

**JULIANO DE SOUZA**

**DESEMPENHO ENERGÉTICO DE DIFERENTES MOTORES  
GERADORES EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE  
ENERGIA ELÉTRICA A BIOGÁS**

**CASCVEL  
PARANÁ - BRASIL  
FEVEREIRO, 2023**

**JULIANO DE SOUZA**

**DESEMPENHO ENERGÉTICO DE DIFERENTES MOTORES  
GERADORES EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE  
ENERGIA ELÉTRICA A BIOGÁS**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor do Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura.

Orientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza.

**CASCVEL  
PARANÁ - BRASIL  
FEVEREIRO, 2023**

## **DEDICATORIA**

Ao meu Pai Celso Gonçalves de Souza (in memoriam)

## AGRADECIMENTOS

À minha esposa Fernanda pelo apoio e incentivo na realização deste trabalho, desde a inscrição como candidato, até a defesa final.

À minha filha Julia e a minha enteada Manuela, que sempre apoiaram o " Pai e o Tio ".

A minha Mãe, mesmo de longe, sempre me mandando seguir em frente, por mais dificuldades que tivesse.

Ao Professor e amigo Samuel pela confiança dedicada, e o apoio incansável para que o trabalho fosse realizado da melhor forma possível.

Ao Professor e amigo Weimar pela ajuda em escrever o pré-projeto.

À Unioeste Instituição de ensino, bem como o seu corpo docente.

Aos proprietários das granjas onde os trabalhos foram realizados, estes foram essenciais para a realização dos ensaios.

A CAPES – Programa pró-equipamentos; ao CNPq – Programa de Auxílio a Pesquisadores – Taxa de bancada; ao FINEP – Programa CT-INFRA e a Fundação Araucária PR pelo auxílio financeiro.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Balanço da digestão anaeróbia da matéria orgânica	10
Figura 2	Biodigestor típico – tipo indiano	13
Figura 3	Biodigestor modelo lagoa coberta	14
Figura 4	Ciclo de operação de motor a ignição por centelha quatro tempos	21
Figura. 5	Ciclo padrão ar Otto	22
Figura. 6	Sistema de mistura num motor a gás/biogás	30
Figura. 7	Atuador eletrônico	33
Figura 8	(a) Pick – up magnético (b) Pick-up instalado	33
Figura 9	Sensor Lambda	34
Figura 10	Sistema de alimentação de gás combustível	34
Figura11	Fluxograma de uma planta SGE típica	38
Figura 12	Motor gerador a biogás e pontos de medição	39
Figura 13	Grupo motor gerador A	40
Figura 14	Grupo motor gerador B	42
Figura 15	Grupo motor gerador C	42
Figura 16	Grupo motor gerador D	45
Figura 17	Grupo motor gerador E	47
Figura 18	Medidor de vazão do biogás	52
Figura 19	Controlador do painel de comando do grupo gerador	54
Figura 20	Monitor de gás portátil	55
Figura 21	Analisador infralyt ELD	56
Figura 22	Consumo dos motores geradores ensaiados	61
Figura 23	Consumo específico dos motores geradores	63
Figura 24	Eficiência dos motores geradores	65
Figura 25	Emissões de CO nos motores geradores D, E A e B	74
Figura 26	Emissões de NO <sub>x</sub> nos motores geradores D, E, A e B	76
Figura 27	Emissões de HC nos motores geradores D, E, A e B	77
Figura 28	Emissões de CO <sub>2</sub> nos motores geradores D, E, B e A	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição típica do biogás	8
Tabela 2	Vantagens e desvantagens do sistema de tratamento anaeróbio	11
Tabela 3	Dados de dimensionamento do biodigestor lagoa coberta	15
Tabela 4	Características técnicas do motor gerador A – Máquina primária (Motor)	41
Tabela 5	Características técnicas do motor gerador A – Máquina secundária (gerador).	41
Tabela 6	Características técnicas do motor gerador B – Máquina primária (Motor)	43
Tabela 7	Características técnicas do motor gerador B – Máquina secundária (gerador)	43
Tabela 8	Características técnicas do motor gerador C – Máquina primária (Motor)	44
Tabela 9	Características técnicas do motor gerador C – Máquina secundária (gerador)	45
Tabela 10	Características técnicas do motor gerador D – Máquina primária (Motor)	46
Tabela 11	Características técnicas do motor gerador D – Máquina secundária (gerador)	47
Tabela12	Características técnicas do motor gerador E - Máquina primária (Motor)	48
Tabela13	Características técnicas do motor gerador E– Máquina secundária (gerador)	49
Tabela14	Combinações para Ponto (P), Lambda ( $\lambda$ ) e Carga (C)	41
Tabela 15	Características do transmissor de vazão	53
Tabela 16	Características do controlador (GC 600)	54
Tabela 17	Características do analisador de biogás GEM 5000	55
Tabela 18	Dados técnicos do medidor de combustão	56
Tabela 19	Concentrações médias de metano	59
Tabela 20	Consumo dos motores geradores	62

Tabela 21	Consumo específico dos motores geradores	64
Tabela 22	Eficiência dos motores geradores	65
Tabela 23	Equações de correlação ou tendência eficiência	66
Tabela 24	Eficiência dos motores geradores em função das cargas máxima (100%) e média (50%),	66
Tabela 25	Consumo de biogás nos motores geradores D e E variando carga e lambda	67
Tabela 26	Consumo de biogás nos motores geradores D e E variando carga e ponto	68
Tabela 27	Consumo específico de biogás nos motores geradores D e E variando carga e lambda	69
Tabela 28	Consumo específico de biogás nos motores geradores D e E variando carga e ponto	71
Tabela 29	Eficiência nos motores geradores D e E variando carga e lambda	72
Tabela 30	Eficiência nos motores geradores D e E variando carga e ponto	73

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	2
2.	HIPÓTESE E OBJETIVOS	4
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1	Geração Distribuída no Brasil	5
3.2	O Biocombustível Biogás	8
3.2.1	Composição do biogás	8
3.2.2	Digestão Anaeróbia	9
3.3	Biodigestores	12
3.3.1	Definição de biodigestor	12
3.3.2	Parâmetros associados a operação de biodigestores	15
3.3.3	Vantagens de um Biodigestor	18
3.3.4	Técnicas para implantação de biodigestores	18
3.3.5	Purificação do biogás com foco em geração de energia elétrica	19
3.4	Motores de combustão interna ignição por centelha	20
3.4.1	Definição de motores ciclo Otto	20
3.4.2	Desempenho de motores de combustão ignição por centelha	22
3.4.3	Parâmetros que influenciam os motores de ignição por centelha	27
3.5	Motor a ignição por centelha a biogás	30
3.6	Motor a biogás acoplado a gerador de eletricidade	32
3.6.1	Controlador de velocidade	32
3.6.2	Sistemas de controle da mistura ar combustível	33
3.7	Desempenho de sistemas de geração de energia com Biogás	35
4	MATERIAL E METODOS	37
4.1	PRIMEIRA ETAPA: AVALIAR O DESEMPENHO DE MOTORES GERADORES A BIOGÁS OPERANDO EM DIFERENTES CARGAS EM UNIDADE DE GERAÇÃO	38



	DISTRIBUIDA	
4.1.1	Descrição dos motores geradores avaliados	39
4.2	SEGUNDA ETAPA: AVALIAR O DESEMPENHO E EMISSÕES DE MOTORES GERADORES A BIOGÁS OPERANDO EM DIFERENTES CARGAS, PONTO DE IGNIÇÃO E RELAÇÃO AR COMBUSTÍVEL	49
4.3	COLETA DE DADOS - EQUIPAMENTOS	52
4.4	DESEMPENHO DOS MOTORES GERADORES	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1	Concentração de metano do biogás e poder calorífico inferior	59
5.2	Desempenho dos motores geradores – Etapa 1	60
5.3	Desempenho dos motores geradores D e E combinando-se as variáveis relação ar combustível ( $\lambda$ ), o ponto de ignição (P) e a carga (C) – Etapa 2	67
6	CONCLUSÃO	79
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80

# DESEMPENHO ENERGÉTICO DE DIFERENTES MOTORES GERADORES EM SISTEMAS DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA A BIOGÁS

## Resumo:

Estetrabalho aborda a avaliação de motores geradores de eletricidade a biogás destinado a geração distribuída de eletricidade no meio rural. Foram estudados diferentes motores geradores (MG) com o objetivo de definir a melhor configuração de MG para uma unidade de geração distribuída em propriedade de criação de suínos onde há disponibilidade de biogás produzido em biodigestores *plug flow* (fluxo pistão) resultante do tratamento dos resíduos. Foram avaliados cinco (05) motores a biogás, sendo três (03) deles produzidos pela empresa Biogás Motores Estacionários LTDA (BIOGÁS) e os outros dois (02) por outras empresas. Foram obtidos o consumo específico, eficiência dos cinco (05) cinco MG e as emissões de (04) quatro MG, basicamente os gases NO<sub>x</sub>, HC, CO e CO<sub>2</sub>, variando-se a carga do MG (em kW), de um valor mínimo até um valor máximo compatível para cada máquina. Para(02) dois MG produzidos pela BIOGÁS, motor D e E, foram determinados o desempenho dos mesmos variando-se a carga (C), o avanço de ignição (P) e relação ar combustível ( $\lambda$ ). Para isso foram medidos o consumo de biogás nos motores geradores, a geração de eletricidade no gerador e a concentração de metano no biogás. Como resultados observou-se que o motor de maior eficiência foi o motor de tecnologia alemã, com eficiência de 27% na carga máxima (75 kW), devido a tecnologia de combustão mais avançada. Dentre os MG produzidos pela BIOGÁS, o motor D apresentou a melhor eficiência, 21%. Por outro lado, o motor E, também produzido pela BIOGÁS, apresentou eficiência um pouco menor que o motor D, 19% na carga máxima (50 kW). Além de emitir menos HC, CO<sub>2</sub> e CO comparado aos demais, já com relação ao NO<sub>x</sub> ele emite mais que o motor D. Por outro lado concluiu-se que o motor E seria o melhor, pois seu custo capital é menor que o motor D e pode operar em plantas com menor disponibilidade de biogás na carga máxima em propriedades de suínos em terminação, com engorda de até 4000 suínos.

**Palavras-chave:** Biogas, Energia, Eficiência

## **ENERGY PERFORMANCE OF DIFFERENT GENERATOR MOTORS IN DISTRIBUTED ELECTRIC POWER BIOGAS GENERATION SYSTEMS**

This work addresses the evaluation of biogas electricity generator engines for distributed electricity generation in rural areas. Different generator engines (MG) were studied in order to define the best MG configuration for a distributed generation unit in a swine farm where there is availability of biogas produced in plug flow biodigesters (piston flow) resulting from waste treatment. Five (05) biogas engines were evaluated, three (03) of which were produced by the company Biogás Motores Estacionários LTDA (BIOGÁS) and the other two (02) by other companies. The specific consumption, efficiency of the five (05) MG and the emissions of (04) four MG were obtained, basically NO<sub>x</sub>, HC, CO and CO<sub>2</sub> gases, varying the load of the MG (in kW), of a value minimum to a maximum compatible value for each machine. For (02) two MG produced by BIOGÁS, engine D and E, their performance was determined by varying the load (C), the ignition advance (P) and the air-fuel ratio ( $\lambda$ ). For this, the consumption of biogas in the generator engines, the generation of electricity in the generator and the concentration of methane in the biogas were measured. As a result, it was observed that the engine with the highest efficiency was the German technology engine, with an efficiency of 27% at maximum load (75 kW), due to the most advanced combustion technology. Among the MG produced by BIOGÁS, the D engine had the best efficiency, 21%. On the other hand, engine E, also produced by BIOGÁS, showed slightly lower efficiency than engine D, 19% at maximum load (50 kW). In addition to emitting less HC, CO<sub>2</sub> and CO compared to the others, in terms of NO<sub>x</sub> it emits more than engine D. On the other hand, it was concluded that engine E would be the best, as its capital cost is lower than engine D and it can operate in plants with less biogas availability at maximum load in finishing pig farms, with fattening up to 5000 pigs.

**Keywords:** Biogas; energy; efficien

## 1. INTRODUÇÃO

Uma das maiores fontes de energia disponíveis na área rural e agroindústrias é a biomassa. A mesma aparece na forma de resíduos vegetais e animais, tais como restos de colheita, esterco animal, plantações energéticas, efluentes agroindustriais, resíduos de serrarias e outros. As vantagens da biomassa como fonte energética, do ponto de vista socioambiental, são inúmeras.

A biomassa é uma forma de energia, a qual pode ser utilizada como mecanismo promotor do desenvolvimento nas áreas rurais. O uso da biomassa como fonte alternativa de energia tem destaque, pois é uma fonte de energia menos intermitente, quando comparada a eólica e a solar, e por apresentar um “balanço nulo” de CO<sub>2</sub>, ou seja, o CO<sub>2</sub> emitido na queima da biomassa é reabsorvido no próximo ciclo de vida da planta, pelo processo da fotossíntese (FAAIJ, 2006; AVCIOGLU et al. 2019).

Os resíduos animais e vegetais disponíveis nas propriedades rurais ou agroindústrias podem ser utilizados para geração de eletricidade, por meio da queima direta em caldeiras de alta pressão para produção de vapor e geração de eletricidade em turbinas a vapor, como por exemplo, o bagaço de cana, o qual vem aplicando seu espaço na geração distribuída de eletricidade. Uma outra forma de aproveitamento de resíduos para geração de eletricidade é a conversão de matéria orgânica (vegetal ou animal) em biogás por meio da digestão anaeróbia nos chamados biodigestores. Sendo que o biogás pode ser utilizado em motores geradores de eletricidade (KHIARI et al., 2019, HUANG et al., 2019).

O biogás, composto de 40-70% de metano, é produzido por meio da biodigestão de resíduos de biomassa. Este processo é desencadeado pela ação de microrganismos na ausência de oxigênio, sendo dividido em três fases: Hidrólise, acidogênese e metanogênese.

Os resíduos animais há alguns anos atrás eram despejados em rios e mananciais, sem preocupação com os impactos ambientais resultantes, mas atualmente, por pressão dos órgãos ambientais, cumprindo a legislação ambiental, devem passar por um tratamento preliminar antes de ser dispostos no ecossistema. Entretanto, estes dejetos animais, que constituem a biomassa animal, ao serem

dispostos em lagoas de tratamento produzem gás metano (CH<sub>4</sub>), o qual apresenta um potencial como gás estufa 21 vezes superior ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

Algumas propriedades no Brasil, com atividade de suinocultura, bovinocultura, fecularias e abatedouros de animais estão construindo biodigestores, especialmente o *pig flow*, modelo tubular ou pistão, o qual seria uma lagoa coberta com geomembrana em PEAD (0,8 a 1,25 mm de espessura), com o objetivo de produzir biogás para geração própria de energia em grupos motores geradores. Aproveitam também o biofertilizante para a fertirrigação de pastagens ou lavouras.

Na Região Oeste do Paraná onde, onde predominam as atividades de suinocultura, avicultura, bovinocultura, abatedouros e fecularias, estão sendo implantadas plantas de geração de eletricidade com biogás, as quais estão operando conectadas a rede no modo GD, Geração Distribuída, com o objetivo principal de suprir a demanda da propriedade rural e exportar para a rede operando em GD. A maioria dos motores utilizados são motores geradores com potência média de 115 kW, os quais são eram ciclo diesel e foram convertidos para gás (Ciclo otto), por meio da mudança de taxa de compressão, alteração do ponto e introdução de um sistema de injeção de biogás/ar

A geração de energia elétrica no Brasil com o uso do biogás, oriundo especialmente de aterros sanitários e resíduos agrícolas vem crescendo com o tempo. Dentre os fatores destacam-se:

- Lucros com a venda de energia elétrica para a concessionária local;
- Aumento das tarifas de energia elétrica estimulando a geração própria;
- Disponibilidade de resíduos animais na propriedade rural em grandes volumes, o que possibilita a instalação de biodigestores com produção de biogás e biofertilizante;
- Aumento do número de fornecedores de biodigestores e motores geradores a nível Nacional

Por outro lado, em face das perspectivas otimistas de produção de biogás na Região Oeste do Paraná e outras regiões do país, em função do aumento do número de biodigestores instalados em propriedades de suinocultura, bovinocultura e outras, incentivo governamental a minigeração e microgeração distribuída (GD),

são necessários estudos aprofundados sobre arranjos produtivos de aproveitamento do biogás em plantas de GD junto a propriedades agrícolas e/ou agroindústrias.

## **2. HIPÓTESE E OBJETIVOS**

### **2.1 HIPÓTESE**

No Brasil há diferentes configurações mecânicas de motores diesel convertidos a biogás pelas empresas que convertem. Com isso assume-se a hipótese que nem todas as configurações apresentam um nível adequado de eficiência de conversão de biogás em energia, com isso tem-se que buscar por meio de evidências experimentais as melhores configurações de motores convertidos e avaliar a sua operação durante o período de um mês num sistema típico de biodigestão no meio rural operando no modo GD.

### **2.2 OBJETIVOS**

**Geral** – Determinação das melhores condições de operação de motores a biogás levando em conta a configuração dos motores, avaliando a alimentação dos mesmos, inclusive com análise do gás, visando maior eficiência em termos de energia gerada com o menor impacto ambiental possível.

#### **Específicos:**

- Avaliar o desempenho de diferentes motores geradores a biogás instalados em unidades de geração distribuída;
- Avaliar o desempenho e emissões de dois motores geradores a biogás Ottolizados , variando-se parâmetros de combustão.
- Definir a melhor configuração de motor gerador para uma unidade de geração distribuída.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO BRASIL

Durante a COP – 15, 15ª Conferência das Partes da UNFCCC em Copenhague, na Dinamarca, o Brasil assumiu a meta voluntária de reduzir até 2020, entre 36,1 e 38,9% das emissões de Gases Efeito Estufa (GEE). A partir daí foi sancionada pela presidência da República em 29 de Dezembro de 2009 a Lei No. 12.187/09, a qual originou a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC).

A partir daí surgiram iniciativas governamentais com o objetivo claro de reduzir as emissões de GEE até o ano 2020 no Brasil, entre elas (MCT, 2011):

- Criação do Decreto No. 7390/10, que estabelece no Art.5º uma meta de redução das emissões entre 1168 milhões e 1259 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>(eq) até 2020, para uma projeção de 3236 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>(eq) em 2020, onde as principais atividades emissoras seriam: mudança de uso da terra (1404 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>(eq)), energia (868 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>(eq)), agropecuária (730 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>(eq)) e processos industriais e tratamento de resíduos (234 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>(eq)).
- Desenvolvimento e consolidação de uma agricultura de baixo carbono (ABC), instituída pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), em Junho de 2010, que visa reduzir um 1000 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>(eq) até 2020.

Uma das formas de atingir os índices propostos de redução de emissões de CO<sub>2</sub> é o uso de energias renováveis em substituição aos combustíveis fósseis. Dentre as ações estão a implementação do uso de biocombustíveis (biodiesel e etanol) no setor de transportes e a geração de eletricidade renovável (eólica, biomassa, solar e hidrelétrica).

Por outro lado o que vem impulsionando e dando muita força ao uso de biogás para geração de eletricidade no meio rural e agroindústrias foi a Resolução Normativa (RN) nº 482/2012, regulamentada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 2012, visando reduzir barreiras para a conexão de pequenas

centrais geradoras na rede de distribuição (desde que utilizem fontes renováveis de energia ou cogeração com elevada eficiência energética), e também a RN 517/2012 que altera a anterior. E, complementarmente, na seção 3.7 Módulo 3, os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (ANEEL, 2014).

Nesta normativa foi definida a microgeração e a minigeração distribuída de energia elétrica (GD), a qual consiste na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. Para efeitos de diferenciação, a microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW, enquanto que a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5000 kW (ANEEL, 2014).

Uma importante inovação trazida pela Resolução Normativa nº 482/2012 é o Sistema de Compensação de Energia Elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com micro ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda. (ANEEL, 2012; ANEEL, 2014).

Nesta lógica, quando a energia injetada na rede for superior a consumida, o consumidor receberá em sua próxima fatura um crédito em energia. Caso contrário o consumidor pagará apenas a diferença entre a energia consumida e a gerada. Dependendo da tributação de cada Estado, o consumidor terá que pagar os impostos (ICMS e PIS/CONFINS) incidentes sobre o total de energia absorvida da rede (o que inclui o imposto sobre os créditos). Os créditos a serem compensados são válidos por 60 meses.

A energia elétrica gerada é enviada à rede de distribuição da concessionária. Um sistema de medição bilateral contabiliza o consumo e a geração de energia elétrica da unidade. A energia elétrica excedente é cedida à distribuidora local,



sendo posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica dessa mesma unidade consumidora ou de outra de mesma titularidade.

Segundo COPEL (2019), os modelos de compensação permitidos são:

**Autoconsumo Remoto:** Caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada.

**Empreendimento com Múltiplas Unidades Consumidoras:** Caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento das áreas de uso comum constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento.

**Geração Compartilhada:** Caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada.

## 3.2 O BIOCOMBUSTÍVEL BIOGÁS

### 3.2.1 Composição do biogás

De acordo com ALMEIDA (2002) , o biogás contém em média 55 a 65% de gás metano, 25 a 30% de gás carbônico e traços de gases sulfídricos.

Segundo MIALHE (1980) o gás metano, também conhecido como gás dos pântanos, é obtido por fermentação anaeróbia de esterco de curral, de palhas e de restos de vegetais e lixo. O gás assim obtido é constituído por cerca de 2/3 de gás metano 1/3 de gás carbônico.

Segundo BARREIRA (1993), o metano, principal componente do biogás, não tem cheiro, cor ou sabor, mas os outros gases presentes tem um cheiro semelhante ao do ovo podre.

