



21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

MICROGERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS DE DEJETOS SUÍNOS: UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE DA SUINOCULTURA

Marco Antônio Casarin, eng.aut.mac@gmail.com.br¹ CON-2016-1463
Edson Bazzo, ebazzo@emc.ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, LabCET – EMC, Campus Universitário Florianópolis, CEP.: 88040-900

Resumo: O aproveitamento energético na criação de porcos reduziu ao longo do tempo. Além disso a criação intensiva do agora suíno fez com que o risco de poluição ambiental se tornasse insustentável. Uma alternativa para ambos os problemas é a instalação de plantas de geração de energia elétrica a biogás (PGEb) e a formação de biosistemas integrados (BSI). Recentemente, através da RN 482, a ANEEL criou o sistema de compensação de energia elétrica (SCEE) que permite a conexão das PGEbs à rede e o armazenamento de energia elétrica (EE) na forma de créditos. Com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica e econômica dos BSIs, foi estudada uma população de 619 suinocultores do Extremo Oeste Catarinense que representam um rebanho de 300.000 suínos. Considerando a possibilidade de recuperação de calor do arrefecimento e dos gases de exaustão do motor, foram propostas 4 configurações de PGEb: isolada, conectada, aquecida e não aquecida. Para considerar o efeito das condições climáticas e de cargas variáveis na produção de biogás e energia elétrica, foi desenvolvido um simulador dinâmico do BSI. Através do simulador foi possível obter o desempenho das plantas ao longo de um ano inteiro e avaliar a influência do clima, do aquecimento e do SCEE na produção de biogás e energia elétrica. Pôde-se constatar a falta de motogeradores adequados às plantas conectadas, a inadequação da RN 482 aos projetos e o tamanho médio reduzido das granjas. Além disso, fatores como a limitação da potência instalada e a rede elétrica monofásica na população reduzem a eficiência da conversão do biogás em energia elétrica, o que compromete a viabilidade econômica. A produção de biogás foi 30% maior nas plantas aquecidas. Em média, a produção de biogás recupera 16% da energia contida na ração e melhora a eficiência da granja em 50%. A baixa eficiência da conversão em energia elétrica faz estes valores caírem para 3 e 8,6%, respectivamente. Apesar da melhora ambiental e energética, os BSIs propostos se mostraram inviáveis economicamente, apresentando melhores indicadores a medida que o consumo de energia elétrica e a produção de biogás aumentam, viabilizando-se a partir de 8000 kWh/mês, o que necessita 2000 suínos em terminação ou 420 matrizes. Apenas 1,5% das granjas estudadas atendem a estes critérios.

Palavras-chave: Microgeração, Biogás, Cogeneradores, Cogeração, Sistema de compensação de energia elétrica.

1. INTRODUÇÃO

O uso do porco na cozinha brasileira data praticamente da época do descobrimento, principalmente devido à simplicidade de sua criação, onde restos de comida compunham a “lavagem” usada como ração.

Este tipo de criação foi utilizado também pelos imigrantes italianos e alemães no final do século XIX, onde de maneira integrada à propriedade apresentava um alto aproveitamento energético, principalmente devido ao uso de restos de comida em sua alimentação e o alto índice de utilização dos “produtos” do porco.

A partir da década de 70 a adoção do modo integrado de produção, onde o suíno e a ração, agora a base de milho e soja, são fornecidos ao produtor que ganha para criar o animal, fez com que a suinocultura se tornasse desintegrada do sistema de produção da propriedade e diminuiu consideravelmente o aproveitamento energético na sua criação.

Com o advento do modo integrado de produção a atividade se ampliou desordenadamente, sem considerar critérios de sustentabilidade ambiental, passando a produzir grandes quantidades de dejetos em pequenas extensões de terra como é o caso da região Oeste de Santa Catarina que concentra 75% do rebanho do estado.

A grande quantidade de dejetos aliada ao baixo conhecimento técnico dos produtores em relação ao seu tratamento representa um alto risco ambiental para a região.

Atualmente a grande maioria dos dejetos é armazenada em lagoas a céu aberto que quando cheias são esvaziadas

parcialmente lançando-se os dejetos, ainda com grande carga poluidora, nas lavouras, o que pode contaminar águas e solos devido a excessiva carga orgânica.

Porém este problema tem uma solução ambientalmente correta, que é a utilização de biodigestores e a geração de energia elétrica com o biogás produzido pela decomposição anaeróbia dos dejetos, evitando assim a emissão de metano para a atmosfera, recuperando parte da energia que seria perdida, diminuindo a carga orgânica e permitindo a fertirrigação com o biofertilizante proveniente do processo.

Para determinar se a solução proposta é mais eficiente que o sistema atual, há a necessidade de uma análise energética.

Em Abril de 2012 a ANEEL publicou a resolução normativa N° 482 que estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica.

Grande parte das plantas de geração de energia elétrica utilizando biogás de suínos enquadra-se em microgeração (até 75 kW). Devido a recente normatização do acesso a rede para plantas desse tipo, faz-se necessária a análise da viabilidade técnica e econômica destas plantas levando em consideração a nova resolução e o sistema de compensação de energia.

Dentre as variáveis que possuem maior influência na produção de biogás, está a temperatura do substrato dentro do biodigestor. Devido à possibilidade de utilizar a energia térmica, proveniente da geração de energia elétrica, para aquecimento do biodigestor, faz-se necessário o estudo do uso da cogeração para este fim e de sua influência sobre a produção de biogás e energia elétrica.

2. CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA POPULAÇÃO

2.1. Localização e tamanho

Este trabalho baseou-se no estudo de 619 produtores de suínos associados da Cooper A1 na região Extremo Oeste de Santa Catarina e Noroeste do Rio Grande do Sul, totalizando um rebanho de 299.320 suínos divididos em granjas Unidade Crescimento e Terminação (UCT) e Unidade de Produção de Leitões (UPL) conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Características do plantel de suínos da Cooper A1

Tipo de Granja	UCT	UPL	Total
Número de animais	266.189	33.131	299.320
Número de produtores	491	128	619
Média de animais por produtor	542	259	484

2.2. Energia elétrica e seu consumo

2.2.1 Tipo de rede

Quando se deseja conectar um microgerador a rede, uma das características mais importantes é o tipo de rede que atende a Unidade Consumidora (UC), pois este determina, juntamente com a carga instalada, a máxima potência do sistema e também o tipo de ligação do gerador. Um gerador com ligação monofásica tem uma redução de 40% em sua potência máxima e 7% na eficiência de conversão da energia mecânica em elétrica. A Figura 1 mostra a distribuição das granjas conforme o tipo da rede elétrica.

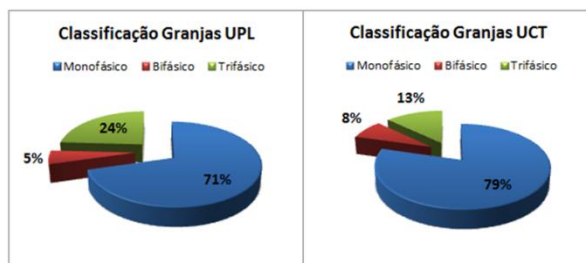


Figura 1- Distribuição das granjas quanto ao tipo da rede elétrica

Pode-se observar da Figura 1 que a grande maioria das granjas possuem rede elétrica monofásica, permitindo a conexão de potências até 15 kW.

2.2.2 Preço e consumo

Obteve-se um consumo e preço médios de 870 kWh/mês e R\$ 0,44 nas granjas UCTs. Nas granjas UPLs estes

valores foram de 2840 kWh/mês e R\$ 0,45, respectivamente.

O ICMS representa 15,6% do valor da tarifa nas granjas UCTs e 18,5% nas granjas UPLs, 3,6% são PIS/COFINS e 16% de bandeira tarifária vermelha.

2.3. Potência mínima necessária

Baseados nos dados de consumo de EE pôde-se determinar a mínima potência líquida do sistema para atender as granjas. Esta potência mínima depende se o sistema é isolado ou conectado a rede.

Nos sistemas isolados considerou-se o pico de carga, queda máxima de tensão e o acionamento de cargas indutivas obtendo-se uma potência mínima de 20 kW.

Os sistemas conectados consideram a carga base, pois basta que a multiplicação da potência líquida pelo tempo de funcionamento supra o consumo médio de EE. A rede suprirá os picos de carga, permitindo eliminar a potência extra. A Figura 2 mostra a distribuição das granjas em faixas de potência para 24 horas de funcionamento do motogerador.

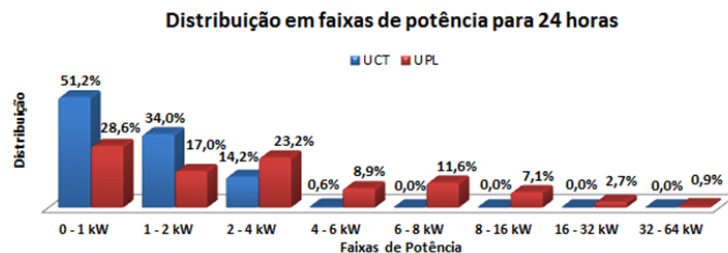


Figura 2 - Distribuição das granjas em faixas de potência líquida para 24h de funcionamento

Observa-se que 99,4% das granjas UCTs necessitam uma potência de até 4 kW e 77,7% das granjas UPL até 6 kW.

2.4. Potência máxima possível

A potência elétrica equivalente ao biogás disponível possível de ser gerada depende da máxima produção de biogás. Para a estimativa da produção de metano utilizou-se o modelo de Chen & Hashimoto (1978) dado pela Eq. (1).

$$\gamma_v = \frac{B_o S_o}{TRH} \left(1 - \frac{K}{TRH * \mu_m - 1 + K} \right) \quad (1)$$

$$K = 0,5 + 0,0043 * e^{0,051 * S_o} \quad (2)$$

$$\mu_m = 0,013 * T_{sub} - 0,129 \quad (3)$$

Onde γ_v é a produção de metano por metro cúbico da câmara de digestão, $B_o = 0,45 \text{ Nm}^3 \text{ de CH}_4/\text{kg de SV}$ é a taxa máxima de produção de metano dada por Oliveira & Higarashi (2006), $S_o = 47,67 \text{ kg/m}^3$ é a concentração de Sólidos Voláteis SV nos dejetos dada por Tavares (2012), $TRH = 20 \text{ dias}$ é o tempo de retenção hidráulica adotado, K é um coeficiente cinético, μ_m é a taxa de crescimento máximo específico e $T_{sub} = 20^\circ\text{C}$ (Oliveira, 2005) é a temperatura adotada para o substrato quando considerada constante.

A produção de biogás $\dot{V}_{gás}$ é obtida pela Eq. (4) considerando uma concentração de 65% de CH_4 (Gusmão, 2008).

$$\dot{V}_{gás} = \frac{\gamma_v}{0,65} * \frac{V_{bio}}{24} \text{ (Nm}^3/\text{h)} \quad (4)$$

Onde V_{bio} é o volume de substrato no biodigestor em metros cúbicos obtido da multiplicação do TRH pela produção diária de dejetos. A produção de dejetos adotada neste trabalho foi de 4,84 L/animal.dia nas granjas UCT (Tavares, 2012) e 22,8 L/matriz.dia nas granjas UPL (FATMA, 2014).

