DQO_{Remov}$ )	9.594,7 kg $DQO_{Remov}/d$
DQO convertida em $CH_4$ ( $DQO_{CH_4}$ )	7.158,4 kg $DQO_{CH_4}/d$
Produção volumétrica máxima de $CH_4$ ( $Q_{CH_4}$ )	2.699,4 $m^3/d$
Perdas de $CH_4$ na fase gasosa ( $Q_{W-CH_4} + Q_{O-CH_4}$ )	270,0 $m^3/d$
Perda de $CH_4$ dissolvido no efluente ( $Q_{L-CH_4}$ )	1.002,2 $m^3/d$
Metano disponível para recuperação de energia ( $Q_{Real-CH_4}$ )	1.427,2 $m^3/d$
Poder calorífico inferior disponível do $CH_4$ ( $PCI_D$ )	6,48 kWh/ $m^3$ <sup>(b)</sup>
Potência elétrica disponível ( $P_E$ )	2.312,1 kWh/d

<sup>(a)</sup> Resultado da aplicação das equações indicadas na Tabela 1.

<sup>(b)</sup> Considerando 65% de  $CH_4$  no biogás:  $PE_{CH_4} = 1,1518 \text{ kg}/Nm^3$ ;  $PCI_{CH_4} = 4.831,1 \text{ kcal}/kg$ .

A eficiência média de remoção da matéria orgânica presente no esgoto bruto foi calculada em 65,6%, considerando-se os dados de monitoramento da estação. A partir do valor médio de DQO removida do afluyente de 9.594,7 kg  $DQO_{Remov}/d$  foi possível estimar a produção de metano em 1.427,2  $m^3/d$  e o potencial de geração de energia elétrica na ETE Santa Quitéria em 70.326,4 kWh/mês.<sup>3</sup>

Para o cálculo do poder calorífico inferior disponibilizado pelo  $CH_4$  ( $PCI_D$ ) foi adotado 65% de metano no biogás (Zilotti, 2012). Todavia, quanto maior a parcela de metano, maior será a capacidade calorífica do biogás, e essa proporção dependerá sobretudo das condições operacionais da estação de tratamento e das características físico-químicas do esgoto afluyente (COELHO *et al.*, 2004; COSTA, 2006).

<sup>3</sup> Considerando-se: 1 mês = 30,4167 d (valor médio no período de 1 ano).

Uma vez que o aumento na parcela de metano na mistura gasosa resulta no aumento do poder calorífico inferior do CH<sub>4</sub> (PCI<sub>CH4</sub>), quanto maior a parcela de metano no biogás, maior será potência elétrica fornecida pela estação (P<sub>E</sub>). Sendo assim, se a parcela de CH<sub>4</sub> for elevada de 65% para 75%, o P<sub>E</sub> obtido passaria a 81.069,5 kWh/mês, o que representa um aumento de 15,3% na quantidade de energia disponibilizada pela estação.

#### 4.2 Consumo de energia

O consumo mensal de energia elétrica na ETE Santa Quitéria durante o período de investigação foi obtido a partir de dados fornecidos pela Sanepar (Tabela 5).

Tabela 5. Consumo mensal de energia elétrica na ETE Santa Quitéria.

ANO	MÊS	ENERGIA CONSUMIDA (kWh/mês)
2012	Agosto	108.877
	Setembro	124.969
	Outubro	156.994
	Novembro	113.245
	Dezembro	70.689
2013	Janeiro	115.022
	Fevereiro	111.050
	Março	82.395
Valor médio :		110.405 ± 26.122 kWh/mês <sup>(a)</sup>

<sup>(a)</sup> Considerando-se: 1 mês = 30,4167 d (valor médio no período de 1 ano).

Visto que a potência elétrica média disponibilizada pela ETE Santa Quitéria foi estimada em 70.326,4 kWh/mês (65% de metano no biogás) e que o consumo médio mensal de energia na ETE foi medido em 110.405 kWh/mês, é possível concluir que a energia proveniente do metano gerado na estação corresponde a aproximadamente 63% do consumo médio mensal da unidade.

Esse valor representa uma redução significativa na demanda externa de energia elétrica para o funcionamento das instalações da ETE Santa Quitéria, resultando em um benefício econômico direto para a companhia de saneamento.

### 4.3 Emissão de metano evitada

Para calcular a emissão de metano evitada na ETE Santa Quitéria com o aproveitamento energético do biogás foram utilizadas as equações 1 e 12 da Tabela 1 e os dados apresentados nas Tabelas 3 e 4. O resultado dos cálculos das variáveis consideradas neste estudo está indicado na Tabela 6.

Tabela 6. Resultado das variáveis calculadas.

