

Marco Antônio Casarin

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

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do
Grau de Mestre em Eng. Mecânica.
Orientador: Prof. Edson Bazzo, Dr.
Eng.

Florianópolis
2016

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Casarin, Marco Antônio

Microgeração distribuída de energia elétrica a partir do biogás de dejetos suínos: Uma contribuição para a sustentabilidade da suinocultura / Marco Antônio Casarin ; orientador, Edson Bazzo - Florianópolis, SC, 2016.

257 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Microgeração distribuída. 3. Cogeração à biogás. 4. Geração termelétrica. 5. Sistema de compensação de energia elétrica. I. Bazzo, Edson. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

Marco Antônio Casarin

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

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 25 de janeiro de 2016.

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Prof. Edson Bazzo, Dr. Eng.
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Edson Bazzo, Dr. Eng. (Presidente)
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Prof. Amir Antônio de Oliveira Jr, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina (USFC)

Prof. José Alexandre Matelli, Dr Eng..
Universidade Estadual Paulista (ENESP)

Prof. Paulo Belli Filho, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

Este trabalho é dedicado à
minha família e a todos que
contribuíram para sua realização.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que me deram a oportunidade e o incentivo de estudar, e sempre me apoiaram nas minhas escolhas.

Ao meu orientador, Professor Edson Bazzo, por acreditar em mim, no meu projeto e pela paciência para lidar com os diversos percalços ao longo deste período.

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PosMec) e ao Laboratório de Combustão e Engenharia de Sistemas Térmicos (LabCET) por tornar possível a realização deste trabalho.

A Cooperativa A1, em especial ao seu Presidente Elio Casarin e ao Gerente de suinocultura Paulo Costacurta, pelo fornecimento das informações essenciais para a realização deste trabalho.

A CAPES pela bolsa de estudos concedida.

A FAPESC e ao programa Sinapse da Inovação por acreditaram no projeto.

Ao projeto FINEP-BIOGÁS pelo apoio técnico e financeiro.

A PETROBRAS e ao projeto TSGA pela oportunidade da instalação do motogerador em Braço do Norte.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram de alguma maneira para a realização deste trabalho.

“A crise é a melhor benção que pode ocorrer com as pessoas ou países, porque a crise traz progressos. A criatividade nasce da angústia, como o dia nasce da noite escura. É na crise que nascem as invenções, os descobrimentos e as grandes estratégias.”

Abert Einstein

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 resolução normativa 482, a ANEEL criou o sistema de compensação de energia elétrica (SCEE) que permite a conexão das PGEb à rede e o armazenamento de energia elétrica. Com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica e econômica dos BSIs, foi estudada uma população de 619 suinocultores do Extremo Oeste Catarinense. Considerando a possibilidade de cogeração, 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 precária rede elétrica 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, Geração termelétrica, Cogeração, Sistema de compensação de energia elétrica.

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 PGEb 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 PGEb 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 in EE 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, Thermoelectric generation, Cogeneration, Net metering.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas da digestão anaeróbia.....	46
Figura 2 - Biodigestor modelo indiano	52
Figura 3 - Biodigestor modelo chinês	52
Figura 4 - Biodigestor modelo mistura completa.....	53
Figura 5 - Biodigestor modelo canadense	53
Figura 6 - Diferentes sistemas de aquecimento em biodigestores.....	56
Figura 7 - Incrustação provocada por compostos de sílica	64
Figura 8 - Distribuição de calor em vila bioenergética na Alemanha	74
Figura 9 - Esquema de cogeração para aquecimento do biodigestor	78
Figura 10 - Nota de produtor da venda do novo produto rural: A energia elétrica.	80
Figura 11 - Sistema de compensação de energia elétrica	84
Figura 12 - Compensação do crédito de energia elétrica ativa excedente	85
Figura 13 - Número de conexões acumulado até maio 2015	87
Figura 14 - Número de conexões por fonte.....	87
Figura 15 - Potência total instalada.....	88
Figura 16 - Distribuição em faixas de potências das conexões	88
Figura 17 - Área de atuação da Cooper A1	93
Figura 18 - Localização do plantel da Cooper A1	95
Figura 19 - Distribuição do número de granjas X número de animais em terminação por granja	95
Figura 20 - Distribuição do número de granjas X número de matrizes por granja	96
Figura 21 - Número médio de suínos por propriedade rural	96
Figura 22 - Distribuição das granjas quanto ao tipo da rede elétrica	97
Figura 23 - Distribuição das granjas em faixas de consumo de energia elétrica	100
Figura 24 - Distribuição das granjas em faixas de potência líquida para 8h de funcionamento	103
Figura 25- Distribuição das granjas em faixas de potência líquida para 24h de funcionamento	103
Figura 26 - Sistema de tratamento atual: Esterqueira	105
Figura 27 - Densidade de suínos em parte da região Sul	106
Figura 28 - Sensibilidade do modelo ao TRH e a temperatura para uma granja UCT	109
Figura 29 - Sensibilidade do modelo a concentração de SV	110
Figura 30 - Distribuição das granjas quanto ao tamanho do biodigestor	111
Figura 31 - Distribuição das granjas quanto ao tamanho do tanque de biofertilizante.....	112
Figura 32 - Distribuição das granjas nas potências estimadas	113
Figura 33 - Distribuição das granjas em faixas de potencial de geração de EE	115
Figura 34 - Distribuição das granjas nas potências disponíveis no mercado ...	130

Figura 35 - Curva de carga da granja UCT.....	135
Figura 36 - Curva de carga da granja UPL	135
Figura 37 - PGEB1: Isolada da rede e sem aquecimento.....	137
Figura 38 - Modelo do biodigestor utilizado	138
Figura 39 - Modelo da bomba de agitação utilizada.....	139
Figura 40 - Modelo de tanque de biofertilizante.....	140
Figura 41 - Motogerador utilizado nas PGEBS.....	141
Figura 42 - PGEB2: Isolada da rede e com aquecimento	142
Figura 43 – Tipo de trocador de calor água-água arrefecimento utilizado	143
Figura 44 - Modelo da bomba do circuito de arrefecimento.....	144
Figura 45 - Tipo de trocador de calor gás-água utilizado	145
Figura 46 - Tipo do trocador de calor água-água biodigestor.....	146
Figura 47 - Modelo da bomba do circuito de aquecimento	148
Figura 48 - PGEB3: Conectada a rede e sem aquecimento	149
Figura 49 - Painel de conexão com a rede.....	150
Figura 50 - PGEB4: Conectada a rede e com aquecimento	151
Figura 51 - Representação esquemática do BSI completo dividido em subsistemas e o ciclo de cogeração.....	153
Figura 52- Representação esquemática das trocas térmicas no biodigestor.....	165
Figura 53 - Forma das isotermas e do fluxo de calor sem isolante térmico	168
Figura 54 - Fluxo de calor através do solo com isolante finito.....	168
Figura 55 - Blocos principais da simulação.....	176
Figura 56 – Bloco Variáveis de entrada.....	176
Figura 57 - Bloco BSI.....	178
Figura 58 - Bloco SCS.....	179
Figura 59 - Bloco SGB	180
Figura 60 - Bloco Cálculo da temperatura do substrato e do biogás.....	181
Figura 61 - Bloco Cálculo da produção de biogás	182
Figura 62 - Bloco Gasômetro	183
Figura 63 - Bloco SGEE.....	184
Figura 64 - Bloco SAB	185
Figura 65 - Bloco Medidor de energia.....	186
Figura 66 - Dados climáticos utilizados	187
Figura 67 - Fluxograma da simulação dinâmica do BSIs	187
Figura 68 - Influência das condições climáticas na produção de biogás	202
Figura 69 - Produção de biogás com e sem aquecimento	203
Figura 70 - Operação do motor com e sem aquecimento nas plantas isoladas da granja UPL	204
Figura 71 - Operação do motor com e sem aquecimento nas plantas isoladas da granja UCT.....	204
Figura 72 - Temperatura do substrato e produção de biogás com e sem isolante térmico.....	205
Figura 73 - Operação do motor em PGEB isolada e não aquecida para diferentes volumes de armazenamento.....	206
Figura 74 - Produção de EE em PGEB isolada X conectada.....	207

Figura 75 – Atuação do controlador de temperatura.....	216
Figura 76- Diagrama orientativo para conexão de geradores síncronos	251

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção de dejetos por categorias dos suínos	43
Tabela 2 - Concentração de ST e SV em propriedades do Meio Oeste Catarinense	44
Tabela 3 - Níveis de temperatura utilizados na digestão anaeróbia	47
Tabela 4 – Equivalência de 1 Nm ³ de biogás com outros energéticos	58
Tabela 5 - Consumo de biogás de acordo com sua utilização.....	59
Tabela 6 - Balanço termodinâmico no totem de 15 kW.....	76
Tabela 7 – Balanço energético em microgerador de 13,2 kW	77
Tabela 8 - Nível de tensão segundo a potência instalada.....	82
Tabela 9 - Requisitos de proteção para acesso de geradores síncronos a rede da Celesc	83
Tabela 10 - Características do plantel de suínos da Cooper A1	94
Tabela 11 - Consumo de energia elétrica na microregião Extremo Oeste Catarinense	98
Tabela 12 - Consumo e preço da EE na população estudada.....	99
Tabela 13 - Filtros para H ₂ S encontrados no mercado.....	123
Tabela 14 - Dados das granjas representativas	131
Tabela 15 - Dimensões dos biodigestores utilizados	138
Tabela 16 - Dados técnicos das bombas de agitação utilizadas	139
Tabela 17 - Dimensões dos tanques de biofertilizante utilizados	140
Tabela 18 - Dados técnicos do motogerador utilizado.....	142
Tabela 19 - Parâmetros de projeto do trocador de calor água-água arrefecimento	144
Tabela 20 - Dados técnicos da bomba do circuito de arrefecimento	145
Tabela 21 - Parâmetros de projeto do trocador de calor gás-água	146
Tabela 22 - Parâmetros de projeto dos trocadores de calor água-água biodigestor	147
Tabela 23 - Dados técnicos da bomba do circuito de aquecimento	148
Tabela 24 - Levantamento dos investimentos nos BSIs da granja UCT	190
Tabela 25 - Levantamentos dos investimentos nos BSIs da granja UPL.....	190
Tabela 26 - Peças, serviços e custos na O&M das plantas.....	192
Tabela 27 - Custos de O&M dos BSIs da granja UCT	192
Tabela 28 - Custos de O&M dos BSIs na granja UPL.....	192
Tabela 29 - Composição do preço da EE na população.....	194
Tabela 30 - Valor do CEE conforme a incidência de ICMS, PIS/COFINS e bandeira tarifária.....	195
Tabela 31 - Estados termodinâmicos do sistema de cogeração	208
Tabela 32 – Resultados da análise termodinâmica do SCS	209
Tabela 33 - Resultados dos balanços energéticos no SGB dos BSIs	210
Tabela 34 - Resultados do desempenho do SGB	211
Tabela 35 - Resultados do balanço energético no SGEE.....	212
Tabela 36 - Resultados do desempenho do SGEE.....	212
Tabela 37 - Resultados dos balanços energéticos no SAB	214

Tabela 38 - Resultados do desempenho do SAB	215
Tabela 39 - Resultados dos balanços energéticos nos BSIs	217
Tabela 40 - Resultados do desempenho dos BSIs	218
Tabela 41 - Resultados da produção e consumo de biogás nos BSIs	219
Tabela 42 - Resultados da produção e consumo de EE nos BSIs	221
Tabela 43 - Comparação entre o desempenho do SGEE do BSI8 e do BSIO	222
Tabela 44 - Comparação entre o desempenho do BSI8 e do BSIO	222
Tabela 45 - Comparação dos resultados de geração e consumo de EE entre o BSI8 e o BSIO	223
Tabela 46 - Resultados da análise econômica para os BSI isolados	224
Tabela 47 - VPL dos BSIs conectados e do BSIO	225
Tabela 48 - TIR dos BSIs conectados e do BSIO	226
Tabela 49 - <i>Payback</i> dos BSIs conectados e do BSIO	227
Tabela 50 - Preço mínimo da EE que viabiliza os BSIs conectados e o BSIO	228
Tabela 51 - Investimento máximo nos BSI conectados e no BSIO para a viabilidade econômica	228
Tabela 52 - Custo da EE gerada nos BSIs	229
Tabela 53- Parametrização das proteções para conexão com inversores de frequência	250
Tabela 54 - Limites de distorção harmônica da corrente	250
Tabela 55 - Resposta às condições anormais de Tensão	251
Tabela 56 - Resultado da reação de combustão estequiométrica	257
Tabela 57 - Resultado da reação de combustão com 20% de excesso de ar	258
Tabela 58 – Características dos motogeradores encontrados no mercado nacional.....	259