Conforme SANTOS (2000), o biogás é composto por uma mistura de gases cujo tipo e percentagem, variam de acordo com as características do tipo de resíduo e às condições de funcionamento do processo de digestão. A tabela 1 apresenta a composição típica do biogás.

Tabela 1. Composição típica do biogás.

<b>Gás</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Percentual no biogás (%)</b>
Metano	CH <sub>4</sub>	50 a 80%
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	20 a 40%
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	1 a 3%
Azoto	N <sub>2</sub>	0.5 a 3%
Sulfídrico e Outros	H <sub>2</sub> S, CO, NH <sub>3</sub> , O <sub>2</sub>	1 a 5%

FONTE: SANTOS (2000)

Devido ao constante crescimento da cadeia produtiva do setor agropecuário brasileiro, também aumentou a preocupação sobre os impactos ambientais causados por essas atividades, como por exemplo as emissões de gás metano provocadas pelos animais, a poluição dos solos e das águas pelo depósito indevido dos resíduos (KERKHOFF et al., 2015).

Visto isso, medidas devem ser tomadas e tecnologia empregada para minimizar os efeitos dessa crescente demanda. Assim, o emprego de biodigestores se torna uma importante ferramenta, que por meio da digestão anaeróbia dos rejeitos, a qual é feita pelas bactérias na ausência de gás carbônico, transforma o rejeito em biogás e biofertilizante (CALZA et al., 2015).

O biometano produzido a partir do tratamento de rejeitos agropecuários pode ser utilizado como fonte de energia, que pode ser aplicada dentro das propriedades rurais como fonte de energia para ligação de máquinas; como biocombustível em automóveis; também pode ser convertido em energia elétrica e utilizado na geração distribuída, reduzindo custos com energia elétrica (MORENO et al., 2019).

### **3.2.2 Digestão Anaeróbia**

A digestão anaeróbia é a tecnologia atualmente disponível, capaz de contribuir para a redução da poluição ambiental e, ao mesmo tempo, de valorizar os subprodutos em causa. É definida como a conversão microbiológica da matéria orgânica numa mistura essencialmente composta por metano e dióxido de carbono, o biogás. A digestão anaeróbia como processo de tratamento e valorização de resíduos, apresenta inegáveis vantagens, o que conduz a crescentes interesses por parte de entidades públicas e privadas, na sua aplicação em resíduos de natureza orgânica (McKENDRY, 2002). Cabe mencionar aqui que esta tecnologia seria a mais adequada no tratamento de resíduos animais, especialmente na forma de águas residuárias como no caso da suinocultura onde a carga orgânica é elevada.

Esse processo é realizada por bactérias químiotróficas não metanogênicas e metanogênicas. Durante este processo, ocorre a hidrólise dos compostos orgânicos complexos (açúcares, álcoois, ácidos voláteis, hidrogênio e dióxido de carbono) pelas bactérias químiotróficas não metanogênicas. Após a hidrólise, ocorre a fermentação dos açúcares e aminoácidos a acetato ou a produtos intermediários, como propionato e butirato. Enquanto os álcoois e ácidos voláteis com mais de dois carbonos são oxidados formando hidrogênio e acetato. A próxima etapa é a oxidação dos produtos intermediários a acetato e hidrogênio, ocorrendo, então, a formação de metano através da descarboxilação do acetato e redução do CO<sub>2</sub> pelo hidrogênio (DE CARVALHO & LUCAS J, 2001).

A figura 1 mostra o balanço da biodigestão anaeróbia da matéria orgânica, onde as etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese, e metanogênese são mostradas.

O processo da digestão anaeróbia pode ser considerado como um micro ecossistema onde micro-organismos trabalham conjuntamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas. Esses micro-organismos atuam como uma simbiose entre várias espécies de bactérias ativas no tratamento anaeróbio, para remoção de matéria orgânica (LETINGA & RINZEMA, 1985).

Atualmente, há diversas pesquisas relacionadas à conversão de biomassa em biogás utilizando processos anaeróbios. A biomassa pode ser dividida em três tipos: biomassa sólida, líquida e gasosa. Estes processos biológicos têm por objetivo diminuir a carga orgânica dos dejetos agrícolas e industriais, e minimizar os impactos que esses efluentes causariam no meio ambiente.

Segundo CHERNICARO et al. (2001), o balanço de massa dos sistemas anaeróbios ocorre da seguinte forma: 70 a 90% do material orgânico é biodegradável e convertido em biogás, de 5 a 10% é convertido em biomassa microbiana, e de 10 a 30% não é biodegradável.

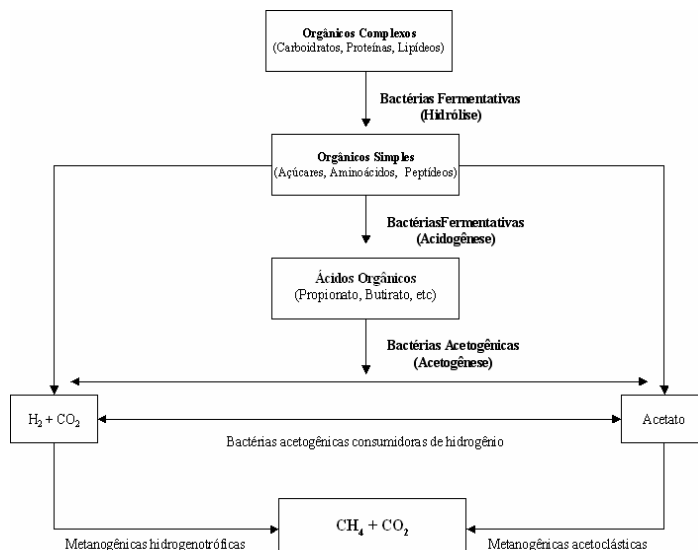


Figura 1. Balanço da digestão anaeróbia da matéria orgânica.

Fonte: CHERNICARO (1997).

Na Tabela 2 é apresentada uma comparação entre as principais vantagens e desvantagens do uso de sistemas de tratamento anaeróbio para o manejo da biomassa residual.

Tabela 2. Vantagens e desvantagens do sistema de tratamento anaeróbio

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Baixa produção de sólidos, cerca de 5 a 10 vezes inferior à que ocorre nos processos aeróbios	As bactérias anaeróbias são susceptíveis à inibição por um grande número de compostos
Baixo consumo de energia, usualmente associado a uma elevatória de chegada. Isso faz com que os sistemas tenham custos operacionais muito baixos	A partida do processo pode ser lenta, na ausência de lodo de semeadura adaptado
Baixa demanda de área	Alguma forma de pós-tratamento é usualmente necessária
Baixos custos de implantação, de ordem de R\$ 20 a 40 per capita	A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas
Produção de metano, um gás combustível de elevado teor calorífico	Possibilidade de geração de maus odores, porém controláveis
Possibilidade de preservação da biomassa, sem alimentação do reator, por vários meses	Possibilidade de geração de efluente com aspecto desagradável
Tolerância e elevadas cargas orgânicas, podendo ser aplicado em pequena e grande escala e há baixo consumo de nutrientes	Remoção de nitrogênio, fósforo e patógenos insatisfatória

Fonte: CHERNICARO (1997)

Para que os processos digestão anaeróbia operem de maneira adequada a remoção de material carbonáceo, deve-se levar em conta alguns parâmetros importantes (CHERNICARO, 1997):

- Temperatura - a temperatura possui correlação com a velocidade cinética e com a atividade microbiana do sistema de tratamento biológico;
- pH – afeta todo o sistema ambiental do reator, bem como a produção de enzimas e a toxicidade de compostos químicos para os microrganismos. Uma faixa de crescimento dita como ótima situa-se entre 6,6 e 7,4, podendo ocorrer uma faixa mais ampla de 6,0 a 8,0. Valores abaixo e

acima desta faixa devem ser evitados devido a possibilidade de inibição do processo metanogênico.

- Alcalinidade e ácidos voláteis – na cadeia de formação de metano, as bactérias acidogênicas tem crescimento ótimo na faixa de pH entre 5 e 6, faixa na qual as bactérias metanogênicas estão com seu metabolismo inibido. Este fato pode acarretar em acúmulo de ácidos voláteis no sistema e interrupção da produção de metano. A alcalinidade pode ser entendida como uma solução tampão, na qual impede mudanças bruscas de pH.

### **3.3 BIODIGESTORES**

Segundo ANDRADE *et al.* (2002), a Índia foi o primeiro país a instalar biodigestores para a produção de biogás. A primeira unidade foi construída por volta de 1908 e este país começou seu programa de implantação de biodigestores em 1951. Contava até 1992 com cerca de 160.000 unidades instaladas e a China que iniciou seu programa de implantação de biodigestores na década de 50, contava até 1992 com cerca de 7,2 milhões de biodigestores.

#### **3.3.1 Definição de biodigestor**

SANTOS (2000) define o biodigestor como sendo um tanque fechado onde os microrganismos entram em contato com o resíduo em condições de ausência de oxigênio, ocorrerá o processo de digestão anaeróbia, descrito anteriormente. Os microrganismos alimentam-se da matéria orgânica e de nutrientes presentes nos resíduos, obtendo-se assim energia e o material necessário para crescerem e se multiplicarem. Das reações envolvidas resultam diversos produtos gasosos, na sua maioria metano (CH<sub>4</sub>) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>), e também o digestato ou biofertilizante. A mistura dos vários produtos gasosos gerados recebe o nome de biogás. A figura 2 apresenta um biodigestor tipo indiano.

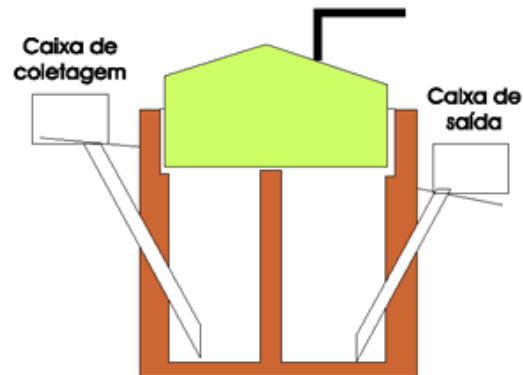


Figura 2. Biodigestor típico – tipo indiano

Segundo Kunz et al. (2019) os biodigestores podem ser do tipo alimentação em batelada ou contínuo. Sendo que no Brasil o mais utilizado no meio rural é o tipo lagoa coberta (*plug flow* ou a pistão).

O biodigestor de lagoa coberta constitui-se numa lagoa em formato retangular e seção trapezoidal com taludes inclinados a 45°. Geralmente as lagoas são numa relação geométrica comprimento/largura mínima de 2: 1 e máxima de 4:1, com profundidade de 3,5 a 4, no formato de um pistão. São impermeabilizadas e cobertas com uma geomembrana (geralmente PEAD de 08 a 1,2 mm de espessura). A membrana superior ou cobertura da lagoa funciona como um gasômetro. A figura 3 mostra o desenho em corte de um biodigestor tipo lagoa coberta ou a pistão.

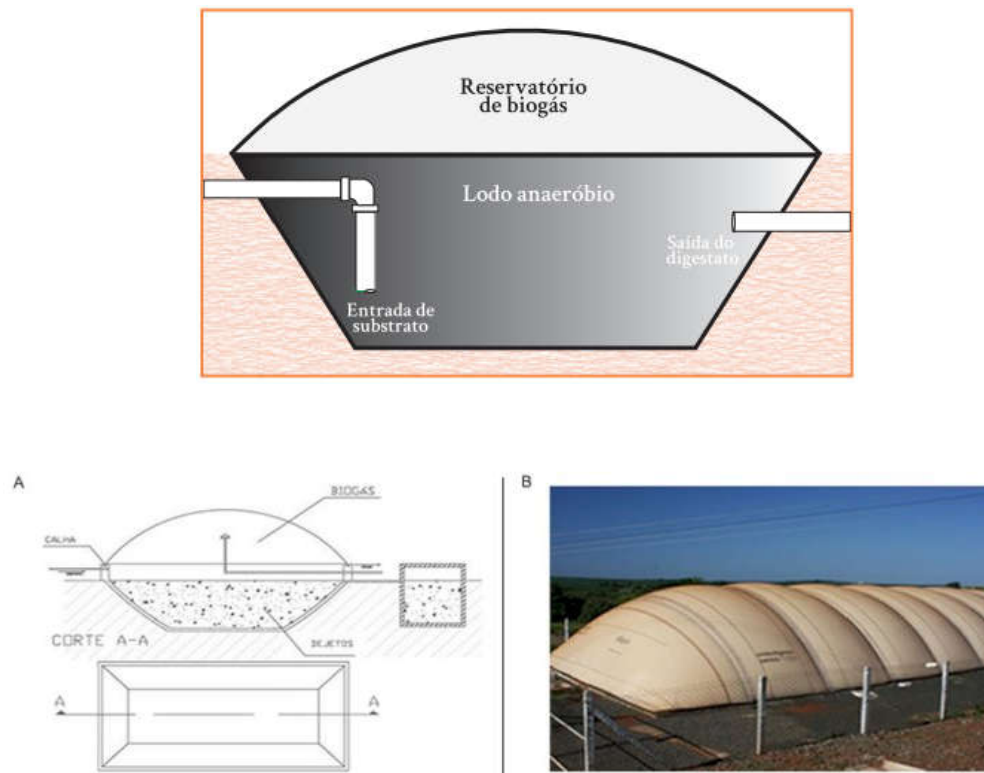


Figura 3. Biodigestor modelo lagoa coberta. Fonte: Kunz et al. (2019); De Lima (2011).

O biodigestor lagoa coberta é o mais utilizado no tratamento de resíduos animais no Brasil e na Região Oeste do Paraná. O resíduo entra no biodigestor e fica retido no reator por um tempo (tempo de retenção hidráulica) e sai na forma de um digestato ou biofertilizante. As empresas que montam esse modelo de biodigestor, geralmente instalam sistemas de agitação hidráulica por meio de bombas e dessulfurização biológica por meio de injeção de ar por compressor centrífugo. Algumas plantas aproveitam o calor gerado pelos gases de exaustão de motores geradores a biogás para aquecimento do resíduo e biodigestor utilizando diferentes configurações de trocadores de calor.

A tabela 3 a seguir mostra alguns dados de dimensionamento do biodigestor tipo lagoa coberta.



Tabela 3. Dados de dimensionamento do biodigestor lagoa coberta

Descrição	Dados e dimensões
Tipo de alimentação	Contínua
Tipo de resíduo	Água residuária de origem animal ou agroindustrial
Dimensão	Comprimento/largura 4:1; profundidade 3 a 45 m; inclinação do talude 45°.
Tempo de retenção hidráulica (TRH)	25 a 40 dias
Concentração de sólidos (CS)	até 3% (m.v <sup>-1</sup> ) de sólidos totais
Carga orgânica volumétrica (COV)	entre 0,3 a 0,5 kgSV.m <sup>-3</sup> .m <sup>-3</sup> <sub>reator</sub> .d <sup>-1</sup> .
Produtividade de biogás	entre 0,03 e 0,15 m <sup>3</sup> .m <sup>-3</sup> <sub>reator</sub> .d <sup>-1</sup>
Agitação	Hidráulica

Fonte: Kunz et al. (2019)

### 3.3.2 Parâmetros associados a operação de biodigestores

Os parâmetros associados a operação dos biodigestores são:

#### Temperatura

A temperatura é um fator decisivo no processo de fermentação do biodigestor, influenciando o processo de degradação biológica, o volume de produção de gás e de biofertilizantes. Segundo SALOMOM (2007), as faixas de temperatura associadas com o crescimento microbiano e a eficiência do processo podem ser classificadas como: criofílicas ou Psicofílicas < 20 °C; mesofílicas 20 °C a 45 °C; termofílicas > 45 °C.

Entretanto, segundo SOARES (1990) quando ocorre variação brusca da temperatura, o sistema pode entrar em colapso. O grupo de bactérias metanogênicas são os que mais sofrem com a influência da temperatura, pois apresentam um intervalo de temperatura muito restrito de operação, podendo causar o aumento de ácidos voláteis através de baixas temperaturas, e conseqüentemente uma queda de pH.

A digestão anaeróbia também é possível a baixas temperaturas (10°C), porém a eficiência e a carga orgânica diminuem muito com a diminuição da temperatura. Entretanto, SPEECE (1996), observa que para cada 5°C de queda de temperatura há um declínio de 34% da atividade dos micro-organismos.

### **pH**

Mudanças no pH do meio afetam sensivelmente as bactérias envolvidas no processo de digestão, podendo manifestar-se de diferentes formas, modificando suas estruturas e conseqüentemente perdendo suas características originais, aumentando ou diminuindo a toxicidade do meio.

Em sistemas onde os micro-organismos atuam em forma de simbiose, deve-se buscar uma faixa de pH adequada, uma vez que o mesmo está diretamente ligado a concentrações de ácidos orgânicos voláteis no meio, resultante do equilíbrio entre populações de micro-organismos e a alcalinidade total do sistema. Portanto, qualquer desequilíbrio no sistema provoca o acúmulo de ácidos orgânicos no meio e conseqüentemente queda do pH. Segundo o autor os valores de pH abaixo de 6 e acima de 8, praticamente fazem cessar a produção de metano (SOARES, 1990).

### **Necessidades Nutricionais**

Uma vantagem importante do processo anaeróbio é a baixa necessidade de nutrientes. Os elementos químicos em maior quantidade na composição dos micro-organismos são: carbono, oxigênio, nitrogênio, hidrogênio, fósforo e enxofre. Outros nutrientes são necessários para a biossíntese dos componentes celulares, como cátions ( $Mg^{+2}$ ,  $Ca^{+2}$ ,  $Na^{+1}$ ,  $K^{+1}$ ,  $Fe^{++}$ ), ânions ( $Cl^-$ ,  $2 SO^-$ ), e traços de elementos considerados como micronutrientes (Co, Cu, Mn, Mo, Zn, Ni, Se,) (CHERNICHARO, 1997).

Os micro-organismos precisam de uma fonte de carbono para o seu crescimento, muitos utilizam  $CO_2$  outros, carbono orgânico. A classificação dos micro-organismos em seres autotróficos e heterotróficos está relacionada à fonte de carbono utilizada pelos mesmos, onde os autotróficos sintetizam suas moléculas carbônicas a partir do  $CO_2$ , e os heterotróficos utilizam como fonte de carbono compostos orgânicos (CHERNICHARO, 1997).

### **Tempo de Retenção Hidráulica**

É o tempo utilizado para a tratamento do sistema no digestor. Esse tempo para o substrato ser biodigerido depende do tipo de digestor, e do tipo de efluente a ser degradado, além de outros fatores, podendo variar de 50 dias em alguns tipos de digestores rurais, em apenas algumas horas em certos digestores industriais. Quanto maior o volume do biodigestor maior o tempo de retenção hidráulica para uma mesma vazão volumétrica na alimentação do reator. Aumentar o volume do biodigestor implica em aumentar o custo.

### **Inibição**

Processos anaeróbios podem cessar e/ou diminuir a taxa de produção de biogás devido aos seguintes fatores (KOSSMANN et al., 2011): diminuição da temperatura; grandes concentrações do íon amônia ( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ ) que podem estar na faixa de 5000 a 7000  $\text{mg.L}^{-1}$ ; concentrações de amônia ( $\text{NH}_3$ ) maior que 200 – 300  $\text{mg.L}^{-1}$ ; relações C/N distantes da faixa ótima de concentração de 8 – 20; presença de metais pesados; antibióticos e; detergentes.

### **Operação do Biodigestor**

Segundo HEN (2005), alguns tipos de substratos requerem agitação ou mistura para um melhor aproveitamento dos micro-organismos ao substrato, e manter a estabilidade do processo dentro do digestor, entre algumas vantagens da agitação, elencam-se: eliminar os gases produzidos; misturar o substrato aos micro-organismos; prevenir a formação de crosta e sedimento interno; evitar gradientes pronunciados de temperatura dentro do digestor; prevenir a formação de espaços inativos que possam reduzir o volume de fermentação.

### 3.3.3 Vantagens de um Biodigestor

BARREIRA (1993) afirma que o biodigestor, além de produzir gás, limpa os resíduos não aproveitáveis de uma propriedade agrícola e gera fertilizantes. É considerado por alguns como um poço de petróleo, uma fábrica de fertilizantes e uma usina de saneamento, todos unidos em um mesmo equipamento.

Segundo ANDRADE *et al.* (2002) os biodigestores são importantes para o saneamento da propriedade, pois o processo de digestão anaeróbia promove a redução da carga orgânica convertendo o carbono presente na matéria orgânica em metano (combustível), redução dos sólidos e também a redução de microrganismos patogênicos presentes nos efluentes. Além de promoverem a reciclagem da matéria orgânica e dos nutrientes, possibilitam a higienização das instalações para criação de animais e o tratamento de seus dejetos.

ALMEIDA *et al.* (2002) afirmam que, após passarem pelo biodigestor os resíduos apresentam alta qualidade para uso como fertilizante agrícola, devido principalmente à redução do teor de carbono do material, pois a matéria orgânica perde carbono na forma de metano (CH<sub>4</sub>). A utilização do biogás e do biofertilizante proporcionam a diminuição nos gastos com energia e com produtos químicos para a cultura, além de contribuir com o saneamento da propriedade.

### 3.3.4. Técnicas para implantação de biodigestores

Para a construção de usinas de biogás, existem várias combinações possíveis entre tecnologias e equipamentos, que devem ser escolhidas de acordo com a localidade, o tipo de substrato que será utilizado, a frequência de alimentação do biodigestor.

As técnicas mais utilizadas para a alimentação são de fluxo descontínuo e contínuo. No descontínuo ou também conhecido por batelada, o material adicionado no biodigestor é transformado de uma só vez, não havendo retirada nem adição de material até o fim do processo, que faz com que a produção de biogás diminua com o tempo. Somente quando o material foi digerido é que se retira do reator para inserção de uma nova quantidade de substrato (KARLSSON *et al.*, 2015). Neste tipo de sistema é interessante o enchimento de mais biodigestores em intervalos entre si,

também chamado de bateria de reservatórios, para que a produção do biogás seja constante.

