

## USO DE BIOGÁS EM MÁQUINAS TÉRMICAS

Amanda Viana de Araújo<sup>1</sup>, Michael Feroldi<sup>1</sup> e Mateus Barbian Urio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Paraná – UFPR, Setor Palotina. Rua Pioneiro, nº 2153, Jardim Dallas, Palotina, PR. CEP: 85.950-000. E-mail: ntmamanda@gmail.com, michaelferoldi@gmail.com e mateusurio@gmail.com

*RESUMO: A busca por minimizar o uso de energias provenientes de fontes fósseis, além de mitigar os eventos causados pelas elevadas emissões de gases de efeito estufa, colocam em evidência novas fontes de energia, tais como o biogás. O biogás é constituído basicamente de metano e dióxido de carbono, sendo produto da biodigestão anaeróbica de diversos resíduos rurais, agroindustriais, urbanos, dentre outros. A aplicação deste para geração de energia pode ser realizada de várias formas, por combustão direta, combustão interna, utilização em turbinas e micro-turbinas, das quais podem se obter várias formas de energia, como elétrica, térmica, luminosa e mecânica. Todavia, os principais gargalos relacionados a utilização do biogás sem dúvida são processos de purificação, que visam a remoção de gás sulfídrico (corrosivo) e dióxido de carbono (gás abafante), e o seu armazenamento. Neste sentido objetivou-se neste trabalho abordar as principais aplicações do biogás em máquinas térmicas.*

*PALAVRAS-CHAVE: biocombustíveis, biometano, geração de energia.*

## USE OF BIOGAS IN THERMAL MACHINES

*ABSTRACT: In the search for minimize the use of energy from fossil sources, as well as mitigate the events caused by higher greenhouse gas emissions, has been emphasized new energy sources such as biogas. Biogas consists primarily of methane and carbon dioxide, being the product of anaerobic biodigestion of several rural agro-industrial residues, urban, among others. The application of power generation can be accomplished in several ways, by direct combustion, internal combustion, in turbines and microturbines, from which they may obtain various forms of energy, such as thermal, electrical, light and mechanics. However, the main bottlenecks related to use of biogas are undoubtedly purification processes, aimed at the removal of hydrogen sulfide gas (corrosive) and carbon dioxide (gas abafante), and its storage. In this sense, the objective in this paper address the main applications of biogas in thermal machines.*

*KEY WORDS: biofuels, biomethane, power generation.*

## INTRODUÇÃO

A instabilidade do preço do petróleo e seus derivados, sobretudo em tempos de crise, faz com que governos adotem medidas de incentivo ao desenvolvimento de tecnologias e produção de energia alternativa, como os biocombustíveis. Dentre eles, destaca-se o biogás, pois além de propiciar a geração distribuída de energia, também mostra-se viável no tratamento de resíduos urbanos, rurais e agroindustriais (Barros et al., 2014).

Conforme Coldebella et al. (2008), a região Oeste do Paraná destaca-se das demais pela alta geração de efluentes de agroindústrias e de esterco de bovinos, suínos e aves, resíduos com potencial para produção de biogás, via biodigestão anaeróbia. A partir disto, o biogás obtido, composto majoritariamente por metano ( $\text{CH}_4$ ), cujo poder calorífico varia entre 5.000 a 7.000 kcal (Deganutti et al., 2002), pode ser utilizado para obtenção de diversas formas de energia como elétrica, térmica ou mecânica (Coldebella et al., 2006).

A utilização de biogás em motores de combustão interna é reportada há bastante tempo na literatura. Oliveira e Nogueira (1984) indicam este tipo de uso durante a 2ª Guerra Mundial e segundo Pires (2009) há mais de 40 anos esta tecnologia também é utilizada em Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR).

Segundo Souza et al. (2010), o emprego do biogás, no acionamento de motores estacionários, é considerado prático, simples e, provavelmente, econômico frente os combustíveis convencionais.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi abordar as principais aplicabilidades do uso do biogás em máquinas térmicas para obtenção de diversas formas de energia, apontando também os principais entraves tecnológicos.

## BIOGÁS

Segundo Pires (2009) o biogás é uma mistura de gases produzidos pela decomposição natural de matéria orgânica por micro-organismos em anaerobiose. Sua composição varia de acordo com a matriz orgânica, e segundo Nogueira (1986) e CETESB (2014), a composição média é retratada na Tabela 1.

**Tabela 1** – Composição média do Biogás em percentual de volume

<b>Composição</b>	<b>Nogueira (1986)</b>	<b>CETESB (2014)</b>
Metano ( $\text{CH}_4$ )	55-75%	50-70%
Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )	25-45%	25-50%
Nitrogênio ( $\text{N}_2$ )	0-3%	0-7%
Hidrogênio ( $\text{H}_2$ )	0-2%	0-1%
Gás Sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0-1%	0-3%

O biogás possui baixa densidade energética devido à alta presença de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), considerado abafante, além de baixa velocidade de chama ( $25 \text{ cm.s}^{-1}$ ) e temperatura de

autoignição (650 °C) se comparado a outros combustíveis como hidrogênio e gás natural (Raju, 2001).

