

## Estimativa do Potencial Energético a Partir da Digestão Anaeróbia da Vinhaça na Cidade de Araraquara (SP).<sup>1</sup>

Andressa Picionieri Bernal<sup>2</sup>, Ivan Felipe Silva dos Santos<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Graduanda em Engenharia Ambiental. Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá (MG). Email: andpbernal@hotmail.com.

<sup>3</sup> Engenheiro Hídrico e Mestrando em Engenharia de Energia. Instituto de Recursos Naturais. Universidade Federal de Itajubá (MG). Email: ivanfelpedeice@hotmail.com.

### RESUMO

O aproveitamento energético de resíduos é um dos temas que pode auxiliar a ampliação das energias renováveis no Brasil. Dentre os diversos tipos de resíduos, destaca-se a vinhaça, resíduo de alta carga orgânica resultante da indústria da cana, indústria de extrema importância para a economia Brasileira. Sendo assim, estudos relacionados à digestão anaeróbia da vinhaça para fins energéticos devem ser realizados e incentivados. Neste contexto, o presente artigo compreende a análise energética e de emissões evitadas que podem ser obtidas por meio da combustão do biogás produzido pela digestão anaeróbia da vinhaça resultante do uso da cana plantada na cidade de Araraquara (SP), em diversos cenários. Os resultados obtidos demonstram que a energia produzida por tal aproveitamento pode chegar a 50 [GWh/ano] e as emissões evitadas podem superar 5600 [tCO<sub>2</sub>/ano], o que comprova os benefícios ambientais e energéticos que podem ser obtidos por tal forma de geração.

**Palavras-chave:** vinhaça, biogás, energia elétrica e emissões evitadas.

## ABSTRACT

Energy recovery from waste is one of the themes that can assist the expansion of renewable energy in Brazil. Among the various types of waste, there is vinasse, a residue of a high organic load resulting from the sugarcane industry, a very important industry to the Brazilian economy. Thus, studies related to the anaerobic digestion of vinasse for energy purposes should be conducted and encouraged. In this context, this article includes energy analysis and avoided emissions that can be achieved through the combustion of the biogas produced by anaerobic digestion of vinasse resulting from the use of sugarcane planted in the city of Araraquara (SP), in various scenarios. The results obtained show that energy produced by such use can reach 50 [GWh/year] and avoided emissions may exceed 5600 [tCO<sub>2</sub>/year], which proves the environmental and energy benefits that can be obtained by such power generation method.

**Keywords:** vinasse, biogas, electricity and avoided emissions.

### 1. Introdução

A cultura da cana de açúcar é um dos ramos mais importantes do agronegócio brasileiro. Segundo o BNDES e o CGEE (2008), a cultura da cana de açúcar é o terceiro cultivo mais importante em superfície ocupada, ficando atrás somente do milho e da soja. Segundo Carvalho (2007), em 2006 foram plantados 6,3 milhões de hectares, colhidos 5,4 milhões e produzidos 425 milhões de toneladas. Tem-se as regiões Centro-Sul e Sudeste com maior produção (em torno de 85%), sendo o estado de São Paulo destaque, com aproximadamente 60% da produção total. Os principais usos da cana são: produção de açúcar e etanol.

A classificação das usinas brasileiras é dada por três tipos de instalações: as usinas de açúcar (as quais produzem somente açúcar), as usinas de açúcar com destilarias anexas (produzem açúcar e etanol) e as destilarias autônomas (produzem somente o etanol). As usinas de açúcar com destilarias anexas são a maioria, cerca de 60% do total, enquanto as autônomas preenchem 35% do montante e o restante é dado pelas unidades de processamento de açúcar.

Um dos principais subprodutos da indústria sucroalcooleira é a vinhaça. Almança (1994) define a vinhaça como o principal resíduo líquido produzido em

destilarias de aguardente e de álcool autônomas ou anexas às usinas de açúcar quando é feita a separação do etanol do mosto fermentado. Ainda segundo o mesmo autor essa é composta por uma suspensão aquosa de sólidos orgânicos e minerais, contendo componentes do vinho não arrastados na etapa de destilação, além de quantidades residuais de açúcar, álcool e componentes voláteis mais pesados.

Conforme VanHaandel (2003) *apud*. Rego e Hernández (2006), para produção de cada metro cúbico de álcool pelo processo convencional, são necessárias 13 toneladas de cana de açúcar. Segundo Silva e Silva (2012), para cada 1 litro de álcool produzido, também são produzidos de 10 a 15 litros de vinhaça, que equivale ao potencial poluidor da produção de esgoto de aproximadamente 17 pessoas em um dia.

