

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SAMUEL CHAVES DA SILVA

**POTENCIAL DO BIOGÁS NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM MINAS  
GERAIS**

VIÇOSA  
2015

SAMUEL CHAVES DA SILVA

**POTENCIAL DO BIOGÁS NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM MINAS  
GERAIS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Delly Oliveira Filho, PhD.

VIÇOSA  
2015



**SAMUEL CHAVES DA SILVA**

**POTENCIAL DO BIOGÁS NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM MINAS  
GERAIS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 22 de junho de 2015.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

*Delly*

---

**Prof. Delly Oliveira Filho, PhD – Orientador**  
**Universidade Federal de Viçosa**

*Adriano da Silva Antônio*

---

**Eng. Adriano da Silva Antônio - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

*Vinicius*

---

**Eng. Vinicius Leonardo Gadioli da Silva - Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

*“However difficult life may seem, there is always something you can do and succeed at.”*

*(Stephen Hawking)*

*À minha família e amigos.*

## *Agradecimentos*

Gostaria de agradecer primeiramente à minha mãe Zeni, tão merecedora desta vitória quanto eu, pelo esforço prestado em me apoiar integralmente em minhas decisões, e pelo grande amor e carinho de sempre, o meu maior suporte moral e emocional. Aproveito para agradecer também aos meus irmãos Diêgo e Lorrana, pela agradável e fortalecedora vivência familiar e também ao meu padrasto José Leão pela harmoniosa companhia. Em memória, agradeço ao meu pai Matias, pela sólida estrutura familiar e humana deixada aos filhos.

Agradeço aos amigos eternizados durante a graduação e convivência em algumas repúblicas em Viçosa. Em especial Jhonatan, Ana Cláudia, Alexandre, Fabiano, Bernardo, Breno, Juninho e Victor Saltarelli. Sem essas pessoas os anos de faculdade não teriam sido tão agradáveis.

Agradeço a todos os meus tios e tias pelo apoio e preocupação comigo, em especial ao Tio Mandinho pela sua bondade e consideração especial e à Tia Rita, pelo forte incentivo e apoio incondicional, minha segunda mãe que tive o privilégio de ser presenteado pela vida.

Agradeço ao Professor Delly, pela ótima oportunidade de estágio acadêmico, que permitiu minha primeira experiência profissional, com ética, integridade e competência.

Não posso deixar de agradecer ao Adriano, pela imensa paciência e dedicação no acompanhamento de seus estagiários, e por proporcionar um ambiente agradável de trabalho e muito aprendizado.

Finalmente agradeço a todos os professores que me acrescentaram algum conhecimento, desde o primário até então, especialmente ao Gerson G. Chaves, professor de física do ensino médio, quem despertou meu interesse pela ciência e possibilitou, através de muito esforço e dedicação, a realização do desejo de me ingressar em uma grande universidade como a UFV.

## *Resumo*

As fontes renováveis de energia têm se tornado cada vez mais populares no decorrer do tempo. As mais conhecidas são as energias eólica e solar, pouco se fala no biogás. Porém este pode ser uma oportuna fonte de energia renovável, uma vez que é obtido da degradação anaeróbica de dejetos orgânicos, que muitas vezes são descartados como lixo, poluindo o meio ambiente.

Este trabalho tem o intuito de mostrar o potencial de geração de energia elétrica do biogás no estado de Minas Gerais, apenas com suinoculturas. Para isso é calculado o potencial energético do estado baseado em todo seu rebanho de suínos. Também são discutidos dados práticos de propriedades suinocultoras visitadas no segundo semestre de 2014 em Minas Gerais.

Finalmente conclui-se que o biogás não fica atrás das outras fontes alternativas de energia, no que diz respeito a geração elétrica e menos ainda em custo ambiental.



## *Abstract*

Renewable energy sources become more popular everyday. The most famous ones are solar and wind energy. Not much is heard about biogas. However that can be an interesting source of renewable energy, once it is obtained from anaerobic degradation of organic wastes. Those which are often forgotten and put aside as garbage in the environment, causing pollution.

This work's aim is to show how much electrical energy biogas can generate in the state of Minas Gerais (MG), considering only its pig farms.

To achieve the work's aim it is evaluated the amount of electrical energy possible to generate in Minas Gerais based in its swine entire herd. It is also discussed practical data from pig farms visited on the second semester of 2014 in MG.

Finally it is concluded that biogas is not worse than other alternative sources when it is about electrical power or environment pollution.

## *Sumário*

<i>1</i>	<i>Introdução</i> .....	13
1.1	Breve histórico do biogás .....	13
1.2	Objetivo Geral .....	14
1.3	Organização do Trabalho.....	14
<i>2</i>	<i>Revisão Bibliográfica</i> .....	15
2.1	Biogás .....	15
2.1.1	Tecnologias de Conversão.....	17
2.2	A Resolução Normativa N°482 da ANEEL.....	18
2.3	Geração Distribuída – panorama mundial .....	19
<i>3</i>	<i>Metodologia</i> .....	21
3.1	Estimativa da quantidade de biogás e fertilizante gerados por uma suinocultura ...	21
3.1.1	Sistema de criação de ciclo completo.....	22
3.1.2	Sistema de criação UPL.....	23
3.1.3	Sistema de Criação de Terminação .....	24
3.2	Capacidade de geração elétrica do biogás .....	24
3.3	Cálculo da geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais baseado no número de suínos .....	24
<i>4</i>	<i>Resultados e discussões</i> .....	26
4.1	Dados e resultados das propriedades visitadas.....	26
4.2	Capacidade de geração elétrica a partir do biogás expandida para todo o rebanho de Minas Gerais.....	29
4.3	Análise do potencial de geração elétrica a partir do biogás de suinoculturas de Minas Gerais na matriz energética do estado .....	30
4.4	Evolução temporal da suinocultura mineira .....	31
<i>5</i>	<i>Conclusões</i> .....	32
<i>6</i>	<i>Referências Bibliográficas</i> .....	33

## ***Lista de Figuras***

Figura 1 - Biodigestor de suinocultura .....	16
Figura 2 - Biodigestor em manutenção.....	17
Figura 3 - Grupo gerador a biogas [10] .....	18
Figura 4 - Matriz Energética de Minas Gerais .....	30
Figura 5 - Evolução do número de matrizes suínas nas principais regiões produtoras de Minas Gerais [30] .....	31