Costa (2006) afirma que o biogás pode ser utilizado de diferentes maneiras, e, dependendo da aplicação, demanda purificação ou não contra H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> e umidade, processo o qual influenciará em sua capacidade de compressão, seu poder calorífico e corrosividade.

O poder calorífico do biogás pode chegar até 11.661,02 kcal.kg<sup>-1</sup> se com um grau de purificação extremamente alto, em torno de 99% CH<sub>4</sub> e 0,1% CO<sub>2</sub>, garantindo semelhança com o gás natural combustível (Iannicelli, 2008). Segundo Ross et al. (1996), biogás com 65% de metano equivale a 0,6 m<sup>3</sup> de gás natural, conforme a Tabela 2.

**Tabela 2** – Equivalência energética de 1 m<sup>3</sup> de biogás a 65% de metano

<b>Combustível</b>	<b>Unidade</b>	<b>Equivalência</b>
Gás Natural	m <sup>3</sup>	0,600
Propano	L	0,882
Butano	L	0,789
Gasolina	L	0,628
Carvão Betuminoso	kg	0,455
Lenha	kg	1,602

Fonte: Ross et al. (1996).

## PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

Para utilizar o biogás como combustível em motores de combustão interna é necessário que sejam removidos o gás carbônico e o gás sulfídrico (Coelho, 2006). A purificação do biogás é importante porque por ser corrosivo, o gás sulfídrico deteriora motores, e por outro lado, a remoção do gás carbônico aumenta o poder calorífico, uma vez que mantém armazenada maior densidade de biogás concomitantemente a diminuída presença de gás abafante presente (Oliveira, 2009).

Diversas técnicas de purificação do biogás são empregadas principalmente para a remoção de H<sub>2</sub>S, a partir de processos químicos, Fe/EDTA (Frare, 2006; Barba et al., 2013), físicos (Chou et al., 1986; Truong e Abatzoglou, 2005; Yuan e Bandosz, 2007) e microbiológicos (Chung et al., 2007; Ho et al., 2008; Ramírez et al., 2011; Ramos et al., 2013).

Da mesma maneira, CO<sub>2</sub> também pode ser removido principalmente a partir de processos microbiológicos (Strevett et al., 1995; Kao et al., 2012), separação criogênica

(Persson, 2003; Hagen et al., 2001), adsorção (Jönsson, 2004) e absorção (Persson, 2003; Håkansson, 2006; Tynell et al., 2007), a fim de aumentar o poder calorífico do biogás.

## COMBUSTÃO DIRETA

Dentre as formas de recuperação de energia do biogás, a combustão direta é a considerada mais simples e utilizada mais comumente quando o equipamento que consumirá o biogás encontra-se próximo a fonte geradora (Lobato, 2011).

Dentre elas destacam-se caldeiras, utilizadas, sobretudo para produção de vapor para processos agroindustriais, secadores térmicos de grãos e fornos de ar forçado para aquecimento de instalações rurais de produção animal.

Caldeiras baseiam-se na transferência do calor da combustão, de biomassa vegetal ou gás natural, para água, ou outro fluido contido em um sistema fechado sem contato direto. Segundo Colorado et al. (2010), a utilização de gás natural em caldeiras pode ser facilmente substituída pelo biogás, uma vez que este biocombustível apresenta eficiência na geração de energia e perdas de energia, através dos produtos da combustão (chaminé), bastante semelhantes aos dados obtidos com gás natural. Cabe ressaltar que neste estudo o gás natural empregado continha aproximadamente 97% CH<sub>4</sub>, já o biogás possuía uma composição de 60% CH<sub>4</sub> e 40% CO<sub>2</sub>, o que favorece ainda mais a utilização do biogás *in natura*.

A utilização de caldeiras para a combustão direta do biogás, além de produzir vapor para processos agroindustriais, podem ser utilizadas para o próprio aquecimento do biodigestor, quando se tem o controle de temperatura e a eficiência de conversão energética destes equipamentos, quando alimentados com biogás, variam em torno de 75-85% de eficiência de conversão (Krich et al., 2005).

Muito semelhante à utilização em caldeiras, é a utilização em fornos de ar forçado e secadores de grãos, onde se tem uma câmara de combustão e o calor gerado nesta aquece uma massa de ar, sem contato direto. Esta massa de ar pode ser conduzida tanto para a secagem de grãos, como para aquecimento de berçários de suínos ou mesmo na produção de aves de corte, caracterizando assim uma forma de geração de energia distribuída (Krich et al., 2005).

Por outro lado, ao considerar o menor poder calorífico, a baixa pressão do armazenamento do biogás (quando armazenado) e a baixa velocidade de combustão (Amestoy et al., 1987), em alguns casos, se faz necessários algumas adaptações como aumento da vazão

de gás e sistemas de *backup* com um combustível auxiliar em casos de flutuações da concentração de metano no biogás (Salomon, 2007).

O grande empecilho da utilização do biogás diretamente em caldeiras ou fornos ainda é a alta presença de  $H_2S$ , que implica em problemas de corrosão e consequentemente na diminuição da vida útil do equipamento, e umidade e  $CO_2$  que causam diminuição do poder calorífico (Hosseini e Wahid, 2013). Tais obstáculos podem ser evitados com a utilização de revestimentos ou materiais resistentes a corrosão (Lobato, 2011) e instalação de purgadores e linhas de condensação para diminuição da umidade (Salomon, 2007). Contudo, etapas de pré-purificação geram custo extra, fazendo-se necessário um estudo de viabilidade econômica, caso a caso.