Devido a sua alta carga orgânica, a vinhaça requererá uma disposição final adequada. Dentre as diversas opções para redução da matéria orgânica desse resíduo está a digestão anaeróbia. Essa pode ser realizada em reatores ou biodigestores anaeróbios e resulta na produção de biogás, gás rico em metano ( $\text{CH}_4$ ) e, portanto, de elevado potencial energético.

Quanto maior a formação de metano, mais energia por unidade de massa o biogás contém. Há ainda dezenas de substâncias, como o gás sulfídrico, causador de mau cheiro, e traços de siloxinas, que reduzem a vida útil dos equipamentos de uso energético, e vapor d'água (Goldemberg, 2006).

A conversão energética do biogás pode ser realizada por meio de diversas alternativas, como motores a combustão interna, turbinas a gás e microturbinas a gás. A tabela 1 apresenta um resumo dos custos, emissões e eficiência destas tecnologias.

Quadro 1: Custo e rendimento das tecnologias de conversão energética. Fonte: Compilado pelo autor com base em: SSC (1997, *apud* Bove e Lunghi 2006), CETESB (2006), Pecora (2006), Carvalho et al. (2007), Capehart (2010) e Garcilasso e Vescovo (2012).

<b>Tecnologia</b>	<b>Custo [R\$/kW]*</b>	<b>Rendimento (%)</b>	<b>Emissões NO<sub>x</sub></b>	<b>Intervalo de potência</b>
Microturbinas a gás	2860 <sup>1</sup>	25	< 9 ppm	20 – 100 kW
Motores Ciclo Otto	1700 <sup>2,3</sup>	33	250 – 3000 ppm	30 kW – 20 MW
Turbinas a gás	3900 <sup>4</sup>	28	35 a 50 ppm	500 kW – 150 MW
Ciclo orgânico Rankine	3900 <sup>4</sup>	18	16 [uJ/kJ]	-

1 – Capehart (2010)  
2 – Valor corrigido para 2014 com base na calculadora do cidadão do banco Central do Brasil (2014).  
3 – CETESB (2006)  
4 - SSC (1997, *apud* Bove e Lunghi 2006)  
\* Como demonstram as referências os valores de custo apresentados foram obtidos em diferentes anos. Recomenda-se a conversão destes valores para valores monetários anuais, por meio de índices de correção de inflação, antes de se aplicar estes valores em cálculos. Foi considerado 1 US\$ = 2,6 R\$.

O presente trabalho apresenta uma estimativa do potencial de eletricidade passível de ser gerada na cidade de Araraquara (SP), por meio da combustão do biogás proveniente da digestão anaeróbia da vinhaça em duas tecnologias de conversão energética, a saber, motores de combustão interna e microturbinas a gás.

## **2. Metodologia**

### *2.1. Caracterização da cidade de Araraquara (SP)*

Araraquara é um município localizado na região central do estado de São Paulo. No setor agropecuário, possui destaque no cultivo de cana de açúcar e produção de açúcar e álcool, bem como no cultivo de laranja e produção de suco. A figura 1 a seguir apresenta a localização do município de Araraquara.