Com os dados adotados obteve-se uma produção de 0,119 $\text{Nm}^3/\text{animal.dia}$ nas granjas UCTs e 0,557 $\text{Nm}^3/\text{matriz.dia}$ nas granjas UPLs.

Através da produção de biogás estimada para cada granja é possível estimar a potência necessária aos motogeradores para converter todo biogás em EE. Para isto calculou-se a potência elétrica equivalente ao biogás disponível P_{el} (kW) conforme a Eq. (5).

$$P_{el} = \dot{V}_{gás} * PCI * \eta_{el} \quad (5)$$

Onde PCI ($6,45 \text{ kWh/Nm}^3$) é o poder calorífico inferior do biogás adotado e $\eta_{el} = 0,28$ é a eficiência elétrica média dos motogeradores encontrados no mercado.

Este cálculo visa orientar a busca por motogeradores de tamanho adequado à população. Como não é possível ter uma potência para cada granja, a escolha das potências adotou como requisitos a utilização de todo biogás produzido e

o funcionamento mínimo do gerador de 12 horas. Nas potências estimadas, 96% das UCTs são atendidas com 10 kW e 77% das UPLs com 15 kW, com disponibilidade média de 72% e potência instalada total de 4,94 MW.

O grupo gerador de menor potência disponível no mercado para ser conectado a rede possui 20 kW. Com as potências disponíveis no mercado nacional a disponibilidade cai para 24% nas UCTs, 45% nas UPLs e a potência instalada sobe para 12,6 MW, evidenciando a potência inadequada dos motogeradores disponíveis no mercado. A Figura 3 compara as potências estimadas e as disponíveis.

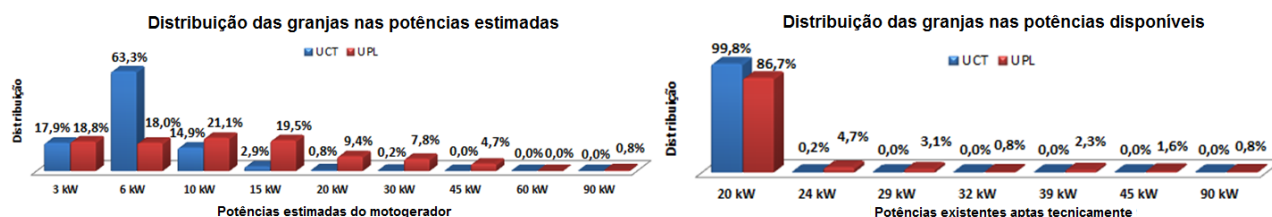


Figura 3 - Distribuição das granjas nas potências estimadas e nas potências disponíveis no mercado nacional

2.5. Granjas representativas

Com base no estudo da população determinou-se duas granjas representativas, uma para cada tipo conforme resume a Tabela 2.

Tabela 2- Dados das granjas representativas

Granja	Número de animais	Consumo de EE	Preço do kWh (R\$)	ICMS	Rede	Disjuntor (A)	Carga Instalada* (kW)	Consumo de ração (kg/animal.dia)
UCT	542	870	0,44	15,60%	monofásica	40	8,8	2
UPL	259	2840	0,45	18,50%	monofásica	60	13,2	4,52

*A carga instalada considerada foi obtida da multiplicação da corrente do disjuntor pela tensão nominal de 220 Volts

3. ANÁLISE TÉCNICA DAS GRANJAS REPRESENTATIVAS

Para cada granja representativa foram propostas 4 tipos de PGEB. A PGEB1 isolada da rede e não aquecida, a PGEB2 isolada da rede e aquecida, a PGEB3 conectada a rede e não aquecida e a PGEB4 conectada a rede e aquecida.

O biodigestor utilizado é do modelo canadense com agitação nas 4 plantas, porém as plantas com aquecimento possuem 5 cm de isolamento térmico em suas paredes e fundo.

O motogerador utilizado é o de menor potência disponível no mercado (20 kW) sendo o mesmo nas 4 plantas. Nas plantas conectadas a potência elétrica do gerador cai para 12 kW devido a ligação monofásica.

A integração das granjas UCT e UPL com as PGEBs formam os Biossistemas Integrados (BSI) da seguinte maneira:

UCT + PGEB1 = BSI1
 UCT + PGEB2 = BSI2
 UCT + PGEB3 = BSI3
 UCT + PGEB4 = BSI4

UPL + PGEB1 = BSI5
 UPL + PGEB2 = BSI6
 UPL + PGEB3 = BSI7
 UPL + PGEB4 = BSI8

A Figura 4 ilustra de forma esquemática a configuração de um BSI completo dividido em subsistemas e o ciclo de cogeração proposto.

Na análise termodinâmica realizou-se balanços energéticos e calculou-se índices de desempenho para cada subsistema e para o BSI.

3.1. Análise termodinâmica do SGEE

Os principais valores conhecidos do SGEE são o consumo de biogás pelo motor com ligações mono e trifásica dados pelas Eq. (6) e (7), a temperatura dos gases de exaustão do motor $T_4 = 525^\circ\text{C}$ e a pressão máxima da água de arrefecimento do motor $P_7 = 200\text{ kPa}$.

$$\text{Trifásico: } \dot{V}_{\text{biogás}} = 0,3695 * \dot{W}_{\text{GER}} + 3,6079 \text{ Nm}^3/\text{h} \quad (6)$$

$$\text{Monofásico: } \dot{V}_{\text{biogás}} = 0,3953 * \dot{W}_{\text{GER}} + 3,6929 \text{ Nm}^3/\text{h} \quad (7)$$

Onde $\dot{W}_{\text{GER}}$ é a potência gerada, que é igual a carga aplicada ao gerador.