### COMBUSTÃO INTERNA – CICLO OTTO

O ciclo termodinâmico que tem por característica a combustão interna a partir de ignição por centelha é denominado de ciclo Otto (Figueiredo et al., 2013). Estes motores operam em quatro tempos, ou seja, inicialmente há a entrada da mistura ar/combustível (admissão), depois ocorre a compressão desta mistura em câmara fechada, seguida de sua ignição, gerada por centelha elétrica, e por fim, a saída dos gases de combustão (Andrade, 2007).

Huang e Crookes (1998) utilizaram motor de ciclo Otto para avaliar seu desempenho com a alimentação de biogás sintético simulando diversas proporções de metano e  $CO_2$  e observaram que a melhor taxa de compressão foi de 13:1, sendo que em taxa 15:1 ou superior houve detonação.

Porém Ortiz-Canavate e colaboradores já afirmavam em 1988 que não é recomendável que a taxa de compressão seja superior a 12:1, pelo fato de que a composição do biogás se torna variável, o que também leva à detonação.

Crookes (2006), relata que a utilização de taxas de compressão entre 11:1 e 13:1, para motores com ignição por centelha, diminui as emissões específicas de  $NO_x$ , concentrando o  $CO_2$  presente no biogás. Além disto, ocorre o aumento das emissões específicas de hidrocarbonetos não queimados.

Motores de ignição por centelha devem oferecer alta compressão interna para promover a combustão do biogás, isto ocorre devido ao seu alto índice de antidetonação (Porpatham et al., 2013).

## COMBUSTÃO INTERNA – CICLO DIESEL

Nos motores de ciclo diesel, o ar é aspirado para a câmara de combustão e comprimido de forma atinja alta pressão e temperatura, em seguida o combustível é injetado no momento que a compressão do ar está em seu ponto máximo. A alta temperatura do ar gerada pela alta pressão no interior do cilindro faz com que o combustível seja inflamado e ocorra a combustão, movimentando o pistão com a expansão da câmara (Penido Filho, 1996).

Segundo Brenneisen (2013), os motores de ciclo Diesel podem ser de dois e quatro tempos. No motor de dois tempos, ocorre um giro completo do virabrequim ou dois cursos do pistão, enquanto que no motor de quatro tempos (admissão, compressão, combustão e escape), ocorrem dois giros completos do virabrequim, ou quatro cursos do pistão.

A otolização é um processo pelo qual o biogás é introduzido a motores de ciclo Diesel. Para sua realização, remove-se a parte de injeção do diesel e adiciona-se em seu lugar um sistema de carburação do gás ao ar de admissão e a ignição é realizada por centelha ao invés das velas. Além disto, é necessário realizar alterações nos cabeçotes dos motores para que a taxa de compressão seja adequada, uma vez que motores de ciclo Otto possuem taxas de compressão inferiores aos motores de ciclo Diesel, 11:1 e 19:1, respectivamente. Todavia, neste processo ocorre muita perda energética (Pereira et al., 2005; Brenneisen, 2013).

## COMBUSTÃO INTERNA – MOTORES BICOMBUSTÍVEIS

Motores bicombustíveis são denominados motores que trabalham com a utilização de dois combustíveis simultaneamente, sejam eles gasosos ou líquidos (Lacour et al., 2012). A utilização de biogás em motores bicombustíveis vem sendo estudada há vários anos, sendo seus principais problemas, a presença de gases inertes como CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> (Kobayashi et al., 2007).

Tippayawong e colaboradores (2007) estudaram a substituição de 10% de diesel por biogás com composição média de 65% de metano em motor Mitsubishi DI-800/1995 adaptado com um misturador venturi para a incorporação do metano na entrada de ar. Tal estudo evidenciou um aumento de 7% na potência em relação à operação sem a incorporação do diesel. Ao realizar um teste de 2.000 h, não foram evidenciados desgastes e alterações significativas na potência e eficiência energética, sobretudo pela realização de um tratamento prévio de umidade e compostos sulfídricos altamente corrosivos.

Rakopoulos et al. (2009) investigaram a eficiência térmica, com base na Segunda Lei da Termodinâmica para ciclos fechados, de motores à ignição por centelha, e observaram que a introdução de 15% de hidrogênio no biogás respondeu por uma eficiência de 42,41%, a qual era de 40,85% sem a adição do mesmo. Além disto, a adição de hidrogênio provoca uma diminuição na emissão de gases como CO e CO<sub>2</sub> (Akansu et al., 2007).

## **ENERGIA ELÉTRICA**

A energia elétrica ocorre por meio do fornecimento de energia mecânica a turbinas e motores que, por sua vez, são acoplados a geradores elétricos, convertendo-o em energia (Avellar, 2001).

A transformação da energia mecânica e térmica em elétrica, quando associada à outra fonte é conhecido como cogeração. A eficiência de conversão é reduzida para motor-gerador, aproveitando tanto na forma de calor quanto de eletricidade (Coldebella, 2006). Combinar a produção de calor e eletricidade proporciona um melhor aproveitamento da energia térmica (Marques, 2011).