Já a técnica de fluxo contínuo é caracterizada pela alimentação contínua do biodigestor, a matéria orgânica pode ser inserida várias vezes ao dia. Portanto, o biodigestor sempre estará cheio, com produção constante de biogás, o que o torna mais interessante principalmente para a produção de energia a partir do gás gerado.

### **3.3.5 Purificação do biogás com foco em geração de energia elétrica**

A limpeza do biogás consiste na remoção de substâncias não combustíveis, como sulfeto de hidrogênio, siloxanos, água, oxigênio, nitrogênio e partículas em suspensão. A presença de impurezas causa problemas de corrosão e de desgaste mecânico nos equipamentos. Além disso, a água e o dióxido de carbono prejudicam o processo de queima, tornando-o menos eficiente (BORSCHIVER; SILVA, 2014; COELHO *et al.*, 2006).

Outro agravante é a emissão de gases poluentes gerados na queima do biogás, como óxido de Nitrogênio (NO) e dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>), sendo este diretamente relacionado à quantidade de H<sub>2</sub>S presente no biogás (SOUZA, *et al.*, 2016).

O impacto desses contaminantes em motores de combustão é sua rápida degradação, causado pela presença de água, dióxido enxofre e principalmente o gás sulfídrico, causando corrosão em diversas partes do motor, desgaste de partes móveis e possíveis contaminação de óleo lubrificante (BERTINATTO, 2014).

Dentre os métodos existentes para remoção de H<sub>2</sub>S do biogás, a dessulfurização biológica é um método de remoção parcial de compostos de enxofre que se baseia na injeção de ar no digestor para a degradação do H<sub>2</sub>S, na razão de 8 a 12% do fluxo de gás. Pode atingir rendimentos de 80 a 99%, no entanto, se a concentração de entrada de H<sub>2</sub>S for muito elevada, pode não atingir os valores recomendados pelos fabricantes de motores a gás, que são da ordem de 100 a 500 ppm de H<sub>2</sub>S no biogás (COELHO *et al.*, 2018).

Os siloxanos são contaminantes tipicamente presentes no biogás de tratamento de esgoto. Trata-se de um composto de sílica proveniente de produtos de higiene pessoal e cosméticos. Quando presente no biogás injetado em motores ou

microturbinas, finas partículas de sílica se formam na câmara de combustão, e são carregadas pelos gases por meio dos componentes do equipamento em velocidades elevadas. Com o passar do tempo, essas partículas abrasivas causam erosão em algumas das superfícies metálicas com que entraram em contato (COELHO *et al.*, 2006).

### **3.4 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA IGNIÇÃO POR CENTELHA**

De acordo com GIACOSA (1986), os motores térmicos são máquinas que tem por objetivo transformar a energia calorífica em energia mecânica diretamente utilizável. A energia calorífica pode provir de diversas fontes primárias, porém no caso dos motores a combustão, a energia calorífica tem origem na queima de combustíveis líquidos e gasosos. Portanto pode-se dizer que os motores de combustão interna transformam a energia química do combustível em energia mecânica.

OBERT (1971) define na máquina de combustão interna os produtos da combustão são os próprios executores do trabalho. A maioria das máquinas de combustão interna utiliza o princípio do embolo alternativo, onde este é dotado do movimento de vai e vem no interior de um cilindro, produzindo trabalho através de uma biela e de um eixo de manivelas.

#### **3.4.1 Definição de motores ciclo Otto**

Os motores de ciclo Otto, também chamados de motores de ignição por centelha, podem funcionar em 2 ou 4 tempos, mas poucos motores de dois tempos ainda são fabricados.

Nos motores de ciclo Otto 4 tempos, o deslocamento do pistão na fase de aspiração, succiona para dentro do cilindro uma mistura de ar e combustível. A mistura de ar e combustível deve ter uma proporção correta, dita relação estequiométrica, que é preparada pelo carburador, ou recentemente por um sistema eletronicamente gerenciado. Depois de concluída a fase de admissão, a válvula é fechada e inicia-se a fase de compressão, na qual a mistura ar e combustível anteriormente admitida é comprimida pelo deslocamento do pistão. No final da fase

de compressão a vela de ignição produz uma centelha que provoca a combustão da mistura ar e combustível de maneira progressiva. A combustão provoca um súbito aumento de temperatura e conseqüentemente uma expansão dos gases. A força gerada por esta expansão desloca o pistão que através do mecanismo biela manivela converte a força linear gerada neste deslocamento em torque no virabrequim. Depois de concluída a fase de expansão abre-se a válvula de descarga e o deslocamento do pistão, agora em sentido ascendente, que faz expelir para o sistema de escapamento os gases residuais da combustão. Ao final desta fase fecha-se a válvula de escapamento e abre-se a válvula de admissão reiniciando-se todo o processo.

O ciclo de quatro tempos se completa a cada duas voltas do eixo de manivelas (virabrequim), onde cada tempo corresponde a um deslocamento angular de 180° do eixo. Durante os quatro tempos ocorre: admissão, compressão, combustão e exaustão (COUTO, 2017; WILDNER, 2006), figura 4.

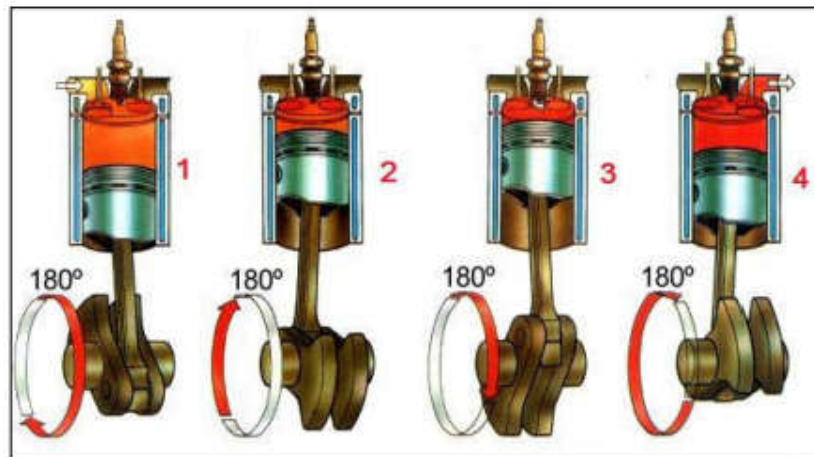


Figura 4. Ciclo de operação de motor a ignição por centelha quatro tempos

Fonte: COUTO, 2017

**1º Tempo: Admissão.** A mistura ar/combustível é admitida no cilindro através da válvula de admissão, durante o curso do pistão do ponto morto inferior (PMI) ao ponto morto superior (PMS).

**2º tempo. Compressão.** A mistura ar/combustível é comprimida, quando o pistão sai do PMI ao PMS.

**3º Tempo: Combustão.** Após a compressão (2º Tempo) ocorre a ignição da

mistura/ar combustível elevando a temperatura e pressão com a queima, fazendo com que haja uma expansão do pistão do PMS ao PMI, transmitindo ao eixo de manivelas uma força motriz.

**4º Tempo: Exaustão.** Antes do pistão atingir o PMI (3º Tempo) a válvula de escape começa a abrir e os gases passam a ser liberados quando o pistão sai do PMI ao PMS. Após isso a válvula de descarga fecha-se e a de admissão abre-se e o ciclo inicia-se novamente.

O Ciclo Otto é usualmente representado pelo ciclo padrão a ar, o qual é um ciclo ideal, onde: o processo 1-2 é uma compressão isentrópica do ar (1º Tempo), no processo 2-3 o calor é transferido ( $q_{2-3}$ ) durante a ignição do combustível (no momento que o pistão está no PMS); no processo 3-4 ocorre uma expansão isentrópica e no processo 4-1 há a rejeição de calor ( $q_{4-1}$ ), enquanto o pistão está no PMI (WYLEN et al, 1998). A figura 5 mostra o processo descrito acima.

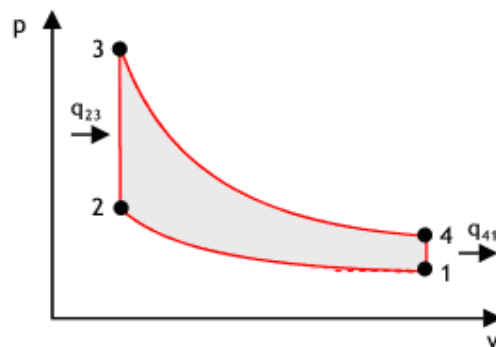


Figura 5. Ciclo padrão ar Otto.

Fonte: (WYLEN et al., 1998)

### 3.4.2 Desempenho de motores de combustão interna de ignição por centelha

Segundo SOUZA et al. (2012) & DAL BEM (2008) os motores de ignição por centelha variam seu desempenho conforme o tipo de combustível utilizado, a taxa de compressão, a relação ar combustível e ponto de ignição. Esses parâmetros irão influenciar no:

- Rendimento total ou eficiência de conversão do combustível;



- Potência efetiva do motor;
- Consumo específico.

### Rendimento total

Segundo PENIDO FILHO (1991) & DAL BEM (2008), o rendimento total de um motor de combustão interna é dado por

$$\eta_T = \eta_{te} \cdot \eta_i \cdot \eta_m \quad \text{eq. (1)}$$

Onde  $\eta_T$  é o rendimento total;  $\eta_i$  é o rendimento indicado;  $\eta_{te}$  é o rendimento térmico;  $\eta_m$  é o rendimento mecânico. O rendimento total de um motor de combustão interna varia de 20 a 30%, (ÇENGEL & BOLES, 2013). Quando acoplado a um motor gerador, o rendimento total do sistema motor gerador dependerá do rendimento do gerador elétrico.

$$\eta_{MG} = \eta_T \cdot \eta_G \quad \text{eq (2)}$$

Onde  $\eta_{MG}$  é o rendimento do conjunto motor-gerador;  $\eta_G$  é o rendimento do gerador elétrico.

O rendimento global também pode ser obtido por

$$\eta_T = \frac{3600}{C_s \cdot PCI} \quad \text{eq. (3)}$$

onde  $C_s$  – é o consumo específico g.kWh<sup>-1</sup>; PCI – poder calorífico inferior do combustível MJ.kg<sup>-1</sup>, 3600 é fator de conversão, (SOUZA et al., 2012; DAL BEM, 2008).

O rendimento térmico ou termodinâmico depende da taxa de compressão do motor. Para o ciclo de ignição por centelha (Otto) (WYLEN et al., 1998)

$$\eta_{ie} = 1 - \frac{1}{\rho^{k-1}} \quad \text{eq (4)}$$

onde  $\rho$  - taxa de compressão do motor; k - a razão entre os calores específicos, a volume constante e a pressão constante. O rendimento térmico varia de 60 a 70%. Quanto maior a taxa de compressão maior o rendimento térmico do motor. Por outro lado, se houver um aumento na taxa de compressão haverá detonação do combustível, ou seja, existe um limite para a taxa de compressão. Em motores a gás a taxa de compressão é maior que nos a gasolina.

O rendimento indicado ( $\eta_i$ ) é a relação entre o trabalho realizado pelo motor no ciclo indicado ( $N_i$ ) e o trabalho realizado pelo motor no ciclo teórico, ou melhor, é a percentagem do trabalho útil que é transformado em trabalho mecânico no ciclo real. Dentre os fatores que influenciam o rendimento indicado estão a combustão imperfeita da mistura ar/combustível e aumento da perda de calor através das paredes do cilindro do motor. O rendimento indicado varia de 50 a 80% (PENIDO FILHO, 1991; SOUZA et al., 2012; DAL BEM, 2008).

O rendimento mecânico ( $\eta_m$ ) é a relação entre a potência efetiva ( $N_e$ ) medida no eixo do motor e a potência indicada, ou seja, a porcentagem de trabalho mecânico do ciclo real que é transformada em trabalho mecânico no eixo do motor. Os fatores que influenciam no rendimento mecânico são: a força de atrito que aparece nos órgãos móveis (mecanismos), a potência absorvida pelos órgãos auxiliares (bomba d'água, bomba de óleo, etc.) e a potência absorvida no bombeamento (admissão e exaustão da mistura queimada) (DALBEM, 2008; PENIDO FILHO, 1991; SOUZA et al., 2012).

### **Potência efetiva do motor**

A potência efetiva representa a gerada no eixo do motor. Para a sua medição deve-se utilizar um dispositivo chamado dinamômetro, o qual mede a potência por meio do produto entre o torque e a velocidade angular.

$$Ne = T \cdot \omega \quad \text{eq. (5)}$$

onde  $Ne$  é a potência efetiva (W),  $T$  – torque (N.m) e  $\omega$  é a velocidade angular ( $\text{rad.s}^{-1}$ ).

A potência efetiva seria a diferença entre a potência indicada (medida no digrama indicado) ( $Ni$ ) e a potência absorvida ( $Nd$ )

$$Ne = Ni - Nd \quad \text{eq. (6)}$$

A potência absorvida é aquela utilizada para vencer o atrito entre as partes mecânicas em movimento (que efetua o bombeamento, aspiração e descarga) e acionar os órgãos acessórios como: a bomba de óleo, alternador, bomba de água. A indicada é aquela desenvolvida no interior do cilindro ocasionada pela combustão da mistura ar combustível e é obtida por intermédio do ciclo indicado. (PENIDO FILHO, 1991).

A potência efetiva deve ser corrigida em função das condições ambientais: pressão barométrica, teor de umidade do ar e temperatura ambiente. Essa correção, para o ciclo Otto, deve ser feita de acordo com a norma NBR ISSO 1585 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (DALBEM, 2008; SOUZA et al., 2012).

A potência efetiva do motor depende do rendimento volumétrico ( $\eta_v$ ), ou seja, quanto menor esse rendimento menos potência o motor terá no eixo (DALBEM, 2008; PENIDO FILHO, 1991).

O rendimento volumétrico ( $\eta_v$ ) é a relação entre a massa de ar que se encontra no cilindro, no início da compressão, e a massa teórica que poderia estar, nas condições atmosféricas de admissão.

Se a aspiração fosse perfeita, todo o espaço liberado pelo pistão, ao deslocar-se do ponto morto superior ao ponto morto inferior, seria ocupado pela mistura. Porém a massa de ar admitido é sempre menor, no caso dos motores naturalmente aspirados. Os fatores que influenciam na eficiência volumétrica são: perdas de carga no conduto de admissão; tempos de abertura, fechamento e cruzamento de válvulas; temperatura da mistura; pressão barométrica; percentagem de gás queimado residual contido na mistura, inércia da mistura e rotação do motor

(PENIDO FILHO, 1991). A relação a seguir é utilizada para determinar o rendimento volumétrico

$$\eta_v = \frac{Q_m}{Q_o} \quad \text{eq. (7)}$$

onde  $Q_m$  é a vazão do ar aspirado ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) e  $Q_o$  a vazão teórica máxima que o motor pode aspirar ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ).

Os combustíveis gasosos, como o metano (gás natural) ou o biogás (58% de gás natural, ao serem queimados em motores de combustão interna produzem uma potência efetiva menor, quando comparados com os líquidos (diesel e gasolina). Um dos motivos é que o conteúdo energético da mistura estequiométrica combustível/ar para o biogás ou gás natural é menor que o da gasolina. Outro fator que observa-se seria que a eficiência volumétrica dos motores a gás é menor (SOUZA et al., 2012).

Os combustíveis líquidos ao serem admitidos juntamente com a corrente de ar no coletor, vaporizam absorvendo calor do ar e resfriam a mistura ar/combustível aumentando assim sua densidade e contribuindo para o aumento da eficiência volumétrica.

### **Consumo específico do motor**

O consumo específico é definido como a quantidade de combustível medido em grama que um motor gasta para cada kW de potência produzida durante uma hora de operação ( $\text{g}/(\text{kWh})$ ). (PENIDO FILHO, 1991; SOUZA et al., 2012).

$$C_s = \frac{Ch}{Ne} \quad \text{eq. (8)}$$

onde  $Ch$  – consumo horário ( $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ ) e  $Ne$  – potência efetiva (em kW).

O consumo específico varia em função da rotação do motor e quanto mais baixo for o seu valor absoluto, maior será o rendimento do motor. A figura 9 mostra uma curva típica de potência e consumo específico em função da rotação.

### 3.4.3 Parâmetros que influenciam no desempenho de motores de ignição por centelha

#### Relação Ar/Combustível para motores a biogás

Para pequenos grupos motores geradores, um método que seria viável, eficiente e menos dispendioso de controle da combustão, porém ainda em fase de amadurecimento (não disponível para consumidores em geral), é aquele em que os parâmetros são monitorados durante a combustão, e as medidas da corrente elétrica de um sensor de ionização correlacionam a temperatura da chama ou a relação ar/combustível com a eficiência da combustão. Neste caso, o sinal de ionização não é dependente somente das características químicas do combustível, mas também do calor gerado na combustão, desta forma, limitando a faixa de operação deste tipo de monitor.

Atualmente o método citado acima já existe no mercado e todos os fabricantes de grupos geradores movidos a biogás estão utilizando. Passa a ser um pré-requisito para a uma boa durabilidade (baixa temperatura de escape) e economia de combustível. A relação ar/combustível é determinada a partir da medida da concentração de oxigênio nos gases de combustão. Neste método, bem amadurecido na indústria automobilística, utiliza-se a chamada sonda Lambda, um sensor de oxigênio muito utilizado nos automóveis.

A relação ar/combustível estequiométrica é aquela na qual a queima do combustível se dá por completo, não havendo excesso de ar, nem de combustível. Essa relação pode ser entre os volumes (volumétrica) ou entre as massas (mássica). Os valores são distintos devido a diferença entre as densidades do ar e do gás natural. Para o gás natural, temos os seguintes valores:

- A/C estequiométrica volumétrica = 9,5
- A/C estequiométrica mássica = 17,3

A variável  $\lambda$  representa a razão entre a relação ar/combustível do motor e a relação estequiométrica do combustível. Para mistura pobre, onde há excesso de ar,  $\lambda > 1$ . Para mistura rica, há excesso de combustível na queima, e  $\lambda < 1$ .

### **Motores de Mistura Pobre - *Lean Burn***

Motores *Lean Burn* são aqueles que utilizam mistura ar/combustível pobre, ou seja, funcionam com excesso de ar ( $\lambda \geq 1,5$ ). Esse tipo de configuração visa basicamente economia de combustível em detrimento do desempenho. Ao funcionarem com excesso de ar, os motores de mistura pobre apresentam menores temperaturas na câmara de combustão, pois queimam uma menor quantidade de combustível para um mesmo volume de mistura admitida, liberando menos calor.

Além desse controle da temperatura, esses motores apresentam a vantagem de terem baixo consumo de combustível, devido a mistura ar/combustível pobre. Apresentam desempenho consideravelmente menor que o estequiométrico. Por isso, esse tipo de configuração é mais indicado para motores turbinados, onde a perda de desempenho não é tão considerável.

### **Motores Estequiométricos**

Esse tipo de motor utiliza mistura ar/combustível estequiométrica ( $\lambda=1$ ), sem excesso de ar ou de combustível. Por queimarem uma maior quantidade de combustível, para um mesmo volume de mistura admitida, o motor regulado a mistura estequiométrica produz mais potência que um motor similar de mistura pobre.

### **Sistema de Ignição**

Para que a mistura de combustível ar se inflame, no interior do cilindro do motor, produzindo assim a força mecânica que o movimentará, é preciso um ponto de partida. Este ponto de partida é a faísca que inflama a mistura, e que é produzida por uma série de dispositivos que formam o sistema de ignição.

Com o sistema de ignição especificado para o utilizado, torna-se necessário avaliar qual é o ponto de ignição ideal, a ser ajustado no controlador de ignição, para o funcionamento do motor. O ponto de ignição nada mais é que o momento no qual ocorre a centelha na vela, provocando o início da combustão. O ponto é especificado em graus medidos antes ou após o ponto morto superior do pistão.

De um modo geral, o ponto ideal deve considerar a velocidade de queima da mistura ar/combustível, e a rotação do motor, de modo que a frente de chama atinja

a cabeça do pistão no momento em que o mesmo se encontra no ponto morto superior. Esse ponto corresponde ao de Máximo torque do motor. Esse ponto também é o de maior potência e o de menor consumo específico de combustível. Todavia, o mesmo só pode ser medido com precisão em testes com dinamômetro.

Na teoria, motores a gás natural, por terem uma mistura ar/combustível mais pobre que os motores a gasolina (mais ar na mistura), por exemplo, requerem um maior avanço no ponto de ignição. Entre a mistura ar/combustível e ponto de ignição ideal, e como o avanço aumenta para misturas mais pobres ( $\lambda > 1$ ), para diferentes valores de corrente

### **Velocidade de Chama**

Se a combustão ocorresse instantaneamente, a ignição ocorreria no PMS. Desde que a combustão se faz em um tempo finito, a máxima força surge inflamando o combustível antes do PMS, tipicamente 10-40° APMS. Esta ignição adiantada tem o efeito adverso de APMS de alta pressão. A velocidade de chama para o fluxo estático ou laminar varia em função da composição química. A turbulência é o meio principal para aumentar a velocidade de chama. Esse fenômeno foi comprovado nos testes realizados.

### **Taxa de compressão**

Segundo ZAREH (1998), alguns motores a gás são motores diesel ou a gasolina, convertidos para funcionar com gás. A conversão consiste em algumas modificações nos sistemas alimentação e de ignição e também na taxa de compressão. Os motores a gás, de ignição por centelha, possuem uma eficiência volumétrica menor que o equivalente motor com combustível de petróleo, pelo fato da adição de gás reduzir o volume de ar aspirado. Contudo, a menor eficiência volumétrica é, geralmente, compensada pelo fato de que os motores a gás conseguem funcionar com taxas de compressão elevadas, 12-13:1. Isto é possível porque o poder antidetonante do gás está ligado ao número de metano, ou seja, quanto maior a quantidade de metano maior será a resistência à detonação.