As hipóteses consideradas são funcionamento com 20% de excesso de ar ($\lambda = 1,2$), temperatura da água de entrada no motor $T_6 = 76^\circ\text{C}$, temperatura da água de saída do motor $T_7 = 84^\circ\text{C}$, temperatura dos gases de exaustão após a recuperação de calor $T_3 = 120^\circ\text{C}$, queda de pressão no líquido de arrefecimento no motor $\Delta P_{\text{motor}} = 50\text{ kPa}$ e calor

dissipado pelo líquido de arrefecimento do motor ($\dot{Q}_{arref}$) igual a 30% da energia fornecida ao motor.

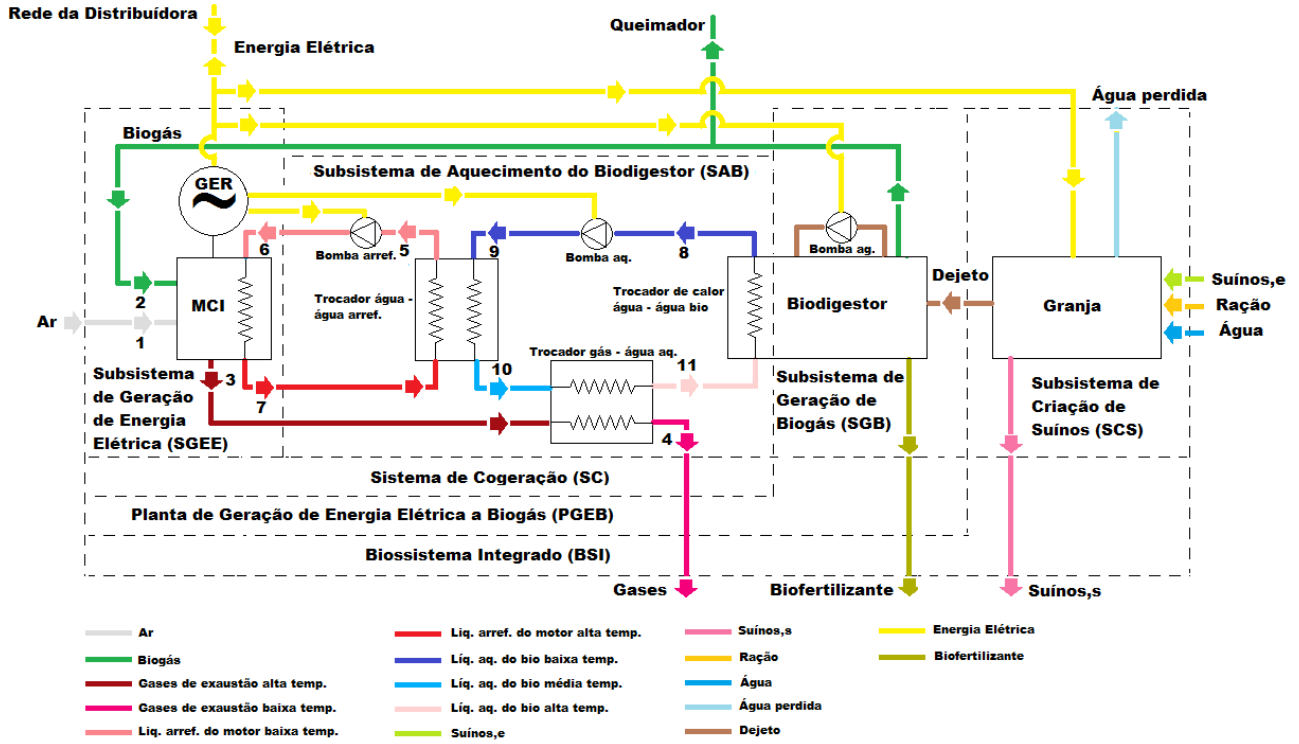


Figura 4 - Representação esquemática do BSI completo dividido em subsistemas e o ciclo de cogeração

A modelagem do motor possui as seguintes equações:

$$\dot{m}_2 = (\dot{V}_{biogás} * \rho_{biogás})/3600 \quad (8)$$

$$\dot{m}_1 = (\dot{m}_2 * \lambda)/f_s \quad (9)$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (10)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{Q}_{arref}/(c_{p,arref} * \Delta T_{motor}) \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{gex} = \dot{m}_3 * h_3 \quad (12)$$

Onde $\dot{m}_2$ é a vazão mássica de biogás, $\rho_{biogás}$ é a massa específica do biogás, $\dot{m}_1$ é a vazão mássica de ar, $\dot{m}_3$ é a vazão mássica dos gases de exaustão, f_s é a relação combustível/ar estequiométrica, $\dot{m}_6$, $c_{p,arref}$, ΔT_{motor} são a vazão mássica, calor específico médio e diferença de temperatura do líquido de arrefecimento, respectivamente, $\dot{Q}_{gex}$ é o calor disponível nos gases de exaustão e h_3 é a entalpia dos gases de exaustão em relação a temperatura de referência (25°C). O gerador é modelado pela Eq. (13).

$$\dot{W}_{SGEE} = \dot{W}_{GER} - (\dot{W}_{SAB} + \dot{W}_{SGB}) \quad (13)$$

Onde $\dot{W}_{SGEE}$ é a energia elétrica líquida produzida, $\dot{W}_{SAB}$ é a energia utilizada no SAB e $\dot{W}_{SGB}$ é a energia utilizada pelo SGB.