Segundo o decreto-lei n.º 185/95 a cogeração é definida como “o processo de produção combinada de energia elétrica e térmica, destinando-se ambas a consumo próprio ou de terceiros, com respeito pelas condições previstas na lei”.

Em geral, a classificação dos sistemas de cogeração é determinada pela máquina térmica que possui. As máquinas térmicas mais utilizadas englobam motores tradicionais, como o de explosão ou compressão interna; turbinas, gás ou vapor; e microturbinas (Castro, 2009).

## **TURBINAS À VAPOR**

Os ciclos de cogeração com turbinas a vapor utilizam como base o ciclo Rankine, isto porque a energia inicialmente perdida, ou seja, que seria descarregada no ambiente, é reutilizada (Barja, 2006).

A principal característica do ciclo Rankine consiste em sua combustão, que é externa ao fluido de trabalho (água na maioria das vezes). Nesta combustão, a matéria-prima pode ser de fonte sólida, líquida ou gasosa, como o biogás (Shapiro e Moran, 2007).

Antes de entrar na caldeira, a água deve ser pré-aquecida para que ocorra a mudança de fases, passando da líquida para vapor, em alta pressão. Na sequência, a água é direcionada ao desgaseificador, na qual é aquecida em temperatura próxima aos 105 °C, para ser bombeada para a caldeira. Ocorre então, a troca de massas entre o combustível e o vapor, fazendo com o vapor sobreaqueça-se. Ao entrar na turbina, o vapor expande, acionando-as e a energia do vapor é transformada em energia mecânica. Após gerar trabalho na turbina, o vapor, em baixa pressão, é direcionado ao condensador para retornar à sua fase líquida para reiniciar o ciclo (Brandão, 2004; Martinelli, 2002).

### **TURBINAS À GÁS**

As turbinas a gás possuem baixo custo de manutenção, alta flexibilidade e confiabilidade e não apresentam complexidade (Todd, 1989; Bohn e Lepers, 2003). Ela é conhecida principalmente por ser mais ambientalmente correta, isto ocorre porque as turbinas a gás diminuem a poluição do ar e reduzem o efeito estufa (Najjar, 2000).

A cogeração com turbina a gás ocorre por combustão interna, com combustíveis em seu estado líquido, sólido e/ou gasoso, podendo estes serem substituídos por biogás. As turbinas a gás funcionam com fluido de trabalho em estado gasoso, por isso a denominação “Turbina a gás”. O ar é sugado, por um compressor, de forma contínua e sofre processo de compressão em alta pressão. Posteriormente é direcionado à câmara de combustão para, junto com o combustível, sofrer combustão e gerar um fluxo contínuo de ar de elevada temperatura e energia. Este fluxo é direcionado à turbina expandindo-se e gerando energia, por meio do acionamento do compressor de ar e do dispositivo mecânico, geralmente um gerador elétrico (Colotta et al., 2010; Brandão, 2004).

A produção de vapor ocorre após a troca de energia da água e os gases que percorrem, separadamente, entre os tubos de uma caldeira. O vapor poderá ser produzido dentro de padrões estabelecidos pelo condutor do procedimento (Fernandes e Camargo, 2010).

### **TURBINAS DE CICLO COMBINADO**

Com o objetivo de aumentar o rendimento da produção, o ciclo combinado é utilizado, isto porque ele é realizado a partir da combinação de dois ou mais ciclos. É considerado de alta eficiência (Colotta et al., 2010; Leo et al., 2003). O princípio deste é semelhante ao ciclo



anteriormente citado, já que consiste no aproveitamento do subproduto de uma geração primária (Triana et al., 2008).

Para utilização do ciclo combinado para geração de energia elétrica a turbina pode ser a gás ou a vapor (Azevedo, 2001). Após queimar o combustível, a energia presente nos gases que foram liberados produz vapor em uma caldeira de recuperação, este por sua vez aciona uma turbina a vapor de condensação. Em ambos os casos, vapor ou gás, é possível acionar geradores capazes de produzir energia elétrica, sendo esta a única forma de gerar energia neste sistema (Costa, 2006).

A combinação mais utilizada está associada ao arranjo do ciclo de Brayton e o Ciclo de Rankine, obedecendo a esta ordem. Os gases de exaustão da turbina saem com temperatura de aproximadamente 550 °C, e são direcionados a uma caldeira do ciclo a vapor, procedimento que aumenta o rendimento elétrico quando comparado ao mesmo se fosse realizado separadamente (Siqueira, 2012; Colotta et al., 2010; Farmer, 1992).

Os gases gerados no momento da queima do combustível, acionam diretamente a turbina a gás conectada a um gerador. Primeiramente ocorre a admissão do ar na entrada do compressor, que devido à alta razão de compressão possui elevada temperatura. Na sequência, há a mistura do ar ao combustível em uma câmara de combustão que geram trabalho no eixo do grupo turbina-gerador (Breeze, 2005).

Segundo Strapasson e Fagá (2003), o emprego do ciclo combinado de cogeração ocorre principalmente quando há a necessidade de maximizar a produção de energia elétrica em relação ao calor do processo. Como há um grande custo de implantação é recomendado que sejam realizados projetos de viabilização.