## ***Lista de Tabelas***

Tabela 1 - Equivalência Energética do biogás com outras fontes [8] [9].....	15
Tabela 2 - Produção de biogás por propriedade mineira .....	26
Tabela 3 - Capacidade de geração elétrica a partir do biogás e possibilidade de autossuficiência.....	27
Tabela 4 - Dados gerais e Potência elétrica do biogás em MG .....	29
Tabela 5 - Formas de geração elétrica e sua potência instalada em MG - ANEEL .....	30

# ***1 Introdução***

O aumento do uso de fontes renováveis de energia e sua integração no sistema elétrico de potência tem se tornado bastante significativo nos últimos anos. A energia proveniente de biomassa pode ser convertida em biocombustíveis como metano e hidrogênio. No futuro a bioenergia substituirá os combustíveis fósseis. Muitas plantas de geração de energia renovável produzem relativamente pouca energia, quando comparadas às tradicionais fontes, como termoelétricas a combustíveis fósseis. [1]

O biogás é um combustível, uma mistura gasosa produzida durante a digestão anaeróbica de matéria orgânica em um biodigestor anaeróbico. Esse tratamento anaeróbico de dejetos tem a vantagem sobre o aeróbico por emitir menos gases de efeito estufa. [2]

## ***1.1 Breve histórico do biogás***

Em 1776 foi reconhecida a presença de metano no gás dos pântanos, ou biogás, pelo italiano Alessandro Volta. Porém apenas em 1859 é que o metano de digestão anaeróbica foi utilizado em Bombaim, na Índia, como gás combustível. Já em 1884, Ulysse Grayon, aluno de Louis Pasteur, obteve em um experimento cerca de 100 L de biogás por m<sup>3</sup> de matéria, de onde concluiu que esse gás poderia ser usado para aquecimento e iluminação. Em 1890 o gás gerado por uma fossa séptica na cidade de Exeter na Inglaterra foi utilizado para iluminação pública. Somente após 1950 é que a biodigestão passou a ser usada de forma intensa na China e Índia. Em 1973, com a crise do petróleo, muitos países desenvolvidos e subdesenvolvidos adotaram os biodigestores como fonte alternativa de energia, o que continua até então. [3] [4]

O interesse na produção de biogás para geração de eletricidade e calor aumenta cada vez mais por ser uma fonte renovável e limpa de energia. Além disso, a produção do biogás está associada à digestão anaeróbica de dejetos orgânicos que posteriormente podem ser utilizados como fertilizantes. Assim a produção de biogás aumenta como uma alternativa energética ambientalmente segura. [5]

Com a criação da Resolução Normativa Número 482 da ANEEL, surgem novas possibilidades para a geração distribuída. Essa resolução permite a conexão do sistema de micro ou minigeração individual dos atuais consumidores de energia na rede elétrica da concessionária. Tal medida vem para alavancar a geração não centralizada de eletricidade. A

Geração Distribuída (GD) vem ganhando espaço no setor energético, especialmente a relacionada às fontes renováveis. [6] [7]

## **1.2 Objetivo Geral**

Este trabalho visa discutir o potencial do biogás como fonte alternativa de energia renovável além da solar e eólica, e sua possível futura colaboração na matriz energética do estado de Minas Gerais. Para isso, além de dados retirados das referências bibliográficas, deseja-se mostrar um estudo de caso, uma análise de 22 granjas suinocultoras de Minas Gerais visitadas no segundo semestre de 2014, e utilizá-las como exemplo do potencial energético do biogás que podem produzir ou produzem, concluindo sobre a possibilidade de se tornarem autossuficientes em energia elétrica, que além da vantagem direta de economia financeira na aquisição de energia da concessionária, tem a independência de fatores econômicos externos como aumento no preço da tarifa e racionamento de eletricidade por falta d'água nos reservatórios de usinas hidrelétricas.

## **1.3 Organização do Trabalho**

Para alcançar os objetivos deste trabalho, inicialmente será realizada uma revisão bibliográfica a respeito do biogás e sua tecnologia de conversão de energia. Também será brevemente discutida a geração distribuída de energia elétrica e a Norma Regulamentadora 482 de abril de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que fornece diretrizes sobre a conexão de pequenas centrais geradoras na rede elétrica da concessionária.

Em seguida será apresentada a metodologia utilizada para se cumprir os objetivos gerais. Por fim serão discutidos os resultados obtidos e a conclusão a respeito desses resultados.

## 2 *Revisão Bibliográfica*

### 2.1 *Biogás*

O biogás é uma mistura de metano ( $\text{CH}_4$ , entre 65-70%), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ , entre 25-30%), água e sulfeto de hidrogênio. Essas substâncias são produzidas durante a decomposição anaeróbica de matéria orgânica, como restos de comida e fezes de animais.

Pequenas quantidades de outros componentes podem ser encontradas no biogás, dependendo de sua origem, como amônia ( $\text{NH}_3$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ). O biogás pode ser usado diretamente para cozinhar alimentos, no aquecimento em geral e iluminação por chama, ou transformado em qualquer tipo de energia: térmica, mecânica, elétrica ou outras formas. Pode ainda ser comprimido e usado em motores de veículos, tal como o gás natural. O metano é o componente mais valioso e em maior quantidade no biogás como combustível. O poder calorífico do biogás é por volta de 6 kWh/m<sup>3</sup>, dependendo da concentração de metano que compõe até 70% do biogás, pois o poder calorífico do  $\text{CH}_4$  puro é maior. Isso corresponde aproximadamente a meio litro de óleo diesel [2]. A Tabela 1 faz uma comparação do valor energético do biogás com diversas outras fontes de energia mais comuns, já considerando a eficiência de conversão.

**Tabela 1 - Equivalência Energética do biogás com outras fontes [8] [9]**

Fonte de energia	Valor de equivalência energética para 1 m <sup>3</sup> de biogás, a 1 atm e 25°C, segundo Sganzerla (1983)
Gasolina (L)	0,613
Querosene (L)	0,579
Diesel (L)	0,553
GLP (kg)	0,454
Álcool (L)	0,79
Carvão M. (kg)	0,735
Lenha (kg)	1,538
Eletricidade (kWh)	1,428

A obtenção do biogás em suinoculturas se dá no biodigestor. O biodigestor é uma câmara vedada e livre de oxigênio, onde ocorrerá a fermentação anaeróbica dos dejetos orgânicos. Deve-se proporcionar um ambiente interno favorável ao crescimento das bactérias fermentadoras, como ausência de agentes tóxicos como desinfetantes e detergentes, e uma

temperatura adequada entre 30 e 45°C. Para contínua produção de biogás os dejetos devem ser renovados constantemente. [10]

A Figura 1 abaixo mostra a foto de um biodigestor típico de suinocultura de uma fazenda na cidade de Pará de Minas/MG, foto tirada em setembro de 2014. Suas dimensões são de 41 m de comprimento por 15 m de largura.