O desempenho do grupo gerador é dado pela Eq. (14) e o desempenho do SGEE pela Eq. (15).

$$\eta_{GRUPO} = \dot{W}_{GER}/\dot{V}_{biogás} * PCI \quad (14)$$

$$\eta_{SGEE} = \dot{W}_{SGEE}/\dot{E}_{biogás,SGEE} \quad (15)$$

Onde $\dot{E}_{biogás,SGEE}$ é a energia do biogás que entrou no SGEE.

3.2. Análise termodinâmica do SAB

A análise termodinâmica do SAB tem como principais hipóteses $T_{11} = 44^\circ\text{C}$ e $T_8 = 38,45^\circ\text{C}$.

Os trocadores de calor foram dimensionados utilizando o método da média logarítmica das diferenças de temperatura devido as vazões e temperaturas serem conhecidas.

As bombas foram dimensionadas considerando as vazões, perdas de carga e o seu rendimento.

O desempenho do SAB (COP_{SAB}) é dado pela Eq. (16), onde $\dot{E}_{biogás_com}$ e $\dot{E}_{biogás_sem}$ são a energia do biogás com e sem o SAB, respectivamente, η_{GRUPO_com} e η_{GRUPO_sem} são a eficiência do motogerador com e sem o SAB e $\dot{W}_{SAB}$ é a EE consumida pelo SAB.

$$COP_{SAB} = \frac{\dot{E}_{biogás_com} * \eta_{GRUPO_com} - \dot{E}_{biogás_sem} * \eta_{GRUPO_sem}}{\dot{W}_{SAB}} \quad (16)$$

3.3. Análise termodinâmica do SGB

Através do balanço de energia sensível no biodigestor é possível obter equações para o cálculo da temperatura do substrato e do biogás em função do tempo, permitindo desta forma calcular a produção instantânea de biogás e EE (Casarin, 2016). Esse balanço considera o calor proveniente do SAB, o calor perdido para o dejetos que entra, o calor perdido para o solo, o calor perdido do substrato para o biogás e o calor perdido do biogás para o ambiente conforme ilustra a Figura 5.

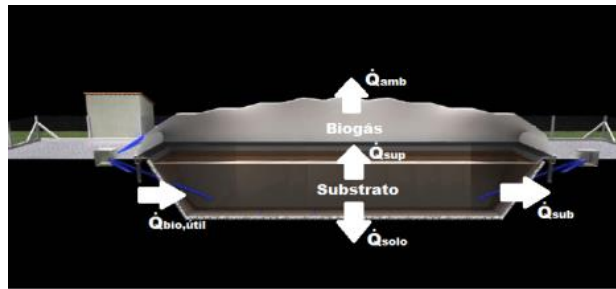


Figura 5 - Representação esquemática das trocas térmicas no biodigestor

3.4. Análise termodinâmica do SCS

O desempenho do SCS é dado pela Eq. 17, onde η_{SCS} é a eficiência do sistema de criação de suínos, $\dot{E}_{suínos,s}$ é a energia dos suínos que saem da granja, $\dot{E}_{suínos,e}$ é a energia dos suínos que entram, $\dot{E}_{ração}$ é a energia da ração e $\dot{W}_{SCS}$ é a EE consumida pelo SCS.

$$\eta_{SCS} = \frac{\dot{E}_{suínos,s}}{\dot{E}_{suínos,e} + \dot{E}_{ração} + \dot{W}_{SCS}} \quad (17)$$

3.5. Análise termodinâmica do BSI

O desempenho do BSI é dado pelas Eq. (18), (19) e (20) que consideram a eficiência quando a saída considerada é, além dos suínos, o biogás, a EE bruta e a EE líquida, respectivamente.

$$\eta_{BSI,Biogás} = \frac{\dot{E}_{suínos,s} + \dot{E}_{biogás}}{\dot{E}_{suínos,e} + \dot{E}_{ração} + \dot{W}_{SCS} + \dot{W}_{SGB} + \dot{W}_{SAB}} \quad (18)$$

$$\eta_{BSI,EE} = \frac{\dot{E}_{suínos,s} + \dot{W}_{GER}}{\dot{E}_{suínos,e} + \dot{E}_{ração} + \dot{W}_{SCS} + \dot{W}_{SGB} + \dot{W}_{SAB}} \quad (19)$$

$$\eta_{BSI,EEL} = \frac{\dot{E}_{suínos,s} + \dot{W}_{SGEE}}{\dot{E}_{suínos,e} + \dot{E}_{ração} + \dot{W}_{SCS} + \dot{W}_{SGB} + \dot{W}_{SAB}} \quad (20)$$

Foram calculados também índices de recuperação da energia da ração na forma de biogás ($IRR_{biogás}$), EE bruta (IRR_{EE}), EE líquida (IRR_{EEL}), e índice de desempenho do BSI (ID_{BSI}) que compara a eficiência da granja com e sem a PGEB.

3.6. Simulação dinâmica do BSI

A simulação dinâmica do BSI foi feita no software Matlab Simulink. As variáveis de entrada são a temperatura ambiente, a irradiação solar total, a velocidade do vento e a curva de carga da propriedade.

A simulação possui o período de um ano com resolução de 1 hora e refere-se aos dados do ano de 2014 na cidade de Erechim – RS. O fluxograma da simulação é representado pela Figura 6.