Quando o objetivo é gerar energia elétrica e energia térmica, também é utilizado a cogeração com ciclo combinado. Neste sistema, há a flexibilização de energia elétrica e térmica (geralmente, vapor) por meio da extração de vapor na turbina a vapor, condensação parcial, queima suplementar de combustível na caldeira de recuperação (Costa, 2006).

Segundo Conha e colaboradores (2009), os ciclos de cogeração de combustão interna utilizam de motores de combustão interna a fim de produzir energia elétrica ou acionamento mecânico através da recuperação da energia térmica residual dos gases de exaustão, e em algumas vezes, o calor resultante do sistema lubrificante do resfriamento das camisas dos pistões.

Turbinas de ciclo combinado possuem construção compacta e podem ser alimentadas com combustíveis líquidos e gasosos. Elevada eficiência em ciclos simples e um fator de disponibilidade adequado (Barja, 2006). Em geral, esta forma de cogeração é empregada

quando forem demandadas pequenas quantidades de calor a temperaturas moderadas e elevadas quantidades de energia elétrica (Azevedo, 2001).

A utilização do biogás nos processos internos da propriedade diminui o custo com energia elétrica, apresentando maior vantagem, principalmente quando comparado com o gás natural ou quando ocorre a compra da concessionária (Avellar et al., 2000). O mesmo autor cita que o tempo necessário para acabar com o custo do investimento é de pouco mais de 7 anos, para o gás natural, e de pouco mais de 3 anos com a utilização do biogás, mesmo com a necessidade de purificar o biogás.

Kang e colaboradores (2014), em estudos com a utilização de biogás como combustível para ciclo combinado/turbina a gás (5 MW), observou que o uso de biogás em ciclo combinado gera 22% a mais de eletricidade, além disto, o tempo de retorno é menor (13%) e o valor líquido é superior (34%). Isto ocorre quando comparado com a geração de turbinas a gás separadamente.

## MICROTURBINAS

As microturbinas apresentam a vantagem de emitirem baixa concentração de poluentes, possibilitando seu uso sem que se faça necessário o tratamento de gases de escape. Estas operam com combustíveis gasosos, como por exemplo, gás natural, propano e o biogás, este último, combustível de grande interesse por ser considerada uma fonte alternativa de energia renovável. Entretanto, podem operar com combustíveis líquidos, desde que estes sejam leves (Costa, 2006).

As microturbinas a gás são projetadas, em sua grande maioria, para funcionamento com gás natural, para utilização do biogás faz-se necessário algumas modificações, dentre elas, ajuste do sistema de injetores, válvulas e distribuidores de combustíveis (Dolak e Armstrong, 2005; Kataoka et al., 2007; Yang et al., 2009). Porém, há no mercado, algumas microturbinas adaptadas ao baixo aquecimento de combustíveis gasosos, dentre eles o biogás (Bruno et al., 2005).

O funcionamento da microturbina consiste na utilização da energia gerada pela turbina para mover o compressor, ligados por um único eixo girante. Este compressor faz com que o ar seja direcionado para a câmara de combustão, no qual há a formação de uma mistura de ar comprimido e combustível, alimentando a combustão continuamente. O gás formado encontra-se em elevada temperatura e pressurizado, expandindo-se na turbina e transformando

a energia térmica em energia mecânica. Ao mesmo eixo, conecta-se o gerador elétrico (Bona e Filho, 2004).

As microturbinas a gás e os motores de combustão interna de ciclo Otto são as tecnologias mais utilizadas para este tipo de conversão energética, porém, a utilização de microturbinas ainda apresenta custos elevados e seu tempo de vida útil operando com biogás ainda é baixo (Souza et al., 2004). Porém, mesmo com eficiências baixas, em torno de 28%, quando operadas em sistema de cogeração, sua eficiência pode chegar a 80% (Hamilton, 2003).

Nikpey et al. (2013), em estudos comparativos da utilização de gás natural e biogás em turbinas a gás, observaram que quando utiliza-se biogás em microturbinas a gás (100 kW), há aumento no consumo de biogás, isto ocorre, segundo o autor, devido ao baixo poder calorífico deste combustível quando comparado ao gás natural.

## CONCLUSÃO

A partir dos estudos abordados neste trabalho, observou-se que a utilização de biogás em máquinas térmicas pode se tornar uma ferramenta de geração de energia distribuída, sobretudo quando utilizado no próprio local onde é produzido, colaborando ao mesmo tempo com a geração de energia barata e com o tratamento de diversos tipos de resíduos.

## REFERÊNCIAS

AKANSU, S. O.; KAHRAMAN, N.; ÇEPER, B. Experimental study on a spark ignition engine fuelled by methane–hydrogen mixtures, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 32, n. 17, p. 4279-4284, 2007.

AMESTOY, E. A.; FERREYRA, R. D. Utilización del biogas. **In: FAO SEMINARIO INTERNACIONAL DE BIODIGESTION ANAEROBIA**, 1987. Montevideo. **Anais Comisión de Agroenergia**, 1987. 63 p.