**Figura 1 - Biodigestor de suinocultura**

A Figura 2 mostra um biodigestor semelhante ao da Figura 1, de mesmas dimensões e da mesma fazenda, em manutenção. Com o tempo, parte dos resíduos se solidificam ocupando espaço no interior da câmara. Recomenda-se a limpeza do biodigestor para melhor eficiência na produção de biogás quando isso acontece.





**Figura 2 - Biodigestor em manutenção**

### **2.1.1 Tecnologias de Conversão**

Há várias opções de tecnologia de geração de energia elétrica a partir do biogás. Basicamente a energia química do gás combustível (metano) é convertida em energia mecânica em uma câmara de combustão controlada, em um motor térmico, ciclo de Otto. Esse motor então ativa o gerador de energia elétrica. As máquinas térmicas mais comumente usadas nesse tipo de conversão são turbinas a gás e a vapor ou motores de combustão interna ou externa.

Os motores de combustão, que podem ser motores a diesel adaptados para o biogás, são mais populares devido a seu menor custo e maior eficiência. As turbinas a gás apresentam maior eficiência quando em cogeração, isto é, geração de energia elétrica com aproveitamento do calor residual da máquina. Dessa forma a eficiência na conversão energética pode chegar tipicamente até a 89%, comparado com 55% das melhores plantas convencionais sem reaproveitamento do calor. [10] [2]

A simples queima do biogás e emissão de  $\text{CO}_2$  na atmosfera já reduz em 21 vezes a poluição causada pela molécula de metano ( $\text{CH}_4$ ). [2]

A Figura 3 mostra um conjunto motor-gerador a diesel adaptado para o biogás, trifásico de 30 kVA. Seu consumo é de  $15\text{m}^3/\text{h}$  operando em máxima potência, o fator de potência típico desses moto-geradores é por volta de 0,8. [10]



Figura 3 - Grupo gerador a biogas [10]

## 2.2 A Resolução Normativa N°482 da ANEEL

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), criou em 17 de abril de 2012 a Resolução Normativa N° 482, ou apenas RN 482. A RN 482 estabelece as condições gerais para acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia

elétrica, não importando qual seja a concessionária de energia no Brasil. Também define diretrizes sobre o sistema de compensação de energia elétrica. [6]

Define-se como microgeração distribuída centrais geradoras com potência instalada menor do que 100 kW, conectada na rede de distribuição e que seja proveniente de determinadas fontes renováveis de energia, entre elas, o biogás. A minigeração distribuída possui a diferença de ser caracterizada pela potência instalada ser entre 100 kW e 1 MW.

O sistema de compensação de energia elétrica define que o excedente de potência ativa injetada na rede pela unidade consumidora é “emprestado” à companhia de energia e “devolvida” ao cliente quando este necessitar em até 36 meses, na mesma unidade ou em outra que seja de mesma titularidade (instalação no mesmo CPF ou CNPJ) e atendida pela mesma companhia de eletricidade.

### **2.3 Geração Distribuída – panorama mundial**

A dependência, bem como a demanda de energia elétrica para o desenvolvimento econômico e manutenção da sociedade cresce em ritmo cada vez mais acelerado. Para atender tal demanda, existe uma tendência global de instalar, cada vez mais, pequenas unidades geradoras conectadas na rede elétrica da concessionária de energia. A essa tendência de pequena geração descentralizada se dá o nome de Geração Distribuída (GD).

Entre as vantagens da GD, está o aumento na confiabilidade do Sistema Elétrico, pelo fato de diminuir a dependência do consumidor em relação a central geradora. Também as grandes centrais geradoras poderão postergar os investimentos necessários no sistema de distribuição e aumento da capacidade instalada, parte da nova demanda será fornecida pelos mini e microgeradores consumidores-produtores. A maior vantagem tratada neste trabalho é o fato de a GD ser adequada à diversificação da matriz energética, incentivando a geração de energia elétrica por meio de fontes alternativas renováveis. [11]

A GD apresenta alguns desafios para seu desenvolvimento, especialmente no Brasil, onde tal conceito ainda é relativamente novo. Com a implantação da geração distribuída vem uma mudança grande de estrutura e organização e também de regulação. Os novos equipamentos de geração ligados na rede podem inserir impurezas de natureza elétrica que reduzem a qualidade de energia, bem como a necessidade de equipamentos específicos de

segurança e proteção dos sistemas elétricos. O ICMS (Imposto sobre operações relativas à circulação de mercadorias e sobre prestação de serviços de transporte interestadual e intermunicipal), que chega a ser até 30% da tarifa de energia elétrica em alguns estados brasileiros, é uma barreira fiscal para a GD. Está sendo discutida a isenção do ICMS aos consumidores que aderirem aos sistemas de microgeração e minigeração, como incentivo fiscal. [12] [13]

Em alguns países a GD já está muito desenvolvida em relação ao Brasil, embora a ANEEL venha tomando medidas e realizando estudos a respeito da viabilidade técnica e econômica da nova tendência. O Reino Unido, por exemplo, estabeleceu incentivos governamentais com o objetivo de implicarem em um acréscimo de capacidade nas redes de até 25 GW apenas com a inserção de fontes renováveis. [14]

A Itália tem cumprido as metas europeias de atingir 18% de geração renovável, isso até 2011. E na Europa de forma geral, o crescente uso de fontes alternativas de energia motiva o desenvolvimento de uma legislação mais detalhada. [15]

O governo alemão criou tarifas incentivadoras para prédios com painéis fotovoltaicos. As concessionárias são obrigadas a comprar a energia solar gerada a um preço superior a aquele pago pela mesma quantidade de energia pelo consumidor. [11]

Portugal incentiva a população a instalar aerogeradores e painéis solares em casa. E como na Alemanha, a energia enviada para a rede possui um valor monetário superior ao comprado pelos consumidores, em Portugal esse valor é 3 vezes superior ao comprado. [11]

Os Estados Unidos não pretendem substituir suas fontes de energia poluentes de imediato, porém fazem fortes investimentos em energia renovável, como a pretensão de construir 975 novas unidades de geração que utilizem energia renovável, das 1300 previstas nos próximos 20 anos. [11]

O Brasil tem investido, por meio da ANEEL, em pesquisas e estudos sobre GD. Mas o grande potencial hídrico do país motiva e viabiliza a construção de grandes usinas hidrelétricas. No entanto, como essas usinas estão sendo construídas cada vez mais distantes dos grandes centros urbanos e industriais, há um aumento no custo hidro-energético pelo fato de haver a necessidade de investimento em longas linhas de transmissão. Além disso, a legislação ambiental brasileira está cada vez mais forte e dificultando a execução de grandes projetos de centrais geradoras. [11]

### **3 Metodologia**

Foram visitadas 22 suinoculturas no estado de Minas Gerais no segundo semestre de 2014, para a coleta de dados como número de matrizes e contas de energia elétrica.