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AVR	Automatic Voltage Regulator
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BSI	Biossistema Integrado
cc	Cilindrada cúbica
CEE	Crédito de energia elétrica
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina
Cfa	Clima subtropical com verão quente
CHP	Combined Heat and Power; Cogedor
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CONFAZ	Conselho Nacional de Política Fazendária
COP	Coefficiente de Performance
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
cv	Cavalo vapor
EE	Energia Elétrica
ET	Energia térmica
ETE	Estação de tratamento de esgoto
FATMA	Fundação do Meio-ambiente de Santa Catarina
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
GD	Geração Distribuída
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GPRS	General Packet Radio Service
ICMS	Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
kWel	Quilowatt elétrico
kWt	Quilowatt térmico
MCI	Motor de Combustão Interna
MCT	Micro Central Termelétrica
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MG	Minas Gerais
MT	Microturbina
NO _x	Óxidos de nitrogênio
O&M	Operação e Manutenção
ORC	Ciclo orgânico de Rankine
PCH	Pequena central hidrelétrica
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEAD	Poliétileno de alta densidade
PEBDL	Poliétileno de baixa densidade linear
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento
PGEB	Planta de Geração de Energia Elétrica a Biogás
PIS	Programa de Integração Social
ppb	Partes por bilhão
ppm	Partes por milhão
PVC	Poli Cloreto de Vinila
PR	Paraná
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
RN	Resolução Normativa
RPM	Rotações por minuto
RS	Rio Grande do Sul
SAB	Subsistema de Aquecimento do Biodigestor
SC	Santa Catarina; Sistema de Cogeração
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SCS	Subsistema de Criação de Suínos
SGB	Subsistema de Geração de Biogás
SGEE	Subsistema de Geração de Energia Elétrica
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica

UC	Unidade Consumidora
UCT	Unidade de Crescimento e Terminação
UPL	Unidade de Produção de Leitões

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{bio}	Volume do biodigestor (m^3)
$V_{dejetos}$	Volume de dejetos produzido por animal por dia (L/dia)
TRH	Tempo de retenção Hidráulica (dias)
SV	Sólidos Voláteis (kg/m^3)
B_o	Taxa máxima de produção de metano (Nm^3 de CH_4/kg de SV)
γ_v	Taxa de produção de metano (Nm^3 de CH_4/m^3 do biodigestor.dia)
S_o	Concentração de sólidos voláteis no dejetos (kg/m^3)
K	Constante cinética (adimensional)
μ_m	Taxa de crescimento máximo específico dos microrganismos (dia^{-1})
T_{sub}	Temperatura do substrato no interior do biodigestor ($^{\circ}C$)
$\dot{V}_{gás}$	Produção de biogás (Nm^3/h)
PCI	Poder calorífico inferior (kWh/Nm^3)
P_{el}	Potencia elétrica equivalente ao biogás disponível (kW)
FD	Fator de disponibilidade (%)
D	Disponibilidade em horas (h)
$\dot{V}_{bio/cab}$	Produção diária de biogás por animal ($Nm^3/animal.dia$)
$PGEE$	Potencial de geração de energia elétrica (kWh)
P_{inst}	Potência instalada (kW)
t	Tempo (h); Tempo do fluxo de caixa (anos)
H	Profundidade do biodigestor (m)
C_s	Comprimento superior do biodigestor (m)
C_i	Comprimento inferior do biodigestor (m)

L_s	Largura superior do Biodigestor (m)
L_i	Largura inferior do biodigestor (m)
A_{sup}	Área da superfície do substrato (m ²)
A_p	Área das paredes do biodigestor (m ²)
A_f	Área do piso do biodigestor (m ²)
A_{cob}	Área de cobertura do biodigestor (m ²)
V_{sub}	Volume ocupado pelo substrato (m ³)
$V_{g\acute{a}s}$	Volume do gasômetro (m ³)
H_t	Profundidade do tanque de biofertilizante (m)
$C_{s,t}$	Comprimento superior do tanque de biofertilizante (m)
$C_{i,t}$	Comprimento inferior do tanque de biofertilizante (m)
$L_{s,t}$	Largura superior do tanque de biofertilizante (m)
$L_{i,t}$	Largura inferior do tanque de biofertilizante (m)
V_t	Volume do tanque de biofertilizante (m ³)
$Pot_{m\acute{a}x}$	Potência máxima do motogerador (kW)
$\dot{V}_{biog\acute{a}s}$	Consumo de biogás pelo motor (Nm ³ /h)
\dot{W}_{GER}	Potência elétrica gerada; Carga elétrica (kW)
T	Temperatura (°C)
\dot{Q}_{gex}	Calor liberado nos gases de exaustão do motor (kW)
P	Pressão (kPa)
\dot{Q}_{arref}	Calor dissipado no arrefecimento do motor (kW)
$n_{ar,s}$	Número de mols de ar estequiométrico
$n_{CO_2,gex}$	Número de mols de CO ₂ nos gases de exaustão
n_{H_2O}	Número de mols de H ₂ O nos gases de exaustão
$n_{N_2,gex}$	Número de mols de N ₂ nos gases de exaustão
f	Razão mássica combustível/ar
m_f	Massa de combustível (kg)
m_{ar}	Massa de ar (kg)

f_s	Razão mássica combustível/ar estequiométrica
$n_{ar,r}$	Número de mols de ar real
$n_{ar,s}$	Número de mols de ar estequiométrico
\dot{m}	Vazão mássica (kg/s)
$c_{p,arref}$	Calor específico do líquido de arrefecimento (kJ/kg°C)
h	Entalpia específica em ralação ao estado de referência (kJ/kg)
$\dot{Q}_{MCI,loss}$	Calor perdido pelo MCI (kW)
\dot{W}_{MCI}	Potência de eixo produzida pelo MCI (kW)
\dot{W}_{SGEE}	Potência elétrica líquida gerada pelo SGEE (kW)
\dot{W}_{SAB}	Potência elétrica consumida pelo SAB (kW)
\dot{W}_{SGB}	Potência elétrica da bomba de agitação do SGB (kW)
$\dot{E}_{biog\ as,SGEE}$	Potência do biogás consumida pelo SGEE (kW)
$\dot{Q}_{SGEE,loss}$	Calor perdido no sistema de geração de energia elétrica (kW)
$c_{p,aq}$	Calor específico do líquido de aquecimento (kJ/kg°C)
U_{arref}	Coefficiente global de transferência de calor do trocador água-água arrefecimento (W/m ² °C)
A_{arref}	Área total de transferência de calor do trocador água-água arrefecimento (m ²)
$\dot{W}_{el,arref}$	Potência elétrica da bomba do circuito de arrefecimento do motor (kW)
\dot{Q}_{gases}	Calor recuperado dos gases de exaustão (kW)
$c_{p,gex}$	Calor específico dos gases de exaustão do motor (kJ/kg°C)
U_{gases}	Coefficiente global de transferência de calor do trocador de calor gás-água (W/m ² °C)
A_{gases}	Área total de transferência de calor do trocador de calor gás-água (m ²)
$\dot{W}_{el,aq}$	Potência elétrica pela bomba do circuito de aquecimento do biodigestor (kW)

\dot{Q}_{bio}	Calor disponível para aquecer o biodigestor (kW)
U_{bio}	Coefficiente global de transferência de calor do trocador de calor água-água biodigestor ($W/m^2\text{°C}$)
A_{bio}	Área total de transferência de calor do trocador de calor água-água biodigestor (m^2)
$\dot{Q}_{bio, \acute{u}til}$	Calor utilizado para aquecimento do biodigestor (kW)
\dot{Q}_{sobra}	Calor descartado pelo controlador de temperatura (kW)
$\dot{Q}_{SAB, loss}$	Taxa de calor perdido pelo SAB (kW)
COP_{SAB}	Coefficiente de performance do SAB
$\dot{E}_{biog\acute{a}s_com}$	Potência do biogás produzido com o SAB (kW)
$\dot{E}_{biog\acute{a}s_sem}$	Potência do biogás produzido sem o SAB (kW)
\dot{m}_{sub}	Vazão mássica do substrato na bomba de agitação (kg/s)
$\dot{E}_{biog\acute{a}s, queimador}$	Potência do biogás enviado ao queimador (kW)
$\dot{E}_{biog\acute{a}s}$	Potência do biogás produzido (kW)
V_{sub}	Volume de substrato (m^3)
cp_{sub}	Calor específico do substrato ($kJ/kg\text{°C}$)
$\frac{dT_{sub}}{dt}$	Derivada da temperatura do substrato em relação ao tempo
\dot{Q}_{sup}	Taxa de calor perdido na superfície do substrato para o biogás (kW)
\dot{Q}_{sub}	Taxa de calor para aquecer o substrato que entra (kW)
\dot{Q}_{solo}	Taxa de calor perdida para o solo (kW)
$cp_{g\acute{a}s}$	Calor específico do biogás ($kJ/kg\text{°C}$)
$\frac{dT_{g\acute{a}s}}{dt}$	Derivada da temperatura do biogás em relação ao tempo
\dot{Q}_{amb}	Taxa de calor perdida para o ambiente na cobertura do biodigestor (kW)
\dot{Q}_{conv}	Taxa de calor trocada por convecção entre o substrato e o biogás (kW)

\dot{Q}_{rad}	Taxa de troca de calor por radiação entre o substrato e o biogás (kW)
h_{sup}	Coefficiente de transferência de calor por convecção entre o substrato e o biogás ($W/m^2\text{°C}$)
$\dot{m}_{sub,e}$	Vazão mássica do substrato que entra no biodigestor (kg/s)
cp_{sub}	Calor específico do substrato ($kJ/kg\text{°C}$)
$T_{sub,e}$	Temperatura do substrato que entra no biodigestor (°C)
U_{solo}	Coefficiente médio de transferência de calor no solo ($W/m^2\text{°C}$)
T_{sol-ar}	Temperatura equivalente sol-ar (°C)
I_t	Irradiação solar total (W/m^2)
h_o	Coefficiente combinado de transferência de calor por radiação e convecção na superfície exterior do biodigestor ($W/m^2\text{°C}$)
V_{vento}	Velocidade do vento (m/s)
U_{cob}	Coefficiente global de transferência de calor através da cobertura do biodigestor ($W/m^2\text{°C}$)
h_i	Coefficiente de transferência de calor por convecção na superfície interna da cobertura do biodigestor ($W/m^2\text{°C}$)
l_{cob}	Espessura da cobertura do biodigestor (m)
k_{cob}	Condutividade térmica da cobertura do biodigestor ($W/m\text{°C}$)
\dot{E}_{dejeta}	Taxa de energia química do dejecto (kW)
$\dot{E}_{efluente}$	Energia química perdida no efluente do biodigestor (kW)
$\dot{E}_{suínos,e}$	Taxa de entrada de energia na forma de suínos (kW)
$\dot{E}_{ração}$	Taxa de entrada de energia na forma de ração (kW)
\dot{W}_{SCS}	Taxa de entrada de EE no sistema de criação de suínos (kW)
$\dot{E}_{suínos,s}$	Taxa de saída de energia na forma de suínos (kW)
$IRR_{Biogás}$	Índice de recuperação da energia da ração como biogás
IRR_{EE}	Índice de recuperação da energia da ração como EE
IRR_{EEL}	Índice de recuperação da energia da ração como EE líquida
ID_{BSI}	Índice de desempenho do BSI

T_{amb}	Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)
I_t	Irradiação solar total (W/m^2)
V_{vento}	Velocidade do vento (m/s)
$EE_{D,antes}$	Consumo de energia elétrica da distribuidora antes da PGEB (kWh)
$EE_{D,depos}$	Consumo de energia elétrica da distribuidora depois da PGEB (kWh)
$R_{isolado}$	Receita das PGEBs isoladas (R\$/ano)
$\$kWh$	Valor do kWh (R\$)
R_{EEE}	Receita referente ao consumo de energia elétrica evitada (R\$/ano)
R_{CEE}	Receita referente ao saldo de créditos de energia elétrica (R\$/ano)
D_{RCEE}	Despesa referente a recuperação de créditos (R\$/ano)
CEE	Créditos de energia elétrica (kWh)
$CEEG$	Créditos de energia elétrica gerados (kWh)
$CEER$	Créditos de energia elétrica recuperados (kWh)
$\$CEE$	Valor dos créditos de energia elétrica (R\$/kWh)
$\$USC$	Valor do uso do sistema de compensação de energia elétrica (R\$/kWh)
$R_{conectado}$	Receita das PGEBs conectadas (R\$/ano)
R_{PGEB}	Receita líquida da PGEB (R\$/ano)
R	Receita bruta da PGEB (R\$/ano)
$O\&M$	Custo de operação e manutenção (R\$/ano)
TMA	Taxa mínima de atratividade (%)
VPL	Valor presente líquido (R\$)
I_{BSI}	Investimento inicial no biossistema (R\$)
n	Período de tempo da análise financeira (anos)
i	Taxa de juros considerada (%)
TIR	Taxa interna de retorno (%)

$\$kWh_{Bruto,BSI}$ Custo do kWh bruto produzido (R\$)

$\$kWh_{BSI}$ Custo do kWh líquido produzido (R\$)

SÍMBOLOS GREGOS

η_{el}	Eficiência média de conversão do biogás em energia elétrica
η_{GER}	Eficiência do gerador
λ	Razão entre o número de mols de ar real e o estequiométrico; Condutividade térmica do solo (W/m°C)
$\rho_{biogás}$	Massa específica do biogás (kg/m ³)
ΔT_{motor}	Diferença de temperatura do líquido de arrefecimento na entrada e na saída do motor (°C)
ΔP_{motor}	Perda de carga do líquido de arrefecimento no motor (kPa)
η_{GRUPO}	Eficiência do grupo gerador
η_{SGEE}	Eficiência do subsistema de geração de energia elétrica
$\Delta T_{ML,arref}$	Média logarítmica das diferenças de temperatura no trocador de calor água-água arrefecimento (°C)
$\Delta P_{arref,q}$	Perda de carga no lado quente do trocador de calor água-água arrefecimento (kPa)
$\Delta P_{arref,f}$	Perda de carga no lado frio do trocador de calor água-água arrefecimento (kPa)
v_{arref}	Volume específico do líquido de arrefecimento (m ³ /kg)
$\Delta P_{bomba,arref}$	Aumento de pressão na bomba do circuito de arrefecimento (kPa)
$\eta_{bomba,arref}$	Eficiência da bomba de arrefecimento
$\Delta T_{ML,gases}$	Média logarítmica das diferenças de temperatura no trocador gás-água (°C)
ΔP_{gases}	Perda de carga sofrida pelo fluido de aquecimento no trocador gás-água (kPa)
v_{aq}	Volume específico do líquido do circuito de aquecimento (m ³ /kg)