### 3.5 MOTOR A IGNIÇÃO POR CENTELHA A BIOGÁS

Os motores de ignição por centelha a gasolina ou álcool e motores ciclo diesel podem ser convertidos para motores a gás. As mesmas técnicas de conversão de motor a gasolina para gás natural são utilizadas para o biogás. O biogás tem um poder calorífico de aproximadamente a metade do gás natural, logo o sistema de carburação tem que ser dimensionado para que o fluxo de biogás seja o dobro do gás natural para que a mesma potência seja mantida (MUELLER, 1995; MACARI, 1987).

A principal adaptação de um motor a ignição por centelha para o biogás é a instalação de um misturador gás com comburente (ar) no lugar do carburador. O controle do motor é efetuado pelo controle da mistura ar/combustível, por meio de uma válvula de variação de pressão, semelhante à válvula borboleta dos motores a gasolina. Outras modificações incluem a mudança na taxa de compressão e avanço de ignição. A figura 6 mostra um misturador ar/combustível num motor a gás/biogás (MITZLAFF, 1988).

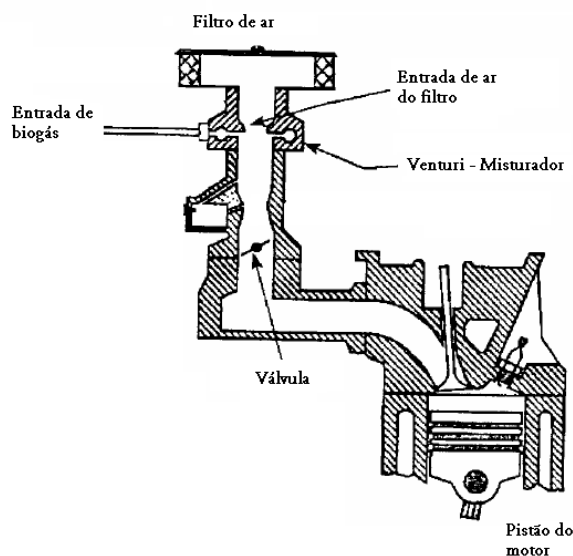


Figura 6. Sistema de mistura num motor a gás/biogás.

O misturador utilizado na maioria dos motores a biogás é do tipo venturi e é instalado antes da entrada da mistura ar combustível na câmara de combustão. O sistema é composto de um filtro, por onde entra o ar (comburente), uma entrada de



biogás para um misturador venturi e uma válvula para controlar a entrada da mistura ar/combustível para o cilindro do motor.

O misturador venturi utiliza o princípio de bernoulli, da mecânica dos fluidos, onde num fluxo de ar através de uma seção reduzida provoca uma queda de pressão facilitando a entrada de um gás combustível e tendo como resultado a mistura ar combustível.

Segundo ZAREH (1998), os motores a gás, ignição por centelha, possuem uma eficiência volumétrica menor que o equivalente motor a gasolina, pelo fato da adição de gás, que reduz o volume de ar aspirado. Contudo, a menor eficiência volumétrica é geralmente compensada pelo fato de que os motores a gás conseguem funcionar com taxas de compressão elevadas, 12-13/1. Isto é possível porque o grau antidetonante do gás está ao metano presente tanto no gás natural quanto no biogás, ou seja quanto maior a concentração de metano no gás maior será a resistência a detonação.

Segundo MUÑOS et al. (2000), em ensaio realizado com motor honda 270 cm<sup>3</sup>, alimentado com biogás bruto e sendo mantidos o ponto de ignição e a taxa de compressão gasolina, as curvas de torque e potência tiveram um decréscimo de 50% em relação ao combustível original.

HUANGA E CROOKES (1998) simularam biogás injetando metano e gás carbônico em proporções diferentes em um motor de ciclo otto. A quantidade de gás que era injetada no motor era definida respeitando as proporções formadas nos biodigestores. Definiram como sendo a melhor taxa de compressão 13:1 por atender a todas as misturas, já que 15:1 em algumas composições houve detonação.

Conforme CANAVATE (1988), a taxa de compressão não pode exceder a 12:1, pois a composição do biogás não é constante, e isto pode levar a detonação em alguns momentos. Já o ponto de ignição deve ser avançado pois a velocidade de combustão é mais lenta.

Em motores de combustão, boa parte de energia é dissipada em forma de calor, e essa energia normalmente não é aproveitada. Pensando na melhor eficiência energética de um determinado sistema, o conceito de coogeração tem recebido muita atenção devido à sua capacidade de produzir duas formas de energia com perdas mínimas. Surge, assim, o conceito de planta *Combined Heat*

*and Power* (CHP), que consiste na geração simultânea de eletricidade e energia térmica de uma única fonte de combustível(HAKAWATI et al., 2017).

### **3.6 MOTOR A BIOGÁS ACOPLADO A GERADOR DE ELETRICIDADE**

Atualmente os motores geradores a biogás disponíveis no mercado tem potências que variam de 10 kW a 1600 kW. Existem grandes empresas no Mundo que comercializam motores geradores a biogás, destacando-se a Caterpillar e a GE-Energy, com o grupo gerador JENBACHER. No Brasil existem várias empresas que convertem e comercializam motores a biogás.

Os motores geradores constituem-se no acoplamento entre o motor de combustão interna e o gerador de eletricidade (alternador). A eficiência no acoplamento, ou seja, conversão de energia mecânica em elétrica é de cerca de 90% na velocidade síncrona. Além do motor de combustão interna (ignição por centelha) e gerador de eletricidade, outros componentes auxiliares compõem o sistema de geração de energia elétrica com motor gerador. Dentre os sistemas estão o controlador de velocidade, sistema de controle da mistura ar/combustível, sistema de partida, exaustão, arrefecimento e ventilação e painel de controle (SOUZA et al., 2012).

#### **3.6.1 Controlador de velocidade**

A rotação do motor tem que ser mantida em 1800 RPM, mas ela pode variar com a carga no gerador de eletricidade. Para manter a rotação constante no motor esse controle é feito pela quantidade da mistura ar/combustível admitida pelo motor, por meio da abertura ou fechamento de uma válvula borboleta.

A válvula é controlada por um módulo eletrônico conectado a um atuador eletrônico ligado ao corpo de borboleta. O módulo colhe informações de rotação (RPM) recebidas por meio de um sensor *pick-up* magnético (indutivo), instalado na carcaça do volante com proximidade adequada dos dentes da cremalheira. As informações são enviadas ao módulo, que ajusta o posicionamento da válvula borboleta pelo atuador eletrônico obtendo a rotação desejada (PEREIRA, 2011; SOUZA et al., 2012).

A Figura 7 mostra um atuador eletrônico da Woodward e a figura 8 mostra o pick – up magnético



Figura 7. Atuador eletrônico. Fonte: WOODWARD (2011)

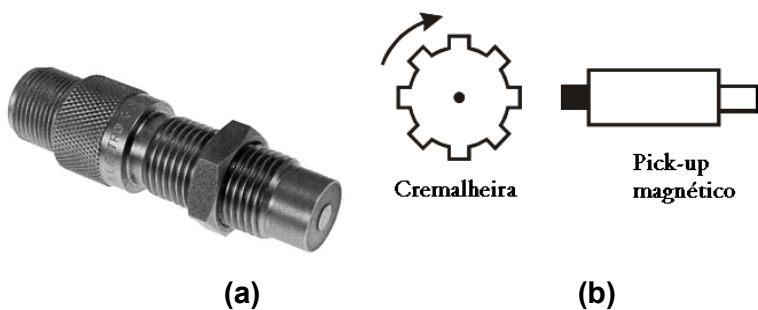


Figura 8 - (a) Pick – up magnético (b) Pick-up instalado.

### 3.6.2 Sistemas de controle da mistura ar combustível

O controle da mistura ar/combustível consiste em ajustar eletronicamente a alimentação do combustível para o motor. Esse sistema utiliza uma válvula corpo de borboleta com atuador eletrônico acoplada a um controlador digital, o qual recebe sinal de uma sonda lambda, conectada no escapamento do motor, a qual faz a leitura do teor de oxigênio dos gases de emissão, indicando se a mistura ar/combustível é pobre ou rica de combustível. De acordo com a leitura o controlador manda um sinal para o atuador eletrônico, que efetua a abertura ou fechamento da válvula borboleta, controlando a passagem de biogás para o motor, até que a mistura estequiométrica seja formada (MAURO Jr. & ALMEIDA, 2006).

Esse sistema permite uma economia de combustível e diminuição das emissões. Esse sistema corrige as variações na concentração de metano no biogás. A figura 9 mostra um sensor lambda,



Figura 9. Sensor lambda

A figura 10 Mostra o circuito de alimentação de combustível gasoso no motor (máquina primária).

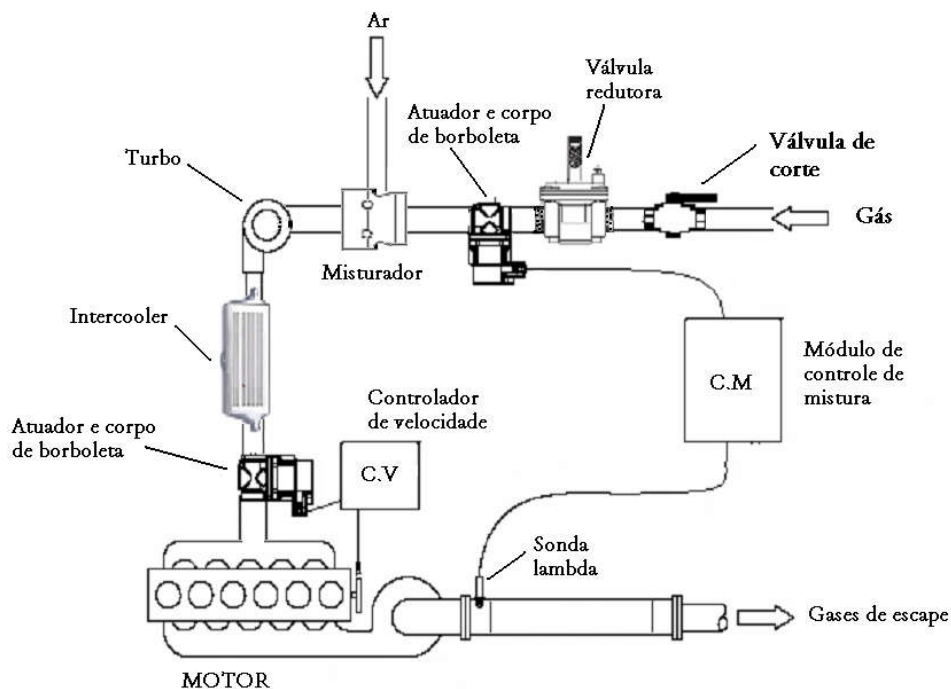


Figura 10. Sistema de alimentação de gás combustível. Adaptado de MAURO Jr. & ALMEIDA (2006).

### **3.7 DESEMPENHO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM BIOGÁS**

Como foi dito anteriormente, cada planta utiliza uma mistura de biomassa residual típica e disponível. Algumas vezes a biomassa residual é adquirida em outra propriedade distante do biodigestor, o que implica em gastos com combustível fóssil. Alguns biodigestores utilizam energia elétrica para misturar a biomassa no interior. Ou seja, para cada tipo de arranjo é necessário realizar um balanço energético, ou seja, obter a relação energia que sai/energia que entra no sistema. Isso é importante para verificar qual arranjo apresenta melhor desempenho.

A necessidade do uso mais eficiente de recursos energéticos e naturais na produção agrícola e agroindustrial nos diversos sistemas de produção culmina na adoção de medidas que promovam o melhor desempenho energético nesses sistemas (HINRICHS; KLEINBACH, 2003).

Com isso é importante a obtenção de indicadores da eficiência energética, que representam ferramenta de tomada de decisão visando um uso racional de recursos existentes num sistema de produção agrícola para a produção de um determinado produto (PIMENTEL, 2004). As cadeias de produção agrícola, tais como suinocultura, avicultura, bovinocultura e outras devem aproveitar a biomassa residual existente da melhor forma para geração de energia visando a redução do custo de produção agrícola.

O balanço energético permite algumas conclusões sobre o desempenho de um sistema de energia (BERGLUND, BÖRJESSON, 2006; BANKS et al. 2011; HAVUKAINEN et al., 2014; SANTOS & LUCAS JÚNIOR, 2004):

- A variação da produção de biogás e energia elétrica da planta ao longo do ano;
- A eficiência da planta na geração de eletricidade ao longo do ano;
- Uma comparação em termos de desempenho de geração de biogás e eletricidade em função de diferentes matérias primas utilizados no biodigestor;
- Redução do custo do produto produzido numa agroindústria ou propriedade rural em função do aproveitamento de resíduos para geração de energia.

O desempenho de um motor gerador (sistema de geração de eletricidade) varia com a carga, ou seja, quanto maior a carga do motor maior a eficiência total. A eficiência total pode ser calculada por

$$\eta = \frac{P}{\dot{V} \cdot PCI} \quad \text{Eq (9)}$$

onde P é a potência útil de geração de eletricidade (kW),  $\dot{V}$  é a vazão volumétrica de biogás ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ), nas condições normais de temperatura e pressão, PCI é o poder calorífico inferior do biogás ( $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ ). A eficiência de geração de eletricidade num motor gerador está em torno de 26%. Este parâmetro é importante para o dimensionamento do potencial de geração de eletricidade com o uso do biogás como combustível. Quando o motor gerador trabalha a baixas cargas essa eficiência pode cair pela metade (SOUZA et al, 2012).

Segundo a CARTEPILLAR (2011), um motor gerador de 132 kW, operando com 100% da carga tem um consumo de biogás de  $76,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; e operando com 50% da carga  $62,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , ou seja produção específica de energia de 1,73 a  $1,46 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ . Já um motor de 1600 kW operando com 100% da carga tem um consumo de  $832 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  e com 50% um consumo de  $461 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , com produção específica de eletricidade de 1,92 a  $1,73 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ . O biogás com 60% de metano apresenta um poder calorífico inferior de  $6 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ , logo a eficiência máxima de um motor gerador de 132 kW seria de 29%.

SILVA et al. (2018) avaliou um motor gerador de 100 kW em operação contínua durante 6 meses e como resultado principal obteve uma eficiência global do grupo gerador na conversão de energia do biogás em energia elétrica na carga máxima (100%) de 17 % ( $1,1 \text{ kWh} / \text{m}^3$  de biogás).

SOUZA et al. (2016) utilizando dois motores geradores de 100 kW cada, um instalado numa propriedade de engorda de suínos e outro num abatedouro de frangos, obteve uma eficiência de 21,8% ( $1,4 \text{ kWh} / \text{m}^3$  de biogás) Na propriedade de engorda e 17,10% ( $1,1 \text{ kWh} / \text{m}^3$  de biogás) no abatedouro.

PIPATNOMANAI et al. (2009) utilizou um gerador de pequeno porte a biogás (1,6 kW), conseguiu uma eficiência de 20,8%.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos serão conduzidos em diferentes sistemas de produção de biogás para geração de eletricidade no modo geração distribuída (SGE), ou denominadas no texto que segue e anterior, plantas SGE.

As plantas SGE avaliadas utilizam matérias primas da suinocultura para a produção de biogás nos respectivos sistemas de biodigestão, sendo que as plantas e serem avaliadas estão localizadas no Município de Toledo PR.

A Figura 11 mostra o fluxograma típico de uma planta SGE, onde foram divididos em três subsistemas:

Subsistema I: composto de sistema biodigestor, com entrada de biomassa e saída de biogás e biofertilizante.

Subsistema II: composto por sistema biodigestor e motor gerador, com entrada de biomassa residual e saída de eletricidade.

Nos sistemas I e II há consumo de energia elétrica operacional combustível para transporte de biomassa até o biodigestor.

Sistema III: Motor gerador e sistema de conexão com a rede da concessionária em GD.

Neste estudo foi avaliado o subsistema III, especificamente o motor gerador das plantas selecionadas. Este estudo consistiu das seguintes etapas:

Etapa 1 – Avaliação do desempenho de motores geradores, em termos de consumo ( $m^3.h^{-1}$ ), consumo específico ( $m^3.kWh^{-1}$ ) e eficiência (%), variando-se a carga de operação.

Etapa 2 – Avaliação do desempenho e emissões de dois motores geradores produzidos pela empresa Biogás Motores Estacionários LTDA, ou seja, pelo autor da tese, com variação de parâmetros de combustão e carga, procurando caracterizar a tecnologias.

Após a avaliação foi possível caracterizar, em termos de desempenho, as tecnologias de motor gerador a biogás em operação em propriedades de suínos em Toledo PR, comparando-se tecnologias de motores de outros fabricantes de motores geradores, com motores produzidos pela empresa Biogás Motores Estacionários LTDA, do autor da TESE.

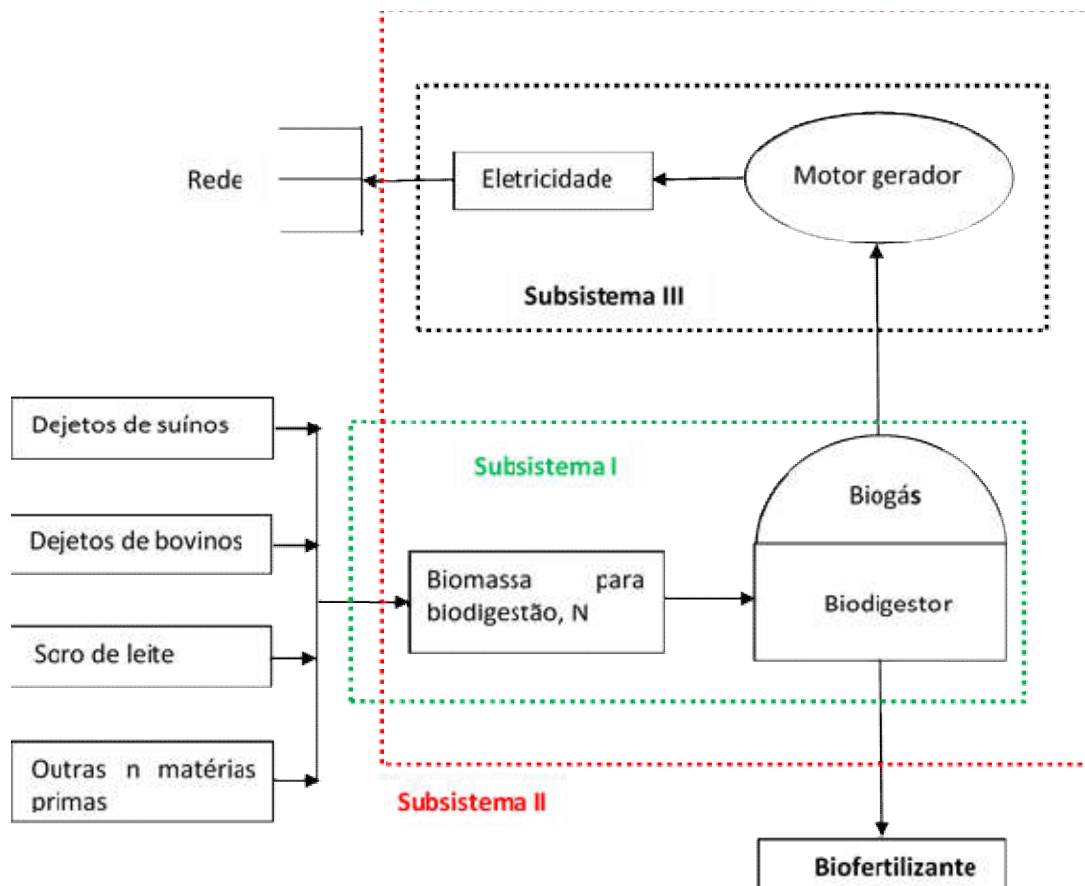


Figura 11. Fluxograma de uma planta SGE típica.

#### 4.1 PRIMEIRA ETAPA: AVALIAR O DESEMPENHO DE MOTORES GERADORES A BIOGÁS OPERANDO EM DIFERENTES CARGAS EM UNIDADE DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Nesta etapa a carga poderá ser variada de 10 a 75 kW. O grupo gerador será ajustado a uma carga fixa, entre 10 a 100% da carga nominal, por meio da variação na energia injetada na concessionária. Após o ajuste serão feitas as leituras de carga, consumo específico e composição do biogás.

O fluxo de biogás foi medido por meio de um medidor volumétrico de fluxo de biogás do tipo dispersão mássica, modelo TA2-A1B0-K30/TFT-141A-000, marca Magnetrol, em  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . O percentual de metano ( $\text{CH}_4$ ), foi obtida por meio de um analisador de gases, marca GEM 5000, da Landtec, o qual possui sensores



infravermelhos para medir a concentração de metano e dióxido de carbono no biogás. Por meio da concentração de metano é possível obter o poder calorífico inferior do biogás consumido pelo motor gerador, em  $\text{kWh.m}^{-3}$ .

A avaliação do desempenho de motores geradores nesta etapa consiste na obtenção dos principais parâmetros de desempenho de motores geradores a biogás: consumo de biogás ( $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ ), consumo específico ( $\text{m}^3.\text{kWh}^{-1}$ ) e eficiência (%), variando-se a carga de operação. A Figura 12 mostra um motor gerador a biogás e pontos de medição.