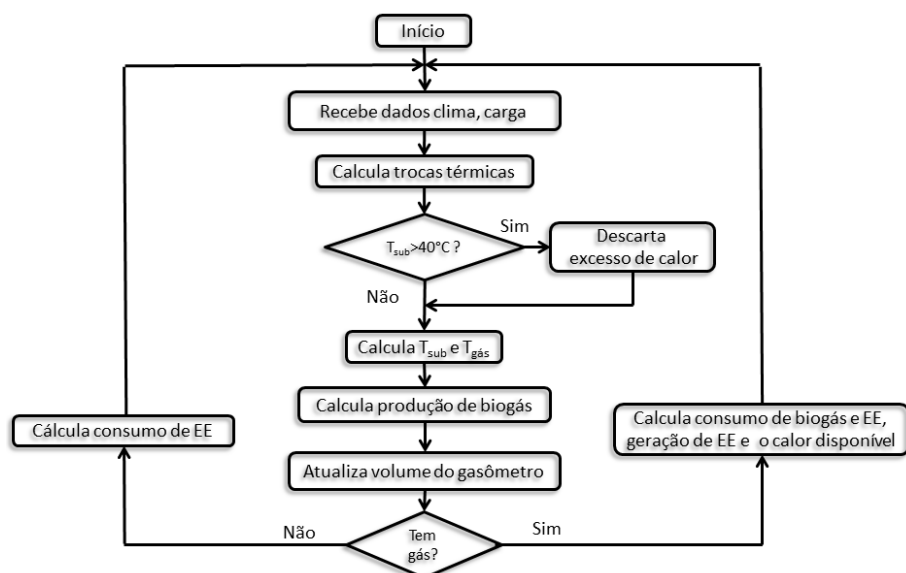


Figura 6 - Fluxograma da simulação dinâmica dos BSIs

4. ANÁLISE ECONÔMICA DAS GRANJAS REPRESENTATIVAS

Na análise econômica foram levantados os investimentos e os custos de O&M durante 15 anos para os 8 BSIs. O investimento foi desde R\$ 142.000,00 para o BSI1 até R\$ 244.000,00 para o BSI8. Os custos de O&M anuais foram em média de 6% sobre o investimento, sendo o óleo lubrificante responsável por 40% deste valor.

A receita das PGEs isoladas é igual ao valor da energia evitada. Nas PGEs conectadas a receita possui três parcelas, uma referente a energia evitada, outra referente aos créditos de energia elétrica gerados e uma parcela negativa referente a despesa com os créditos já recuperados. O valor dos créditos de EE dependem da incidência de encargos sobre o preço da EE conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Valor do crédito de EE conforme a incidência de diferentes encargos

Granja	Valor "Cheio"	Valor dos créditos de EE (R\$/kWh)						
		Quando incide sobre os créditos:						
		ICMS	PIS/COFINS	Adicional	ICMS + PIS/COFINS	ICMS + Adicional	PIS/COFINS + Adicional	Todos os três
UCT	0,440	0,371	0,424	0,370	0,356	0,301	0,354	0,285
UPL	0,450	0,367	0,434	0,378	0,351	0,295	0,362	0,279

A receita líquida é dada pela receita bruta menos os custos de O&M.

A taxa mínima de atratividade considerada foi de 5,5% a.a..

Na análise econômica foram calculados o valor presente líquido (VPL), custo da EE gerada e o preço mínimo da EE e investimento máximo para viabilizar os BSIs.

5. RESULTADOS

5.1. Análise técnica

Tabela 4 – Resultados do desempenho do SGEE

Desempenho do SGEE								
Granja	UCT				UPL			
Indicador	BSI1	BSI2	BSI3	BSI4	BSI5	BSI6	BSI7	BSI8
Fator de capacidade	8,80%	14,10%	26,03%	34,01%	31,60%	39,82%	69,11%	88,80%
η_{GRUPO}	0,11	0,13	0,19	0,19	0,17	0,19	0,22	0,22
η_{SGEE}	-0,03	0,00	0,06	0,06	0,09	0,09	0,14	0,14

O baixo fator de capacidade nos BSI conectados da granja UCT observados na Tabela 4 é devido a potência inadequada do motogerador (alto consumo de biogás), a limitação da potência injetada em 8,8 kW e a baixa disponibilidade de biogás. Nos sistemas isolados é devido ao funcionamento em carga parcial e a baixa disponibilidade de biogás.

Nos BSI isolados da granja UPL (BSI5 e 6) o baixo fator de capacidade é devido a operação em carga parcial, pois nestes BSIs sobrou biogás.

O maior fator de capacidade foi obtido na planta conectada e aquecida da granja UPL (BSI8) devido ao funcionamento na máxima carga possível e a maior disponibilidade de biogás.

Nos BSI1 e 2 ele foi negativo e nulo. Isto significa que o consumo das cargas auxiliares superou a produção de energia elétrica e o BSI utilizou energia da rede para alimentá-las.

Destaca-se na Tabela 5 o aumento médio de 29,50% na produção de biogás proporcionado pelo SAB.

A partir dos valores obtidos para o desempenho do SAB, é possível constatar que ele aumentou o trabalho elétrico líquido produzido em todos os BSI.