ANDRADE, G. S. da. **Avaliação Experimental da Duração de Combustão para Diferentes Combustíveis, em um Motor Padrão Ciclo Otto ASTM-CFR**. 2007. 132p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

AVELLAR, L. H. N. **A Valorização dos Sub-produtos Agroindustriais visando Cogeração e a Redução da Poluição Ambiental**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2001.

AVELLAR, L. H. N.; CARROCCI, L. R.; SILVEIRA, J. L. A utilização de subprodutos agro-industriais na geração de energia em unidades co-geradoras. **Revista Biotecnologia Ciência & Desenvolvimento**, n. 13, 2000.

AZEVEDO, J. L. T. **Apontamentos sobre cogeração**. Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico. Lisboa, 2001.

BARBA, D.; PALMA, V.; CIAMBELLI, P. Screening of catalysts for H<sub>2</sub>S abatement from biogas to feed molten carbonate fuel cells. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 1, p. 328-335, 2013.

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 2006. 157p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

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

BOHN, D.; LEPPERS, J. Effects of biogas combustion on the operation characteristics and pollutant emissions of a micro gas turbine. In: ASME TURBO ESPO CT2003-38767, 1, 2003, Atlanta. **Anais**. Atlanta: ASME, 11p.

BONA, F. S.; FILHO, E. R. As microturbinas e a geração distribuída. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2004, Campinas. **Anais**. Campinas: UNICAMP, 10p.

BRANDÃO, S. S. **Produção e Planeamento de Energia Elétrica**. Departamento de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores. Universidade de Coimbra. 2004.

BREEZE, P. **Power generation technologies**. Great Britain: Elsevier, 2005. 288p.

BRENNEISEN, P. J. **Desempenho de motogerador de ciclo diesel operando com gás de gaseificação/diesel ou biogás/diesel**. 2013. 54p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2013.

BRUNO, J. C.; VALERO, A.; CORONAS, A. Performance analysis of combined microgas turbines and gas fired water/LiBr absorption chillers with post-combustion. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, n. 1, p. 87-99, 2005.

CASTRO, R. M. G. **Introdução à cogeração**. Energias Renováveis e Produção Descentralizada. Universidade Técnica de Lisboa. DEEC/Área Científica de Energia, Ed. 2, 2009.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Definição de Biogás**. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Biog%C3%A1s/17-Defini%C3%A7%C3%A3o>, acesso em 07/07/2014.

CHOU, T. C.; LIN, T. Y.; HWANG, B. J.; WANG, C. C. Selective removal of H<sub>2</sub>S from biogas by a packed silica-gel adsorber tower. **Biotechnology Progress**, v. 2, n. 4, p. 203-209, 1986.

CHUNG, Y.-C.; HO, K.-L.; TSENG, C.-P. Two-stage biofilter for effective NH<sub>3</sub> removal from waste gases containing high concentrations of H<sub>2</sub>S. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 57, n. 3, p. 337-347, 2007.

COELHO, S. T. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando um grupo gerador de 18 kW. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 2006, Brasília. **Anais**. Brasília: UnB, 12p.

COLDEBELLA, A.; SOUZA, S. N. M.; FERRI, P.; KOLLING, E. M. Viabilidade da geração de energia elétrica através de um motor gerador utilizando biogás da suinocultura. **Informe Gepec**, v. 12, n. 2, p. 44-55, 2008.

COLDEBELLA, A.; SOUZA, S. N. M.; SOUZA, J.; KOHELER, A. C. Viabilidade da cogeração de energia elétrica com biogás da bonivocultura de leite. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2006, Campinas. **Anais**. Campinas: UNICAMP, 9p.

COLORADO, A. F.; HERRERA, B. A.; AMELL, A. A. Performance of a Flameless combustion furnace using biogas and natural gas. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 7, p. 2442-2449, 2010.

COLOTTA, G. S.; LOARTE, J. P.; ATUNCAR, C. Q. Ahorro del gas de Camisea por uso de un ciclo de potencia combinado de gas y vapor en la generacion eléctrica. **Industrial data**, v. 13, n. 1, p. 94-98, 2010.

CONHA, A. A.; ANDALAFI, A. CH.; FARÍAS, O. F. Gasificación de carbón para generación de energía eléctrica: análisis con valoración de opciones reales. **Revista chilena de ingeniería**, v. 17, n. 3, p. 347-359, 2009.

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

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

CROOKES, R. Comparative bio-fuel performance in internal combustion engines. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 5, p. 461-468, 2006.

Decreto-Lei 185. (27 de Julho de 1995). Diário da República Portuguesa, I Série-A: p 4802-4811.

DEGANUTTI, R.; PALHACI, M. C. J. P.; ROSSI, M.; TAVARES, B. R.; SANTOS, B. C. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2002, Campinas. **Anais**. Campinas: UNICAMP, 5p.

DOLAK, E. J.; ARMSTRONG, J. P. The correlation of IR microturbine combustion performance while burning diluted gaseous fuel supplied by a fuel mixing facility. In: ASME TURBO EXPO GT2005-68610, 2, 2005, Reno. **Anais**. Nevada: ASME, 7p.

FARMER, R. 227 MW frame 9FA will power Epon's 1.7 GW combined cycle. **Gas Turbine World**, p. 15-22, 1992.