$\Delta P_{bomba, aq}$	Aumento de pressão na bomba do circuito de aquecimento (kPa)
$\eta_{bomba, aq}$	Eficiência da bomba do circuito de aquecimento
ΔP_{bio}	Perda de carga do trocador de calor do biodigestor (kPa)
ΔT_{bio}	Diferença de temperatura entre a entrada e a saída do trocador do biodigestor (°C)
$\Delta T_{ML, bio}$	Média logarítmica das diferenças de temperatura no trocador de calor do biodigestor (°C)
$\eta_{GRUPO, com}$	Eficiência do grupo gerador com o SAB
$\eta_{GRUPO, sem}$	Eficiência do grupo gerador sem o SAB
v_{sub}	Volume específico do substrato (m ³ /kg)
$\Delta P_{bomba, ag}$	Aumento de pressão na bomba de agitação (kPa)
$\eta_{Bomba, ag}$	Eficiência da bomba de agitação
ρ_{sub}	Massa específica do substrato (kg/m ³)
$\rho_{gás}$	Massa específica do biogás (kg/m ³)
ε_{sub}	Emissividade do substrato (0,95)
σ	Constante de Steffan-Boltzman (5,67x10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴)
α	Absortividade da cobertura do biodigestor (0,3)
ε_{cob}	Emissividade da cobertura do biodigestor (0,3)
ΔR	Diferença entre a radiação de ondas longas e a emitida pelo corpo negro (W/m ²)
η_{SGB}	Eficiência do subsistema de geração de biogás
η_{SCS}	Eficiência do sistema de criação de suínos
$\eta_{BSI, Biogás}$	Eficiência do BSI considerando o biogás produzido
$\eta_{BSI, EE}$	Eficiência do BSI considerando a EE total produzida
$\eta_{BSI, EEL}$	Eficiência do BSI considerando e EE líquida produzida

ÍNDICES

1, 2, 3 ... Pontos do sistema de cogeração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	37
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO.....	38
1.2 OBJETIVOS.....	40
1.2.1 Geral	40
1.2.2 Específicos	40
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	41
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	43
2.1 OS DEJETOS DE SUÍNO.....	43
2.1.1 Volume produzido	43
2.1.2 Sólidos totais e sólidos voláteis	44
2.2 A DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	44
2.2.1 Condições do meio	45
2.3 O BIODIGESTOR.....	50
2.3.1 Tipos de biodigestores	50
2.3.2 Parâmetros de projeto e operação	54
2.4 O BIOGÁS.....	58
2.4.1 O biogás como combustível em MCI	59
2.4.2 Condicionamento	60
2.5 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM BIOGÁS.....	64
2.5.1 Micro turbina a gás	65
2.5.2 Uso do biogás em caldeiras/turbinas a vapor	68
2.5.3 Ciclo combinado	68
2.5.4 Motores de combustão interna (MCI)	69
2.5.5 Cogeração a biogás	72
2.6 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	78
2.6.1 Micro e minigeração distribuída	81
2.6.2 O Sistema de Compensação de Energia Elétrica SCEE	84
2.6.3 A RN 482 e o SCEE em números	86
2.6.4 Revisão da RN 482	89
2.7 ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS.....	89
2.8 BALANÇO ENERGÉTICO NA CRIAÇÃO DE SUÍNOS.....	91
3 CARECTERIZAÇÃO E ESTUDO DA POPULAÇÃO	93
3.1 LOCALIZAÇÃO E TAMANHO.....	93
3.2 ENERGIA ELÉTRICA E SEU CONSUMO.....	97
3.2.1 Impostos e bandeiras tarifárias	100
3.3 POTÊNCIA MÍNIMA NECESSÁRIA.....	101

3.4 O CLIMA	104
3.5 PRODUÇÃO DE DEJETOS E O TRATAMENTO ATUAL.....	104
3.6 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS	106
3.6.1 Análise de sensibilidade do modelo.....	108
3.7 TAMANHO DOS BIODIGESTORES E TANQUES DE BIOFERTILIZANTE	111
3.8 POTÊNCIA E DISPONIBILIDADE DAS PLANTAS.....	112
3.8.1 Potência das plantas.....	112
3.8.2 Fator de disponibilidade das plantas.....	114
3.9 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	115
3.10 POSSIBILIDADES DE GERAÇÃO DE BIOGÁS, ENERGIA ELÉTRICA E TÉRMICA	116
3.10.1 Arranjos físicos para a geração de biogás e EE	116
3.10.2 Modos de operação.....	117
3.10.3 Uso da energia térmica	119
3.10.4 Equipamentos necessários.....	120
3.10.5 Equipamentos disponíveis no mercado nacional.....	121
3.10.6 Adequação dos equipamentos a população.....	127
3.11 GRANJAS REPRESENTATIVAS.....	131
4 ANÁLISE TÉCNICA DAS GRANJAS REPRESENTATIVAS.133	
4.1 DESCRIÇÃO DAS GRANJAS REPRESENTATIVAS.....	133
4.1.1 Localização e tamanho.....	133
4.1.2 Quantidade e qualidade dos dejetos	133
4.1.3 Consumo de EE, ração e água.....	134
4.1.4 Preço da EE e impostos.....	134
4.1.5 Rede, carga instalada e curva de carga	134
4.1.6 O clima	135
4.2 DESCRIÇÃO DAS PGEB	136
4.2.1 PGEB isolada da rede e sem aquecimento (PGEB1).....	136
4.2.2 PGEB isolada da rede e com aquecimento (PGEB2)	142
4.2.3 PGEB conectada a rede e sem aquecimento (PGEB3).....	148
4.2.4 PGEB conectada a rede e com aquecimento (PGEB4)	151
4.3 ANÁLISE TERMODINÂMICA DO BSI.....	151
4.3.1 Subsistema de geração de energia elétrica (SGEE).....	154
4.3.2 Subsistema de aquecimento do biodigestor (SAB)	159
4.3.3 Subsistema de geração de biogás (SGB).....	163
4.3.4 Subsistema de criação de suínos (SCS).....	172
4.3.5 Biossistema integrado	173
4.4 SIMULAÇÃO DINÂMICA DOS BSI.....	175
4.4.1 O modelo de simulação	175
4.4.2 Os dados Climáticos	186

4.4.3 Fluxograma da simulação	187
5 ANÁLISE ECONÔMICA	189
5.1 LEVANTAMENTO DOS INVESTIMENTOS PARA INSTALAÇÃO DAS PLANTAS	189
5.2 LEVANTAMENTO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO	191
5.3 LEVANTAMENTO DA RECEITA DAS PGEb	193
5.3.1 PGEb isoladas	193
5.3.2 PGEb Conectadas	193
5.3.3 Receita Líquida das PGEb	196
5.4 LINHAS DE FINANCIAMENTO	196
5.4.1 Pronaf Eco	196
5.4.2 Programa ABC	196
5.5 TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE	197
5.6 VALOR PRESENTE LÍQUIDO	197
5.7 TAXA INTERNA DE RETORNO	198
5.8 PAYBACK	198
5.9 CÁLCULO DO CUSTO DO KWH BRUTO PRODUZIDO	198
5.10 CÁLCULO DO CUSTO DO KWH LÍQUIDO PRODUZIDO ..	198
5.11 PREÇO DA EE PARA TORNAR O BSI VIÁVEL	199
5.12 VALOR DO INVESTIMENTO PARA TORNAR O BSI VIÁVEL	199
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	201
6.1 ANÁLISE TÉCNICA DOS BSI	201
6.1.1 Influência das condições climáticas na produção de biogás. 201	
6.1.2 Influência do aquecimento do biodigestor na produção de biogás e no funcionamento do motogerador	202
6.1.3 Influência do isolante térmico do biodigestor na produção de biogás	205
6.1.4 Influência do volume de armazenamento no funcionamento do motogerador	206
6.1.5 Influência da conexão com a rede na produção de EE	207
6.1.6 Estados termodinâmicos do Sistema de Cogeração em regime permanente	208
6.1.7 Análise termodinâmica dos subsistemas	209
6.1.8 Análise termodinâmica do BSI	216
6.1.9 Produção e consumo de Biogás	219
6.1.10 Produção e consumo de Energia Elétrica	220
6.1.11 BSI Ótimo	222
6.2 ANÁLISE ECONÔMICA	223
6.2.1 BSI isolados	223

6.2.2 BSI conectados.....	224
6.2.3 Custo da EE gerada.....	229
7 CONCLUSÃO.....	231
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	235
APÊNDICE A - CONEXÃO DE MICRO E MINIGERADORES A REDE	249
APÊNDICE B – RESULTADOS DA COMBUSTÃO	257
APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS DOS MOTOGERADORES ENCONTRADOS	259

1 INTRODUÇÃO

O uso do porco na cozinha brasileira data praticamente da época do descobrimento. Estimulado pela falta de mão de obra para o plantio e criação de animais nas regiões mineradoras de Minas Gerais do século XVIII, e devido principalmente a simplicidade de sua criação, onde restos de comida e outros produtos nativos como bananas e inhames compunham a “lavagem” usada como ração necessária para o fornecimento de banha, torresmo, carne e linguiça.

Este tipo de criação foi utilizado também pelos imigrantes italianos e alemães que se instalaram principalmente na região sul do país no final do século XIX e início do século XX. Nesta época, o produto mais importante do porco era a banha, pois era utilizada no preparo de alimentos, na produção de sabão e como lubrificante, sendo a carne um produto secundário. Este tipo de criação de porcos apresentava um alto aproveitamento energético, pois se valia da utilização de restos de comida para sua alimentação, e apresentava um alto índice de uso dos “produtos” derivados do porco.

A partir da década de 70, devido principalmente ao surgimento dos óleos vegetais, a carne do agora suíno, passou por uma grande transformação genética e tecnológica, tendo uma redução de 20% de gordura corporal. Junto com esta transformação, está o sistema de produção integrado á indústria, sistema onde o suíno e a ração, agora a base de milho e soja, são fornecidos ao produtor, que ganha para criar o animal.

Este sistema de criação embora altamente tecnificado, fez com que a suinocultura se tornasse cada vez mais desintegrada do sistema de produção da propriedade e diminuiu consideravelmente o aproveitamento energético da criação de suínos.

Com o advento do modelo integrado de produção, a atividade se ampliou desordenadamente, sem considerar critérios de sustentabilidade ambiental. Em busca de maior produtividade e redução de custos, a produtividade por animal e por área, aumentou consideravelmente, passando-se a produzir grandes quantidades de dejetos em pequenas extensões de terra que se manejados de maneira incorreta acabam por poluir águas e solos além de intensificar a produção de gases do efeito estufa.

Segundo dados da produção pecuária municipal de 2012 (IBGE, 2013), o rebanho suíno brasileiro é de aproximadamente 38,8 milhões de cabeças, sendo a região Sul responsável por 49,5%, o Sudeste por 18,4%, o Nordeste por 15,1%, o Centro-Oeste por 13,2% e o Norte por

3,8%. Vale destacar que, na região Sul, Santa Catarina é responsável por 19,3% do rebanho nacional, seguida pelo Rio Grande do Sul com 16% e do Paraná com 14,2%.

A suinocultura brasileira apresenta algumas diferenças regionais importantes. No Sul, a escala de produção é menor, especializada, segregada em múltiplos sítios com pouca produção de grãos e com participação majoritária da agricultura familiar integrada a empresas e cooperativas agroindustriais. No Sudeste predomina a criação em ciclo completo por produtores independentes de médio e grande porte, mas com aumento das granjas integradas.

Devido principalmente ao custo da ração, e da grande disponibilidade de área para disposição dos dejetos, possibilitando a integração da suinocultura à pecuária, existe uma tendência que a atividade migre para regiões produtoras de grãos como o Centro-Oeste, onde predominam granjas independentes de grande porte e altamente automatizadas.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÃO

A grande quantidade de suínos em uma pequena área, aliado a um relevo acidentado, como é o caso da região Oeste de Santa Catarina, que concentra aproximadamente 75% da produção do estado, somado ao baixo conhecimento técnico dos produtores em relação ao tratamento dos dejetos, representa um alto risco ambiental para a região.

Atualmente a grande maioria dos dejetos suínos 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 as águas de rios e o lençol freático bem como os solos por receber 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 sua carga orgânica e permitindo a fertirrigação com o biofertilizante proveniente do processo.

Para a realização deste trabalho, teve-se como base de estudo os dados de 619 produtores de suínos de 17 cidades da região Extremo Oeste de Santa Catarina e Noroeste do Rio Grande do Sul, integrados a Cooper A1 sediada na cidade de Palmitos/SC. Estes 619 produtores, possuem um rebanho de 261039 suínos em terminação e 33131 matrizes, representando aproximadamente 5% dos suínos em terminação

e matrizes do estado de Santa Catarina. O número médio de matrizes e suínos em terminação na população é de 259 e 542 respectivamente.