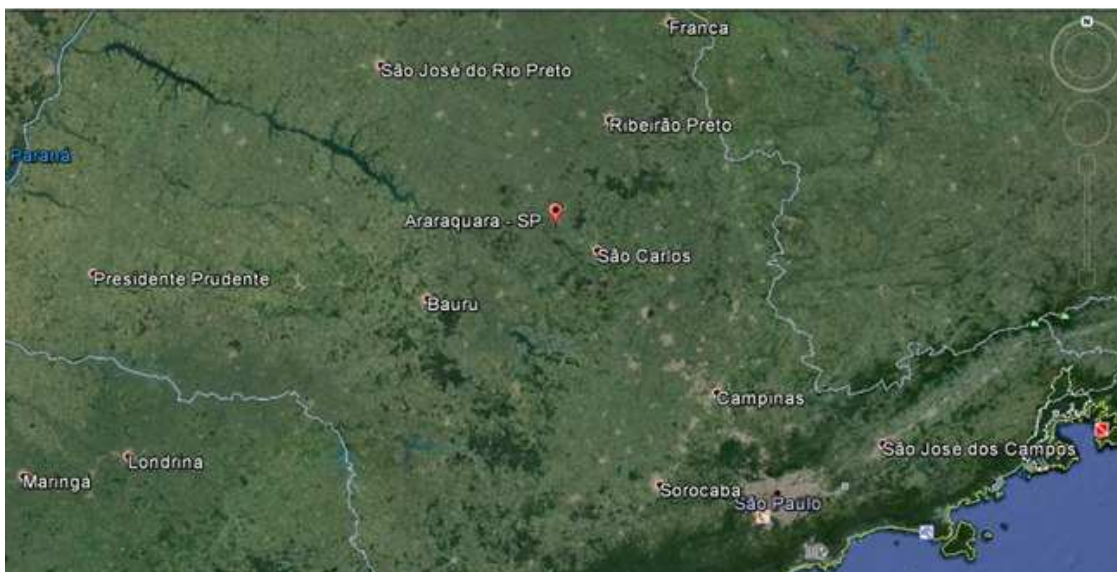


Figura 1: localização do município de Araraquara (SP).

Segundo o IBGE (2015), a população estimada em 2014 era de 224.304 mil habitantes. A área total que abrange o município é de 1003,625 km<sup>2</sup>. Dados de 2015 do INPE mostram que, na cidade, o total cultivado de cana-de-açúcar em 2013 foi de 49269 hectares, o que equivale a 492,69 km<sup>2</sup>. A cada ano a área cultivada sofre ampliação.

Através de um levantamento feito, a destinação da vinhaça gerada na cidade atualmente é a fertirrigação. A vinhaça é diluída em água e são adicionados outros nutrientes necessários, para então ser aplicada na própria lavoura de cana.

## 2.2. Metodologia para estimativa da geração de energia elétrica

A metodologia do presente trabalho foi efetuada no software Microsoft Excel® e se baseia na correlação entre a área de cana plantada ( $A_{cana}$ ) na cidade de Araraquara e a produção de vinhaça que seria gerada caso toda essa cana fosse sada em uma usina para geração de Etanol. Conforme demonstram as equações 1 e 2, da área de cana plantada pode-se obter o número de toneladas de cana produzida ( $t_{cana}$ ) por meio do índice de produtividade ( $I_c$  [tonelada de cana por ha]). Por meio dessa, pode-se utilizar a produção específica de vinhaça ( $I_v$  [litros de vinhaça/kg cana]) para se calcular o volume de vinhaça ( $V_{vinhaça}$ ).

$$t_{cana} = I_c \cdot A_{cana} \quad (1)$$

$$V_{vinhaça} = t_{cana} \cdot I_v \quad (2)$$

Sabendo o volume de vinhaça, a partir da carga de DQO típica destes resíduos pode-se calcular a carga de DQO total de todo volume de vinhaça ( $C_{DQO}$ ) (Equação 3). Pelo produto dessa com sua eficiência de tratamento ( $Ef$ ) em um reator anaeróbio, obtemos a carga total de DQO a ser removida pelo tratamento da vinhaça ( $C_{DQO\ removida}$ , Equação 4), parâmetro que pode ser relacionado com a produção de biogás específica ( $P_b$  [KgDQO/m<sup>3</sup> biogás], a fim de se calcular a vazão de metano no reator (equação 5). Por fim, a partir da vazão de biogás e considerando-se uma tecnologia de conversão energética de rendimento  $\eta$  pode se calcular a potência disponível e a energia gerada pela combustão deste biogás (Equações 6 e 7).

$$C_{DQO} = DQO_{típica} \cdot V_{vinhaça} \quad (3)$$

$$C_{DQO\ removida} = C_{DQO} \cdot Ef \quad (4)$$

$$Q_{biogás} = C_{DQO\ removida} \cdot P_b \quad (5)$$

$$P = Q_{biogás} \cdot PCI \cdot \eta \quad (6)$$

$$E = P \cdot t \quad (7)$$

Onde: PCI = Poder calorífico do biogás e t = tempo de operação anual da usina.

### 3. Resultados

Para estimativa da produção energética utilizou-se foram utilizadas as equações 1 a 7. Para estes cálculos foi necessário o levantamento de diversos dados na literatura, que estão apresentados no quadro 2.