FERNANDES, A. E.; CAMARGO, J. R.; Estudo de caso de um sistema de cogeração em uma indústria farmacêutica. **Revista Ciências Exatas**, v. 16, n. 2, p. 7-15, 2010.

FIGUEIREDO, F. L.; FERNANDES, F.; PETRUCCI, A. L.; FILHO, R. F.; MARSURA, M. Análise do desempenho de um grupo gerador de 50 kVA com motor MWM adaptado a ciclo Otto, alimentado com gás natural. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 34, n. 2, p. 145-154, 2013.

FRARE, L. M. **Estudos para implementação de uma planta de remoção de ácido sulfídrico de processos de produção de biogás**. 2006. 182p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

HAGEN, M.; POLMAN, E.; JENSEN, J.; MYKEN, A.; JÖNSSON, O.; DAHL, A. **Adding gas from biomass to the gas grid**. Report. Malmö, Sweden, 2001. 142p.

HÅKANSSON, A. **Preventing microbial growth on pall-rings when upgrading biogas using absorption with water wash**. Svenskt Gastekniskt Center, Malmö, Sweden. Rapport SGC, 166, 2006. 47p.

HO, K.-L.; CHUNG, Y.-C.; LIN, Y.-H.; TSENG, C.-P. Microbial populations analysis and field application of biofilter for the removal of volatile-sulfur compounds from swine wastewater treatment system. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, n. 5, p. 580–588, 2008.

HOSSEINI, S. E.; WAHID, M. A. Biogas utilization: Experimental investigation on biogas flameless combustion in lab-scale furnace. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 426-432, 2013.

HUANG, J.; CROOKES, R. J. Assessment of simulated biogás as a fuel for the spark ignition engine. **Fuel**, v. 77, n. 15, p. 1793-1801, 1998.

IANNICELLI, L. A. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira**. 2008. 84p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2008.

JÖNSSON, O. **Biogas upgrading and use as transport fuel**. Report. Swedish Gas Center, Malmö, Sweden, 2004. 5p.

KANG, J. Y.; KANG, D. W.; KIM, T. S.; HUR, K. B. Comparative economic analysis of gas turbine-based power generation and combined heat and power systems using biogas fuel. **Energy**, v. 67, p. 309-318, 2014.

KAO, C.-Y.; CHIU, S.-Y.; HUANG, T.-T.; DAI, L.; WANG, G.-H.; TSENG, C.-P. A mutant strain of microalga *Chlorella* sp. for the carbon dioxide capture from biogas. **Biomass and Bioenergy**, v. 36, p. 132-140, 2012.

KATAOKA, T.; NAKAJIMA, T.; NAKAGAWA, T.; HAMANO, N.; YUASA, S. Combustion characteristics of methane-CO<sub>2</sub> mixture and a microturbine cogeneration system utilized sewage digester gas. In: ASME TURBO EXPO GT2007-27351, 3, 2007, Montreal. **Anais**. Montreal: ASME, 10p.

KOBAYASHI, H.; HAGIWARA, H.; KANEKO, H.; OGAMI, Y. Effects of CO<sub>2</sub> dilution on turbulent premixed flames at high pressure and high temperature. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 31, p. 1451-1458, 2007.

KRICH, K.; AUGENSTEIN, D.; BATMALE, J. P. *et al.* **Biomethane from dairy waste: A sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California.** Califórnia: Clear Concepts, 2005. 282p.

LACOUR, S.; CHINESE, T.; ALKADEE, D.; PERILHON, C.; DESCOMBES, G. Energy and environmental balance of biogas for dual-fuel mobile applications, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 3, p. 1745-1753, 2012.

LEO, T. J.; GRANDE, I. P.; NOTARIO, P. P. Gas turbine turbocharged by a steam turbine: a gas turbine solution increasing combined power plant efficiency and power. **Applied Thermal Engineering**, v. 23, n. 15, p. 1913-1929, 2003.

LOBATO, L. C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico.** 2011. 184p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MARQUES, F. M. F. G. **Análise termo-económica no desenvolvimento de sistemas de cogeração de pequena escala para edifícios.** 2011. 105p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho, Braga, 2011.

MARTINELLI, L. C. **Máquinas Térmicas II.** Pinambi: DeTEC, 2002. 135p.

NAJJAR, Y. S. H. Efficient use of energy by utilizing gas turbine combined systems. **Applied Thermal Engineering**. v. 21, n. 4, p. 407-438, 2001.

NIKPEY, H.; ASSADI, M.; BREAUHAUS, P.; MORKVED, P. T. Experimental evaluation and ANN modeling of a recuperative micro gas turbine burning mixtures of natural gas and biogas. **Applied Energy**, v. 117, p. 30-41, 2014.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão – A alternativa energética.** São Paulo: Nobel, 1986. 93p.

OLIVEIRA, M. E.; NOGUEIRA, M. H. **Biogás: Uma energia de alternativa.** Lisboa. Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial. Departamento de energias renováveis, 1984.

OLIVEIRA, R. D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono.** 2009. 79p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

ORTIZ-CANAVATE, J.; BAADER, W.; AHLERS, R. Biogas as fuel for internal combustion engines. **American Society of Agricultural Engineers**, 1988. 14 p.