Tabela 5 - Resultados do desempenho do SAB

Desempenho do SAB				
Granja	UCT		UPL	
Sistema	BSI2	BSI4	BSI6	BSI8
% aumento no biogás	30,54%	30,50%	28,51%	28,47%
% calor excedente	35,00%	34,00%	33,00%	43,00%
COP_{SAB}	1,50	1,87	2,37	2,42

Tabela 6 - Resultados do desempenho dos BSIs

Desempenho do BSI								
Granja	UCT				UPL			
Indicador	BSI1	BSI2	BSI3	BSI4	BSI5	BSI6	BSI7	BSI8
η_{SCS}	30,37%	30,37%	30,37%	30,37%	27,01%	27,01%	27,01%	27,01%
$\eta_{BSI,biogás}$	38,57%	41,03%	38,57%	41,07%	45,17%	50,19%	45,17%	50,22%
$\eta_{BSI,W_{GER}}$	30,95%	31,37%	31,65%	32,06%	29,73%	30,38%	30,70%	31,72%
$\eta_{BSI,W_{SGEE}}$	29,80%	29,87%	30,50%	30,65%	28,28%	28,40%	29,25%	29,80%
$IRR_{biogás}$	9,26%	12,09%	9,26%	12,08%	19,55%	25,12%	19,55%	25,11%
IRR_{EE}	1,00%	1,59%	1,76%	2,30%	3,28%	4,13%	4,30%	5,53%
IRR_{EEL}	-0,24%	-0,04%	0,52%	0,77%	1,75%	2,04%	2,78%	3,50%
ID_{BSI}	-1,88%	-1,64%	0,43%	0,92%	4,71%	5,14%	8,31%	10,31%

Tomando por base a eficiência do SCS (η_{SCS}) que não muda com a instalação da PGEB, podemos observar na Tabela 6 a melhora na eficiência da granja na maioria dos BSIs. A maior melhora é obtida quando se considera o biogás como saída. Quando se considera a EE e a EE líquida esses valores caem, chegando a ser negativos nos BSI1 e 2 devido a baixa eficiência de conversão do biogás em EE.

Ao se observar os índices de recuperação da energia da ração na forma de biogás, EE e EE líquida, pode-se constatar a mesma tendência descrita para as eficiências.

5.1.1 BSI Ótimo

Para evidenciar a influência da limitação da potência à carga instalada pela RN 482 e da rede monofásica, simulou-se uma planta ótima, conectada, aquecida, com rede trifásica e sem o limite de potência integrada a granja UPL denominada BSIO.

Tabela 7 – Comparação entre o desempenho do SGEE do BSI8 e do BSIO

Granja	Sistema	Fator de capacidade	η_{GRUPO}	η_{SGEE}
UPL	BSI8	88,80%	0,22	0,14
	BSIO	68,05%	0,28	0,21

Pode-se perceber na Tabela 7 o significativo aumento na eficiência do grupo gerador e do SGEE resultante da utilização do motogerador com ligação trifásica e na potência máxima (20 kW).

Tabela 8 - Comparação entre o desempenho do BSI8 e do BSIO

Granja	Sistema	η_{SCS}	$\eta_{BSI,biogás}$	$\eta_{BSI,EE}$	$\eta_{BSI,EEL}$	$IRR_{biogás}$	IRR_{EE}	IRR_{EEL}	ID_{BSI}
UPL	BSI8	27,01%	50,22%	31,72%	29,80%	25,11%	5,53%	3,50%	10,31%
	BSIO	27,01%	50,26%	33,20%	31,39%	25,10%	7,07%	5,15%	16,22%

Os índices de desempenho relacionados com a EE e a EE líquida tiveram aumentos consideráveis devido a maior eficiência na conversão do biogás em EE no BSIO, como pode-se observar na Tabela 8.

A maior eficiência do grupo gerador, aliada a maior carga resultaram no aumento de 27,72% da EE total gerada e 47,22% na EE líquida.

5.2. Análise econômica

Tabela 9 - Resultados da análise econômica para os BSIs isolados

Análise econômica dos BSI isolados				
Granja	UCT		UPL	
Indicador	BSI1	BSI2	BSI5	BSI6
VPL (R\$)	-237.297	-267.776	-168.251	-180.725
Preço mínimo da EE (R\$/kWh)	NP	NP	1,02	0,98
Investimento Máximo (R\$)	NP	NP	70.737	83.542

Pode-se perceber da Tabela 9 que nenhum dos BSI isolados obteve viabilidade econômica. Os BSIs da granja UCT não possuem (NP) preço mínimo da EE e investimento máximo, pois eles aumentaram o consumo de energia da rede.

Tabela 10 - VPL dos BSIs conectados e do BSIO

VPL dos BSIs conectados (R\$)					
Granja	UCT		UPL		Ótima
Sistema	BSI3	BSI4	BSI7	BSI8	BSIO
ICMS	-233.437	-256.408	-154.603	-142.988	- 51.979
Sem ICMS	-227.471	-244.513	-129.137	-117.566	6.911

Tabela 11 - Preço mínimo da EE e investimento máximo para viabilizar o BSI

Preço mínimo da EE nos BSI conectados (R\$/kWh)						Investimento máximo nos BSI conectados (R\$)					
Granja	UCT		UPL		Ótima	Granja	UCT		UPL		
Sistema	BSI3	BSI4	BSI7	BSI8	BSIO	Sistema	BSI3	BSI4	BSI7	BSI8	BSIO
ICMS	4,90	3,25	0,83	0,72	0,52	ICMS	18.335	30.249	120.999	152.252	210.660
Sem ICMS	3,29	2,50	0,73	0,65	0,44	Sem ICMS	27.265	39.188	137.813	168.642	248.433

Tabela 12 - Custo da EE gerada nos BSIs

Custo da EE gerada									
Granja	UCT				UPL				Ótima
Indicador	BSI1	BSI2	BSI3	BSI4	BSI5	BSI6	BSI7	BSI8	BSIO
Custo do kWh bruto (R\$)	1,13	0,86	0,72	0,63	0,45	0,40	0,37	0,32	0,25
Custo do kWh líquido (R\$)	NP	NP	2,45	1,88	0,84	0,80	0,57	0,51	0,35

Pode-se perceber das Tabelas 10, 11 e 12 a melhora dos indicadores econômicos dos BSI conectados a medida que aumenta o consumo de EE e a produção de biogás. Somente o BSIO sem a incidência de ICMS possui viabilidade econômica devido ao aumento da carga e da eficiência de conversão do biogás em EE na ausência das restrições da rede monofásica e da potência máxima injetada. Para ser economicamente viável, estimou-se que um BSI deva possuir um consumo de 8000 kWh/mês o que necessita 2000 suínos em terminação ou 420 matrizes.