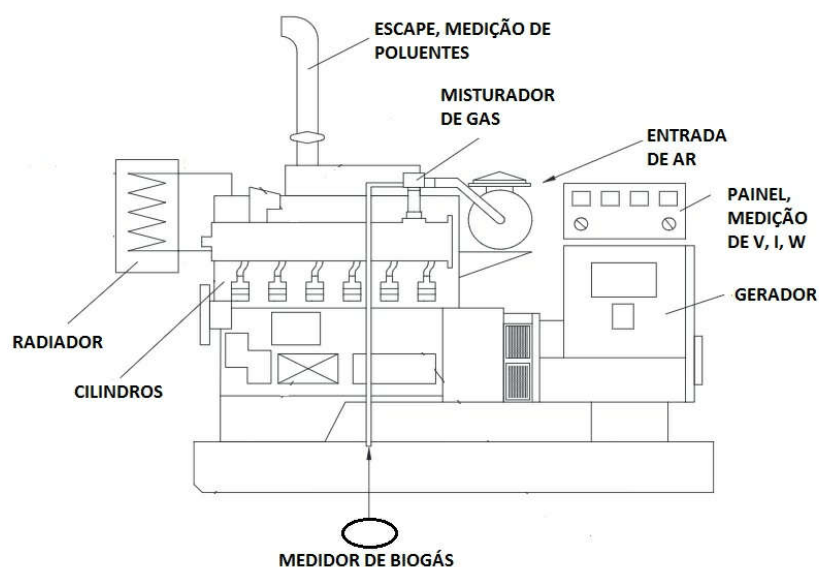


Figura 12. Motor gerador a biogás e pontos de medição

#### 4.1.1 Descrição dos motores geradores avaliados

Os experimentos serão conduzidos em diferentes plantas de geração de eletricidade no modo geração distribuída (GD) a biogás, com diferentes tecnologias de motores geradores.

As plantas avaliadas estão localizadas no Município de Toledo e Ouro Verde do Oeste - PR. Foram avaliados cinco motores geradores, os quais possuem deslocamento volumétrico e número de cilindros diferentes e com potências que variam de 35 a 75 kW. A seguir estão as especificações e localização dos motores geradores.

## Motor gerador A

A propriedade rural onde está instalado o Motor gerador A está localizada no município de Toledo PR, distrito de São Miguel, na região Oeste do estado do Paraná, coordenadas geográficas  $24^{\circ}35'33,77''\text{S}$   $53^{\circ}50'58,58''\text{N}$  ( $24,5927130^{\circ}$ ;  $53,8496060^{\circ}$ ), cuja principal atividade econômica é a suinocultura onde abriga em torno de 1650 suínos em terminação. A propriedade possui uma planta geradora de eletricidade a partir do biogás, com capacidade nominal de produção de 35 kW, conectada à rede de distribuição de energia. Motor produzido pela empresa Biogás Motores Estacionários LTDA, localizada em Toledo-PR.

Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**<sup>13</sup> é ilustrado o grupo gerador instalado para geração de energia elétrica a partir do biogás.



Figura 13. Grupo motor gerador A.

A tabela 4 e 5 mostram as características técnicas do motor e do gerador, referentes aos conjunto motor gerador A.

Tabela 4. Características técnicas do motor gerador A – Máquina primária (Motor)

<b>Descrição Motor</b>	<b>Dados técnicos</b>
Modelo/Marca	Motor Ford 4.9
Número e disposição dos cilindros	6 em linha
Ciclo (tempos)	Otto 4 tempos
Diâmetro dos cilindros	101,60 mm
Curso dos pistões	101,09 mm
Cilindrada total	4.90 litros
Taxa de compressão	8,8:1
Combustível	Biogás
Potência máxima líquida (gasolina)	148 cv @ 3500 rpm
Torque máximo líquido (gasolina)	338 Nm @ 2400 rpm

Tabela 5. Características técnicas do motor gerador A – Máquina secundária (gerador)

<b>Descrição Gerador</b>	<b>Dados técnicos</b>
Marca/modelo	WEG/ GTA 162 AI 32
Potência Ativa Nominal	30 kW (40 kVA)
Rotação/frequência/número de polos	1800 rpm/60 Hz/4 polos
Fator de Potência	0,8
Proteção	Ip-21 ou Ip-23 classe “F” ou “H
Refrigeração	Ventiladora centrífuga montada no próprio eixo
Tensão de Operação	380 V / 220 V (especificar) Trifásico
Controle de Rotação	Eletrônico com controle por sensor, de alta estabilidade (+- 5 RPM).

A energia elétrica produzida pelo grupo gerador visa suprir a demanda interna da propriedade e o excedente é exportado para rede de distribuição em regime de compensação.

## Motor gerador B e Motor gerador C

A propriedade rural está localizada no município de Toledo PR, distrito de Vila Ipiranga, na região Oeste do estado do Paraná, coordenadas geográficas 24°39'28,05"S e 53°52'46,55"N (24,6577930; 53,8795960), cuja principal atividade econômica seria o aproveitamento de resíduos da suinocultura e outros resíduos animais para produção de biogás e eletricidade. A propriedade possui um biodigestor, mistura completa, o qual é alimentado por resíduos colhido via caminhão tanque em propriedades próximas. A propriedade possui duas plantas geradoras de eletricidade a partir do biogás, Motores geradores B e C com capacidades nominais de produção de 75 kW cada uma, conectadas à rede de distribuição de energia. A figura 14 e 15 mostram os motores geradores B e C.



Figura 14. Grupo motor gerador B

A tabela 6 e 7 mostram as características técnicas do motor e do gerador, referentes aos conjuntos motor gerador B e C.

Tabela 6. Características técnicas do motor gerador B – Máquina primária (Motor)

<b>Descrição Motor</b>	<b>Dados técnicos</b>
Marca/Modelo	MAN/Motor a gás 0836 E
Número e disposição dos cilindros	6 em linha
Ciclo (tempos)	Motor a gás 4 tempos
Diâmetro dos cilindros	108,00 mm
Curso dos pistões	125,00 mm
Cilindrada total	6,90 litros
Taxa de compressão	13,5
Combustível	Biogás
Potência (Conforme ISO 3046, Parte I)	110 kW
	1800 rpm

Fonte: MAN (2023)

Tabela 7. Características técnicas do motor gerador B – Máquina secundária (gerador)

<b>Descrição Gerador</b>	<b>Dados técnicos</b>
Marca/modelo	LEROY-SOMER/LSA-44.3-S2
Potência Ativa Nominal	74 kW (93 kVA)
Rotação/frequência/número de polos	1800 rpm/60 Hz/4 polos
Fator de Potência	1,00
Proteção	Ip-21 ou Ip-23 classe “F” ou “H
Refrigeração	Ventiladora centrífuga montada no próprio eixo
Tensão de Operação	220 V / 480 V Trifásico
Controle de Rotação	Eletrônico com controle por sensor, de alta estabilidade (+- 5 RPM).

Fonte: GENERAL POWER (2023)



Figura 15. Grupo motor gerador C

A tabela 8 e 9 mostram as características técnicas do motor e do gerador, referentes aos conjunto motor gerador C.

Tabela 8. Características técnicas do motor gerador C – Máquina primária (Motor)

<b>Descrição Motor</b>	<b>Dados técnicos</b>
Modelo/Marca	<b>Motor MWM 4.12</b>
Número e disposição dos cilindros	4 em linha
Ciclo (tempos)	Ottolizado 4 tempos
Diâmetro dos cilindros	105,00 mm
Curso dos pistões	137,00 mm
Cilindrada total	4.80 litros
Taxa de compressão	12:1
Combustível	Biogás
Potência máxima líquida (diesel)	140 cv @ 2200 rpm
Torque máximo líquido (diesel)	550 Nm @ 1600 rpm

Tabela 9. Características técnicas do motor gerador C – Máquina secundária (gerador)

<b>Descrição Gerador</b>	<b>Dados técnicos</b>
Marca/modelo	WEG/GTA 202 AI 34
Potência Ativa Nominal	55 kW (80 kVA)
Rotação/frequência/número de polos	1800 rpm/60 Hz/4 polos
Fator de Potência	0,8
Proteção	Ip-21 ou Ip-23 classe “F” ou “H
Refrigeração	Ventiladora centrífuga montada no próprio eixo
Tensão de Operação	380 V / 220 V (especificar) Trifásico
Controle de Rotação	Eletrônico com controle por sensor, de alta estabilidade (+- 5 RPM).

### **Motor gerador D**

A propriedade rural onde está instalado o Motor gerador A está localizada no município de Ouro Verde do Oeste PR, na região Oeste do estado do Paraná, coordenadas geográficas 24°46'25.7 S e 53°50'30.2 O, cuja principal atividade econômica é a suinocultura onde abriga em torno de 1200 suínos em terminação. A propriedade possui uma planta geradora de eletricidade a partir do biogás, com capacidade nominal de produção de 75 kW, conectada à rede de distribuição de energia. Motor produzido pela empresa Biogás Motores Estacionários LTDA, localizada em Toledo-PR.

Na figura 16 é ilustrado o grupo gerador D instalado para geração de energia elétrica a partir do biogás.



Figura 16. Grupo motor gerador D

A tabela 10 e 11 mostram as características técnicas do motor e do gerador, referentes aos conjunto motor gerador D.

Tabela 10. Características técnicas do motor gerador D – Máquina primária (Motor)

<b>Descrição Motor</b>	<b>Dados técnicos</b>
Modelo/Marca	<b>Motor MWM 6.12</b>
Número e disposição dos cilindros	6 em linha
Ciclo (tempos)	Ottolizado 4 tempos
Diâmetro dos cilindros	105,00 mm
Curso dos pistões	137,00 mm
Cilindrada total	7,20 litros
Taxa de compressão	12:1
Combustível	Biogás
Potência máxima líquida (diesel)	225 cv
	@ 2200 rpm
Torque máximo líquido (diesel)	861 Nm
	@ 1600 rpm



Tabela 11. Características técnicas do motor gerador D – Máquina secundária (gerador)

<b>Descrição Gerador</b>	<b>Dados técnicos</b>
Marca/modelo	WEG/GTA 202 AI 36
Potência Ativa Nominal	75 kW (120 kVA)
Rotação/frequência/número de polos	1800 rpm/60 Hz/4 polos
Fator de Potência	0,8
Proteção	Ip-21 ou Ip-23 classe “F” ou “H
Refrigeração	Ventiladora centrífuga montada no próprio eixo
Tensão de Operação	380 V / 220 V Trifásico
Controle de Rotação	Eletrônico com controle por sensor, de alta estabilidade (+- 5 RPM).

### **Motor gerador E**

A propriedade rural onde está instalado o Motor gerador A está localizada no município de Toledo PR, na região Oeste do estado do Paraná, coordenadas geográficas 24°45'33,1" S e 53°46'03,3", cuja principal atividade econômica é a suinocultura onde abriga em torno de 2500 marrans. A propriedade possui uma planta geradora de eletricidade a partir do biogás, com capacidade nominal de produção de 50 kW, conectada à rede de distribuição de energia. Motor produzido pela empresa Biogás Motores Estacionários LTDA, localizada em Toledo-PR.

Na Erro! Fonte de referência não encontrada.17 é ilustrado o grupo motor gerador E instalado para geração de energia elétrica a partir do biogás.



Figura 17. Grupo motor gerador E

A tabela 12 e 13 mostram as características técnicas do motor e do gerador, referentes aos conjunto motor gerador D.

Tabela 12. Características técnicas do motor gerador E – Máquina primária (Motor)

<b>Descrição Motor</b>	<b>Dados técnicos</b>
Modelo/Marca	<b>Mercedes Benz OM 352</b>
Número e disposição dos cilindros	6 em linha
Ciclo (tempos)	Ottolizado 4 tempos
Diâmetro dos cilindros	97,00 mm
Curso dos pistões	128,00 mm
Cilindrada total	5,60 litros
Taxa de compressão	12,5:1
Combustível	Biogás
Potência máxima líquida (diesel)	130 cv @ 1700 rpm
Torque máximo líquido (diesel)	432 Nm @ 2400 rpm

Tabela 13. Características técnicas do motor gerador E – Máquina secundária (gerador)

<b>Descrição Gerador</b>	<b>Dados técnicos</b>
Marca/modelo	- Kohlbach/ Modelo 225– MB
Potência Ativa Nominal	45 kW (70 kVA)
Rotação/frequência/número de polos	1800 rpm/60 Hz/4 polos
Fator de Potência	0,8
Proteção	Ip-21 ou Ip-23 classe “F” ou “H
Refrigeração	Ventiladora centrífuga montada no próprio eixo
Tensão de Operação	380 V / 220 V Trifásico
Controle de Rotação	Eletrônico com controle por sensor, de alta estabilidade (+- 5 RPM).

#### **4.2 SEGUNDA ETAPA: AVALIAR O DESEMPENHO E EMISSÕES DE MOTORES GERADORES A BIOGÁS OPERANDO EM DIFERENTES CARGAS, PONTO DE IGNIÇÃO E RELAÇÃO AR COMBUSTÍVEL**

##### **Definição das variáveis que influenciam no desempenho do motor gerador e combinações de ensaios**

As variáveis foram definidas buscando-se ajustes existentes no mercado, pesquisadores e situações de baixo rendimento das máquinas. O desgaste de algumas peças móveis dos motores também ajudaram a definir possíveis ajustes em alguns parâmetros, como por exemplo, o ponto de ignição e a relação ar combustível (Lambda)

Para a **variável ponto de ignição**, partiu-se de artigos técnicos que informavam que as velocidades de propagação da chama no biogás, que são inferiores ao GNV (combustível padrão), e também eram inferiores a outros combustíveis convencionais, e por isto o ponto deveria ser avançado para compensar a mesma. Em função disto foram definidos três pontos de ignição, já estando o primeiro avançado em relação ao original.

As variáveis para o ponto de ignição ficaram assim definidas:

**P1** – Ponto de ignição avançado em 22° APMS

**P2** – Ponto de ignição avançado em 27° APMS

**P3** – Ponto de ignição avançado em 28° APMS

Para a **variável Lambda ( $\lambda$ )** levou-se em conta o desempenho dos motores disponíveis no mercado, no que diz respeito ao consumo e a temperatura de escape.

As variáveis para o Lambda ficaram assim definidas:

**Lambda 1** – 1.3  $\lambda$

**Lambda 2** – 1.4  $\lambda$

**Lambda 3** – 1.6

Para a **variável Carga (kW)** buscou-se 3 faixas de potência para que todos os motores ensaiados pudessem trabalhar na carga limite e também em situações onde o rendimento será baixo.

As variáveis para a carga ficaram assim definidas: para um motor com carga máxima de 75 kW, como

**C1** – 30 kW (40% da carga máxima)

**C2** – 45 kW (60% da carga máxima)

**C3** – 70 kW (90% da carga máxima)

As variáveis para a carga ficaram assim definidas: para um motor com carga máxima de 50 kW, como

**C1** – 20 kW (40% da carga máxima)

**C2** – 30 kW (60% da carga máxima)

**C3** – 45 kW (90% da carga máxima)

As combinações para os testes de performance dos motores geradores ficaram assim definidas conforme a tabela 14, onde P (variável ponto);  $\lambda$  (variável

lambda) e C (Carga). Todas as combinações serão repetidas para um gás pobre e um gás rico em metano. Durante os ensaios foram feitas seis (06) repetições para a obtenção do valor médio de consumo em cada uma das combinações.

Tabela 14. Combinações para Ponto (P), Lambda ( $\lambda$ ) e Carga (C)

P1 $\lambda$ 1C1	P1 $\lambda$ 2C1	P1 $\lambda$ 3C1
P1 $\lambda$ 1C2	P1 $\lambda$ 2C2	P1 $\lambda$ 3C2
P1 $\lambda$ 1C3	P1 $\lambda$ 2C3	P1 $\lambda$ 3C3
P2 $\lambda$ 1C1	P2 $\lambda$ 2C1	P2 $\lambda$ 3C1
P2 $\lambda$ 1C2	P2 $\lambda$ 2C2	P2 $\lambda$ 3C2
P2 $\lambda$ 1C3	P2 $\lambda$ 2C3	P2 $\lambda$ 3C3
P3 $\lambda$ 1C1	P3 $\lambda$ 2C1	P3 $\lambda$ 3C1
P3 $\lambda$ 1C2	P3 $\lambda$ 2C2	P3 $\lambda$ 3C2
P3 $\lambda$ 1C3	P3 $\lambda$ 2C3	P3 $\lambda$ 3C3

Os ensaios serão realizados realizando à leitura da qualidade do combustível, e na sequência a bateria de testes com as combinações já determinadas. Teremos situações que em função do porte dos motores estes não atingirão a potência máxima definida para os ensaios, isto se dá em função do baixo deslocamento volumétrico. Nesta situação serão elencados os melhores resultados de rendimento.

Os parâmetros a serem variados serão ajustados com o motor em funcionamento, e não terão efeito nenhum na energia disponibilizada para os testes. Sendo todos conectados em GD, e aprovados pela Concessionária Copel.

Foram definidos para essa etapa (etapa 2), dois motores geradores, os motores D e E, com cargas máximas de 75 kW e 50 kW, ambos estão descritos no item Etapa 1. O objetivo foi verificar se há diferença de desempenho em termos de performance e emissões dos dois motores escolhidos, ambos produzidos pela Biogás Motores Estacionários LTDA.

### 4.3 COLETA DE DADOS - EQUIPAMENTOS

Os dados coletados foram consumo de biogás no motor gerador (Etapa 1 e 2), composição do biogás (Etapa 1 e 2) e emissões de poluentes (somente na Etapa 2). Esses dados são importantes no processo de determinação do desempenho dos grupos geradores a biogás descritos acima, para cada uma das etapas.

#### Consumo de biogás no Grupo gerador

Para medir o consumo de biogás no motor foi utilizado um transmissor de fluxo térmico de massa, marca Magnetrol, modelo TA2. O equipamento realiza a medição de vazão mássica através da dispersão térmica. A faixa de medição de vazão do equipamento é de  $0,05$  a  $100\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  com precisão de  $\pm 1\%$  da leitura  $+0,5\%$  da calibração.

O aparelho foi instalado na linha de gás próximo a admissão do motor, de forma que mede a vazão consumida pelo motor durante a operação. O aparelho mede a vazão instantânea (em  $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ). A figura 18 mostra o medidor de fluxo de biogás instalado e suas características técnicas na tabela 15.



Figura 18. Medidor de vazão do biogás

Tabela 15. Características do transmissor de vazão

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Grandeza	Vazão
Método de medição	Medição de fluxo mássico através da diferença de temperatura
Exatidão (vazão)	$\pm 1\%$ da leitura + 0,5% do F.E.
Faixa de medição (vazão)	0 a 100 Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
Alimentação	24 Vcc
Sinal	Analógico (4-20 mA)

### **Controle da carga e medição de potência no motor gerador**

Todos os sistemas de geração de energia avaliados e conectados à rede de distribuição possuem um controlador microprocessado, modelo GC600 Mains, que integra o painel de comando do grupo gerador. Esse controlador tem a função de supervisionar e proteger o sistema de geração de energia elétrica. É um sistema homologado pela concessionária de energia (COPEL – Companhia Energética do Paraná). Este sistema mostra instantaneamente a energia produzida (kWh), potência (kW), a tensão (V), corrente (A) e o fator de potência. Por meio deste controlador é possível variar a potência do gerador, ou seja, aplicar cargas diferentes de geração ao sistema (em kW). A figura 19 mostra o GC600 e suas características técnicas na tabela 16.





de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S no biogás. A figura 20 mostra o equipamento e a tabela 17 os seus dados técnicos.



Figura 20. Monitor de gás portátil

Tabela 17. Características do analisador de biogás GEM 5000.

Gás	Faixa de leitura	Precisão
CH <sub>4</sub>	0-100%	±0,7 - 0,5% (Vol)
CO <sub>2</sub>	0-100%	±0,6 - 0,5% (Vol)
H <sub>2</sub> S	0-5000 ppm	± 2%FS
O <sub>2</sub>	0 – 25%	± 0,25 – 1,0% (Vol)
CO	0 – 500 ppm	±2%FS

### Medição das emissões de poluentes gasosos

Para a medição dos níveis de gases poluentes emitidos pela combustão das misturas no motor, foi utilizado um analisador de combustão Infralyt ELD, da marca Saxon Junkalor GmbH. A tabela 7 apresenta os limites de medição dos sensores deste analisador. Com este equipamento foi possível medir as emissões de NO, NO<sub>2</sub>, CO, HC, CO<sub>2</sub>, e O<sub>2</sub>. A tabela 18 mostra os dados técnicos do medidor e figura 21 o medidor.

Tabela 18. Dados técnicos do medidor de combustão

Gás	Faixa de leitura	Precisão
CO	0 – 2000 ppm vol	±10 ppm
CO <sub>2</sub>	0 – 20%vol	±0,3%
NO	0 – 5000 ppm	± 5 ppm
NO <sub>2</sub>	0 – 500 ppm	± 5 ppm
HC	0 – 2500 ppm	±10 ppm
O <sub>2</sub>	0 – 22%	±0,3%

Esta sonda conta com uma haste para captação dos gases provenientes da combustão no escapamento do motor, a qual é conectada ao analisador através de uma mangueira com tubo para retenção da umidade e do material particulado. Os gases são succionados do escapamento através de uma bomba interna ao equipamento, passam pelos sensores do equipamento e são expelidos ao ambiente.



Figura 21 Analisador Infracal ELD.

As medições das emissões de gases serão realizadas nas cargas de melhor rendimento de cada motor.

#### 4.4 DESEMPENHO DOS MOTORES GERADORES

Os parâmetros de análise de desempenho dos motores geradores serão o consumo de biogás, consumo específico de biogás e eficiência de conversão de energia elétrica no conjunto motor gerador. Esses parâmetros foram obtidos levando-se em consideração: a variação da carga do motor gerador, o ponto de

ignição, a relação ar combustível ( $\lambda$ ), conforme as combinações mostradas na tabela 14.

### **Consumo específico de biogás do motor gerador**

Uma das maneiras de descrever a eficiência de um motor gerador é pelo consumo específico de combustível. Com a obtenção dos dados de consumo instantâneo de biogás ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) e a potência instantânea ativa gerada (kW) pode-se calcular o consumo específico (ÇENGEL e BOLES, 2013).