Neste item será apresentado como foi calculada a quantidade de energia que pode ser gerada em cada granja, baseando-se principalmente no número de matrizes da propriedade (a matriz é a fêmea suína com a função de procriar). Para isso deve-se estimar a quantidade de dejetos para então calcular quanto de biogás é possível obter da granja.

Todas as equações e dados apresentados nesta metodologia foram utilizados para se obter os resultados do item 4 deste trabalho.

#### **3.1 Estimativa da quantidade de biogás e fertilizante gerados por uma suinocultura**

É necessário saber que as suinoculturas podem ser, basicamente, estruturadas em três diferentes tipos de sistemas de produção ou ciclos. O primeiro tipo é o ciclo completo, o qual trata de todas as fases de criação de suínos, do nascimento à engorda, com maternidade, creche e terminação. O segundo tipo é a UPL ou Unidade de Produção de Leitões, onde há creche e maternidade, neste sistema os animais são retirados da granja com no máximo 25 kg para crescerem e se desenvolverem em outro tipo de propriedade, a terminação, que é o terceiro tipo de suinocultura. Não há matrizes na terminação, apenas os animais a partir de 25 kg crescendo até o abate. [16]

O fertilizante resultado da biodigestão anaeróbica, também chamado de biofertilizante, é o produto que resta dos dejetos suínos após a extração do biogás no biodigestor. Seu uso representa corte de gastos com adubos químicos para plantações, bem como aproveitamento final dos resíduos de suinocultura. Os dejetos suínos constituem um bom recuperador da fertilidade desejada do solo. [17]

A seguir serão apresentadas as formas como se calcula a quantidade de biofertilizante e biogás gerados por cada sistema de criação de suínos: o sistema de criação de ciclo completo, UPL e terminação.

### 3.1.1 Sistema de criação de ciclo completo

Primeiramente, deve-se considerar a quantidade de animais presentes na suinocultura, a sua taxa de mortalidade, o período de confinamento e a produção média diária de dejetos por animal para calcular a quantidade de dejetos produzidos anualmente pela granja. Para isso aplica-se a equação (1) abaixo:

$$D_{pa} = N_a \cdot (1 - M_o) \cdot D_{da} \cdot N_{dc} \cdot F_c \quad (1)$$

Em que:

- $D_{pa}$  = dejetos produzidos por ano (em m<sup>3</sup>);
- $N_a$  = número de animais;
- $M_o$  = mortalidade (em %);
- $D_{da}$  = dejetos produzidos diariamente por animal (em m<sup>3</sup>);
- $N_{dc}$  = número de dias de confinamento no ano;
- $F_c$  = fator de correção para incertezas;

Para a produção em ciclo completo (maternidade, creche e terminação) o  $D_{da}$  é igual a 0,0086 m<sup>3</sup> e o  $N_{dc}$  é igual a 365 dias por ano. [16] O valor usado de  $M_o$  será de 3% e  $F_c$  é 0,94. Segundo as informações coletadas nas visitas às granjas de Minas Gerais, adota-se uma correspondência média de 13 animais por cada matriz.

Calculada a quantidade de dejetos gerados anualmente, calcula-se a quantidade anual de sólidos voláteis presentes nesses dejetos. Para isso utiliza-se a equação (2) abaixo:

$$V_{SV} = D_{pa} \cdot V_{St} \cdot P_{SV} \quad (2)$$

Em que:

- $V_{SV}$  = sólidos voláteis ao ano presentes nos dejetos (em kg);
- $D_{pa}$  = dejetos produzidos por ano (em m<sup>3</sup>);
- $V_{St}$  = sólidos totais presentes nos dejetos (em kg/m<sup>3</sup>);
- $P_{SV}$  = porcentagem de sólidos voláteis nos sólidos totais (em %).

Diversos valores para  $V_{St}$  e  $P_{SV}$  podem ser encontrados em diferentes bibliografias, para uma estimativa mais segura adota-se o menor valor de  $P_{SV}$ , que é igual a 70% e a média de  $V_{St}$  que vale 55 kg/m<sup>3</sup>. [16] [18]

Dessa forma o volume de biogás gerado por ano, considerando todos os animais da propriedade, é dado pela equação (3):

$$V_{bg} = V_{SV} \cdot B_{SV} \quad (3)$$

Em que:

- $V_{bg}$  = volume de biogás anual (em m<sup>3</sup>);
- $V_{SV}$  = sólidos voláteis ao ano presentes nos dejetos (em kg);
- $B_{SV}$  = volume de biogás gerado por kg de sólido volátil.

O menor valor de  $B_{SV}$  encontrado e utilizado, por segurança na estimativa, vale 0,45 m<sup>3</sup>/kg. [16]

Para o cálculo da quantidade de biofertilizantes, tem-se uma produção diária de 1000 kg de fertilizante a cada 12 matrizes [17]. Para saber o volume de biofertilizante adotou-se sua densidade do biofertilizante igual a 1010,32 kg/m<sup>3</sup> [19].

### 3.1.2 Sistema de criação UPL

Para estimar a quantidade de biogás que é possível gerar em um sistema de unidade de produção de leitões (UPL), tem-se que, em média, cada matriz produz 0,031 m<sup>3</sup> de biogás por hora. [16]

Para o cálculo da quantidade de biofertilizantes em UPL's, adota-se o mesmo método das suinoculturas de ciclo completo, ou seja, tem-se uma produção diária de 1000 kg de fertilizante a cada 12 matrizes [17]. Para saber o volume de fertilizante, adotou-se o mesmo valor de densidade do biofertilizante, como apresentado anteriormente.