Quadro 2: Dados necessários ao cálculo de energia

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Fonte</b>
Produtividade média de cana por unidade de área plantada no Brasil ( $I_c$ )	65 [t/ha]	Nova Cana (2010)
Produção de vinhaça por tonelada de cana processada	156 [l/ton] em destilarias anexas (Álcool e açúcar)	LORA (2000) <i>apud.</i> EMBRAPA (S/d)
	910 [l/ton] em destilarias autônomas (Somente álcool)	
$DQO_{\text{típica vinhaça}}$	10-65 [kg/m <sup>3</sup> ] – (Adotado 37.5 kg/m <sup>3</sup> )	Santos et al. (2011)
Eficiência de remoção de DQO ( $E_f$ )	74%	Média dos valores de eficiência dos reatores UASB mesofílicos levantados por Moraes et al. (2015)
Produção de biogás $P_b$	0,33 [l/gDQO]	Granato e Silva (2002)/Santos et al. (2011)
Percentual de metano no Biogás	60%	Valor médio – AEBIOM (2009)
Poder calorífico do biogás (Com 60% de metano)	21 [MJ/m <sup>3</sup> ]	Qasin (1998)
Horas anuais de geração de eletricidade (t)	8200	-

Os resultados foram calculados em dois cenários de tipo de destilaria (anexa e autônoma) e tecnologia de conversão energética, a saber, motores de combustão interna e microturbinas a gás. O quadro 3 apresenta e compara os resultados de volume de vinhaça, DQO removida e vazão de biogás obtidos nestes cenários.

Quadro 3: Resultados obtidos na destilaria anexa e autônoma

<b>Parâmetro</b>	<b>Destilaria autônoma</b>	<b>Destilaria anexa</b>
<b>Tonelada de cana produzida (<math>t_{cana}</math>)</b>	3,2 milhões de toneladas	3,2 milhões de toneladas
<b>Volume de vinhaça produzido (<math>V_{vinhaça}</math>)</b>	2,9 milhões de m <sup>3</sup>	0,5 milhões de m <sup>3</sup>
<b>Carga de DQO removida total</b>	81 Milhões de kg	18,7 Milhões de kg
<b>Volume de biogás produzido</b>	26,64 Milhões de m <sup>3</sup>	4,59 Milhões de m <sup>3</sup>

A partir dos resultados de vazão de biogás e dos rendimentos apresentados na tabela 1, foi possível o cálculo da potência passível de ser instalada bem como da energia produzida anualmente considerando-se duas tecnologias de conversão energética: microturbinas a gás e motores de combustão interna. Os resultados obtidos são apresentados no quadro 4. Pela análise desse, podemos observar que as microturbinas resultam em uma menor produção energética do que os motores de combustão de interna (devido ao seu menor rendimento de conversão energética). Além disto, como observamos no quadro, os custos das microturbinas a gás são bem mais elevados do que os dos motores (Por volta de 1000 R\$/kW a mais). A vantagem das microturbinas reside porém nas menores emissões de NOx, gás de impacto local sobre a saúde respiratória humana, que são, no mínimo, cerca de 30 vezes menores que as dos motores (quadro 1). Devido à maior produção de vinhaça, o potencial de produção energética nas destilarias autônomas é muito maior que nas anexas.

Quadro 4: Resultados de potência e energia obtidos na destilaria anexa e autônoma

<b>Parâmetro</b>	<b>Destilaria autônoma</b>	<b>Destilaria anexa</b>
<b>Potência – Motor de combustão interna</b>	5,9 [MW]	1 [MW]
<b>Energia produzida anualmente - Motor de combustão interna</b>	46,8 [GWh/ano]	8 [GWh/ano]
<b>Potência – Microturbinas a gás</b>	4,45 [MW]	0,77 [MW]
<b>Energia produzida anualmente - Microturbinas a gás</b>	34,5 [GWh/ano]	5,9 [GWh/ano]

Utilizando os valores de energia do quadro 4 e sabendo-se que energia produzida pela combustão do metano (um gás biogênico que pode ser considerado limpo) substituirá o consumo energético da eletricidade da rede pode se calcular as emissões de CO<sub>2</sub> evitadas em cada caso. Para tal foi necessário o uso do fator de emissão de eletricidade nacional, próximo a 0,12 [tCO<sub>2</sub>/MWh] (BEN, 2014). Os resultados estão apresentados no quadro 5.