PENIDO FILHO, P. **Os motores de combustão interna.** Belo Horizonte: Lemi, 1996. 700p.

PEREIRA, R. H.; BRAGA, S. L.; BRAGA, C. V. M.; FREIRE, L. G. M. Geração distribuída de energia elétrica – aplicação de motores bicompostível diesel/gás natural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3, 2005, Salvador. **Anais.** Salvador: ABPG, 6p.

PERSSON, M. **Evaluation of upgrading techniques for biogas.** SvensktGastekniskt Center, Malmö, Sweden. Rapport SGC, 142, 2003. 69p.

- PIRES, A. F. F. E. **Contribuição para o estudo de avaliação do desempenho de um sistema de estabilização anaeróbia e utilização do gás produzido**. 2009. 123p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.
- PORPATHAM, E.; RAMESH, A.; NAGALINGAM, B. Effect of swirl on the performance and combustion of a biogas fuelled spark ignition engine. **Energy Conversion and Management**, v. 76, p. 463-471, 2013.
- RAJU, A. V. S. R. **Experimental investigations on the performance of a lean burn spark ignited gas engine**. Tese. I.C. Engines Lab, IIT Madras, Chennai, Índia, 2001.
- RAKOPOULOS, C.; MICHOS, C.; GIAKOUMIS, E. Thermodynamic analysis of SI engine operation on variable composition biogas-hydrogen blends using a quasi-dimensional, multi-zone combustion model. **SAE International Journal of Engines**, v. 2, n. 1, p. 880-910, 2009.
- RAMÍREZ, M.; FERNÁNDEZ, M.; GRANADA, C.; LE BORGNE, S.; GÓMEZ, J. M.; CANTERO, D. Biofiltration of reduced sulphur compounds and community analysis of sulphur-oxidizing bacteria. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 5, p. 4047-4053, 2011.
- RAMOS, I.; PÉREZ, R.; FDZ-POLANDO, M. Microaerobic desulphurisation unit: A new biological system for the removal of H<sub>2</sub>S from biogas. **Bioresource Technology**, v. 142, p. 633-640, 2013.
- ROSS, C. C.; DRAKE, T. J.; WALSH, J. L. **Handbook of biogas utilization**. 2<sup>a</sup> ed. Atlanta: U.S. Department of Energy, 1996.
- SALOMON, K. R. **Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade**. 2007. 219 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- SHAPIRO, M. J.; MORAN, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. São Paulo: LTC, 2007. 800p.
- SIQUEIRA, J. C. **Análise de técnicas para controle de energia elétrica para dados de alta frequência: aplicação à previsão de carga**. 2012. 88p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2012.
- SOUZA, R. G.; SILVA, F. M.; BASTOS, A.C. Desempenho de um conjunto motogerador adaptado a biogás. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 1, p. 190-195, 2010.
- SOUZA, S. N. M.; PEREIRA, W. C.; NOGUEIRA, C. E.; PAVAN, A. A.; SORDI, A. Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura. **Acta Scientiarum Technology**, v. 26, n. 2, p. 127-133, 2004.
- STRAPASSON, A. B.; FAGÁ, M. T. W. Impacto da qualidade energética da energia final no consumo de energia primária: caso gás natural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS, 2007, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: UFRJ, 6p.



STREVETT, K. A.; VIETH, R. F.; GRASSO, D. Chemo-autotrophic biogas purification for methane enrichment: mechanism and kinetics. **The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal**, v. 58, n. 1, p. 71-79, 1995.

TIPPAYAWONG, N.; PROMWUNGKWA, A.; RERKKRIANGKRAI, P. Long-term operation of a small biogas/diesel dual-fuel engine for on-farm electricity generation, **Biosystems Engineering**, v. 98, n. 1, p. 26-32, 2007.

TODD, D. M. GE combined cycle experience. In: GD TURBINE STATE-OF-THE-ART TECH SEMINAR, 33, 1989, USA. **Anais**. USA: 1989.

TRIANA, W. M.; GONZÁLEZ, J. A.; SALAZAR, J. C. R. Modelamiento dinámico del proceso de gas - turbina de combustión en una planta de ciclo combinado. **Energía y computación**, v. 16, n. 2, 2008.

TRUONG, L. V. A.; ABATZOGLOU, N. A H<sub>2</sub>S reactive adsorption process for the purification of biogas prior to its use as a bioenergy vector. **Biomass and Bioenergy** v. 29, n. 2, p. 142-151, 2005.

TYNELL, Å.; BÖRJESSON, G.; PERSSON, M. Microbial growth on pall rings: A problem when upgrading biogas with the water-wash absorption technique. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 141, n. 2-3, p. 299-319, 2007.

YANG, C. H.; LEE, C. C.; CHEN, C. H. System identification and performance improvement to a micro gas turbine applying biogas. **World Academy of Science, Engineering and Technology**. v. 3, n. 34, p. 254-258, 2009.

YUAN, W. X.; BANDOSZ, T. J. Removal of hydrogen sulphide from biogas on sludge derived adsorbents. **Fuel**, v. 86, n. 17-18, p. 2736-2746, 2007.