Estima-se que o potencial de geração de energia elétrica com o biogás produzido a partir de dejetos suínos no Brasil é de 500 MW, potencial este suficiente para abastecer toda a energia consumida pelos próprios produtores de suínos, abaixando assim seus custos de produção.

A produção de biogás e energia elétrica na suinocultura, juntamente com a fertirrigação fazem parte do que o autor chama de modo circular de produção, onde as plantas transformam a luz do sol e os nutrientes do solo em biomassa, que vira ração, que vira carne e dejetos. A carne vira energia para o consumo humano e os dejetos viram biogás e biofertilizante. O biogás será convertido em energia elétrica, térmica, gás carbônico e água. O biofertilizante será aplicado no solo e servirá de nutriente para as plantas que além deles usarão o gás carbônico e a água do processo de combustão do biogás para produzir mais biomassa que virará ração, reiniciando assim o ciclo. Para determinar se o modo de produção proposto é mais eficiente que o atual há a necessária de uma análise energética.

Apesar da implantação do modo circular de produção na criação de suínos aparentemente ser a alternativa ideal para se obter uma suinocultura sustentável, esta ideia ainda enfrenta grandes barreiras técnicas, econômicas e políticas, como a falta de tecnologia adequada ao tamanho das propriedades da região Sul, falta de profissionais qualificados, falta de incentivos para projetos deste tipo, falta de incentivo a fabricantes de equipamentos da cadeia do biogás e a incidência de impostos sobre a energia elétrica gerada por meio da micro e minigeração distribuída.

Em Abril de 2012 a ANEEL publicou a resolução normativa N° 482 que estabelece 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 100 kW) e minigeração (de 100 kW até 1 MW). 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.

Assim, o foco deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica e econômica da microgeração de energia elétrica na população em estudo, levando em consideração ou não o sistema de compensação de energia elétrica. Na análise foram propostas duas granjas representativas da população, uma com capacidade para 542 suínos em terminação, e outra com 259 matrizes. Considerando a possibilidade de aproveitamento do calor liberado pela água de arrefecimento e gases de exaustão do motor, foi proposto o uso da cogeração para aquecimento do biodigestor, sendo a viabilidade técnica e econômica reavaliada.

É neste contexto e com motivação de transformar o modo de produção circular, e o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás em realidade, que esta dissertação está inserida. Servindo principalmente para capacitar pessoal no aproveitamento energético do biogás por meio da geração distribuída, guiar o desenvolvimento de projetos futuros e promover a micro e minigeração de energia elétrica a partir do biogás.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Avaliar a viabilidade técnica e econômica da microgeração de energia elétrica a partir do biogás de dejetos suínos, levando em consideração o sistema de compensação de energia elétrica e o uso da cogeração no aquecimento do biodigestor.

1.2.2 Específicos

- Definir e caracterizar uma população de estudo representativa da criação de suínos catarinense;
- Levantar os requisitos dos projetos considerando as características da população e a RN 482 da ANEEL;
- Analisar a viabilidade técnica da produção de biogás e energia elétrica na população;
- Realizar a análise termodinâmica da criação de suínos, das plantas de geração de energia elétrica a biogás, e dos biosistemas integrados formados, com e sem aquecimento do biodigestor e conectado ou não a rede da distribuidora;

- Simular a produção instantânea de biogás e energia elétrica levando em consideração as condições climáticas locais e a curva de carga das propriedades;
- Analisar a viabilidade econômica das plantas propostas;
- Avaliar a adequação da RN 482 em relação à produção de energia elétrica a partir do biogás de dejetos suínos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 7 capítulos. Neste capítulo introdutório foram descritos a contextualização e motivação do assunto, objetivos geral e específicos.

No capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica sobre dejetos suínos, digestão anaeróbia, biodigestor, biogás, produção de EE com biogás, cogeração a biogás, geração distribuída, viabilidade técnica e econômica da geração de EE a partir do biogás de dejetos suínos e balanço energético na criação de suínos.

O capítulo 3 apresenta a caracterização e estudo da população que serviu de base para o trabalho, estimativa da produção de biogás, cálculo do potencial de geração de EE, levantamento das possibilidades e dos equipamentos necessários e disponíveis no mercado para geração de biogás e EE, análise da adequação dos equipamentos aos projetos e determinação de propriedades representativas da população.

No capítulo 4 é realizada a análise técnica das plantas de geração de energia elétrica a biogás (PGEB) propostas para as propriedades representativas, contemplando a análise termodinâmica dos biosistemas integrados (BSI) formados e seus subsistemas e a simulação dinâmica dos BSIs levando em consideração as condições climáticas locais, as perdas térmicas do biodigestor e a curva de carga das granjas;

O capítulo 5 apresenta a análise econômica dos BSIs, contemplando o cálculo do custo da energia elétrica gerada, taxa interna de retorno, valor presente líquido, tempo de retorno do investimento, preço mínimo da EE e investimento máximo para tornar o BSI viável;

O capítulo 6 apresenta e discute os resultados obtidos nas análises técnica e econômica dos BSIs.

O capítulo 7 apresenta a conclusão e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 OS DEJETOS DE SUÍNO

Tratando-se da geração de energia elétrica a partir do biogás de dejetos suínos, é de fundamental importância que a planta de geração receba um dejetos de qualidade para proporcionar a maior produção de biogás. O dejetos neste caso é a matéria prima fundamental para a produção de biogás e posterior conversão em energia elétrica e térmica.

2.1.1 Volume produzido

Vários fatores influenciam no volume de dejetos produzidos, tais como o manejo, o tipo de bebedouro, sistema de higienização adotado (frequência e volume de água utilizada), bem como, o número e categoria de animais e seu estado psicológico (BELLI Fº, 1995; OLIVEIRA, 2001).

Segundo Konzen (1983), a produção média diária por suíno é de 8,6 litros/dia. A Tabela 1 apresenta as variações das quantidades de dejetos líquidos produzidos de acordo com diferentes categorias dos suínos.

Tabela 1 - Produção de dejetos por categorias dos suínos

Categoria dos suínos	Esterco (kg/dia)	Esterco + urina (kg/dia)	Dejetos líquidos (l/dia)
5 - 100 kg	2,30	4,90	7,00
Gestação	3,60	11,00	16,00
Lactação	6,40	18,00	27,00
Macho	3,00	6,00	9,00
Leitão	0,35	0,95	1,40
Média	2,35	5,80	8,60

Fonte: Konzen (1983)

A fim de medir o consumo de água e a produção de dejetos na suinocultura do estado de Santa Catarina, Tavares (2012), avaliou diariamente 15 granjas de crescimento e terminação entre abril e dezembro de 2011, obtendo o valor médio de 4,84 litros de dejetos por animal por dia para um tempo de alojamento de 18 semanas. Este valor foi recentemente adotado pela FATMA (2015) como referência para

construção de sistemas de tratamento de dejetos e está consideravelmente abaixo do adotado anteriormente que era de 7 litros por animal por dia.

2.1.2 Sólidos totais ST e sólidos voláteis SV

Entre as características físico-químicas do dejetos, a concentração de ST e dos SV é uma das mais importantes para a produção de biogás. Segundo Lucas Junior (1994) e La Farge (1995), os SV representam entre 70 a 75% dos ST, e estão diretamente relacionados com a produção de biogás. Assim, quanto maior for a concentração de SV na alimentação diária do biodigestor, maior será a capacidade do biodigestor de produzir biogás (OLIVEIRA & HIGARASHI, 2006).

A relação SV/ST indica a degradabilidade de um resíduo orgânico e quanto maior for o valor dessa relação no dejetos que entra no biodigestor, maior será o potencial de produção de biogás. Quanto menor for a relação SV/ST na saída do digestor maior foi a conversão desse potencial (GUSMÃO, 2008).

Na Tabela 2 podemos observar os valores médios mais recentes obtidos por Tavares (2012) em 15 propriedades do Meio Oeste de Santa Catarina.

Tabela 2 - Concentração de ST e SV em propriedades do Meio Oeste Catarinense

Variável	Alojamento (semanas)	Média	Desvio padrão(σ)	Mínimo	Máximo
ST (g/l)	18	63,02	15,43	41,41	90,74
SV (g/l)	18	47,67	12,16	30,98	70,50

Fonte: Adaptado de Tavares (2012)

2.2 A DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo em que alguns microrganismos que atuam na ausência de oxigênio, atacam a estrutura de materiais orgânicos complexos, produzindo compostos simples como o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) (SANCHEZ et al., 2005).

Segundo Kunz, et al., (2004) a biodigestão anaeróbia é um processo conhecido há muito tempo e seu emprego na produção de

biogás para a conversão de energia é muito popular nos países asiáticos como, China e Índia.

Basicamente o processo de digestão anaeróbia, como pode ser observado na Figura 1, é constituído de 4 etapas, são elas:

Hidrólise: nesta etapa, bactérias hidrolíticas liberam enzimas que decompõem compostos orgânicos complexos, tais como carboidratos, proteínas e lipídios, em substâncias menos complexas, por meio de reações bioquímicas.

Acidogênese: nesta etapa, bactérias fermentativas acidogênicas decompõem os compostos menos complexos da hidrólise, em ácidos graxos de cadeia curta (ácidos acético, propiônico e butírico), dióxido de carbono e hidrogênio. Adicionalmente, formam-se pequenas quantidades de ácido láctico, álcoois e sulfeto de hidrogênio. Os compostos formados nesta etapa dependem da concentração de hidrogênio intermediário.

Acetogênese: nesta etapa, bactérias acetogênicas convertem os compostos da acidogênese nos precursores do biogás, o ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono.

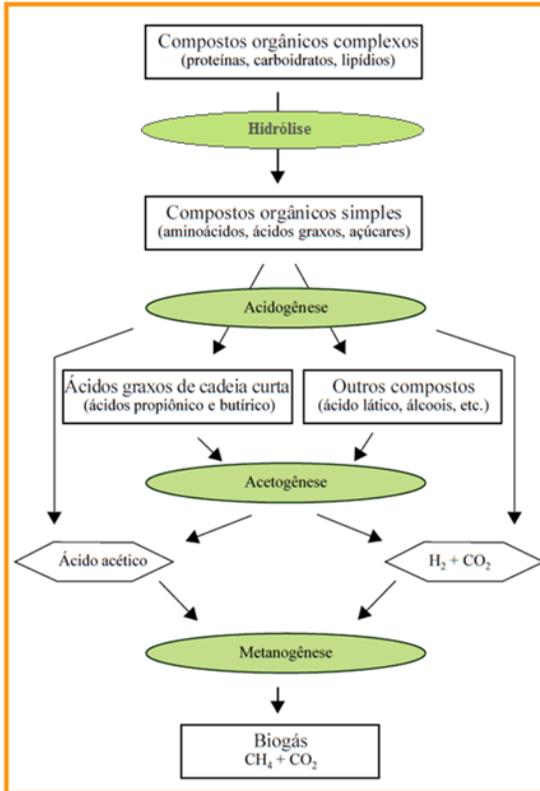
Metanogênese: nesta etapa, as bactérias archeas metanogênicas, estritamente anaeróbias, convertem principalmente o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono em metano.

2.2.1 Condições do meio

Existem vários fatores que influenciam a digestão anaeróbia e por consequência resultam numa maior ou menor produção de biogás.

Dentre eles podemos citar:

- Temperatura
- pH
- Nutrientes
- Inibidores



Fonte: FNR (2010)

Figura 1 - Etapas da digestão anaeróbia

2.2.1.1 Temperatura

A temperatura do substrato é um dos fatores com maior influência na digestão anaeróbia, pois está diretamente relacionada a seleção das espécies, o crescimento microbiano, produção de biogás, resposta a variação de carga no digestor, grau de utilização do substrato e duração do arranque. Os microrganismos não possuem mecanismos para controlar a própria temperatura, dessa forma a sua temperatura é dada pela temperatura do meio (HENN, 2005).

Cada microrganismo envolvido nos processos metabólicos tem a sua faixa de temperatura ótima. Temperaturas acima ou abaixo podem acarretar a inibição dos microrganismos (KALTSCHMITT, 2001 apud FNR, 2010).

Em função da temperatura ótima, os microrganismos são divididos em psicrófilicos, mesófilicos e termófilicos. A Tabela 3 apresenta as faixas de temperatura e a temperatura ótima dos microrganismos.

Tabela 3 - Níveis de temperatura utilizados na digestão anaeróbia

Faixa de temperatura	Intervalo	Intervalo ótimo
Psicrófilica	< 20°C	12 - 18°C
Mesófilica	20 - 45°C	25 - 40°C
Termófilica	> 45°C	55 - 65°C

Fonte: METCALF & EDDY (2003) apud GUSMÃO (2008).

A faixa de temperatura psicrófilica, embora dispense o aquecimento do digestor, se caracteriza por uma lenta decomposição e reduzida produção de gás, o que pode inviabilizar a operação de uma planta em escala comercial (FNR, 2010).

No intervalo de 25°C a 40°C, há um crescimento gradual da velocidade de degradação da matéria orgânica, embora existam diferentes valores ótimos de temperatura das diversas populações de microrganismos envolvidas nos processos (CCE, 2000 apud GUSMÃO, 2008).