Quadro 5: Resultados de potência e energia obtidos na destilaria anexa e autônoma

<b>Parâmetro</b>	<b>Destilaria autônoma</b>	<b>Destilaria anexa</b>
<b>Emissões evitadas – Motor de combustão interna</b>	5616 [tCO <sub>2</sub> /ano]	960 [tCO <sub>2</sub> /ano]
<b>Emissões evitadas – anualmente - Microturbinas a gás</b>	4140 [tCO <sub>2</sub> /ano]	707,7 [tCO <sub>2</sub> /ano]

#### 4. Conclusões

O presente trabalho avaliou o potencial energético e as emissões evitadas a partir de uma digestão anaeróbia da vinhaça produzida pela área de cana plantada na cidade de Araraquara (SP). O potencial energético resultante de tal geração é próximo a 40 [GWh/ano] em

destilarias autônomas e próximo a 6 [GWh/ano] em destilarias anexas (Sendo o potencial exato dependente da tecnologia de conversão energética adotada). As emissões evitadas deste aproveitamento podem chegar a 6000 toneladas de CO<sub>2</sub> somente na cidade de Araraquara, emissões que podem ser muito maiores se considerarmos as outras cidades produtoras de cana no Brasil, o que demonstra os benefícios ambientais da digestão anaeróbia da vinhaça para fins energéticos.

## 5. Referências

AEBIOM. European Biomass Association. A Biogas Road Map For Europe, 2009. Disponível em <[http://www.aebiom.org/IMG/pdf/Brochure\\_BiogasRoadmap\\_WEB.pdf](http://www.aebiom.org/IMG/pdf/Brochure_BiogasRoadmap_WEB.pdf)>. Acesso em: 6 fev. 2015.

BEN. Balanço Energético Nacional, 2014. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese2014.aspx>>. Acesso em: 10 mai. 2015.

BNDES & CGEE. Agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil. In: *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável*. Rio de Janeiro, BNDES, 2008. Disponível em: <<http://www.bioetanoldecana.org/pt/download/bioetanol.pdf>>. Acesso em: 6 fev. 2015.

BOVE, R. e LUNGHI, P. *Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies*. Energy Conversion and Management, V. 47, o. 1391-1401, 2006.

CAPEHART, L. WBDG. *Whole Building Design Guide*. Microturbines, 2010. U.S.A. National Institute of Building Sciences. Disponível em: <<http://www.wbdg.org/resources/microturbines.php>>. Acesso em: 6 fev. 2014.

CARVALHO, A.M. et al. *Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída*. Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – Citenel, 2007. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/citenel2007/pdf/it96.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2014.

CARVALHO, E. *Perspectivas da agroenergia*. São Paulo: Unica, 2007.

EMBRAPA. *Árvore do conhecimento: cana-de-açúcar*. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONT1.html>>. Acesso em: 26 fev. 2015.

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

GOLDEMBERG, J. *Biogás: Projetos e Pesquisas no Brasil*. CETESB / Secretaria do Meio Ambiente; Organização: Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer; Responsável Técnico: João Wagner Silva Alves; São Paulo, 2006, 184 p.

GRANATO, E. F.; SILVA, C. L. *Geração de energia elétrica a partir do resíduo vinhaça*. An. 4. Encontro Energia no Meio Rural, 2002.

IBGE. *Informações Completas – Araraquara*. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=350320&search=sao-paulo|araraquara|infograficos:-informacoes-completas>>. Acesso em: 9 mai. 2015.

INPE. *Monitoramento da cana-de-açúcar: dados do município de Araraquara*. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/cultivo.html>>. Acesso em: 09 mai. 2015.

MORAES, B. S.; ZAIAT, M.; BONOMI, A. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. *In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 44*, 2015.

NOVACANA. *A evolução da produtividade da cana-de-açúcar*. Disponível em: <<http://www.novacana.com/estudos/a-evolucao-da-produtividade-da-cana-de-acucar-160813/>>. Acesso em: 26 abr. 2015.

PECORA, V. *Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto residencial da USP – Um estudo de caso*. Dissertação (Mestrado). Programa de Internuidades, Universidade de São Paulo (USP), 153 p., 2006.

QASIN, S., R. *Wastewater Treatment Plants – Planninng design and operation*. 2.a ed. Lancaster, Pennsylvania, USA Technomic Publishing Company, 1999, 1107 p.

REGO, E. E.; HERNANDEZ, F. D. M. Eletricidade por digestão anaeróbia da vinhaça de cana-de-açúcar: contornos técnicos, econômicos e ambientais de uma opção. *In: Encontro de energia no meio rural*, 6., 2006, Campinas.

SANTOS, R. F. *et. al. Brazil's potential for generating electricity from biogas from stillage*. World Renewable Energy Congress. Linkoping, Sweden, 2011.

SCS Engineers. *Comparative analysis of landfill gas utilization technologies*. File No. 0293066, SCS Engineers, Washington, DC, 1997.

SILVA, R. T.; SILVA, T. J. *Necessidades de P&D na Área Industrial em Vinhaça*. Universidade Federal do ABC, 2012.