### 3.1.3 Sistema de Criação de Terminação

Para a terminação, sistema de criação de engorda de suínos, cada animal gera em média 0,011 m<sup>3</sup> de biogás por hora. [16]

Para o cálculo da quantidade de biofertilizantes, no caso de terminação, é produzido em média 0,007 m<sup>3</sup> de dejetos por animal diariamente. [16]

## 3.2 Capacidade de geração elétrica do biogás

Para aplicar o biogás nos motores de combustão interna, deve-se retirar o H<sub>2</sub>S, que é altamente corrosivo para os metais, e o vapor de H<sub>2</sub>O, que reduz a eficiência de queima do gás. Quanto maior a eficiência dos filtros de sulfeto de hidrogênio e vapor d'água do biogás, mais elevada é a taxa de conversão energética. Levando em consideração o rendimento das máquinas, as atuais tecnologias de geração elétrica a partir do biogás disponíveis no mercado, tem-se uma média de 1,42 kWh/m<sup>3</sup> de biogás em condições normais de temperatura e pressão. Assim calcula-se de forma direta a quantidade de energia elétrica gerada por cada propriedade, baseado na sua produção de biogás. [8] [20]

## 3.3 Cálculo da geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais baseado no número de suínos

Segundo dados do Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA), o estado de Minas Gerais possui um rebanho de 243.331 matrizes, somando um total de 2.513.942 animais em toda a cadeia de produção suinícola. [21]

Tendo-se apenas o número de suínos, não se calcula a quantidade de biogás mas o volume da produção de metano (CH<sub>4</sub>), principal gás no biogás será calculado utilizando-se a equação (4) abaixo: [22]

$$V_{CH_4} = 365 \cdot N_S \cdot D_S \cdot S_{vol} \cdot V_{CH_4SV} \quad (4)$$

Em que:

- $V_{CH_4}$  = produção de metano (em m<sup>3</sup>/ano);



- $N_s$  = número de animais;
- $D_s$  = dejetos produzidos por suínos (em m<sup>3</sup>/dia);
- $S_{vol}$  = sólidos voláteis nos dejetos (em kg/(m<sup>3</sup>. $D_s$ ));
- $V_{CH_4SV}$  = produção de metano por kg de  $S_{vol}$  (em m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por kg de  $S_{vol}$ ).

A produção de dejetos por suínos é considerada como 0,007 m<sup>3</sup>/dia e a concentração de sólidos voláteis  $S_{vol}$  é igual a 53,55 kg/m<sup>3</sup> de dejetos [23]. A produção de metano é 0,42716 m<sup>3</sup>/kg de sólidos voláteis. [24]

A potência elétrica disponível com um grupo gerador será conforme a equação (5), que inclui a vazão de metano calculada através da produção de CH<sub>4</sub> obtida anteriormente na equação (4). [22]

$$P_{elt} = PCI_{CH_4} \cdot v \cdot \eta_{motor} \cdot \eta_{ger} \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

Em que:

- $P_{elt}$  = potência elétrica (em MW);
- $PCI_{CH_4}$  = poder calorífico inferior do metano (36000 kJ/m<sup>3</sup>) [25];
- $v$  = vazão de metano (em m<sup>3</sup>/s);
- $\eta_{motor}$  = rendimento do motor (15%) [22];
- $\eta_{ger}$  = rendimento do gerador (95%) [22].

Os rendimentos do gerador e principalmente do motor utilizados na equação (5) podem variar de acordo com as máquinas de conversão consideradas. Porém preferiu-se aplicar tais valores anteriormente descritos por terem sido encontrados na bibliografia estudada como padrões. O rendimento do motor, de 15% pode parecer baixo se comparado aos motores atuais no mercado, mas é interessante adotá-lo assim mesmo por segurança na estimativa da potência elétrica gerada com tal equipamento, para que não seja sobredimensionada.

## 4 Resultados e discussões

Os cálculos numéricos que geraram os resultados aqui apresentados não serão expostos detalhadamente, uma vez que a forma com que foram obtidos foi mostrada passo a passo na metodologia deste trabalho.

Inicialmente serão discutidos os dados fornecidos pelas propriedades visitadas, bem como os resultados calculados para elas. Em seguida será exibida a capacidade de geração elétrica de todo o rebanho suíno mineiro. Então será feita uma comparação analítica do potencial mineiro do biogás com a matriz energética do estado. Por fim, mostrar-se-á que a suinocultura de Minas Gerais tem se expandido nos últimos anos, e essa tendência continuará nos próximos anos, significando aumento no potencial elétrico por biogás.

### 4.1 Dados e resultados das propriedades visitadas

Usando as equações (1), (2) e (3) para ciclo completo, junto das informações de produção diária de biogás para UPL e terminação, mostradas na metodologia deste trabalho, calculou-se para todas as 22 suinoculturas mineiras visitadas a quantidade de energia elétrica que é possível gerar, a partir do biogás que produzem ou tem a capacidade de produzir. A Tabela 2 mostra as propriedades com a cidade do estado de Minas Gerais em que se encontram, o número de animais e a produção diária de biogás em m<sup>3</sup>. Também é explicitado o tipo de sistema de criação de suínos.

Tabela 2 - Produção de biogás por propriedade mineira

Propriedade número:	Cidade do estado de MG	Número de animais	Produção Diária de Biogás (m <sup>3</sup> )	Tipo de Ciclo
1	Piedade de Ponte Nova	11243	1527,41	Completo
2	Esmeraldas	10374	1409,33	Completo
3	Pará de Minas	10400	1412,88	Completo
4	Pará de Minas	12740	1730,78	Completo
5	Pará de Minas	8060	1094,97	Completo
6	Pará de Minas	7800	1059,59	Completo
7	Pará de Minas	16900	2295,93	Completo
8	Paraopeba	2730	380,51	Completo
9	Sete Lagoas	6250	849,1	Completo

10	Bom Despacho	44200	6004,73	Completo
11	Cabo Verde	3900	529,83	Completo
12	Juíz de Fora	32604	4429,36	Completo
13	Lima Duarte	7800	1059,65	Completo
14	Oliveira	67600	9183,71	Completo
15	Passos	6500	883,05	Completo
16	Itaúna	7800	1059,66	Completo
17	Patos de Minas	28600	3885,41	Completo
18	Capinópolis	1000	744	UPL
19	Uberlândia	5350	3980,4	UPL
20	Ituiutaba	2200	580,8	Terminação
21	Prata	3000	792	Terminação
22	Monte Alegre	5000	1320	Terminação

Na Tabela 2 os nomes das suinoculturas não estão explicitados para conservar a discrição dos suinocultores e suas granjas que são propriedades de direito privado. Além disso os nomes constituem uma informação dispensável para os objetivos deste trabalho.