VARIÁVEL	VALOR OBTIDO <sup>(a)</sup>
Fator de emissão ( $F_E$ )	0,19 kgCH <sub>4</sub> /kgDQO <sub>Remov</sub>
DQO convertida em biomassa (DQO <sub>Lodo</sub> )	1.439,2 kgDQO <sub>Lodo</sub> /d
CH <sub>4</sub> removido no aproveitamento energético ( $R_{CH_4}$ teórico)	1.789,6 kgCH <sub>4</sub> /d
CH <sub>4</sub> removido no aproveitamento energético ( $R_{CH_4}$ calculado)	946,2 kgCH <sub>4</sub> /d
Emissão total de CH <sub>4</sub> ( $E_{CH_4}$ sem recuperação do biogás)	1.549,5 kgCH <sub>4</sub> /d
Emissão total de CH <sub>4</sub> ( $E_{CH_4}$ com recuperação do biogás)	603,3 kgCH <sub>4</sub> /d

<sup>(a)</sup> Resultado da aplicação das equações indicadas na Tabela 1.

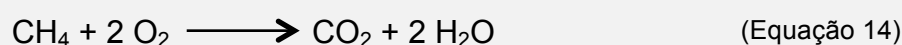
O fator de emissão ( $F_E$ ) foi calculado a partir da produção mássica máxima de metano ( $Q_{CH_4}$  em kg/d) dividida pela DQO removida no tratamento (DQO<sub>Remov</sub>/d). O valor obtido para  $F_E$  é coerente com o que outros trabalhos têm reportado na literatura (0,19 a 0,22 kgCH<sub>4</sub>/kgDQO<sub>Remov</sub>) (Metcalf & Eddy, 2003; Lobato, 2011; Zinotti, 2012).

Para calcular a parcela de metano removido no aproveitamento energético do biogás ( $R_{CH_4}$  teórico) foi utilizada a equação dos gases ideais (equação 13), considerando-se:  $P = 1$  atm (pressão ambiente);  $V = 2.699,4$  m<sup>3</sup> (produção volumétrica teórica máxima de CH<sub>4</sub> em 1 dia,  $Q_{CH_4}$ );  $MM_{CH_4} = 16$  g/mol (massa molecular do CH<sub>4</sub>);  $R = 0,08206$  atm.L/mol.K (constante dos gases);  $T = 21,1^\circ\text{C}$  (temperatura operacional do reator biológico).

Ao substituir o volume correspondente a  $Q_{CH_4}$  (valor teórico) por  $Q_{Real-CH_4}$  (valor real calculado) na equação 13 verificou-se que a emissão efetivamente evitada de metano pela implantação do sistema de recuperação do biogás na ETE Santa Quitéria seria de 946,2 kgCH<sub>4</sub>/d ( $R_{CH_4}$  calculado), portanto, cerca de 52,9% menor que o valor teórico. Essa diferença se deve às perdas de metano na fase líquida e gasosa, bem como a parcela consumida na conversão do sulfato em sulfeto durante o tratamento, as quais não são consideradas no cálculo de  $R_{CH_4}$  teórico. Dessa forma, o  $R_{CH_4}$  calculado fornece uma resposta mais precisa.

Os resultados obtidos mostram que a recuperação do biogás pode reduzir a emissão total de metano ( $E_{CH_4}$ ) de 1.549,5 kgCH<sub>4</sub>/d para 603,3 kgCH<sub>4</sub>/d na ETE Santa Quitéria (cerca de 220,2 tonCH<sub>4</sub> evitado por ano).

Porém, pela estequiometria da reação de combustão do CH<sub>4</sub> (equação 14) é possível observar que 16 gCH<sub>4</sub>/mol são consumidos enquanto 44 gCO<sub>2</sub>/mol são liberados. Com isso, estima-se que a queima de 942,6 kgCH<sub>4</sub>/d ( $R_{CH_4}$  real calculado) resulte na formação de 2.602,0 kgCO<sub>2</sub>/d.



Sabendo-se que o Potencial de Aquecimento Global (PAG) do CH<sub>4</sub> é 21 vezes o valor do CO<sub>2</sub>, tem-se que a massa correspondente à emissão evitada de metano ( $R_{CH_4}$  real calculado) seria igual a 19.794,6 kgCO<sub>2 eq</sub>/d. Subtraindo-se desse valor a massa de CO<sub>2</sub> formada na reação de combustão do CH<sub>4</sub> (equação 14), tem-se que a redução estimada na emissão de GEEs seria de 17.192,6 kgCO<sub>2 eq</sub>/d ou 522,9 tonCO<sub>2 eq</sub> evitada por mês com a recuperação do biogás.

Assim, o aproveitamento do biogás na ETE Santa Quitéria representa um benefício ambiental efetivo, vindo de encontro às diretrizes estabelecidas pela Política Nacional de Mudanças do Clima (Lei 12.187/2009) para a mitigação de emissões de GEEs decorrentes do processo biológico de decomposição da matéria orgânica presente no esgoto bruto.

## 5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que:

- A produção média de metano disponível para o aproveitamento energético na ETE Santa Quitéria foi estimada em 1.427,2 m<sup>3</sup>/d.
- O potencial de geração de energia elétrica na ETE Santa Quitéria foi calculado em 70.326,4 kWh/mês. Esse valor representa cerca de 63% da demanda média de energia elétrica mensal na estação entre os meses de Agosto/2012 e Março/2013.