Na Equação (4.1) é apresentado como deve-se calcular o consumo específico de combustível ( $cec$ ), em  $\text{m}^3 \cdot \text{kWh}^{-1}$ .

$$cec = \frac{Q}{P} \quad (\text{eq. 4.1})$$

Onde  $Q$  é o consumo de biogás no grupo gerador ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ );  $P$  a potência ativa gerada ou carga do gerador (kW). A carga é medida no sistema de controle do motor gerador, descrito anteriormente.

Para a medição do consumo de biogás no motor gerador foi utilizado o transmissor de vazão termal descrito anteriormente o qual foi instalado na tubulação de alimentação de biogás ao motor gerador. Localizada entre o biodigestor e o motor gerador. Quando todo gás do biodigestor é consumido pelo motor gerador, pode-se dizer que o consumo corresponde ao biogás que foi produzido num intervalo de tempo.

### **Eficiências de conversão de biogás em energia elétrica no motor gerador**

O desempenho de um motor-gerador varia com a carga, ou seja, quanto maior a carga do motor maior a eficiência global. Para conhecer melhor este desempenho deve-se calcular esta eficiência.

O cálculo da eficiência global de conversão de biogás em energia elétrica ( $\eta$ ) é dada pela equação a seguir (MITZLAFF, 1988).

$$\eta = \frac{P}{Q \cdot PCI_{\text{biogás}}} \quad (\text{eq.4.2})$$

onde  $PCI_{biogás}$  é poder calorífico inferior do biogás ( $kWh.m^{-3}$ ), o qual depende da composição do biogás, ou seja, do percentual de metano;  $Q$  o consumo de biogás no grupo gerador ( $m^3.h^{-1}$ ) e  $P$  a potência ativa gerada ou carga do gerador (kW).

Para a obtenção do poder calorífico inferior (PCI) do biogás, em  $kWh.m^{-3}$ , foi obtido os dados do teor de metano no biogás, por meio do analisador descrito anteriormente. Em posse da informação da densidade calculada para a temperatura desejada obtém-se o poder calorífico do biogás com a concentração de metano e o PCI padrão para o gás metano. Na equação a seguir é demonstrado o cálculo utilizado.

$$PCI_{biogás} = \%_{CH_4} \cdot PCI_{padrão} \quad (eq.4.3)$$

onde  $\%_{CH_4}$  = concentração de metano no biogás (%);  $PCI_{padrão}$  = poder calorífico inferior do metano padrão ( $9,97 kWh.m^{-3}$ ), (ANGELIDAKI, et al., 2018).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Concentração de metano do biogás e poder calorífico inferior – Etapa 1

Após as medições de concentração de metano no biogás consumido por cada um dos motores analisados, foram obtidos os seguintes dados, mostrado na tabela 19.

Tabela 19. Concentrações médias de metano medidas durante os ensaios dos motores geradores e o PCI do biogás encontrado.

<b>Biogás consumido nos motores geradores</b>	<b>Concentração média de metano (%)</b>	<b>Poder calorífico inferior do biogás – PCI (kWh.m<sup>-3</sup>)</b>
Motor A	58	5,78
Motor B	53	5,28
Motor C	53	5,28
Motor D	65,5	6,53
Motor E	54	5,38

Na medição da composição do biogás encontrou-se concentrações de metano entre 53 e 65,5%, as quais estão dentro da faixa de 50 a 70% (ANGELIDAKI et al., 2018; SANTOS, 2000; KHAN et al., 2017). A concentração de metano depende do tipo substrato e do PH no processo de biodigestão. Os valores acima mostram que há uma variação da concentração de metano, pois cada motor gerado consome biogás de uma planta específica de biodigestão. O biogás consumido pelos motores B e C apresentam baixa concentração de metano, pois o substrato utilizado no processo de biodigestão não é somente resíduos de suinocultura, mas uma mistura de outros resíduos tais como o soro de leite. Já o substrato que originou o biogás dos biodigestores dos motores A e D são somente de suínos em terminação. No motor E, a concentração de metano é baixa, pois há injeção de ar no biodigestor com o intuito de reduzir a concentração de ácido sulfídrico e isso causa uma redução, também, na concentração de metano. O poder calorífico inferior do metano padrão é 9,97 kWh.m<sup>-3</sup>) de acordo com ANGELIDAKI, et al. (2018), logo o do biogás varia

conforme a concentração de metano. Um biogás com uma concentração máxima de metano (70%) teria um poder calorífico inferior de aproximadamente  $7,0 \text{ kWh.m}^{-3}$ .

## 5.2 Desempenho dos motores geradores – Etapa 1

A figura 22 e a tabela 20 mostram os resultados do consumo dos motores geradores, ensaiados em função da carga (kW). As cargas máximas são: 30 kW no motor A, 60 kW no motor C, 50 kW no motor E e 75 kW nos motores B e D.

Os motores A, D e E são motores produzidos pela empresa Biogás Motores Estacionários LTDA (BIOGÁS), já o motor B seria produzido por uma empresa da Alemanha e o Motor C pela MWM motores. Os dados de desempenho apresentados a seguir permitem comparar os motores produzidos pela empresa Biogás Motores Estacionários LTDA com motores de outras empresas. Também, comparar os modelos A, D e E, produzidos pela Biogás, um em relação ao outro.

Os modelos A, D e E, produzidos pela BIOGÁS, operam com avanço de ignição (ponto) de  $25^\circ$  e relação ar combustível ( $\lambda$ ) de 1,45.

Observa-se que com o aumento da carga, o consumo é maior, ou seja, quanto maior a potência de uma máquina térmica a demanda por combustível é maior. Observa-se que o motor A que é um motor ciclo otto, o qual foi convertido a biogás, apresentou um consumo menor em relação aos motores D e E, pois os dados obtidos foram nas cargas máxima e média, a qual seria  $31,16 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a 30 kW (100%) e  $22,21 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  a 15 kW (50%), isso porque a faixa de operação do motor A é de até 30 kW, enquanto os motores D e E é 75 e 50 kW. O índice que permitem avaliar melhor o desempenho seria o consumo específico e eficiência, mostrados a seguir.

Dentre os motores geradores tipicamente utilizados para operar com biogás e comercializados. O motor gerador B e C foram os que apresentaram um menor consumo, pois possuem um sistema de controle de injeção de combustível diferente dos demais. O sistema de injeção dos motores convencionais consiste basicamente no controle da relação ar/combustível por meio de um sensor  $\lambda$  e de uma válvula borboleta. Ao passo que os motores B e C possuem um controle de injeção de combustível baseado na pressão e temperatura de combustão no pistão.

Isso mostra que há uma necessidade de que os fabricantes nacionais de motores geradores a biogás utilizem o mesmo sistema, a fim de melhorar o rendimento dos motores e ter economia no consumo de biogás.

Os fabricantes nacionais trabalham utilizando as informações da sonda lambda. Embora não seja a melhor tecnologia, muitas vezes é aplicada em função das peças de reposição para no caso de assistência técnica. A empresa Biogás em parceria com a Woodward já está em testes com sistema SG Plus, sistema que equipa o motor C.

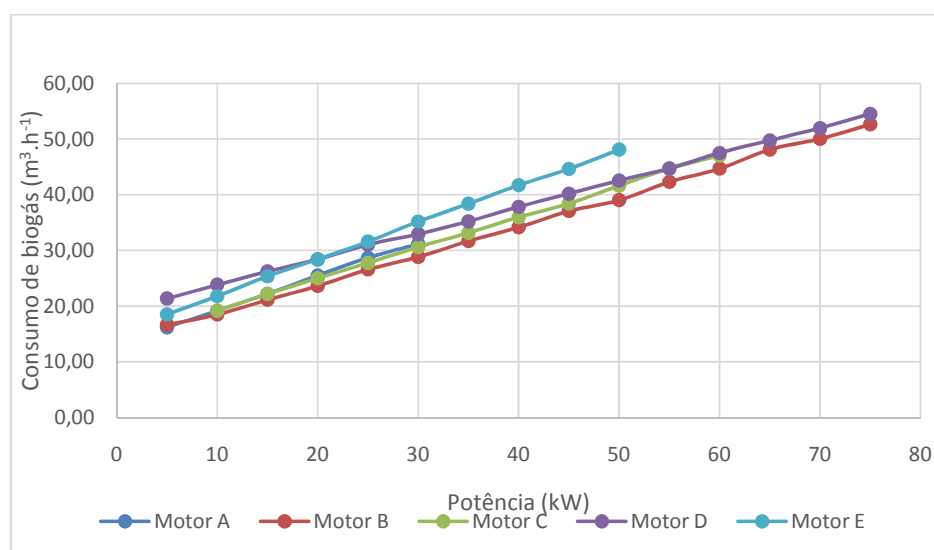


Figura 22. Consumo dos motores geradores ensaiados

Tabela 20. Consumo dos motores geradores (em  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )

Potência (kW)	Motor A	Motor B	Motor C	Motor D	Motor E
5	16,19	16,67		21,36	18,54
10	19,18	18,53	19,19	23,85	21,82
15	22,21	21,15	22,21	26,26	25,37
20	25,52	23,66	25,02	28,42	28,41
25	28,68	26,61	27,79	31,05	31,60
30	31,16	28,84	30,63	32,96	35,21
35		31,70	33,19	35,23	38,41
40		34,17	35,99	37,84	41,73
45		37,08	38,44	40,21	44,65
50		39,03	41,64	42,57	48,13
55		42,32	44,72	44,75	
60		44,70	47,06	47,52	
65		48,13		49,76	
70		50,05		51,98	
75		52,77		54,54	

A figura. 23 e tabela 21 mostram os resultados de consumo específico dos motores ensaiados, obtidos pela relação entre a carga dos motores e o consumo. Observa-se que o consumo específico diminui com a carga do motor gerador, como observado por VERMA et al. (2017) e Silva et al. (2018). Como descrito anteriormente o consumo específico em motores com tecnologia de controle de combustão avançada possuem menor consumo específico, independente da carga. O consumo específico também fica mais baixo em potências mais próximas da máxima, visto pela melhora do rendimento. Os Motores B e D apresentaram um consumo específico menor nas potência máxima,  $0,70$  e  $0,73 \text{ m}^3 \cdot \text{kWh}^{-1}$ , menores que aquele encontrado por Silva et al. (2018),  $0,89 \text{ m}^3 \cdot \text{kWh}^{-1}$ , operando um motor similar ao motor D na potência máxima. Os motores B e D apresentaram um menor consumo específico e portanto uma maior eficiência devido ao fato de apresentarem um melhor controle de combustão.

O motor A, apesar de não ser um motor diesel otolizado e manter as mesmas características do motor a gasolina original (ciclo otto), apresentou um consumo específico de  $1,04 \text{ m}^3 \cdot \text{kWh}^{-1}$ , na potência máxima,  $30 \text{ kW}$ , ficando próximo do consumo específico do Motor E na potência máxima,  $0,96 \text{ m}^3 \cdot \text{kWh}^{-1}$ , o qual é um motor diesel otolizado e com um custo maior de conversão em biogás.



Observando-se os dados acima conclui-se que os grupos geradores a biogás de menor escala (menor potência), apresentaram um consumo específico maior em suas respectivas cargas/potências máximas. Por outro lado, são grupos geradores de menor custo capital e menor custo de manutenção.

Quando compara-se o Motor A, de menor escala, menor custo capital e de operação, que pode operar a 30 kW durante 24 horas, com motores grandes operando na carga de 30 kW (Motores C, D e E), verifica-se que o consumo específico de todos se aproxima de  $1 \text{ m}^3.\text{kWh}^{-1}$ . Em situações operacionais onde não é possível operar com cargas elevadas durante 24 horas, devido à limitações da rede de energia elétrica e variação na produção de biogás, justifica-se a utilização de grupos geradores menores trabalhando 24 horas na potência máxima, ao invés de motores maiores com potências baixas. Problema muito comum nas usinas atualmente, onde a concessionária não consegue absorver a energia gerada por elevada tensão na rede. Nestes casos a potência de um grupo gerador de maior escala deve ser reduzida e como consequentemente o rendimento também.

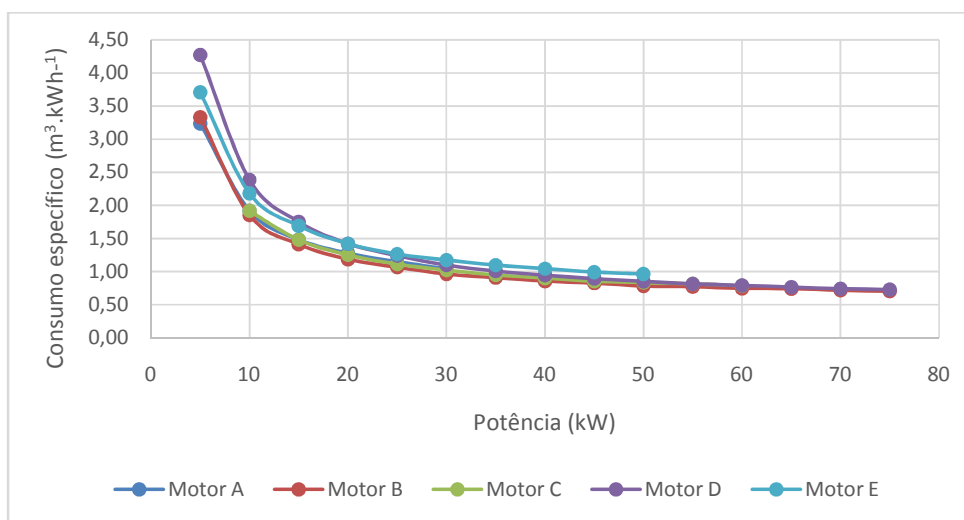


Figura 23. Consumo específico dos motores geradores

Tabela 21. Consumo específico dos motores geradores ( $\text{m}^3 \cdot \text{kWh}^{-1}$ ).

Potência (kW)	Motor A	Motor B	Motor C	Motor D	Motor E
5	3,24	3,33		4,27	3,71
10	1,92	1,85	1,92	2,39	2,18
15	1,48	1,41	1,48	1,75	1,69
20	1,28	1,18	1,25	1,42	1,42
25	1,15	1,06	1,11	1,24	1,26
30	1,04	0,96	1,02	1,10	1,17
35		0,91	0,95	1,01	1,10
40		0,85	0,90	0,95	1,04
45		0,82	0,85	0,89	0,99
50		0,78	0,83	0,85	0,96
55		0,77	0,81	0,81	
60		0,75	0,78	0,79	
65		0,74		0,77	
70		0,71		0,74	
75		0,70		0,73	

A figura. 24 e tabela 22 mostram os resultados de eficiência dos motores geradores ensaiados, obtidos pela relação entre a carga dos motores, consumo específico e poder calorífico do biogás consumido pelos motores. Observa-se que o motor A possui um rendimento baixo, pois é um motor ciclo otto original aplicado em motor a gasolina, além de não ter turbina e ter uma taxa de compressão menor que os outros. O motor D e E são motores nacionais,ottolizados pela empresa BIOGÁS, porém não possuem controle de combustão tão apurado quanto os motoresB e C.

O motor D sendo um Otto dedicado, com comando de válvulas para o combustível Biogás e controle de combustão eletrônico produziu uma maior eficiência, quando comparado com o motor E.

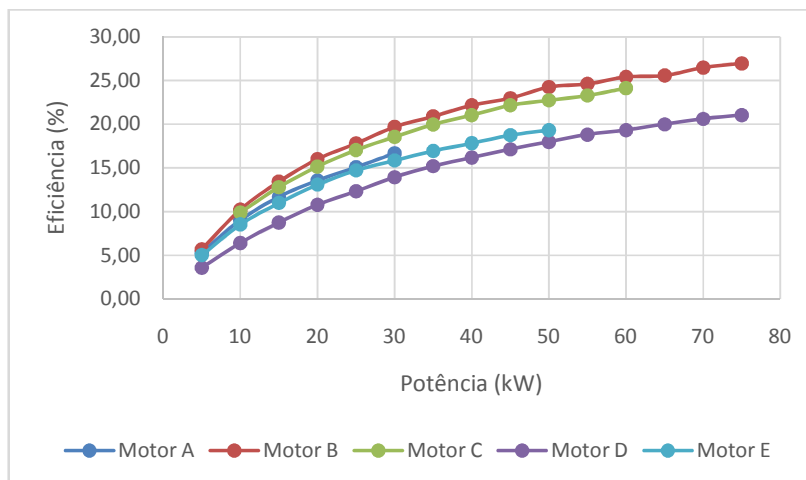


Figura. 24. Eficiência dos motores geradores.

Tabela 22. Eficiência dos motores geradores (%).

Potência (kW)	Motor A	Motor B	Motor C	Motor D	Motor E
5	5,34	5,68		3,58	5,01
10	9,02	10,22	9,87	6,42	8,52
15	11,69	13,43	12,79	8,75	10,99
20	13,56	16,01	15,14	10,78	13,08
25	15,08	17,80	17,04	12,33	14,71
30	16,66	19,70	18,55	13,94	15,84
35		20,91	19,97	15,21	16,94
40		22,17	21,05	16,19	17,82
45		22,98	22,17	17,14	18,73
50		24,26	22,74	17,99	19,31
55		24,61	23,29	18,82	
60		25,42	24,15	19,34	
65		25,58		20,01	
70		26,49		20,62	
75		26,97		21,06	

A tabela 23 mostra as curvas de tendência da eficiência (y) em função da carga (x) para cada um dos motores avaliados. As unidades da variável y e x são: [%] e [kW].

Tabela 23. Equações de correlação ou tendência eficiência (y) versus carga (x).

<b>Motor Gerador</b>	<b>Equação de tendência</b>	<b>Coefficiente de determinação (R<sup>2</sup>)</b>
Motor A	$y = 6,2722.\ln(x) - 5,081$	0,9947
Motor B	$y = 8,1438.\ln(x) - 8,1049$	0,9972
Motor C	$y = 8,1086.\ln(x) - 8,9869$	0,9988
Motor D	$y = 6,8779.\ln(x) - 9,0506$	0,9870
Motor E	$y = 6,3903.\ln(x) - 5,8423$	0,9959

A tabela 24 mostra o consumo dos motores avaliados em função do percentual da carga máxima (100% e média (50%). Motor A – 30 kW (100%) e 15 kW (50%); Motor B e D – 75 kW (100%) e 37,5 kW (50%); Motor C – 60 kW (100%) e 30 kW (50%); Motor E – 50 kW (100%) e 25 kW (50%).

Tabela 24. Eficiência dos motores geradores em função das cargas máxima (100%) e média (50%),(em %)

<b>Carga (%)</b>	<b>Motor A</b>	<b>Motor B</b>	<b>Motor C</b>	<b>Motor D</b>	<b>Motor E</b>
50	11,69	21,41	18,55	15,88	14,71
100	16,66	26,97	24,15	21,06	19,31

Como pode-se observar na tabela 24, há um aumento de eficiência em cada um dos motores geradores em função do desenvolvimento tecnológico. O motor gerador A, por ser um motor ciclo otto, não turbinado e sem controle de combustão apresenta a menor eficiência em relação aos demais. O motor gerador B, com tecnologia da Alemanha (importado) apresentou a maior eficiência, tanto trabalhando com metade da carga máxima, quanto na carga máxima. Isso mostra que os motores produzidos pela empresa BIOGÁS tem potencial para atingir melhorias tecnológicas. Por outro, lado existe a barreira econômica, ou seja, embora o motor B apresente maior eficiência, seu custo capital chega a valores em torno de 10 vezes maior que o motor A com eficiência inferior. Os autores (KABEYI & OLANREWAJU, 2022; PIPATMANOMAI et al., 2009; WANG et al., 2014; RIOS

&KALTSCHMITT, 2016; DOS SANTOS et al.,2016; DE SOUZA et al., 2013; Silva et al., 2018), encontraram eficiências para motores geradores entre 17 e 35%. Os valores encontrados no presente estudo estão dentro da faixa enumerada pelos autores.

### 5.3 Desempenho dos motores geradores De E combinando-se as variáveis relação ar combustível ( $\lambda$ ), o ponto de ignição (P) e a carga (C) – Etapa 2

#### Consumo de biogás nos motores geradores D e E

A tabela 25 mostra a variação do consumo dos motores geradores D e E, variando-se a carga e a relação ar/combustível ( $\lambda$ ) para cada ponto (avanço de ignição).

Tabela 25. Consumo de biogás nos motores geradores (em  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )

Ponto	Lambda	Motor gerador D			Motor gerador E		
		C1 (kW)	C2 (kW)	C3 (kW)	C1 (kW)	C2 (kW)	C3 (kW)
		30 (40%)	45 (60%)	70 (90%)	20 (40%)	30 (60%)	45 (90%)
P1 (22°)	$\lambda 1$ (1.3)	26,85	34,33	46,09	30,21	38,45	49,41
	$\lambda 2$ (1.4)	26,39	34,03	46,75	29,00	35,28	46,06
	$\lambda 3$ (1.6)	27,49	35,46	47,80	29,87	36,77	45,84
P2 (27°)	$\lambda 1$ (1.3)	31,64	40,50	54,16	28,00	35,03	45,58
	$\lambda 2$ (1.4)	31,74	39,44	53,39	27,76	34,60	45,31
	$\lambda 3$ (1.6)	31,08	40,18	54,10	28,43	35,36	45,68
P3 (28°)	$\lambda 1$ (1.3)	32,20	41,05	54,00	28,08	34,77	45,49
	$\lambda 2$ (1.4)	31,90	40,10	52,85	27,50	34,15	44,99
	$\lambda 3$ (1.6)	30,72	39,48	53,88	27,85	35,00	46,42

No motor de D o ponto de ignição utilizado nos testes apresentou melhora quando comparado com o ponto em 25 graus usado na condição original. Atribui-se esta redução no consumo com a instalação do controle de sonda lambda que não era usado nos motores mais antigos. Com o controle da relação ar/combustível e com o motor mais atrasado (menor ponto) o consumo foi menor. Já no motor E o ponto de ignição testado (22°) não levou a grandes melhoras no consumo, pois o mesmo possui somente a leitura de sonda lambda e não controle automático. O

ajuste da mistura é feito pelo operador na ocasião da partida, após a definição da carga.