Na Tabela 3 é apresentada a capacidade de geração de energia elétrica com o biogás que se pode obter em cada uma das granjas.

**Tabela 3 - Capacidade de geração elétrica a partir do biogás e possibilidade de autossuficiência**

Propriedade	Capacidade de geração de energia elétrica (kWh/mês)	Consumo máximo registrado e mês de ocorrência	Possibilidade de autossuficiência
1	65.067,78	42.092 kWh em Fevereiro de 2014	sim
2	60.037,52	31.920 kWh*	sim
3	60.188,60	35.547 kWh em Agosto de 2014	sim
4	73.741,44	42.120 kWh em Julho de 2014	sim
5	46.645,76	24800 kWh*	sim
6	45.138,64	30.257 kWh em Novembro de 2013	sim
7	97.806,47	117.666 kWh em Fevereiro de 2014	não
8	16.209,97	41808kWh*	não
9	36.171,61	44.054 kWh em Agosto de 2013	não
10	255.801,54	71.920 kWh em Julho de 2014	sim
11	22.570,57	39.224 kWh em Julho de 2014	não
12	188.690,76	115.319 kWh em Abril de 2014	sim
13	45.141,14	26.635 kWh em Dezembro de 2013	sim
14	391.255,88	283.150 em Agosto de 2014	sim
15	37.617,87	21.960 kWh em Março de 2014	sim
16	45.141,45	24000 kWh*	sim
17	165.518,64	Já é autossuficiente	sim

<b>18</b>	31.694,00	6.226 kWh em Julho de 2014	sim
<b>19</b>	169565,04	79.102 kWh em Fevereiro de 2014	sim
<b>20</b>	24.742,00	2.317 kWh em Novembro de 2014	sim
<b>21</b>	33.739,00	12.289 kWh em Janeiro de 2014	sim
<b>22</b>	56.232,00	20.307 kWh em Abril de 2013	sim

\*obtidos através de interpolação do consumo de granjas semelhantes com mesmo perfil de produção por não terem apresentado as contas de energia elétrica.

Para definir se a suinocultura tem ou não a possibilidade de se tornar autossuficiente em energia elétrica utilizando seu biogás, foi analisado o consumo de energia elétrica em kWh através das contas de energia elétrica fornecidas. Foi pedido aos suinocultores as contas dos últimos 12 meses a contar a data da visita. Destas, foi utilizado o maior valor de consumo para comparação com a capacidade de geração elétrica com o biogás. Se a capacidade calculada de geração elétrica for maior do que a quantidade de energia registrada no mês de maior consumo, então a propriedade pode se tornar autossuficiente, caso contrário, não pode ser autossuficiente.

A possibilidade de se tornar autossuficiente em energia elétrica discutida aqui considera apenas a quantidade mensal de energia que é possível ser gerada nas granjas e a quantidade consumida mensalmente. Não se analisará a demanda de potência contratada da concessionária.

É interessante observar na Tabela 3 que das 22 suínoculturas visitadas, apenas 4 não podem se tornar autossuficientes em energia elétrica a partir do biogás que é gerado por ela própria.

Mas, ainda segundo a Tabela 3, somando a capacidade total de geração de energia elétrica de todas as suinoculturas, exceto a propriedade número 17 que já é autossuficiente e, portanto não possui contas de energia elétrica, tem-se uma possível geração de aproximadamente 1.803.199 kWh/mês, enquanto a soma dos consumos é 1.112.713 kWh/mês. Isso dá um saldo positivo de 690.486 kWh/mês. Esse saldo positivo de energia pode ser enviado para a rede elétrica da concessionária, por meio da Resolução Normativa 482 da ANEEL. Sendo assim, pode-se afirmar que de forma geral o conjunto das 22 suínoculturas analisadas não apenas pode ser autossuficiente em energia elétrica com seu biogás, como também pode gerar de excedente no mínimo 62 % além do necessário para suas próprias operações.

Como o custo de manutenção dos equipamentos de geração é diretamente proporcional ao tempo de funcionamento [26], os proprietários podem preferir gerar apenas o que necessitarem, já que caso insiram na rede todo o seu excedente, que tem o prazo de validade para reutilização de até 3 anos estariam reduzindo a vida útil de seus equipamentos em prol da concessionária [27]. Esse problema poderia ser corrigido com a implantação de novas tarifas para a geração distribuída, em que ao invés de conceder créditos de energia para reutilização, pagasse efetivamente ao consumidor-produtor pelo seu excedente de energia injetado na linha de distribuição.

A quantidade de energia de 1.803.199 kWh/mês que é possível gerar com o biogás potencialmente produzido pelas 22 suínoculturas equivale então a 2,504 MW.

#### **4.2 Capacidade de geração elétrica a partir do biogás expandida para todo o rebanho de Minas Gerais**

Segundo o item 3.3 deste trabalho, Minas Gerais possui um rebanho total de 2.513.942 animais em toda a cadeia de produção suinícola. [21]

A Tabela 4 a seguir apresenta os resultados calculados com as equações do item 3.3:

**Tabela 4 - Dados gerais e Potência elétrica do biogás em MG**

<b>Ítem</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>
<b>Total de suínos em MG</b>	2.513.942	animais
<b>Dejetos produzidos por animal</b>	0,007	m <sup>3</sup> /dia
<b>Produção de dejetos</b>	6.423.121,81	m <sup>3</sup> /ano
<b>Volume de metano produzido</b>	146.925.173,1	m <sup>3</sup> /ano
<b>Vazão de biogás</b>	4,66	m <sup>3</sup> /s
<b>Potência elétrica</b>	23,9	MW

Sendo assim, caso todas as granjas do estado de Minas Gerais aproveitassem seus dejetos para geração de biogás e o transformassem em energia elétrica, teria-se uma potência instalada de 23,9 MW.

### 4.3 Análise do potencial de geração elétrica a partir do biogás de suinoculturas de Minas Gerais na matriz energética do estado

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o estado de Minas Gerais possui uma capacidade de geração elétrica instalada de 15.598,4 MW. [28]

A Figura 4 - Matriz Energética de Minas Gerais mostra a matriz energética do estado de Minas Gerais.