- A recuperação do biogás nessa estação de tratamento pode reduzir a emissão total de metano ( $E_{CH_4}$ ) de 1.549,5 kgCH<sub>4</sub>/d para 603,3 kgCH<sub>4</sub>/d, considerando-se o fator de emissão de 0,19 kgCH<sub>4</sub>/kgDQO<sub>Remov</sub> calculado a partir de dados de monitoramento da ETE Santa Quitéria.
- Com a recuperação do biogás estima-se a redução de 17.192,6 kgCO<sub>2</sub> eq/d ou 522,9 tonCO<sub>2</sub> eq evitada por mês na emissão de GEEs a partir do sistema de tratamento de esgoto utilizado na estação.
- Conclui-se, portanto, que o aproveitamento energético do biogás resulta em benefícios econômicos e ambientais diretos com a sua implantação na ETE Santa Quitéria.
- Finalmente, como recomendação para trabalhos futuros, são sugeridos estudos complementares para se determinar os equipamentos e os investimentos financeiros necessários, bem como verificar a infraestrutura requerida para a implantação dos dispositivos de aproveitamento energético do biogás na estação de tratamento em questão.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa n. 390, de 15 de dezembro de 2009. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2009390.pdf>> Acesso em: 24 mai. 2014.

BRASIL. Lei 9.074, de 07 de julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9074cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9074cons.htm)> Acesso em: 20 mai. 2014.

BRASIL. Lei 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9427cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9427cons.htm)> Acesso em: 20 mai. 2014.

BRASIL. Conselho Nacional de Meio Ambiente, Resolução 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução 357, de 17 de março de 2005.

Disponível em:

<<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>> Acesso em: 20 mai. 2014.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007, v.5, 380 p.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; MARTINS, O. S.; COSTA, D. F.; BASAGLIA, F.; BACIC, A. C. K. Instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto. In: ANAIS DO V ENCONTRO DE ENGENHARIA NO MEIO RURAL, 2004, Campinas.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; MARTINS, O. S.; ABREU, F. C. A Conversão da fonte renovável biogás em energia. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 2006, Brasília.

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

DENG, Y.; XU, J.; LIU, Y.; MANCL, K. Biogas as a sustainable energy source in China: Regional development strategy application and decision making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, China, v. 35, p. 294-303, 2014.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional, Ministério de Minas e Energia, 2013a. Disponível em <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2013.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf)> Acesso em: 24/05/2014.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Anuário de estatística de energia elétrica, Ministério de Minas e Energia, 2013b. Disponível em <[http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf)> Acesso em: 24 mai. /2014.

FARIA, R. A. P. **Avaliação do potencial de geração de biogás e de produção de energia a partir da remoção da carga orgânica de uma estação de tratamento de esgoto – Estudo de caso.** 76 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2012.

FRANÇA Jr., A. T. **Análise do Aproveitamento Energético do Biogás Produzido numa Estação de Tratamento de Esgoto.** 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2008 .

GARCILASSO, V. P.; FIGUEIREDO, N. J. V.; COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S.G. Potencial de geração de energia elétrica e iluminação a gás por meio do aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário. **In:** VII CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 2008a, Fortaleza.

GARCILASSO, V. P.; FIGUEIREDO, N. J. V.; COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S.G. Biogás e o mercado de créditos de carbono. **In:** III RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 2008b, Rio de Janeiro.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** 2013. Disponível em: [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_ALL\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf) Acesso em: 08 jun. 2014.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Prepared by the National

Greenhouse Gas Inventories Programme. EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MIWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (Eds.). Published: IGES, Japan. 2006.

Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>>

Acesso em: 08 jun. 2014.

JIANG, X.; HAYASHI, J.; SUN, Z. Y.; YANG, L.; TANG, Y. Q.; OSHIBE, H.; OSAKA, N.; KIDA, K. Improving biogas production from protein-rich distillery wastewater by decreasing ammonia inhibition. **Process Biochemistry**, v. 48, p. 1778-1784, 2013.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 187 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2011.

METCALF e EDDY, Inc. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. Ed/revised by George Tchobanoglous, Franklin L., Burton H., David Stensel, New York: McGraw-Hill, 2003.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. Produto 6 – Resumo executivo. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), São Paulo, 2010. Disponível em:

<[http://www.mma.gov.br/estruturas/164/\\_publicacao/164\\_publicacao10012011033201.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf)> Acesso em: 08 mai. 2014.

SNIS. Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. Ministério das Cidades. **Diagnóstico dos serviços de água e esgoto**. 18º edição, 2012.

Disponível em:

<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=103> Acesso em: 24 mai. 2014.

VARNERO, M. T.; CARÚ, M. GALLEGUILLOS, K.; ACHONDO, P. Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. **Información Tecnológica**, v. 23, 2012, p. 31-40.

VENKATESCH, G.; ELMI, R. A. Economic–environmental analysis of handling biogas from sewage sludge digesters in WWTPs (wastewater treatment plants) for energy recovery: Case study of Bekkelaget WWTP in Oslo (Norway). **Energy**, v. 58, p. 220-235, 2013.

ZILOTTI, H. A. R. **Potencial de produção de biogás em uma Estação de tratamento de esgoto de cascavel para a geração de energia elétrica**. 52 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2012.