Souza, et al. (2005), avaliando a partida de biodigestores de bancada, alimentados com dejetos de suíno, com 6% de sólidos totais, submetidos a três temperaturas (25, 35 e 40°C) e agitação do substrato, obtiveram uma maior produção de biogás a 35°C e concluíram que temperaturas mais altas favoreceram a partida dos biodigestores.

A grande maioria de plantas comerciais trabalha na faixa de 37°C a 42°C, pois esta faixa proporciona uma produção de biogás relativamente elevada e uma boa estabilidade do processo (WEILAND, 2001 apud FNR, 2010).

Existe um pico relativo na taxa de digestão anaeróbia próximo a 35°C e um máximo global a aproximadamente 55°C. Devido a este fato, diferencia-se uma região mesófilica abaixo de 45°C e termófilica acima (VAN HAANDEL&LETTINGA, 1994).

Embora a máxima taxa de digestão anaeróbia ocorra a 55°C, esta faixa não é comumente adotada, pois os microrganismos são mais suscetíveis a variações de temperatura e do fluxo de substrato, além de requerer um gasto maior com energia, justificando-se somente quando o

extermínio de germes nocivos no processo faz-se necessário (HENN, 2005; FNR, 2010).

Não existem limites rígidos entre as faixas de temperatura. O que pode prejudicar os microrganismos são variações bruscas de temperatura, assim, como as bactérias metanogênicas têm a capacidade de se adaptar a diferentes níveis de temperatura quando a sua variação é lenta, é mais importante para a estabilidade do processo, uma constância na temperatura do que o seu valor absoluto (JÄKEL, 1998 apud FNR, 2010).

O efluente a ser digerido, na maioria dos casos, não se encontra a temperatura ideal. Nessa situação é necessário fornecer calor ao processo de forma a aumentar a temperatura do afluente, compensando as perdas térmicas no biodigestor (CCE, 2000 apud GUSMÃO, 2008).

Segundo Massé, et al. (2003), o desempenho do biodigestor anaeróbio diminui significativamente quando a temperatura operacional cai de 20°C para 10°C. Abaixo de 10°C a atividade enzimática é muito fraca e a produção de biogás quase nula. No campo, os biodigestores podem estar sujeitos a flutuações de temperatura, devido a grandes variações na temperatura do ar ambiente (OLIVEIRA, 2005). Sendo assim, é necessário o aquecimento do substrato em digestão, para uma maior uniformidade na temperatura do substrato e conseqüentemente maior eficiência do biodigestor.

2.2.1.2 Potencial Hidrogeniônico (pH)

Cada microrganismo envolvido no processo de digestão anaeróbia possui um valor ótimo de pH para seu desenvolvimento.

Para as bactérias hidrolíticas e acidogênicas, o pH ideal é de 5,2 a 6,3, tendo sua atividade um pouco diminuída para valores de pH levemente elevados (WEILAND, 2001 apud FNR, 2010).

As bactérias acetogênicas e as metanogênicas necessitam de um pH entre 6,5 e 8, portanto os processos de fermentação em apenas um digestor devem respeitar esta faixa (LABUHN et. Al, 2008 apud FNR, 2010).

O valor do pH no sistema é determinado pelos metabólitos ácidos e alcalinos produzidos na decomposição anaeróbia (FNR, 2010).

A taxa de digestão anaeróbia é máxima, quando o pH está na faixa neutra, perto de 7,0. Se o pH tiver um fator menor que 6,3 ou superior a 7,8, essa taxa diminui rapidamente (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

2.2.1.3 Necessidade de Nutrientes

Cada microrganismo envolvido no processo de biodigestão possui a sua necessidade própria de micro e macro nutrientes, e para que se obtenha a máxima produção de metano, é ideal que a disponibilidade destes nutrientes seja mantida em níveis ótimos. A quantidade de metano que pode ser produzida depende do teor de proteínas, gorduras e carboidratos do substrato (SEYFRIED et al., 1990 apud FNR, 2010).

Depois do carbono, o nitrogênio é o nutriente mais importante, pois é necessário para a formação de enzimas metabólicas. É fundamental uma relação C/N correta. Uma relação C/N elevada reduz a atividade metabólica e a produção de biogás devido à incompleta degradação do carbono. Já o excesso de nitrogênio pode causar a formação excessiva de amônia, capaz de inibir o crescimento das bactérias e causar o seu colapso (BRAUN, 1982 apud FNR, 2010). Uma faixa adequada para a relação C/N é entre 10 e 30 com valor ótimo próximo a 30. A relação C/N em dejetos de suínos é aproximadamente 15. Para elevar esta relação podem-se adicionar ao dejetos, outras biomassas como restos de culturas, folhas e frutos (NISHIMURA, 2009).

Além do carbono e nitrogênio, são importantes também o fósforo e o enxofre, pois são fundamentais no processo de transporte de energia nos microrganismos. Uma relação C:N:P:S adequada é 600:15:5:3 (WEILAND, 2000 apud FNR, 2010).

As bactérias metanogênicas necessitam também de micronutrientes como o cobalto, níquel, molibdênio, e selênio para o seu metabolismo, que geralmente estão presentes nos dejetos de suínos, pois são ingredientes da ração. No caso da digestão de cultivos energéticos, esses micronutrientes precisam ser adicionados no digestor (ABDOUN et al. 2009; BISCHOFF, 2009 apud FNR, 2010).

Micronutrientes como o ferro, magnésio e manganês também são importantes para o transporte de elétrons e o funcionamento de determinadas enzimas.

2.2.1.4 Inibidores

A inibição da produção de gás pode ser devida a vários fatores, podendo ser provenientes da adição do substrato, ou originados no processo de digestão. O próprio carregamento excessivo de substrato pode causar a inibição, pois qualquer substância em elevada concentração no substrato pode diminuir a atividade bacteriana,

principalmente, antibióticos, solventes, desinfetantes, herbicidas, sais e metais pesados (OLIVEIRA, 1983 apud OLIVEIRA & HIGARASHI, 2006; FNR, 2010).

Segundo FNR (2010) a amônia (NH_3) prejudica as bactérias mesmo em pequenas concentrações. Outro inibidor é o sulfeto de hidrogênio (H_2S), que na forma não dissociada em solução atua como citotóxica. A medida que o pH diminui aumenta a concentração de H_2S livre aumentando assim o risco de inibição.

O enxofre elementar é um macronutriente importante na formação de enzimas, porém uma concentração muito elevada na precipitação de sulfeto pode provocar a inibição da metanogênese.

2.3 O BIODIGESTOR

O biodigestor é o local adequadamente projetado para a ocorrência do processo de biodigestão anaeróbia da matéria orgânica. Basicamente o biodigestor constitui-se de uma câmara hermeticamente fechada, onde a matéria orgânica, em solução aquosa, sofre a decomposição e o biogás é produzido e armazenado.

Os tipos de biodigestor mais difundidos são os modelos indiano, chinês e canadense, sendo este último bastante utilizado recentemente, principalmente pelo desenvolvimento de geomembranas que facilitam a construção dos biodigestores (KUNZ & OLIVEIRA, 2006).

2.3.1 Tipos de biodigestores

Existe uma infinidade de modelos de biodigestores, diferindo-se principalmente na sua finalidade e tamanho. Biodigestores com a finalidade de produção de biogás para uso doméstico normalmente são de pequeno porte e alimentados com resíduos familiares e de animais, como é o caso dos modelos Chinês e Indiano. Ao contrário, os biodigestores que tem por finalidade a produção de energia térmica e elétrica em maior escala, são mais sofisticados de maior porte e, geralmente, alimentados pelo cultivo de culturas energéticas, como é o caso dos biodigestores mistura completa usados na Alemanha.

Existem também biodigestores intermediários que se destinam a produção de energia elétrica em menor escala, fazendo uso principalmente de resíduos como é o caso do modelo canadense, bastante utilizado no Brasil.

A seguir são apresentados os quatro modelos comentados:

2.3.1.1 Modelo indiano

O modelo indiano como pode ser observado na Figura 2 caracteriza-se por possuir uma campânula como gasômetro, a qual é mergulhada sobre a biomassa em fermentação, ou em um selo d'água externo. Este tipo de construção reduz as perdas na produção de biogás, e faz com que a pressão interna do gás seja constante, eliminando assim a frequente regulagem dos equipamentos que o utilizam. É utilizado em instalações de pequeno porte, devido ao elevado aumento dos custos de construção com o aumento do seu tamanho (FARIA, 2011).

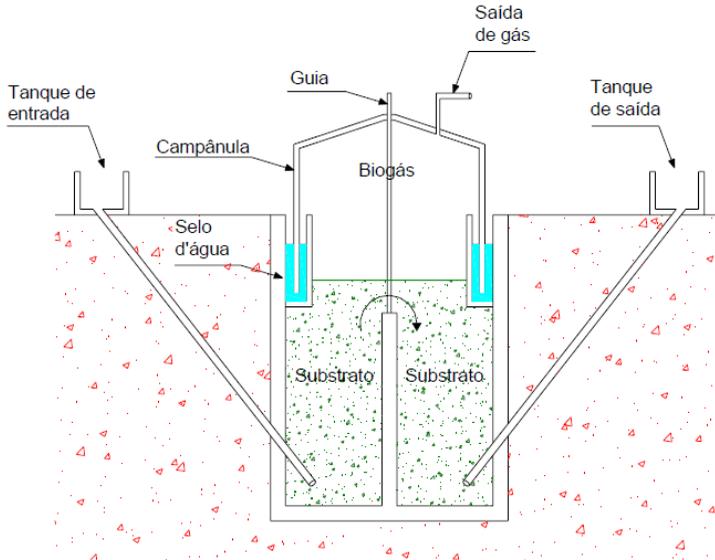
2.3.1.2 Modelo Chinês

O modelo chinês é geralmente construído em alvenaria abaixo do solo com câmara cilíndrica e teto em forma de abóboda, conforme ilustra a Figura 3. A ideia desse modelo é evitar o uso do gasômetro, porém o problema está na oscilação da pressão interna e maior probabilidade de vazamento de gases. Sua construção requer cuidados no aspecto de impermeabilização, seu custo geralmente é menor que o indiano, já que o gasômetro onera o custo do biodigestor, e tem se mostrado eficiente em instalações de pequeno porte, como a suinocultura familiar (FARIA, 2011).

2.3.1.3 Modelo mistura completa

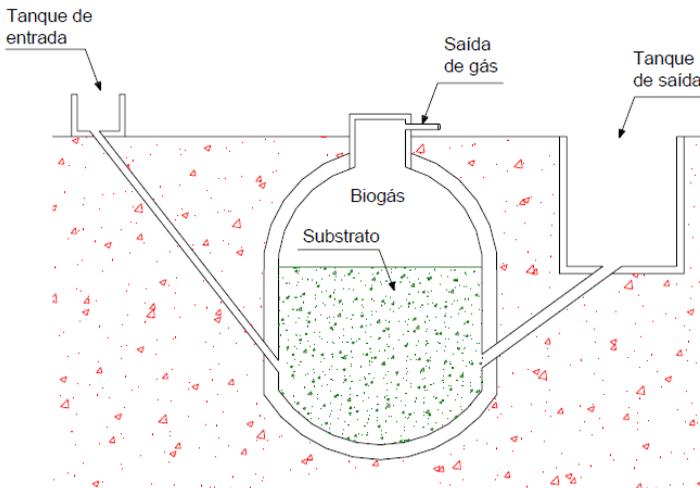
Na Alemanha, em 2009, esse modelo totalizava cerca de 90% do total das plantas de biogás dedicadas a geração de energia elétrica ou biometano.

Este biodigestor constitui-se de um reservatório cilíndrico na posição vertical como ilustra a Figura 4, com fundo de concreto, paredes de aço inox ou concreto armado, podendo ser enterrado, parcialmente enterrado ou posicionado completamente sobre o solo. Sobre o reservatório é montada uma cobertura para o gás, normalmente de lona ou concreto. A mistura completa é realizada por agitadores internos ou posicionados em sua lateral, e o aquecimento geralmente é proporcionado pela circulação de água quente, proveniente da unidade de cogeração, em tubulações no seu interior (FNR 2010).