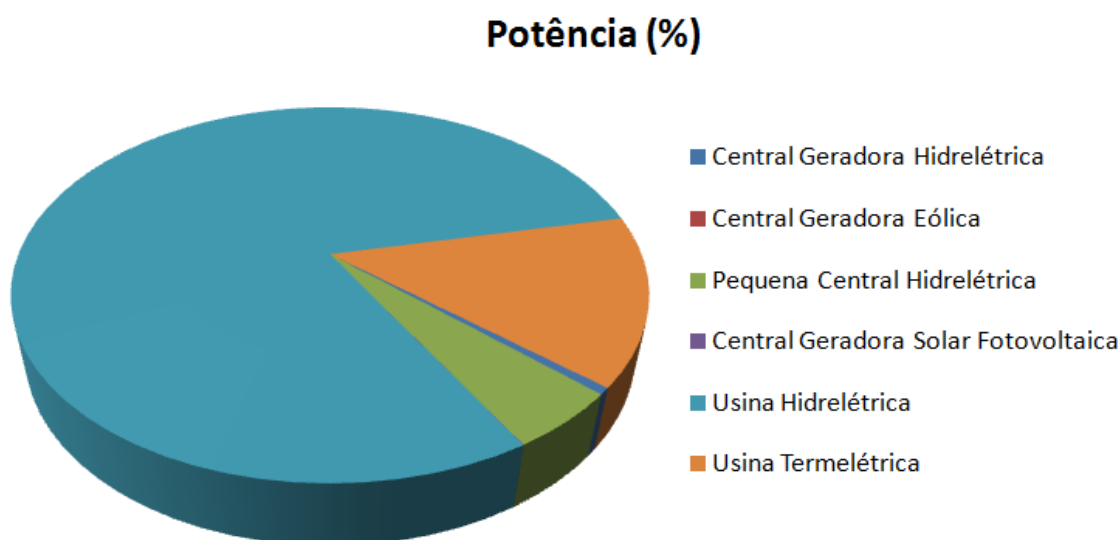


Figura 4 - Matriz Energética de Minas Gerais

A Tabela 5 apresenta a potência instalada no estado de Minas Gerais para cada fonte de energia:

Tabela 5 - Formas de geração elétrica e sua potência instalada em MG - ANEEL

Tipo	Quantidade	Potência (MW)	%
Central Geradora Hidrelétrica	126	84,85	0,54
Central Geradora Eólica	1	0,156	0
Pequena Central Hidrelétrica	97	769,58	4,93
Central Geradora Solar Fotovoltaica	51	1,71	0,01
Usina Hidrelétrica	44	12.484,34	80,04
Usina Termelétrica	389	2.257,76	14,47
<b>Total</b>	<b>708</b>	<b>15.598,41</b>	<b>100</b>

A possível geração de 23,9 MW das suinoculturas mineiras representaria 0,15 % da geração total de 15.598,41 MW, ou seja, maior do que a atual potência fotovoltaica instalada, que corresponde a 0,01 %. Também é maior do que a potência proveniente de energia eólica, que é insignificante perante as outras, como se pode ver na Tabela 5.

#### 4.4 Evolução temporal da suinocultura mineira

A Figura 5 abaixo mostra a evolução temporal da suinocultura no estado de Minas Gerais. Uma regressão linear foi feita com os dados da curva Total e foi então desenhada a melhor reta. Nota-se que o número de matrizes no estado sempre tem crescido desde o ano 2000, com excessão do ano 2010 para 2011, devido ao surto mundial de gripe suína (H1N1) a partir de 2009, que provocou paralisia no setor de carne de porco no Brasil. [29]

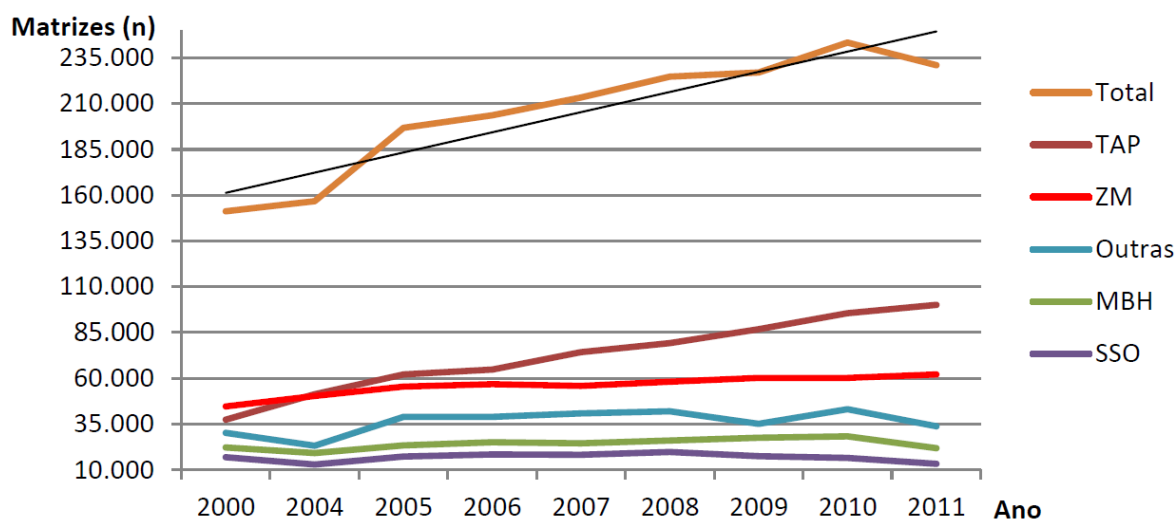


Figura 5 - Evolução do número de matrizes suínas nas principais regiões produtoras de Minas Gerais [30]

Na legenda da Figura 5, TAP é o Triângulo/Alto Paranaíba, ZM é Zona da Mata, MBH é a região Metropolitana de Belo Horizonte e SSO é Sul/Sudeste.

Como a tendência do setor suinocultor mineiro é aumentar a produção, conforme gráfico da Figura 5 a geração de energia elétrica a partir do biogás de suinoculturas também tende a aumentar seu potencial.

## 5 *Conclusões*

A aplicação do biogás de suinoculturas para a geração distribuída de energia elétrica é viável e apresenta uma eficiência satisfatória do sistema geral de produção do gás e geração de eletricidade por meio das tecnologias disponíveis no mercado. [10]

Como demonstrado nos resultados deste trabalho, o biogás se constitui de grande potencial energético a ser explorado efetivamente. E que apesar de outras fontes renováveis de energia serem mais conhecidas, como a solar e eólica, o biogás além de ser renovável, é proveniente de dejetos que por vezes são jogados no ambiente, provocando um grave impacto ambiental.