6. CONCLUSÃO

Através da realização deste trabalho pôde-se constatar o tamanho reduzido das propriedades, carência de equipamentos adequados, produção de EE maior que o consumo na maioria dos BSIs e viabilidade técnica do sistema de cogeração proposto proporcionando aumento e estabilidade na produção de biogás.

O SCEE melhora a viabilidade econômica, pois permite armazenar EE. A conexão aumenta a carga e a eficiência da conversão proporcionando dessa forma a máxima produção de EE possível resultando em melhores indicadores técnicos e econômicos.

Os principais fatores limitantes são: rede elétrica monofásica, limitação da potência injetada pela RN 482, tamanho inadequado dos motogeradores, alto custo do sistema de conexão e a incidência de encargos sobre os créditos de EE.

A RN 482 mostrou-se inadequada para PGEs a partir do biogás de dejetos suínos.

A produção de biogás melhora a eficiência energética da criação de suínos, porém a baixa eficiência da conversão do biogás em EE líquida reduz consideravelmente este valor, chegando em alguns casos a piorá-la.

De modo geral a instalação da PGEB aumenta a eficiência energética da criação de suínos.
A instalação de PGEBs pode conduzir a suinocultura à sustentabilidade ambiental, porém requer incentivos.

7. REFERÊNCIAS

- AXAOPOULOS, P. et al. **Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester**. Solar Energy, v.70, n.2, p.155-164, 2001.
- CASARIN, M. A. **Microgeração Distribuída de Energia Elétrica a Partir do Biogás de Dejetos Suínos: uma contribuição para a sustentabilidade na suinocultura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- CHEN, Y. R.; HASHIMOTO, A. G. **Kinetics of Methane Fermentation**. In: Proceedings of Symposium on Biotechnology in Energy Production and Conservation, 1978.
- FATMA – Fundação do Meio Ambiente. **Instrução Normativa Nº 11, suinocultura**. p. 37. 2014. Disponível em <<http://www.fatma.sc.gov.br/conteudo/instrucoes-normativas>>. Acessado em 20 mar. 2015.
- GUSMÃO, M.M.F.C.C. **Produção de biogás em diferentes sistemas de criação de suínos em Santa Catarina**. 2008. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- NISHIMURA, R. **Análise de balanço energético de sistema de produção de biogás em granja de suínos: Implementação de aplicativo computacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande, 2009.
- OLIVEIRA, P. A. V.; HIGARASHI, M. M. **Geração e utilização do biogás em unidades de produção de suínos**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2006, 41p. Programa Nacional do Meio Ambiente – PNMA II; Projeto de Controle da Degradação Ambiental Decorrente da Suinocultura em Santa Catarina.
- OLIVEIRA, P. A. V. de. **Projeto de biodigestores e estimativa de produção de biogás em sistema de produção**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2005. 8p. (Embrapa Suínos e Aves. Comunicado Técnico, 417).
- TAVARES, J. M. R. **Consumo de água e produção de dejetos na suinocultura**. 2012. 230p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

8. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

MICRO DISTRIBUTED GENERATION OF ELECTRIC POWER FROM SWINE WASTE BIOGAS: A CONTRIBUTION FOR SUSTAINABILITY ON PIG FARMING

Marco Antônio Casarin, eng.aut.mac@gmail.com.br¹
Edson Bazzo, ebazzo@emc.ufsc.br¹

¹Universidade Federal de Santa Catarina, LabCET – EMC, Campus Universitário Florianópolis, CEP.: 88040-900

Abstract. *The energy recovery in pig breeding has been reduced over time. Moreover, the intensive rearing of now called swine result in unsustainable risk of environmental pollution. An alternative to both problems is to install plants of electric energy (EE) from biogás (PGEB) and formation of integrated biosystems (BSI). Recently, by means of normative resolution (RN) 482, the National Electric Energy Agency (ANEEL) created the electric energy compensation system (SCEE) that allows PGEBs to connect to the grid and store EE. In order to assess the technical and economic viability of BSIs, was studied a population of 619 swine farmers in the far west of Santa Catarina state. Considering the possibility of cogeneration, it has been proposed 4 PGEBs layouts: isolated, connected, heated and unheated. To consider the effect of weather conditions and variable loads in the production of biogas and EE, was developed a dynamic simulator of the BSI. Through the simulator was possible to obtain the plant performance over a full year and evaluate the influence of climate, heating and SCEE in the biogas and EE production. It might be noted the lack of gensets with adequate capacity for connected plants, inadequacy of RN 482 to the projects and the reduced average size of farms. In addition, factors such as the limitation of installed capacity and single phase power grid in the population reduces the biogas conversion efficiency into EE, which undermines the economic viability. The biogas production was 30% higher in heated plants. On average, biogas production recovers 16% of the energy contained in the ration and improves farm efficiency by 50%. The low conversion efficiency leads these values to fall to 3 and 8,6%, respectively. Despite of the environmental and energetic improvements, the proposed BSIs proved economically unviable, achieving better indicators as the consumption of EE and biogas production increases, becoming viable from 8000 kWh/month, what need 2000 hogs or 420 sows. Only 1.5% of the studied farms meet this criteria.*

Keywords: Microgeneration, Biogas, Micro-CHP, Cogeneration, Net metering.