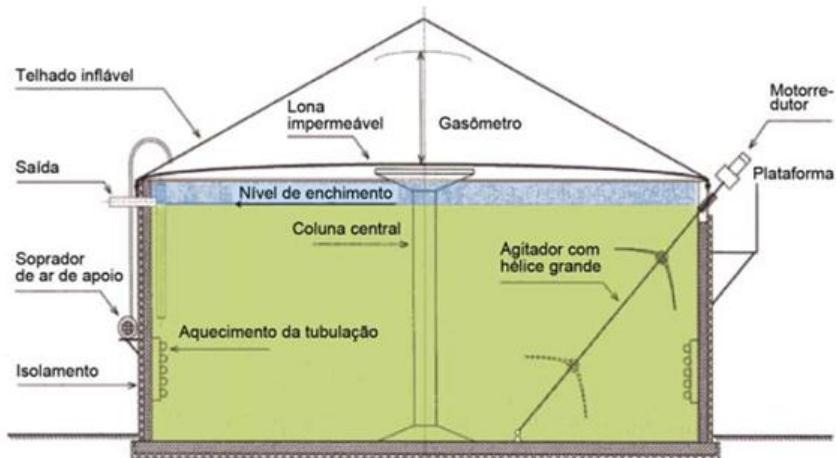
Fonte: Nishimura (2009)

Figura 2 - Biodigestor modelo indiano



Fonte: Nishimura (2009)

Figura 3 - Biodigestor modelo chinês

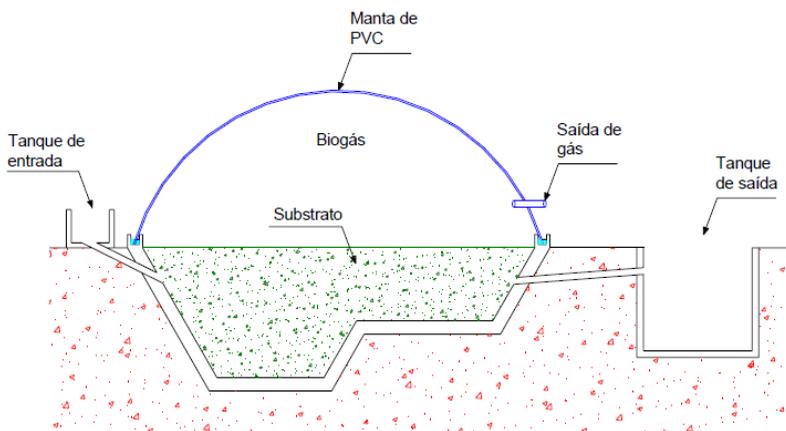


Fonte: FNR (2010)

Figura 4 - Biodigestor modelo mistura completa

2.3.1.4 Modelo Canadense

Na suinocultura, principalmente nas propriedades rurais no sul do Brasil, o modelo de biodigestor mais utilizado é o Canadense ou lagoa coberta, como ilustra a Figura 5.



Fonte: Nishimura (2009)

Figura 5 - Biodigestor modelo canadense

Este modelo é constituído por uma caixa de entrada, para onde são canalizados os dejetos provenientes dos galpões; uma câmara de fermentação subterrânea revestida com lona plástica; uma manta superior também plástica, para reter o biogás produzido de modo a formar uma campânula de armazenamento; e uma caixa de saída, onde o já chamado biofertilizante é canalizado para um tanque de armazenamento (MARQUES, 2012).

2.3.2 Parâmetros de projeto e operação

Geralmente, a construção de uma planta de biogás prioriza aspectos econômicos, uma vez que um máximo rendimento de gás necessitaria um biodigestor muito grande. Assim, procura-se obter uma capacidade adequada de decomposição á um custo aceitável.

2.3.2.1 Tempo de Retenção Hidráulica TRH

O TRH representa o tempo médio que o substrato irá permanecer dentro do biodigestor, isto é, o tempo entre a entrada e a saída. O tempo de retenção é o principal fator de avaliação do desempenho e eficiência de um biodigestor. Para digestor contínuo, recomenda-se adotar tempos de retenção de 20 a 30 dias (NOGUEIRA, 1986 apud HENN, 2005).

Para fermentação de dejetos de suínos, o tempo de retenção em temperatura mesofílica, varia de 15-25 dias (KOSSMANN, 1999).

O TRH adotado no Brasil, por várias empresas de projetos de biodigestores, situa-se entre 22 e 30 dias (OLIVEIRA 2005).

2.3.2.2 Volume

O volume do biodigestor está diretamente ligado ao TRH. No caso de dejetos suínos, ele é dado pela multiplicação do volume de dejetos produzido por dia e o TRH.

2.3.2.3 Agitação

Para se obter um nível elevado de produção de biogás, é necessário um contato intenso entre as bactérias e o substrato, o que pode ser obtido com a agitação no biodigestor (KALTSCHMITT, 2001 apud FNR, 2010).

A formação de zonas de curto circuito e o isolamento das bactérias de contato com a mistura em biodigestão são fatores que

diminuem a eficiência do sistema e contribuem para o assoreamento precoce do biodigestor e redução de sua vida útil. A agitação da biomassa no biodigestor pode amenizar estes problemas (LA FARGE, 1995).

Segundo Oliveira (2004), para aumentar a eficiência (velocidade) da digestão anaeróbia "high rate digesters", o processo convencional pode ser dotado de um sistema de agitação (hélice ou circulação com bomba hidráulica) e de um sistema de aquecimento da biomassa, o que permite reduzir o tempo de retenção, para 10 a 20 dias e aumentar significativamente a produção de biogás.

Alguns substratos e diversos modos de fermentação requerem agitação ou mistura para manter a estabilidade do processo dentro do digestor com objetivo de (KOSSMANN, 1999):

- Remover metabólitos produzidos (gás);
- Misturar o substrato fresco com a população bacteriana;
- Prevenir contra a formação de crosta e sedimento;
- Evitar gradientes pronunciados de temperatura dentro do digestor;
- Prevenir contra a formação de zonas mortas, que reduzem o volume de fermentação efetiva.

2.3.2.4 Aquecimento

A temperatura da biomassa e sua estabilidade são fatores determinantes na quantidade de biogás produzida. Dessa forma, para o bom funcionamento de uma PGEB, principalmente em regiões de clima frio, é necessário o aquecimento do biodigestor.

Este ponto é bastante crítico, pois nos meses de inverno é que se apresenta uma maior demanda por energia térmica e uma tendência dos biodigestores em produzirem volumes menores de biogás causados pelas baixas temperaturas (OLIVEIRA & HIGARASHI, 2006).

Segundo Jäkel (1998) apud FNR (2010) vários fatores podem provocar variações de temperatura no digestor, entre eles:

- alimentação do substrato fresco;
- formação de camadas ou zonas de temperatura em função do isolamento térmico insuficiente ou mau dimensionamento do sistema de aquecimento;
- agitação insuficiente;
- posição dos elementos de aquecimento;
- temperaturas extremas no verão e inverno;
- falha nos equipamentos;

O aquecimento pode ocorrer por meio de trocadores de calor ou elementos de aquecimento externos ou internos ao digestor.

Os elementos de aquecimento internos ao digestor elevam a temperatura do substrato em fermentação.

Trocadores de calor externos aquecem o substrato antes da introdução no digestor, evitando assim oscilação de temperatura causada pelo fluxo de entrada. No uso desta técnica, deve-se realizar a recirculação contínua do substrato pelo trocador de calor, ou utilizar um aquecedor extra no digestor, a fim de manter a temperatura em seu interior constante.

Geralmente a energia térmica necessária para aquecer o biodigestor é proveniente do uso da cogeração, onde a energia térmica produzida na geração de energia elétrica é aproveitada.

A Figura 6 ilustra diferentes sistemas de aquecimento em biodigestores.



Fonte: FNR (2010)

Figura 6 - Diferentes sistemas de aquecimento em biodigestores

Axaopoulos et al. (2001) propuseram o aquecimento de um biodigestor enterrado, de dejetos suínos, utilizando coletores solares sobre o digestor para aquecer água até 44°C. O calor era entregue ao substrato por meio de um trocador de calor interno. A configuração dos coletores sobre o digestor diminuiu a perda térmica do biogás para o ar ambiente e o sistema proposto foi capaz de manter a temperatura do substrato entre 32 e 34°C para uma temperatura ambiente variando de 16 até 32°C.

Em um caso de estudo numa fazenda com 850 vacas leiteiras no estado de Nova Iorque nos Estados Unidos, Gooch & Pronto (2008) relataram que o digestor era aquecido por um boiler que fornecia água quente a temperatura de 51°C para manter o substrato a aproximadamente 38°C. O boiler é alimentado por uma fração do biogás e pelo calor recuperado dos gases de exaustão de uma micro turbina a gás de 70 kW.

Numa fazenda com 5000 suínos no estado do Colorado nos Estados Unidos, o biodigestor é mantido aquecido com a circulação de água quente entrando a 43°C, proveniente da cogeração com um motor de combustão interna de 100 kW e uma microturbina de 30 kW (EPA, 2002).

2.3.2.5 Perda térmica do biodigestor

Para que parâmetros técnicos e econômicos, sejam determinados, é fundamental que as perdas térmicas do biodigestor sejam conhecidas. Nesse sentido, vários pesquisadores desenvolveram modelos matemáticos para prever a troca térmica em biodigestores.

Wu et al. (2006) desenvolveram um modelo matemático tridimensional para simular a transferência de calor em biodigestores enterrados, de diferentes geometrias a fim de determinar a que tivesse menor perda térmica. Os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais obtidos em um biodigestor do tipo plug-flow e se mostraram razoavelmente similares. Uma análise de sensibilidade para as perdas de calor através do teto, piso e paredes foi realizada e a geometria cilíndrica com topo plano se mostrou a com menor perda térmica. No estudo pode-se observar ainda que a maior perda térmica ocorre na superfície superior do digestor, seguida das paredes e do piso.

Um modelo matemático unidimensional para prever a temperatura do substrato, foi proposto por Parrigault et al. (2012) para avaliar o desempenho de um biodigestor tubular enterrado, protegido por uma estufa, e isolado com palha nas paredes e no piso. Obteve-se uma temperatura média de 24,5°C com amplitude de 6°C para o substrato perante uma temperatura ambiente variando de 10 até 30°C. Foram considerados os fenômenos de radiação, condução e convecção entre todos os elementos do sistema. O modelo matemático foi verificado com dados experimentais obtendo-se um erro de 2% na temperatura prevista para o substrato.

Axaopoulos et al. (2001) desenvolveram um modelo matemático para simular a temperatura do substrato e do biogás em um digestor enterrado com aquecimento solar. Foi considerado um balanço energético dependente do tempo, incluindo a energia entregue ao substrato, perda de calor na superfície do substrato por convecção e radiação, perda de calor para as paredes e para o piso, troca de calor pela cobertura e energia perdida para o substrato que entra. As temperaturas previstas foram muito próximas às medidas.

2.4 O BIOGÁS

Devido às baixas concentrações de outros gases que não o metano e o gás carbônico, pode-se restringir as propriedades físico-químicas a esses dois. Porém, gases como por exemplo, o gás sulfídrico, influenciam na escolha da tecnologia de operação, limpeza e combustão (PECORA, 2006).

O principal componente do biogás é o metano, o qual é o componente combustível. A presença de substâncias não combustíveis no biogás (água, dióxido de carbono) prejudica o processo de queima tornando-o menos eficiente. Estas substâncias absorvem parte da energia gerada no processo e alteram a química da combustão. O poder calorífico do biogás se torna menor à medida que se eleva a concentração das espécies químicas inertes. Segundo Yura (2006), o poder calorífico do biogás varia de 5.000 a 7.000 kcal/Nm³, dependendo da quantidade de metano presente na mistura.

A Tabela 4 apresenta a equivalência energética do biogás com outros combustíveis.

Tabela 4 – Equivalência de 1 Nm³ de biogás com outros energéticos

Energético	Quantidade equivalente a 1 Nm³ de biogás
Gasolina	0,613 L
Querosene	0,579 L
Diesel	0,553 L
GLP	0,454 kg
Álcool	0,79 L
Carvão mineral	0,735 kg
Lenha	1,538 kg
Energia elétrica (Máquina térmica com 22% de eficiência)	1,428 kWh

Fonte: Sganzerla (1983) apud Nishimura (2009)

Sendo um gás combustível, o biogás pode ser utilizado em diversas atividades domésticas e rurais. Dos usos finais do biogás, a combustão direta e a operação de motores de combustão interna (MCI) são os mais comuns (DIAZ, 2006). Na Tabela 5 é mostrado o consumo de biogás em diferentes usos.

Tabela 5 - Consumo de biogás de acordo com sua utilização

Utilização	Consumo
Fogão	0,33 Nm ³ /dia.pessoa
Lampião	0,12 Nm ³ /h
Chuveiro	0,8 Nm ³ /banho
Motor de combustão interna	0,45 Nm ³ /hp.h
Aquecimento de água a 100 °C	0,08 Nm ³ /L
Incubadora	0,71Nm ³ /m ³ de volume interno.h
Geração de energia elétrica	0,62 Nm ³ /kWh

Fonte: CETEC (1982) apud Nishimura (2009)

2.4.1 O biogás como combustível em MCI

Mitzlaff (1988) descreve algumas propriedades do biogás que possuem efeitos importantes no seu processo de combustão em motores, tais como:

- Misturas de ar e biogás com menos de 5% ou mais de 15% de metano em volume na mistura terão dificuldades de ignição;
- A velocidade de chama do biogás depende, entre outros fatores, da quantidade de metano na mistura ar/biogás. Para uma pressão de 1 bar e temperatura de 298 K, a velocidade de chama é 0,20 m/s para 7% de CH₄, 0,36 m/s para 10% de CH₄ e 0,20 m/s para 13% de CH₄;
- A velocidade de chama é máxima próximo a razão ar/combustível estequiométrica, mais especificamente para lambda entre 0,8 e 0,9, crescendo rapidamente com o aumento da temperatura e pressão;
- A temperatura de auto-ignição do metano em uma mistura com o ar pode variar entre 645°C a 750°C, o que corresponde a uma razão de compressão entre 15 e 20. A quantidade de CO₂ no biogás diminui a temperatura de auto-ignição e aumenta a taxa de compressão possível;
- biogás apresenta um alto número de metano (130 para 70% de CH₄) quando comparado com o metano (100), butano (10) e o propano (33,5);
- Relação ar/combustível estequiométrica para o metano é de 17,16 kg ar/kg CH₄;

2.4.2 Condicionamento

A presença de vapor d'água, e gases corrosivos como o sulfeto de hidrogênio (H_2S) no biogás, constitui-se no principal problema para a viabilização do seu armazenamento e uso na produção de energia. Equipamentos mais sofisticados, como micro turbinas, motores de combustão interna e compressores têm sua vida útil extremamente reduzida. A remoção destas substâncias indesejadas é imprescindível para a viabilidade do seu uso a longo prazo. Plantas de biogás, normalmente realizam a dessulfurização e a secagem do gás gerado. Adicionalmente, pode ser de interesse também a remoção do dióxido de carbono para a obtenção do biometano. Na utilização do biogás proveniente de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto, faz-se necessário também a remoção de siloxanos.