Como exemplo de autossuficiência energética a partir do biogás, foram apresentados os dados das 22 granjas visitadas em Minas Gerais, das quais uma já é autossuficiente na prática. Das 21 restantes, apenas 4 não conseguem gerar energia o bastante para se suprirem. Ainda assim o balanço das 22 suinoculturas é positivo, mostrando que com a geração distribuída incentivada pela RN 482, a energia que é possível produzir nessas propriedades, como um conjunto, é mais do que o bastante para supri-las.

Outro fato interessante é que o biogás é uma fonte mais estável e constante do que a energia do vento ou do sol. Em épocas frias a produção de biogás é reduzida, mas não pára durante a noite, como os painéis fotovoltaicos nem com variações na velocidade do vento para aerogeradores.

Finalmente, além de o biogás ter um grande potencial de geração elétrica a ponto de permitir a autossuficiência de suinoculturas, ele tende a aumentar a quantidade disponível, junto da tendência de aumento na produção suinocultora.



## 6 Referências Bibliográficas

- [1] V. Jerkovic, Z. Spoljaric e D. Sljivac, “Stability Testing of a Small Biogas Plant in an Electric Power System,” 2011.
- [2] N. Sacher, S. S. Paclijan, R. Gensh e D. Spuhler, “Biogas Electricity (Small-scale),” 2014.
- [3] R. Nishimura, “Análise de Balanço Energético de Sistema de Produção de Biogás em Granja de Suínos: Implementação de Aplicativo Computacional,” Campo Grande/MS, 2009.
- [4] L. Prati, “Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Gerado por Biodigestores,” Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2010.
- [5] J. Bacenetti e M. Fiala, “Electricity Production from Anaerobic Digestion of Animal Slurries in Farm Scale Plants,” Milão, Itália, 2014.
- [6] ANEEL, “RN N° 482,” 2012.
- [7] A. L. C. Mendes, “Metodologia e Aplicação da Inserção de Geração Fotovoltaica e Armazenamento de Energia em Sistema Elétrico de Potência,” Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 2013.
- [8] A. Catapan, D. C. Catapan e E. A. Catapan, “Formas Alternativas de Energia Elétrica a Partir do Biogás: Uma Abordagem do Custo de Geração da Energia,” UFPR e UFSC, Curitiba/PR, 2011.
- [9] E. Sganzerla, “Biodigestor: Uma Solução,” Porto Alegre/RS, 1983.
- [10] R. Tassinari, D. Guntzel, C. G. Reghelin e R. Barichello, “Geração de Energia Elétrica com Biogás: Um caso prático na Suinocultura”.
- [11] T. C. Farqui, “Modelo para avaliação de oportunidades de oferta de geração distribuída,” Escola Politécnica da USP, São Paulo/SP, 2011.
- [12] R. Bicalho, “O desafio da geração distribuída no Brasil,” Grupo de Economia da Energia, 21 maio 2015. [Online]. Available: <http://jornalggn.com.br/blog/ronaldo-bicalho/o-desafio-da-geracao-distribuida-no-brasil>. [Acesso em 23 junho 2015].
- [13] S. d. Fazenda, “ICMS,” Governo do Estado de São Paulo, [Online]. Available: [http://www.fazenda.sp.gov.br/oquee/oq\\_icms.shtm](http://www.fazenda.sp.gov.br/oquee/oq_icms.shtm). [Acesso em 23 junho 2015].
- [14] R. Fujii, M. Udaeta, G. Burani e J. Grimoni, “Análise dos Elementos Regulatórios Relativos à Geração Distribuída,” USP, São Paulo/SP.
- [15] G. J. A. Barja, “A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico,” UnB, Brasília/DF, 2006.
- [16] M. M. F. C. C. Gusmão, “Produção de Biogás em Diferentes Sistemas de Criação de Suínos em Santa Catarina,” Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2008.
- [17] E. A. Konzen, “Manejo e Utilização dos Dejetos de Suínos,” EMBRAPA, Concórdia/SC, 1983.
- [18] L. Prati, “Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás Gerado por Biodigestores,” Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR, 2010.

- [19] A. Kunz e P. A. V. Oliveira, “Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás,” *Revista de Política Agrícola*, Concórdia/SC, 2006.
- [20] C. Trivelatto, “Geração com Biogás,” Uberlândia/MG, 2011.
- [21] S. K. Garcia e M. R. Aguiar, “Suinocultura em Minas Gerais,” UFMG - Escola de Veterinária, Belo Horizonte/MG, 2010.
- [22] A. H. Ferrarez, D. O. Filho, J. N. Silva e N. S. Souza, “Potencial de Geração de Energia Térmica e Elétrica a Partir dos Resíduos da Avicultura e Suinocultura na Zona da Mata de Minas Gerais,” XLIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Viçosa/MG, 2014.
- [23] C. F. Souza, C. C. S. Carvalho, J. A. Campos, A. T. Matos e W. P. M. Ferreira, “Caracterização de dejetos suínos em fase de terminação,” *Revista Ceres*, Viçosa/MG, 2009.
- [24] M. A. P. O. Júnior, A. C. A. Orrico e J. d. L. Júnior, “Produção animal e o meio ambiente: uma comparação entre potencial de emissão de metano dos dejetos e a quantidade de alimento produzido,” *Eng. Agríc.* vol.31 no.2, Jaboticabal/SP, 2011.
- [25] A. Pantaleo, B. Gennaro e N. Shah, “Assessment of optimal size of anaerobic co-digestion plants: An application to cattle farms in the province of Bari (Italy),” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.
- [26] C. C. S. Paes, “ER-BR - Apresentação Fábrica, Clientes e Projetos,” ER-BR Energias Renováveis Ltda, Londrina/PR, 2014.
- [27] N. J. H. Moreira, “Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012,” Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2012.
- [28] A.-. A. N. d. E. Elétrica, “BIG - Banco de Informações de Geração,” <http://goo.gl/BDnmID> , Acesso em 17 de junho de 2015.
- [29] D. Oliveira, “Gripe suína provoca paralisia no setor de carne de porco no Brasil, diz associação,” *Folha de São Paulo*, 28 abril 2009. [Online]. Available: <http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2009/04/557500-gripe-suina-provoca-paralisia-no-setor-de-carne-de-porco-no-brasil-diz-associacao.shtml>. [Acesso em 17 junho 2015].
- [30] S. K. Garcia e J. P. Gonçalves, “Suinocultura Mineira e sua Defesa Sanitária,” *Revista VeZ em Minas*, p. 47, 2012.