A tabela 26 mostra a variação do consumo de biogás nos motores geradores D e E variando-se a carga e o ponto (avanço de ignição), para cada relação ar/combustível (lambda).

Tabela 26. Consumo de biogás nos motores geradores (em  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )

Lambda	Ponto	Motor gerador D			Motor gerador E		
		C1 (kW)	C2 (kW)	C3 (kW)	C1 (kW)	C2 (kW)	C3 (kW)
		30 (40%)	45 (60%)	70 (90%)	20 (40%)	30 (60%)	45 (90%)
$\lambda 1$ (1.3)	P1 (22°)	26,64	40,70	54,36	30,21	38,45	49,41
	P2 (27°)	31,64	40,50	54,16	28,00	35,03	45,58
	P2 (28°)	32,20	41,05	54,00	28,08	34,77	45,49
$\lambda 2$ (1.4)	P1 (22°)	31,41	40,33	55,12	29,00	35,28	46,06
	P2 (27°)	31,74	39,44	53,39	27,76	34,60	45,31
	P3 (28°)	31,90	40,10	52,85	27,50	34,15	44,99
$\lambda 3$ (1.6)	P1 (22°)	32,73	42,03	56,41	29,87	36,77	45,84
	P2 (27°)	31,08	40,18	54,10	28,43	35,36	45,68
	P3 (28°)	30,72	39,48	53,88	27,85	35,00	46,42

Percebeu-se que houve uma redução no consumo do motor D e E, quando o ponto de ignição é maior e o lambda está próximo da mistura pobre. Isto já era esperado devido a experiências observadas em campo. Em algumas combinações, principalmente em carga máxima, esta variação não levou a melhoras no consumo. A influência da pressão da turbina na carga máxima muda o processo da combustão. Este fenômeno aparece mais acentuado no motor E, cujo o controle de lambda é feito pelo operador. Os ajustes de ponto de ignição e do lambda são feitos para a carga fixa. O correto seria o Motor D operar com 75 kW e o Motor E com 40 kW, os dois na forma contínua. Mas, na verdade, há restrições na rede da concessionária de energia que limitam a carga dos motores geradores em determinadas granjas.

### Consumo específico de biogás nos motores geradores D e E

A tabela 27 mostra a variação do consumo específico dos motores geradores D e E variando-se a carga e a relação ar/combustível (lambda) para cada ponto (avanço de ignição).

Tabela 27. Consumo específico de biogás nos motores geradores (em  $\text{m}^3.\text{kWh}^{-1}$ )

Ponto	Lambda	Motor gerador D			Motor gerador E		
		C1 (kW)	C2 (kW)	C3 (kW)	C1 (kW)	C2 (kW)	C3 (kW)
		30 (40%)	45 (60%)	70 (90%)	20 (40%)	30 (60%)	45 (90%)
P1 (22°)	$\lambda 1$ (1.3)	0,90	0,76	0,66	1,51	1,28	1,10
	$\lambda 2$ (1.4)	0,88	0,76	0,67	1,45	1,18	1,02
	$\lambda 3$ (1.6)	0,92	0,79	0,68	1,49	1,23	1,02
P2 (27°)	$\lambda 1$ (1.3)	1,05	0,90	0,77	1,40	1,17	1,01
	$\lambda 2$ (1.4)	1,06	0,88	0,76	1,39	1,15	1,01
	$\lambda 3$ (1.6)	1,04	0,89	0,77	1,42	1,18	1,02
P3 (28°)	$\lambda 1$ (1.3)	1,07	0,91	0,77	1,40	1,16	1,01
	$\lambda 2$ (1.4)	1,06	0,89	0,75	1,37	1,14	1,00
	$\lambda 3$ (1.6)	1,02	0,88	0,77	1,39	1,17	1,03

Na tabela 27 está bem claro a melhora do consumo específico nos motores D e E com o aumentada potência e também do lambda avançando para a mistura noextremo pobre. A mistura pobre, “lean burn”, além de reduzir a temperatura na câmara de combustão melhora o rendimento do motor, pois o combustível é praticamente todo queimado. Em regiões de lambda 1,6 o consumo ficou baixo, porém ocorreu potência reversa (situação em que o alternador funciona como motor) em alguns momentos. O consumo específico do motor E mostra-se bem superior ao motor D pelo fato de o motor D ter controle de lambda. O motor E manteve o comando de válvulas original (aspirado) do motor quando ainda funcionava no ciclo diesel. Isto também vem a somar para a consumo elevado quando comparado com o motor D.

Observa-se que quanto maior a carga, menor o consumo específico para os motores D e E. O motor D para o ponto P1 apresentou consumos específicos menores em comparação aos pontos P2 e P3 (maiores que P1), isso mostra que o mesmo tem um melhor desempenho a pontos baixos em torno de 0,9 a 0,7  $\text{m}^3.\text{kWh}^{-1}$ .

Verificou-se também que, para o motor D, a relação ar combustível ( $\lambda$ ) não apresenta muita influência no desempenho em termos de consumo específico.

O motor E apresentou consumos específicos ligeiramente maiores para o ponto P1 e menores para os pontos P2 e P3, mostrando o contrário do motor D. Com isso concluiu-se que o motor D deve ser ajustado para operar a pontos menores e o motor E a pontos maiores, para que haja um melhor desempenho em termos de consumo específico. Estes dados mostram que o ponto de operação dos motores não pode ser o mesmo, ou seja, cada máquina tem o ponto próprio de operação. Boa parte do comportamento diferente dos motores D e E com relação ao ponto ignição está ligado ao tipo de turbina que os dois utilizam. A turbina do motor E atende motores da linha automotiva (caminhão) e o motor D (grupo gerador).

A tabela 28 mostra a valores em função do consumo específico de biogás nos motores geradores D e E variando-se a carga e o ponto (avanço de ignição), para cada relação ar/combustível ( $\lambda$ ).

Na tabela 28 pode-se verificar que o ponto de ignição tem grande influência na variação do consumo específico em motores com controle de  $\lambda$ . No caso do motor E, em que o ajuste é manual, na potência máxima a variação do consumo específico é pequena, e independe do  $\lambda$ .

Para a carga máxima (C3) não há variações significativas do consumo específico variando-se tanto o ponto como o  $\lambda$ , pois nesta região temos alta temperatura na câmara favorecendo o desempenho da combustão.

Observa-se que tanto para o motor D como para o motor E, não há variação considerável do consumo específico em função do  $\lambda$ . A variação ocorre com o aumento da carga. Por outro lado, quando se compara o motor D com o motor E fica evidente que o motor E apresenta maiores consumos específicos em todas as configurações de ponto e  $\lambda$ , sendo portanto um motor menos eficiente quando comparado com o motor D, isso por razões já descritas acima.



Tabela 28. Consumo específico de biogás nos motores geradores (em  $\text{m}^3.\text{kWh}^{-1}$ )

Lambda	Ponto	Motor gerador D			Motor gerador E		
		C1 (kW)	C2 (kW)	C3 (kW)	C1 (kW)	C2 (kW)	C3 (kW)
		30 (40%)	45 (60%)	70 (90%)	20 (40%)	30 (60%)	45 (90%)
$\lambda_1$ (1.3)	P1 (22°)	0,89	0,90	0,78	1,51	1,28	1,10
	P2 (27°)	1,05	0,90	0,77	1,40	1,17	1,01
	P2 (28°)	1,07	0,91	0,77	1,40	1,16	1,01
$\lambda_2$ (1.4)	P1 (22°)	1,05	0,90	0,79	1,45	1,18	1,02
	P2 (27°)	1,06	0,88	0,76	1,39	1,15	1,01
	P3 (28°)	1,06	0,89	0,75	1,37	1,14	1,00
$\lambda_3$ (1.6)	P1 (22°)	1,09	0,93	0,81	1,49	1,23	1,02
	P2 (27°)	1,04	0,89	0,77	1,42	1,18	1,02
	P3 (28°)	1,02	0,88	0,77	1,39	1,17	1,03

### Eficiência nos motores geradores D e E

A tabela 29 mostra a variação da eficiência dos motores geradores D e E variando-se a carga e a relação ar/combustível (lambda) para cada ponto (avanço de ignição).

Observa-se na tabela 29 que o rendimento, aumenta com a carga independente do lambda e do ponto, tanto para o motor D como para o motor E. Observa-se também que o rendimento nos motores para cada combinação não varia significativamente com o lambda.

O motor D apresentou a maior eficiência, 24,2%, na carga de 70 kW no Ponto 1 (P1). Nos pontos P2 e P3, o motor D apresentou menores eficiências, em torno de 21%, na carga máxima.

Já o motor E apresenta menores eficiências em relação ao motor D, sendo que na carga máxima ele apresentou eficiências em torno de 18%.

Para lambda 1 (1,3), ponto 1 (22°), carga 1 (20 kW), carga mínima de 40% da máxima, no motor E, ocorreu a menor eficiência, 12,29%. Acredita-se que ocorreu uma instabilidade da operação, pois na ocasião o motor funcionou com a combustão totalmente irregular devido aos parâmetros colocados acima, extremamente rico e atrasado.

O motor D comprovou ser o de melhor rendimento, pois o mesmo é um MWM original utilizado, preparado pela MWM para gás, e montado pela BIOGÁS para venda, o qual é equipado com sistema de controle de combustão, turbina, entre outros. Já o motor E é um motor ciclo diesel que foi otolizado e mantém o comando de válvulas do ciclo diesel aspirado.

A tabela 30 mostra a variação da eficiência nos motores geradores D e E variando-se a carga e o ponto (avanço de ignição), para cada relação ar/combustível (lambda).

Tabela 29. Eficiência nos motores geradores (em %)

Ponto	Lambda	Motor gerador D			Motor gerador E		
		C1 (kW)	C2 (kW)	C3 (kW)	C1 (kW)	C2 (kW)	C3 (kW)
		30 (40%)	45 (60%)	70 (90%)	20 (40%)	30 (60%)	45 (90%)
P1 (22°)	$\lambda 1$ (1.3)	17,78	20,86	24,17	12,29	14,49	16,91
	$\lambda 2$ (1.4)	18,09	21,05	23,83	12,81	15,79	18,14
	$\lambda 3$ (1.6)	17,37	20,20	23,91	12,43	15,15	18,23
P2 (27°)	$\lambda 1$ (1.3)	15,09	17,68	20,57	13,26	15,90	18,33
	$\lambda 2$ (1.4)	15,05	18,16	20,87	13,38	16,10	18,44
	$\lambda 3$ (1.6)	15,36	17,83	20,59	13,06	15,75	18,29
P3 (28°)	$\lambda 1$ (1.3)	14,83	17,45	20,63	13,22	16,02	18,37
	$\lambda 2$ (1.4)	14,97	17,86	21,08	13,51	16,31	18,57
	$\lambda 3$ (1.6)	15,54	18,14	20,68	13,33	15,91	18,00

A tabela 30 mostra a variação da eficiência nos motores geradores D e E variando-se a carga e o ponto (avanço de ignição), para cada relação ar/combustível (lambda).

Na tabela 30 observa-se que não há variação da eficiência com o lambda para as combinações de ponto. Os motores D e E na carga máxima apresentaram eficiências em torno de 21% e 18,5%. A BIOGÁS, segundo os dados apresentados, deveria promover melhorias tecnológicas no motor E para que a sua eficiência seja próxima do motor D.

Dentre as melhorias a serem feitas destacam-se a instalação de uma turbina visando o para que o rendimento seja máximo em 1800 rpm, troca do comando de válvulas para o motor turbinado e mecanismo de controle de lambda (combustão)..

Tabela 30. Eficiência nos motores geradores (em %)

Lambda	Ponto	Motor gerador D			Motor gerador E		
		C1 (kW) 30 (40%)	C2 (kW) 45 (60%)	C3 (kW) 70 (90%)	C1 (kW) 20 (40%)	C2 (kW) 30 (60%)	C3 (kW) 45 (90%)
$\lambda_1$ (1.3)	P1 (22°)	17,93	17,60	20,49	12,29	14,49	16,91
	P2 (27°)	15,09	17,68	20,57	13,26	15,90	18,33
	P2 (28°)	14,83	17,45	20,63	13,22	16,02	18,37
$\lambda_2$ (1.4)	P1 (22°)	15,20	17,76	20,21	12,81	15,79	18,14
	P2 (27°)	15,05	18,16	20,87	13,38	16,10	18,44
	P3 (28°)	14,97	17,86	21,08	13,51	16,31	18,57
$\lambda_3$ (1.6)	P1 (22°)	14,59	17,04	19,75	12,43	15,15	18,23
	P2 (27°)	15,36	17,83	20,59	13,06	15,75	18,29
	P3 (28°)	15,54	18,14	20,68	13,33	15,91	18,00

#### Emissões dos motores geradores D , E, A e B

A figura 25 mostra as emissões de monóxido de carbono nos motores geradores A, B, D e E .

O Co é produto da combustão incompleta e presença de CO<sub>2</sub> no combustível, no caso o biogás é uma mistura de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, a redução de CO<sub>2</sub> do biogás leva a formação de CO (PRABHU et al., 2021; BORA et al., 2014). Observou-se que o motor D, motor tipicamente produzido pela BIOGÁS para a venda, possui valores de emissões de CO acima do motor B, motor produzido na Alemanha e com melhor controle de combustão, pois o motor B não tem controle da combustão gerenciado eletronicamente. O motor D trabalha na condição normal com a sonda próxima da região da mistura rica. Já o motor B, tecnologia Alemã trabalha com a sonda lambda sempre na região mais pobre. Os motores nacionais usam a mistura um pouco mais rica para compensar a perda de potência na ottolização. Já os motores dedicados, que o caso do motor B, tem o sistema de alimentação desenvolvido para o ciclo otto com Biogás e os nacionais mantém o do ciclo diesel.

No caso do motor E, que é um motor nacional, a emissão de CO é baixa quando comparada aos outros motores por causa da sonda lambda que estava

ajustada em 1,65 na ocasião do teste. Se estivesse com a sonda em 1,4 também iria apresentar valores elevados. O motor A tem um comportamento muito próximo do B, apesar de ser ciclo otto original e sem controle de combustão, apresentou uma boa queima com menor emissão de CO quando comparado ao motor E, isso se explica por ter uma maior velocidade na chama em relação aos outros motores (AMBARITA, 2017).

Segundo MACOR & BENATO (2020), BENATO et al. (2017), as legislações que normatizam as emissões de motores geradores a biogás na Itália e Alemanha estabelecem um limite de 700 ppm para as emissões de CO. Portanto os motores acima, com exceção do motor D a uma carga de 60 kW, emitem dentro dos padrões recomendados nos países citados.

Segundo a SEMA (2014), a resolução N. 16/2014 estabelece os limites de emissão de CO para motores estacionários a biogás num valor máximo de 1630 ppm ( $2000 \text{ mg.Nm}^{-3}$ ), com isso, os motores enumerados acima atendem a resolução do Paraná.

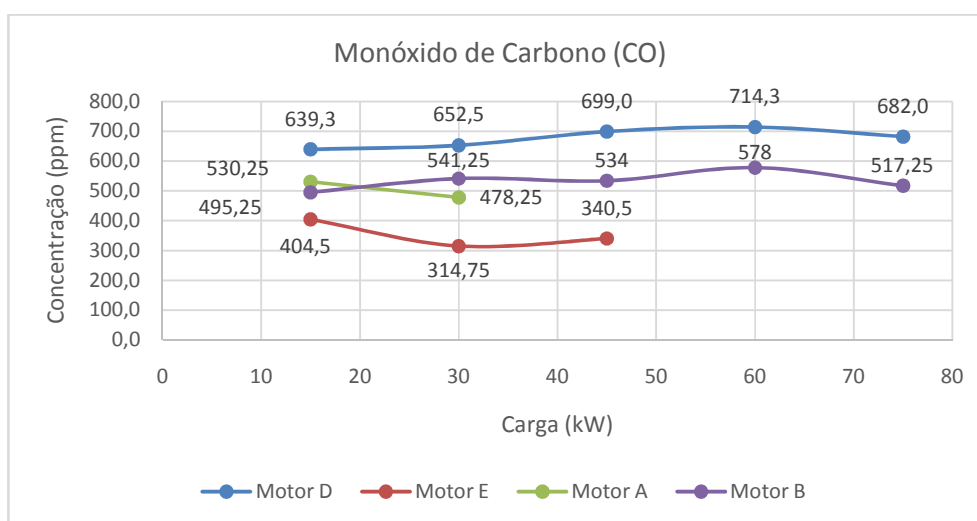


Figura 25. Emissões de monóxido de carbono nos motores geradores D,E, A e B

A figura 26 mostra as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) nos motores A, B, D e E. A presença deste poluente está ligada está ligado diretamente com a taxa de compressão, alta temperatura de combustão e duração da combustão (KORAKIANITIS et al., 2011).

O Motor A com a taxa de compressão 8,8:1 foi o que emitiu menos NOx máximo de 47 ppm a 30 kW de carga, e o motor B com 13,5:1 de taxa de compressão foi o que emitiu mais, 881 ppm a 75 kW. O motor E que possui a taxa de compressão intermediária entre o motor B e o motor D também manteve o mesmo comportamento, pois a taxa de compressão dele é 13,5 :1. A relação ar/combustível também ficou aqui bem justificada.

O teor de NOx depende da temperatura na câmara de combustão do motor de combustão interna. Logo o motor de tecnologia da Alemanha emite mais devido a essa maior temperatura. O motor D, produzido pela BIOGÁS apresentou uma emissão de NOx máxima de 666 ppm a uma carga de 75 kW (carga máxima). Importante observar que quando se aumenta a carga dos motores a emissões de NOx tende a ser maior, isso porque há um aumento da temperatura de combustão com o aumento da carga (PRABHU et al., 2021; BORA et al. 2014)

Segundo MACOR & BENATO (2020), BENATO et al. (2017), as legislações de emissões de motores geradores a biogás na Itália e Alemanha, países importantes dentro da comunidade econômica da Europa, estabelecem um limite de 400 ppm para as emissões de NOx. Portanto os motores analisados apresentam índices de emissões acima no permitidos nos países citados, nas suas respectivas cargas máximas, com exceção do motor A, original a gasolina.

Segundo a SEMA (2014), a resolução N. 16/2014 estabelece os limites de emissão de NOx para motores estacionários a biogás num valor máximo de 1745 ppm (2000 mg.Nm<sup>-3</sup>), com isso, os motores enumerados acima atendem a resolução do Paraná.

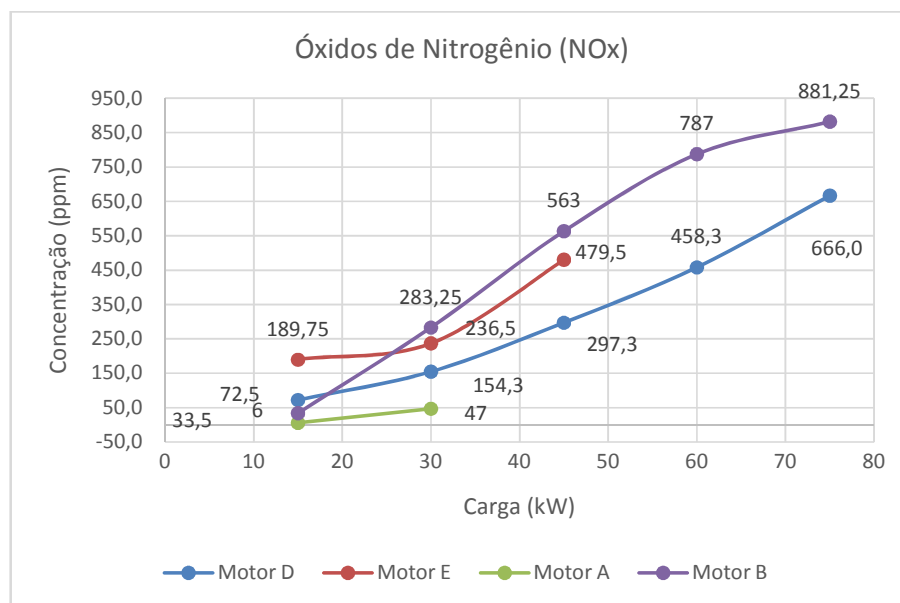


Figura 26. Emissões de óxidos de nitrogênio nos motores D,E, A e B

A figura 27 mostra as emissões dos hidrocarbonetos (HCs) nos motores A, B, D e E. Segundo AMBARITA (2017) a baixa temperatura de combustão leva a uma combustão incompleta do combustível e conseqüentemente um aumento na emissão de HC. Também uma mistura mais rica é um dos motivos para a maior emissão de HC, segundo PRABHU et al. (2021). Observou-se que em todos os motores ocorre uma redução das emissões de HCs com a carga, o que está de acordo com HAWI et al. (2015), isso se explica pelo fato de a combustão ser mais incompleta a baixas cargas.

O motor B, com a combustão totalmente gerenciada eletronicamente manteve bem linear a redução dos HCs, caindo 279 ppm a 163 na carga de 75 kW, situação esperada com o aumento da eficiência do motor chegando próximo da potência máxima. Já o motor D apresentou as maiores concentrações de emissões de HC, chegando a 279 ppm a uma carga de 15 kW, isso se explica pela baixa oxidação do combustível, ao passo que o motor E emitiu na mesma carga 75 ppm. O motor E manteve níveis bem baixos comparados com os outros pois o mesmo trabalha com a mistura bem pobre, ou seja, praticamente todo o combustível é queimado.