2.4.2.1 Remoção de vapor d'água

A remoção da água deve ser realizada a fim de se proteger os equipamentos e aumentar seu poder calorífico.

A quantidade de água que o biogás pode absorver depende de sua temperatura. No biodigestor, o biogás se encontra completamente saturado (umidade relativa 100%).

Além de reduzir o poder calorífico, a elevada umidade no biogás pode causar problemas com a condensação nas tubulações de gás e nos motores, podendo-se combinar com o H_2S e formar ácido sulfúrico, que pode causar graves corrosões aos componentes de aço.

A secagem do biogás pode se dar por condensação, adsorção e absorção.

Secagem por condensação

Este processo constitui-se no resfriamento do biogás abaixo do seu ponto de orvalho. O resfriamento é frequentemente realizado na tubulação de gás, que deve possuir certa inclinação e um purgador para o condensado no ponto mais baixo da tubulação. Tubulações enterradas facilitam o processo. É necessário que a tubulação seja suficientemente longa e o acesso aos purgadores seja facilitado.

Resfriamento adicional pode ser obtido com a compressão e o uso de trocadores de calor com água fria. Este método, é indicado para qualquer vazão, permite pontos de orvalho de 3 a 5°C e umidade de até 0,15% em volume, obtendo significativa redução quando comparado a concentração original de 3,1% a 30°C. Este processo atualmente

representa o estado da técnica, porém não satisfaz completamente os critérios para injeção de biometano na rede (URBAN et.al., 2008 apud FNR, 2010).

Secagem por adsorção

Este processo faz uso de zeólitos, gel de sílica ou óxido de alumínio. Instalados em um leito fixo, os adsorvedores são operados a uma pressão variável de 6 a 10 bar podendo atingir pontos de orvalho de até -90°C . Se destinam a vazões pequenas e médias e podem ser regenerados a quente ou a frio (RAMESOHL et al. 2006 ; URBAN et.al., 2008 Apud FNR, 2010).

Secagem por absorção

Neste processo, o biogás flui em contracorrente a uma solução de glicol ou trietilenoglicol, onde são removidos o vapor d'água e hidrocarbonetos superiores, podendo-se atingir pontos de orvalho de -100°C . Sua regeneração se dá pelo aquecimento a 200°C . Este processo é indicado para fluxos mais elevados ($500 \text{ Nm}^3/\text{h}$) e possibilita a injeção de gás na rede de distribuição (FNR, 2006; SCHÖNBUCHER, 2002; URBAN et.al., 2008 Apud FNR, 2010).

2.4.2.2 Remoção de H_2S

O sulfeto de hidrogênio é proveniente da degradação de proteínas e outros compostos de enxofre presentes no dejetos. A concentração de H_2S no biogás depende do substrato utilizado e pode variar de 0,1% até 2% (LASTELLA, 2002 apud WELLINGER, 2013). Geralmente a concentração de H_2S em biogás de dejetos de animais e estações de tratamento de esgoto é maior que no biogás de aterros.

O H_2S é tóxico e altamente corrosivo a vários tipos de aço e precisa ser removido, exceto para simples queima.

Quando não tratado e queimado, o H_2S é convertido em óxidos de enxofre que reagem com a água e formam ácido sulfúrico (H_2SO_4), que oxida componentes metálicos e acidifica o óleo em unidades de cogeração. A reatividade do H_2S é aumentada com a concentração, pressão, umidade e temperaturas elevadas (WELLINGER, 2013).

O sulfeto de hidrogênio deve ser removido, ou pelo menos reduzido para níveis abaixo de 1.000 ppm (0,1% em volume) para prevenir a corrosão em caldeiras e para níveis entre 100 – 500 mg/Nm^3 (0,01% - 0,05% em volume), para prevenir danos em unidade de

cogeração e demais equipamentos. Para uma operação livre de problemas, o nível residual de H_2S deve ser menos que 20 mg/Nm^3 (0,002% em volume).

Existem inúmeros processos de remoção de H_2S do biogás, dividindo-se em biológicos, físicos e químicos. Os mais utilizados na prática são a biodessulfurização, remoção com óxido de ferro e remoção com carvão ativado.

Biodessulfurização

Nesta técnica, é injetado ar no biodigestor de 3 a 6% em volume da quantidade de biogás produzida. As bactérias facultativas *Sulfobacter oxydans* consomem o oxigênio e converte o sulfeto de hidrogênio em enxofre elementar, que em seguida é descarregado do reator com os biofertilizantes. É por essa razão que o oxigênio do ar introduzido no gasômetro do biodigestor para a biodessulfurização não tem impacto negativo sobre a formação de metano (FNR, 2010).

É indicado para a desulfurização grossa, ou seja quando há altas concentrações de H_2S . A qualidade obtida é em geral suficiente para o uso na cogeração, chegando-se a obter remoções de até 95% de H_2S (WELLINGER, 2013).

As principais vantagens são o baixo custo, a não exigência de produtos químicos, ser de baixa manutenção e pouco sujeito a falhas.

Tem como desvantagens a redução do poder calorífico devido ao aumento da concentração de nitrogênio, influência da temperatura, possibilidade de oxidação do metano e o risco da formação de uma mistura explosiva.

Remoção com óxido de ferro

Neste processo, o biogás atravessa uma torre com preenchimento de *pellets* de óxidos de ferro (Fe_2O_3) para a remoção do Sulfeto de Hidrogênio. O gás é injetado na base da coluna e à medida que o gás circula pela torre o Sulfeto de Hidrogênio vai ficando retido pela reação com o óxido de ferro. Quando estes *pellets* estão completamente saturados por enxofre, basta expor ao oxigênio para completa regeneração do óxido de ferro. É indicado para a dessulfurização fina, quando a concentração de H_2S não é muito alta. Este processo é muito utilizado devido ao baixo custo e a simplicidade do mesmo (HASS, 2013).

Remoção com carvão ativado

Neste método ocorre a adsorção em carvão impregnado geralmente por iodeto de potássio ou carbonato de potássio baseado na oxidação catalítica do sulfeto de hidrogênio. Para uma adequada remoção, é necessária a presença de vapor d'água e oxigênio. No uso em gases isentos de ar é indicado o carvão ativado dopado com permanganato de potássio. É indicado para a dessulfurização fina, quando a concentração de H_2S não é muito alta possibilitando obter valores menores que 4 ppm. Tem como desvantagem o custo mais elevado e a necessidade do descarte (FNR, 2010).

2.4.2.3 Siloxanos

Os Siloxanos são um subgrupo de compostos de sílica que contém ligações Si-O com radicais orgânicos ligados a molécula de sílica incluindo grupos metilo e etilo, entre outros. Estes compostos são muito utilizados em vários processos industriais e frequentemente adicionados a produtos de consumo (xampus, pastas de dentes, cremes, detergentes, produtos de papel, tintas, óleos, etc), sendo muitas vezes o destino final as águas residuais e/ou aterros sanitários (ATLAS SEIS, 2015).

Os Siloxanos não são decompostos, e durante a digestão anaeróbia, volatilizam e acabam por permanecer no biogás. Durante a combustão do biogás, os siloxanos são convertidos em compostos de sílica microcristalina (SiO_2), um resíduo com propriedades químicas e físicas similares ao vidro cuja dureza leva à abrasão das superfícies dos motores (ACCETTOLA et al., 2008 apud WELLINGER, 2013). Os compostos voláteis de sílica incrustam-se nos motores como observado na Figura 7, turbinas e caldeiras, contribuindo para uma deterioração e mau funcionamento dos equipamentos.

Depósitos de silicato podem resultar também na diminuição da eficiência de trocadores de calor devido à incrustação e causar abrasão nas pás de turbinas a gás. O limite de siloxanos em microturbinas é menos que 10 ppb (ACCETTOLA et al., 2008 apud WELLINGER, 2013).



Fonte: Atlas Seis (2015)

Figura 7 - Incrustação provocada por compostos de sílica

Remoção de siloxanos

Siloxanos podem ser removidos através de adsorção em carvão ativado, alumina ativada e sílica gel. Uma quantidade significativa de siloxanos (90 – 95%) pode ser removida juntamente com a umidade quando o biogás é secado a -23°C . Carvão ativado seguido por um secador de gás pode apresentar um bom custo benefício na remoção de siloxanos. Resfriar o gás a 5°C reduz a umidade e aproximadamente 30 a 40% dos siloxanos (WELLINGER, 2013).

2.5 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM BIOGÁS

Existem diversas formas de produzir energia elétrica a partir do biogás sendo as mais comuns a queima em combustores de turbinas a gás e geração de potência segundo o ciclo Brayton, a queima em caldeiras para a produção de vapor e geração de potência em turbinas a vapor segundo o ciclo de Rankine, e a queima em motores de combustão interna para produzir potência segundo o ciclo Otto ou Diesel. Cada uma delas tem um rendimento térmico e elétrico característico, sendo a sua

aplicação condicionada a fatores tais como, tamanho, vida útil, qualidade e quantidade do combustível, demanda térmica e elétrica. Pode ainda existir a combinação delas, como é o caso do ciclo combinado.

2.5.1 Micro turbina a gás

Microturbinas a gás ou microturbinas (MT) são pequenas turbinas a gás de alta rotação e baixa temperatura e pressão de combustão, com potência elétrica variando de 25 até 200 kW. As MT podem funcionar com uma variedade de combustíveis, incluindo gás natural, biogás, gás de síntese, biodiesel e querosene.

Uma rotação de aproximadamente 96.000 RPM gera uma corrente elétrica alternada de alta frequência, a qual é retificada e processada por um inversor de frequência para ser injetada na rede de energia elétrica, o que elimina a necessidade de caixas de redução e qualquer parte móvel associada (ROSSA, 2007).

O uso de MT é crescente em aplicações com biogás, especialmente em plantas de tratamento de águas residuais, fazendas e aterros.

O calor residual dos gases de exaustão pode ser aproveitado em sistemas de cogeração, tanto para aquecimento quanto para refrigeração.

A eficiência elétrica é muito sensível a variações nas condições ambientais como temperatura, pressão e umidade relativa do ar (RÜCKER, 2004).

2.5.1.1 O uso do biogás em microturbinas à gás

O uso do biogás em microturbinas exige certas adaptações da câmara de combustão e dos bicos de injeção de combustível, em comparação com a operação com gás natural (DIELMANN, 2001 apud FNR, 2010).

Como o biogás tem de ser inserido na câmara de combustão da microturbina a gás, a qual se encontra a uma sobre pressão de 10 a 15 bar, é necessário um aumento da pressão do gás na alimentação. Além da pressão da câmara de combustão, devem ser consideradas perdas de pressão devidas aos escoamentos na tubulação de gás, válvulas e queimador, de forma que a sobre pressão deve ser de pelo menos 6 bar em relação à pressão atmosférica para vencer essas perdas de carga. Para essa finalidade, a montante da microturbina a gás é instalado um compressor.

Substâncias concomitantes no biogás (principalmente água e siloxanos) podem danificar a microturbina a gás, sendo, portanto necessária à secagem e filtragem do gás. No quesito teor de enxofre, as microturbinas a gás têm uma tolerância maior que MCI. Microturbinas a gás são capazes de processar biogás com teores de metano de 35% a 100%.

Os intervalos de manutenção são sensivelmente mais longos que os de motores, ao menos no caso de microturbinas movidas a gás natural. Conforme dados dos fabricantes, o intervalo de manutenção é de 8.000 horas e a vida útil é de aproximadamente 80.000 horas. Após cerca de 40.000 horas está prevista uma revisão geral com substituição da seção de ar quente.

As microturbinas têm como desvantagem a eficiência elétrica relativamente baixa, mal atingindo 30%. Esse valor, relativamente baixo em relação aos motores convencionais, é compensado pelo bom comportamento a cargas parciais (50% - 100%). Os custos de investimento são de 15% a 20% superiores aos de motores de potência equivalente destinados a aplicações de biogás (FNR, 2010).

2.5.1.2 Exemplos de aplicação

Em estudo comparativo entre uma MT e um motogerador, ambos na faixa de potência de 30 kW, utilizando biogás de uma estação de tratamento de esgoto, Costa (2006) concluiu que:

- É possível atender as especificações técnicas exigidas para a utilização do biogás de ETE em microturbinas sem maiores dificuldades;
- A grande vantagem na utilização de MT é ambiental, pois a emissão de NO_x por esta (<9ppm) é substancialmente menor que MCI com ciclo Otto (~3000 ppm);
- Análise financeira é extremamente desfavorável para a MT, pois esta necessita um tratamento e compressão do biogás, enquanto o MCI pode fazer uso do biogás “in natura” sem a necessidade da compressão;
- Dificuldades para efetuar manutenções nos equipamentos de tratamento e compressão do gás, principalmente pela indisponibilidade de peças de reposição;

Durante o período de realização de seu trabalho, ambos os equipamentos estavam fora de operação. A MT devido a problemas com

o compressor de biogás e o grupo gerador devido a problemas no sistema de mistura ar/combustível.