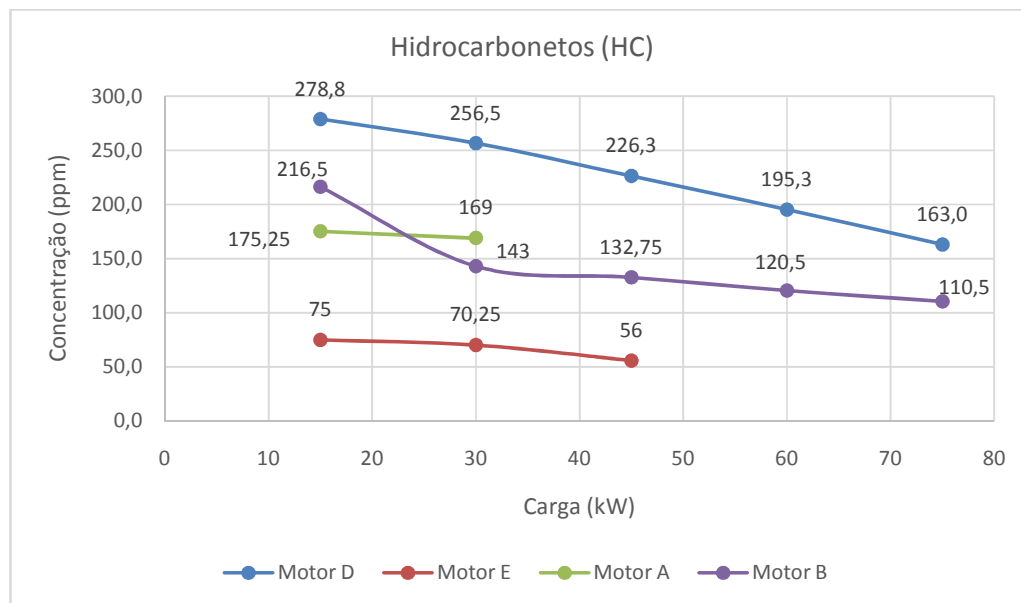


Figura 27. Emissões de hidrocarbonetos nos motores geradores D, E, A e B

Afigura 28 mostra as emissões do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) nos motores A, B, D e E. O ideal seria que a combustão de um hidrocarboneto produzisse somente dióxido de carbono e água, mas a realidade é outra. Como o biogás é composto de uma maior concentração de  $\text{CO}_2$  (maior que 30%), a queima do mesmo pode emitir mais  $\text{CO}_2$ . Quanto maior a temperatura de combustão, o oxigênio do ar é mais facilmente oxidado com o carbono e mais  $\text{CO}_2$  é produzido (SAHOO, 2011).

Segundo BORA (2014) o aumento da taxa de compressão do motor leva a uma combustão completa e maior emissão de  $\text{CO}_2$  e menos emissão de CO. As afirmações dos autores acima explicam o fato do motor B emitir mais  $\text{CO}_2$  em relação aos outros modelos, pois apresenta uma combustão mais completa, ou seja, o sistema de combustão tem um maior controle e a taxa de compressão ser 13,5, a maior de todos. O Motor E apesar de ter uma taxa de compressão maior que os motores D e A, apresentou uma menor emissão de  $\text{CO}_2$ , isso se explica pelo fato do biogás consumido pelo motor E ter 36% de  $\text{CO}_2$  em sua composição.

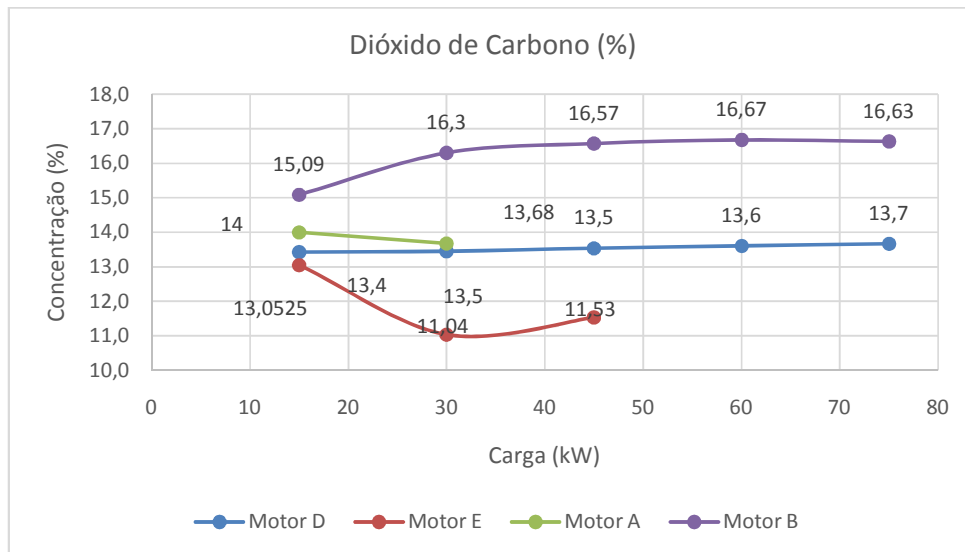


Figura 28. Emissões de dióxido de carbono nos motores geradores D, E, B e A.

No geral, em termos de emissões o motor E, apresentou as menores concentrações na exaustão, na maioria dos gases, com exceção do NOx. Isso mostra que em termos de menor impacto nas emissões, o mesmo é o mais recomendado, apesar de apresenta uma eficiência menor em relação aos outros motores.



## 6. CONCLUSÃO

Em termos de desempenho, verificou-se que o consumo específico diminuiu com a carga e com isso há um aumento na eficiência com a carga (kW). O motor B, apresentou eficiências maiores em relação aos motores A, C, D e E, a qual foi de 27% na carga máxima (75 kW), pois o mesmo, produzido na Alemanha é equipado com sistema de injeção e controle de combustível avançado, em relação aos demais.

Dentre os motores produzidos pela BIOGÁS, o motor D apresentou a melhor eficiência, 21%. O motor E produzido pela BIOGÁS apresenta eficiência um pouco maior que o motor D, 19% na carga máxima (50 kW). A vantagem do motor E em relação ao D seria o seu custo capital menor e o fato de poder operar em plantas com menor disponibilidade de biogás na carga máxima.

Quando comparou-se os dois motores produzidos pela BIOGÁS, D e E, variando-se o avanço de ignição e a razão ar combustível, observou-se que uma variação na relação ar combustível não influencia no rendimento, mas o avanço de ignição sim.

Em termos de emissões, o motor E emite menos HC, CO<sub>2</sub> e CO comparando-se com os demais, já com relação ao NO<sub>x</sub> ele emite mais que o motor D.

Logo, dentre os motores avaliados e produzidos pela BIOGÁS D e E, o motor E seria o mais vantajoso, pois tem um desempenho bom, em termos de eficiência, ligeiramente menor que o motor D. Mas apresenta um custo capital menor e pode operar na carga máxima por mais tempo, sendo o mais indicado para granjas de suínos em terminação, com engorda de até 4000 suínos.

O motor E, com um pouco de investimento num sistema de injeção de combustível mais avançado, poderia ter uma eficiência superior ao motor D, alcançando a do motor C, 24%, o qual é produzido no Brasil pela MWM.

Considerando as modificações sugeridas no motor E este seria o motor mais indicado para as plantas de geração distribuída até 50 kW. Ele é o mais barato em termos de investimento, opera com 45 kW na carga máxima (maior eficiência), e não terá problemas de sincronismo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F. A.; MELO, R. J. S.; VIDIGAL, R. C.; PEREIRA, E. M. D. Eficientização Energética da Fazenda experimental PUC – Minas – Biodigestor de Baixo custo. In: 4º ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL. **Anais...CD ROM**. São Paulo, 2002.

AMBARITA, Himsar. Performance and emission characteristics of a small diesel engine run in dual-fuel (diesel-biogas) mode. **Case studies in thermal engineering**, v. 10, p. 179-191, 2017.

ANDRADE, M. A. N., RANZI, T. J. D., & MUNIZ, R. N. (2002). Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental. *Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural*.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2014, 28P. Acesso: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>. Acessado em 12 de Maio de 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482. Brasília: ANEEL, 2012, 5P.

ANGELIDAKI, Irini et al. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 2, p. 452-466, 2018

AVCIOGLU, A. O; DAYIOGLU, M. A; TÜRKER, U. Assessment of the energy potential of agricultural biomass residues in Turkey. **Renewable Energy**. v. 138, p.610-619, 2019.

BANKS, Charles J. et al. Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: performance assessment by mass and energy balance. **Bioresource technology**, v. 102, n. 2, p. 612-620, 2011.

BARREIRA, P. **Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural**. São Paulo: Ícone, 1993.

BENATO, Alberto; MACOR, Alarico; ROSSETTI, Antonio. Biogasengineemissions: standards and on-site measurements. **Energy Procedia**, v. 126, p. 398-405, 2017.

BERTINATTO, Rovian. Analysis of contamination and degradation of the lubricating oil and wear a adapted Otto engine powered by biogas. 2014. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Universidade Estadual do Oeste do Parana, Cascavel, 2014.

BORA, B. J., SAHA, U. K., CHATTERJEE, S., & VEER, V. (2014). Effect of compression ratio on performance, combustion and emission characteristics of a dual fuel diesel engine run on raw biogas. *Energy conversion and management*, 87, 1000-1009.

BORSCHIVER, S., & DA SILVA, A. L. R. (2014). Mapeamento tecnológico para purificação de biogás e seu aproveitamento: panorama mundial e iniciativas nacionais. In CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA-COBEQ (Vol. 20, pp. 8757-8765).

CALZA, L. F., LIMA, C. B., NOGUEIRA, C. E., SIQUEIRA, J. A., & SANTOS, R. F. (2015). Avaliação dos custos de implantação de biodigestores e da energia produzida pelo biogás. *Engenharia Agrícola*, 35, 990-997.

CANAVATE, O.J.;BAADER. W.; Biogás as fuel for internalcombustionengines. Ase1988.

CARTEPILLAR. Gás generator sets. Catálogos informativos. Disponível em [www.cat.com](http://www.cat.com), acesso em 23/03/2011

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Termodinâmica. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: tratamentos anaeróbios. **Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária/UFMG**, 1997.

CHERNICHARO, C. A. L.; HAANDEL, A. C. V.; FORESTI, E.; CYBIS, L. F. Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. Edital 02, Programa em Saneamento Básico (PROSAB). FINEP, 2001. Disponível em: <[http://www.finep.gov.br/prosab/pos\\_tratamento.htm](http://www.finep.gov.br/prosab/pos_tratamento.htm)>. Acesso em: 18 Fev. 2011.

COELHO, S. T., SANCHES-PEREIRA, A., TUDESCHINI, L. G., & GOLDEMBERG, J. (2018). The energy transition history of fuelwood replacement for liquefied petroleum gas in Brazilian households from 1920 to 2016. *Energy Policy*, 123, 41-52.

COELHO, S. T., VELÁZQUEZ, S. M. S. G., & SILVA, O. C. D. (2006). Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. *Proceedings of the 6. Encontro de Energia no Meio Rural*.

COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica. Micro e Minigeração – Sistema de Compensação de Energia Elétrica, 2019. [www.copel.com](http://www.copel.com).

COUTO, Giselle Elias. Sistema de ignição com pré-câmara operando com mistura homogênea em um motor de ignição por centelha. Dissertação de Mestrado (UFMG), 2017.

DAL BEM, A. J. (2008). Análise de desempenho de um motor ciclo Otto alimentado com álcool de 75 INPM. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 231p

DE CARVALHO, S. M., & LUCAS, J. (2001). Energy balance and biogas production potential in a laying poultry farm in the region of Marília, São Paulo state; Balanço energético e potencial de produção de biogás em granja de postura comercial na região de Marília, SP. *Energia na Agricultura*, 16.

DE LIMA, HELENO QUEVEDO. Avaliação dos modelos Hashimoto e AMS-III. D para produção de metano com dejetos de suínos. 2011. Tese de Doutorado. Universidade Federal do ABC.

DE SOUZA, S. N. M., WERNCKE, I., MARQUES, C. A., BARICCATTI, R. A., SANTOS, R. F., NOGUEIRA, C. E. C., & BASSEGIO, D. (2013). Electric energy micro-production in a rural property using biogas as primary source. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 385-391.

DOS SANTOS, Ivan Felipe Silva; BARROS, Regina Mambeli; TIAGO FILHO, Geraldo Lucio. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. **Journal of cleaner production**, v. 126, p. 504-514, 2016.

FAAIJ, A. P. C. **Bio-energy in Europe: changing technology choices**, Energy Police, v.34, p.322-342, London, 2006.

GENERAL POWER. <https://www.genpowerusa.com/ac-alternators/lsa-44-3-s2-leroy-somer-74-kw/>. Acessado em Janeiro de 2023.

GIACOSA D. Motores endotérmicos. Madrid: Editorial dossat, 1986, 722 p.

HAKAWATI, R., SMYTH, B. M., MCCULLOUGH, G., DE ROSA, F., & ROONEY, D. (2017). What is the most energy efficient route for biogas utilization: heat, electricity or transport?. *Applied Energy*, 206, 1076-1087.

HAVUKAINEN, Jouni et al. Evaluation of methods for estimating energy performance of biogas production. **Renewable energy**, v. 66, p. 232-240, 2014.

HAWI, M., KIPLIMO, R., & NDIRITU, H. (2015). Effect of exhaust gas recirculation on performance and emission characteristics of a diesel-piloted biogas engine. *Smart Grid and Renewable Energy*, 6(04), 49.

HEN, A. Avaliação de dois sistemas de manejo de dejetos em uma pequena propriedade produtora de suínos – Condição de partida. Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental. UFSC. 2005.

HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin. Energia e meioambiente. Cengage Learning Editores, 2003.

HUANG, Chao et al. Anaerobic digestion of elephant grass hydrolysate: Biogas production, substrate metabolism and outlet effluent treatment. **Bioresource technology**, v. 283, p. 191-197, 2019.

HUANG, J.; CROOKES, R. J.; Assessment of simulated biogas as a fuel for the spark ignition engine. *Fuel* Vol. 77, nº 15, pp. 1793-1801. Editora Elsevier science Ltda. 1998.

KABEYI, Moses Jeremiah Barasa; OLANREWAJU, Oludolapo Akanni. Technologies for biogas to electricity conversion. **Energy Reports**, v. 8, p. 774-786, 2022.

KARLSSON, Magnus; IVNER, Jenny; SÖDERSTRÖM, Mats. Final report for BRC EP3 (New industries). 2015.

KERKHOFF, S., MITO, J. D. L., NASCIMENTO, K. R., CAMILO, N. C., MARIANI, L., & SILVA, J. L. G. (2015). Potencial teórico de produção de biogás e energia elétrica a partir da biomassa residual da suinocultura da região oeste do Paraná. In *10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural* (pp. 1-10).

KHAN, Imran Ullah et al. Biogas as a renewable energy fuel—A review of biogas upgrading, utilisation and storage. **Energy Conversion and Management**, v. 150, p. 277-294, 2017.

KHIARI, B; JEGUIRIM, M.; LIMOUSSY, L.; BENNICI, S. Biomass derived chars for energy applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. V. 108, p. 253-273, 2019.

KORAKIANITIS, T.; NAMASIVAYAM, A. M.; CROOKES, R. J. Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compression-ignition (CI) engine performance and emissions. **Progress in energy and combustion science**, v. 37, n. 1, p. 89-112, 2011.

KOSSMANN, W.; HABERMEHL, S.; HOERZ, T; KRAMER, P.; KLINGLER, P.; KELLNER, C.; WITTUR, T.; KLOPOTEK, F. V.; KRIEG, A.; EULER, H.. Biogas Digest. ISAT. Disponível em: <http://www.gtz.de/de/dokumente/en-biogas-volume1.pdf>. Acesso em 01/05/2011

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; DO AMARAL, André Cestonaro. Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Embrapa Suínos e Aves-Livro científico (ALICE), 2019.

LETTINGA, G.; RINZEMA, A. Anaerobic treatment of sulfate containing wastewater. **Bioenvironmental System**, 1985.

MACARI, N. C., RICHARDSON, R.D. Operation of a Caterpillar 3516 spark-ignited engine on low-Btu fuel. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. Transactions of the ASME, V.109, pp.443-447, 1987.

MACOR, Alarico; BENATO, Alberto. Regulated emissions of biogas engines—On site experimental measurements and damage assessment on human health. **Energies**, v. 13, n. 5, p. 1044, 2020.

MAN-Engines <https://www.man.eu/engines/en/products/power-generation/gas/power-generation-gas.html>. Acessado em Janeiro de 2023.

MAURO Jr, L., ALMEIDA, S. C. A. Conversão de motores diesel para gás natural. Proceedings of the 11o Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT, Curitiba, 2006.

MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource technology**, v. 83, n. 1, p. 37-46, 2002.

MCT. Ministério de Ciência e Tecnologia. Comissão Interministerial sobre Mudanças Climáticas, 2011.

MIALHE, L. G. **Máquinas motoras na Agricultura**. São Paulo: Ed. da Universidade de São Paulo, 1980. p. 202-203

MITZLAFF, K. VON. **Engines for biogas**. Eschborn: GTZ, 1988.

MME – Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2019. Relatório Síntese. Brasília: MME, 80p, 2019.

MUELLER, G. P. Landfill gas application development of the cartepillar G3600 spark-ignited gas engine. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. Transactions of the ASME, V.117, pp.820-825, 1995

MUNÓZ, M; MORENO, F.; MOREA-ROY, J.; RUIZ, J.; ARAUZO, J.; Low heating value gas on spark ignition engines. *Biomass e bioenergy*. Vol 18, pp 431-439, 2000.

OBERT, E. F.; Motores de combustão interna. Porto Alegre: Editora Globo, 1971.

PENIDO FILHO, P. Os motores de combustão interna: performance dos motores. 2ª Ed. Belo Horizonte: Ed. LEMI S. A., 1991.

PEREA-MORENO, Miguel-Angel; SAMERÓN-MANZANO, Esther; PEREA-MORENO, Alberto-Jesus. Biomass as renewable energy: Worldwide research trends. **Sustainability**, v. 11, n. 3, p. 863, 2019.

PEREIRA, J. C. Motores e geradores – princípio de funcionamento, instalação, operação e manutenção de grupos diesel geradores. [www.joseclaudio.eng.br](http://www.joseclaudio.eng.br). Acesso em Abril de 2011.

PIMENTEL, D. Industrial Agriculture, Energy Flows in. *Encyclopedia of Energy*. New York, v.3, 2004.

PIPATMANOMAI, S.; KAEWLUAN, S.; VITIDSANT, T. Economic assessment of biogas-to-electricity generation system with H<sub>2</sub>S removal by activated carbon in small pig farm. **Applied Energy**, v. 86, n. 5, p. 669–674, maio. 2009.

PRABHU, A. V., AVINASH, A., BRINDHADEVI, K., & PUGAZHENDHI, A. (2021). Performance and emission evaluation of dual fuel CI engine using preheated biogas-air mixture. *Science of The Total Environment*, 754, 142389.

RIOS, Mario; KALTSCHMITT, Martin. Electricity generation potential from biogas produced from organic waste in Mexico. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 384-395, 2016.



SAHOO, Bibhuti Bhusan. **Clean development mechanism potential of compression ignition diesel engines using gaseous fuels in dual fuel mode.** 2011. Tese de Doutorado.

SALOMON, Karina Ribeiro. Avaliação técnico-econômica e ambiental da utilização do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça em tecnologias para geração de eletricidade. 2007. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.

SANTOS, P. **Guia Técnico de Biogás.** 1º ed. Portugal: Je92 Projectos de Marketing Ida, 2000.

SANTOS, Tânia; LUCAS JÚNIOR, Jorge de. Balanço energético em galpão de frangos de corte. **Engenharia Agrícola**, p. 25-36, 2004.

SEMA - Secretário de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. N ° 016 / 2014. CAPÍTULO III - DOS PADRÕES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA POR TIPOLOGIA DE FONTES ESTACIONÁRIAS POTENCIALMENTE POLUIDORA, de 15 de abril de 2014. Acesso: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=269324#:~:text=Define%20crit%C3%A9rios%20para%20o%20Controle,melhoria%20da%20qualidade%20de%20vida>.

SILVA, Felipe Pinheiro et al. Energy efficiency of a micro-generation unit of electricity from biogas of swine manure. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3900-3906, 2018.

SOARES, H.M. Digestão anaeróbia de efluentes de fábricas de cervejas e refrigerantes em reator tipo fluxo ascendente com manta de lodo (UASB). Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 1990.

SOUZA, SAMUEL N. M. DE; NOGUEIRA, CARLOS EDUARDO CAMARGO ; SANTOS, R. F. . Geração de eletricidade em motores geradores a biogás. In: Reginaldo Ferreira Santos; jair Antônio cruz Siqueira. (Org.). Fontes Renováveis de Energia - Agroenergia. 1ed.Cascavel: Edunioeste, 2012, v. 1, p. 45-76.

SOUZA, SAMUEL NM DE et al. Gas emission and efficiency of an engine-generator set running on biogas. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 4, p. 613-621,

2016.

SPEECE, R. E. *Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewaters*. Archae Press, Nashville, 1996, Tennessee.

VERMA, Saket; DAS, L. M.; KAUSHIK, S. C. Effects of varying composition of biogas on performance and emission characteristics of compression ignition engine using exergy analysis. **Energy conversion and management**, v. 138, p. 346-359, 2017.

WANG, Xiaolong et al. Efficiency and sustainability analysis of biogas and electricity production from a large-scale biogas project in China: an emergy evaluation based on LCA. **Journal of cleaner production**, v. 65, p. 234-245, 2014.

WILDNER, Fabiano Disconzi. Estudo experimental da variação de velocidade de combustão para diferentes combustíveis, relações de mistura e relações de compressão em um motor ASTM CFR. 2006.

WYLEN, V., SONNTAG, E. R., BORGNAKKE, C. *Fundamentos da termodinâmica*. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1998.

ZAREH, A. *Motores a Gás. Lubrificação*, Rio de Janeiro, v. 81, n.04 , p. 2-4, 1998.