Costa (2006) comenta ainda que ocorreram diversos problemas no funcionamento do motogerador, o que impediu a obtenção de resultados mais consistentes, e demonstrou a não confiabilidade do equipamento nacional adquirido.

É importante ressaltar que a afirmação de que o MCI pode fazer uso do biogás “in natura” é baseada em informações do fabricante, e não é possível afirmar que o MCI terá a vida útil estabelecida.

Na prática, para aumentar a vida útil dos MCI, é necessário o tratamento do biogás.

Singh et al (2014) analisaram o desempenho de uma planta de geração de energia elétrica a biogás de dejetos animais em uma fazenda com 300 vacas leiteiras na Índia desde o comissionamento em 2007 até março de 2013. A produção diária de dejetos era de 6.000 kg, porém eram usados somente 2.500 kg que eram misturados a 2,5 m³ de água para alimentar o biodigestor tubular (canadense) de 125 m³ que não era agitado nem aquecido.

A planta possuía duas microturbinas Capstone de 30 kW cada, sendo que uma ficava em *stand-by*. O biogás era resfriado a 21°C, desumidificado, comprimido por um compressor a parafuso e resfriado novamente. Em seguida o H₂S era removido e o biogás entrava na MT a 5 bar. Dessa forma os operadores nunca tiveram problemas com a MT, porém outros problemas foram reportados, como o reparo do compressor de biogás por três vezes, vazamento de gás no digestor e a queima de fusíveis da MT e troca do glicol usado na filtragem do biogás, difíceis de serem encontrados na região.

O principal problema reportado foi a gradual queda na produção de biogás. No início, uma microturbina com carga média de 25 kW funcionava entre 6 e 7 horas por dia produzindo em média 160 kWh. É importante ressaltar que 8 kW eram necessários no condicionamento do biogás, produzindo uma potência líquida de 17 kW. Atualmente a MT funciona apenas 1 hora por dia.

A queda gradual na produção de biogás foi devida principalmente a falta de aquecimento e agitação, que provocou o assoreamento e a formação de regiões de estagnação com o conseqüente curto circuito do biodigestor fazendo com que o tempo de residência fosse menor que o TRH projetado e o efluente apresentasse grandes quantidades de sólidos orgânicos voláteis não digeridos.

2.5.2 Uso do biogás em caldeiras/turbinas a vapor

A produção de calor em caldeiras e aquecedores é o jeito mais comum e simples de usar o biogás. A eficiência de conversão na produção de calor a partir do biogás é normalmente de 75 – 85% (WELLINGER, 2013). Caldeiras usadas para o gás natural podem ser adaptadas para usar biogás, mudando-se a relação ar/combustível e aumentando os orifícios dos queimadores. São necessárias também mudanças para lidar com a maior vazão do biogás, necessária devido ao menor conteúdo energético em relação ao gás natural.

Este tipo de aplicação pode utilizar um biogás de baixa qualidade, porém é necessária a operação a temperaturas acima de ponto de orvalho para evitar a condensação da água. Para prevenir a corrosão devido ao H_2S , todas as superfícies críticas precisam ser revestidas.

Embora apresentem uma série de vantagens sobre os demais combustíveis, não é viável o uso de gases na geração de vapor, a não ser nos casos em que haja a disponibilidade do produto a custos compensadores (BAZZO, 1995).

Devido principalmente ao tamanho não adequado às usinas de biogás, é raro encontrar turbinas a vapor utilizando biogás como combustível. Embora esta seria uma alternativa adequada para a utilização de biogás sem tratamento, principalmente devido ao fato de ser uma máquina de combustão externa, apresentar rendimentos satisfatórios, com baixa manutenção e elevada vida útil. A longo prazo, esta pode ser uma alternativa competitiva se comparada a turbinas a gás e motores de combustão interna. Desenvolvimentos tecnológicos recentes tem se dedicado a redução do tamanho e aumento da eficiência de turbinas a vapor, o que pode levar ao uso mais frequente dessa tecnologia.

2.5.3 Ciclo combinado

Geralmente em aplicações com biogás, as turbinas a vapor estão associadas a turbinas a gás formando o ciclo combinado. O calor necessário para a produção de vapor é proveniente dos gases de exaustão da turbina a gás. Essas aplicações visam a máxima produção de energia elétrica, e podem chegar a eficiências elétricas superiores a 50%.

Uma alternativa recente, disponível no mercado internacional, são as turbinas a vapor que fazem uso do chamado ciclo orgânico de Rankine (ORC). Neste ciclo, o fluido de trabalho é um fluido orgânico. Geralmente são escolhidos fluidos secos ou isentrópicos, pois estes

fluidos não necessitam superaquecimento para alcançar aceitáveis eficiências na recuperação de calor, o que permite o aproveitamento de rejeitos térmicos a temperaturas mais baixas. Estudos recentes mostram que fluidos orgânicos tem uma performance melhor do que a água em converter calor de baixa temperatura em trabalho útil (MAGO et al., 2011).

Turbinas a vapor que fazem o uso do ORC estão disponíveis em tamanhos menores que as turbinas convencionais, e são ideais para utilização no ciclo combinado com microturbinas a gás.

Mago et al. (2011) estudaram o possível aumento da eficiência elétrica com o uso do ORC em três MT com potência entre 30 e 200 kW utilizando quatro diferentes fluidos de trabalho. No estudo chegou-se a obter um incremento médio de 27% na eficiência elétrica utilizando R113 como fluido de trabalho, alcançando eficiências elétricas próximas a 65%. O estudo demonstra o potencial do uso do ciclo combinado para plantas de biogás.

Tanto as MT como o ORC são tecnologias caras e sem produção nacional, o que praticamente inviabiliza o seu uso no Brasil.

Vale ressaltar que o ORC também pode ser utilizado na recuperação de calor dos gases de exaustão de motores de combustão interna.

2.5.4 Motores de combustão interna (MCI)

A produção de energia elétrica a partir do biogás pode ser feita com MCI ciclo Otto ou Diesel. No ciclo Otto, a mistura ar/biogás entra em ignição com o auxílio da vela de ignição. No ciclo Diesel, a mistura ar/biogás sofre ignição devido à injeção piloto de diesel sobre a mistura a alta pressão e temperatura. A quantidade injetada varia de 10 e 20% quando comparada ao uso do motor somente com diesel (MITZLAFF, 1988).

Este trabalho, concentra-se em MCI ciclo Otto por equiparem mais de dois terços de novas plantas à biogás no mundo (FNR, 2010) .

As principais características dos MCI para geração de energia elétrica são (WELLINGER, 2013; FNR, 2010; ORLANDO, 1996):

- Possibilidade da utilização de diversos tipos de combustíveis, tanto líquidos quanto gasosos, o que os torna muito flexíveis;
- Bem adaptados para pequenas e médias demandas elétricas, desde poucos kW até dezenas de MW;
- Maior eficiência elétrica que outros acionadores primários;

- Eficiência elétrica é menos susceptível às condições ambientais do que as MT;
- Possibilita instalações modulares e flexíveis, com tempo de construção curto e rápido *start-up*;
- Apropriados para condições de partida e parada diárias;
- Alta relação potência/peso;
- Eficiência de 30 a 40% crescendo com o tamanho do motor;
- Necessita manutenções mais frequentes;
- Dependendo do tipo de motor, pode chegar a uma vida útil de 60.000 horas;
- Custo relativamente baixo comparado às outras alternativas;

2.5.4.1 O uso de biogás nos MCI

Existe uma série de características desejáveis para um MCI à biogás e sua operação, muito importantes para que este apresente a maior eficiência elétrica e durabilidade possível. Entre elas podemos citar (MITZLAFF, 1988):

- Concentrações de H_2S abaixo de 100 ppm;
- Redução da umidade do biogás;
- Remoção de siloxanos;
- Concentração mínima de metano de 45%;
- Taxa de compressão entre 12 e 14;
- Uso de turbo compressores;
- Controle eletrônico do ponto de ignição para lidar com a concentração variável de CH_4 ;
- Sistema de ignição de alta energia;
- Controle preciso da mistura ar/combustível;
- Trabalhar com excesso de ar para uma maior economia de combustível;
- Sede de válvula de material mais resistente ao atrito;
- Proteção/substituição de materiais susceptíveis a corrosão por H_2S ;
- Uso de óleo lubrificante que mantenha alta alcalinidade por longos períodos;
- Grande reservatório de óleo para prover uma maior capacidade de diluição de impurezas;
- Controle de velocidade rápido e com baixo sobre sinal;

Atualmente, a grande maioria das PGEs, localizadas principalmente na Alemanha, utiliza MCI ciclo Otto derivado de motores desenvolvidos para utilizar gás natural com potência entre 50 e 600 kW. Com pouca ou nenhuma modificação, esses motores são aptos a funcionar com o biogás de baixo teor de enxofre, atingindo eficiências elétricas entre 34 e 42% e vida útil de 60.000 horas (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008). Essas plantas geralmente fazem cogeração e utilizam culturas energéticas como substrato, o que proporciona uma produção de biogás 10 vezes maior que com dejetos de suínos. Isso faz com que o tamanho médio das plantas também seja maior e conseqüentemente a potência dos geradores. É raro encontrar motores para biogás menores que 50 kW.

No Brasil, não existe fabricantes de motores específicos para biogás. O que existe, são empresas que utilizam motores ciclo Otto originalmente a gasolina, flex ou diesel adaptados.

Em sua grande maioria, as empresas brasileiras de grupos geradores a biogás, utilizam motores originalmente projetados para óleo diesel convertidos para o ciclo Otto. Essa conversão normalmente envolve a substituição dos bicos injetores de diesel por velas de ignição, adoção de um sistema de ignição e um sistema de controle de velocidade e mistura ar/combustível. Caso a taxa de compressão seja muito alta, é necessário também reduzi-la, o que geralmente não é necessário devido ao número de metano elevado do biogás.

O uso de motores a Diesel “ottolizados” tem obtido sucesso, principalmente por dispor da maior robustez de um motor a diesel e uma alta taxa de compressão, requisitos necessários para um motogerador a biogás.

2.5.4.2 Exemplos de aplicação

OLIVEIRA & HIGARASHI (2006) demonstraram a possibilidade da utilização do biogás produzido num biodigestor canadense de 300 m³, TRH de 35 dias e alimentado com dejetos de uma granja UPL de 200 matrizes na produção de energia elétrica através do uso de um motor ciclo Otto de 2 litros, originalmente a gasolina e adaptado para biogás. A remoção da umidade foi feita por condensação na tubulação de gás, e a filtragem do H₂S com um filtro de limalha de ferro. A potência do gerador era de aproximadamente 35 kW e apresentou um consumo médio de 22 Nm³/h. A carga instalada na propriedade era aproximadamente 30,5 kW. A geração de biogás foi

estimada em 150 Nm³/dia, o que permitia o grupo gerador funcionar entre 4 e 6 horas diárias.

MARQUES (2012) avaliou a produção de biogás e energia elétrica a partir de dejetos suínos utilizando um grupo gerador com motor Diesel “ottolizado”. A granja contava com dois biodigestores com TRH de 30 dias, um de 876 m³ e outro de 219 m³. O número médio de animais em terminação e a produção de biogás foram de 4.762 e 553 m³/dia, respectivamente. O motogerador de 76 kW foi capaz de funcionar 10 horas diárias em média com um consumo específico de 0,68 Nm³/kWh e eficiência elétrica de 22,21%. O autor concluiu que a produção de eletricidade na propriedade é inviável, pois o custo da energia foi de 0,45 R\$/kWh e o valor pago pela concessionária para a energia excedente era 0,14 R\$/kWh.

Dentre as demais tecnologias para a conversão do biogás em energia elétrica estão os motores Stirling e as células a combustível, porém elas não serão contempladas no trabalho.

Ressalta-se que as células a combustível podem vir a ser uma alternativa viável para a produção eficiente de energia elétrica a biogás em pequenas plantas, alcançando eficiências elétricas próximas a 60%.

Devido principalmente ao tamanho médio das propriedades na população em estudo, a maior disponibilidade no mercado e o menor custo, este trabalho considera a geração de energia elétrica utilizando apenas MCI ciclo Otto.

2.5.5 Cogeração a biogás

A maioria das PGEB no mundo faz a cogeração. Cogeração é a produção simultânea de energia elétrica (EE) e energia térmica (ET) útil a partir de uma mesma fonte de energia primária (ORLANDO, 1996). O uso da cogeração implica no uso mais eficiente da energia primária e menor consumo de combustível do que quando a geração é feita de forma separada, além de apresentar uma menor emissão de poluentes. As usinas de cogeração podem trabalhar priorizando a produção de energia elétrica ou térmica.

Atualmente, a Alemanha possui o maior número de plantas comerciais de geração de EE a biogás. Normalmente essas plantas geram EE e ET a partir de cogeneradores (CHP*) baseados em MCI à gás

* CHP é um acrônimo para *Combined Heat and Power* que significa cogeração na língua inglesa e é comumente utilizado para designar cogeneradores.

priorizando a EE. A EE é utilizada na própria planta (quando economicamente favorável) e o excedente (maior parte) é vendido para a rede com contratos de longo prazo. A ET é utilizada para aquecer o digestor (20 a 40%), e o excedente pode ser vendido para a vizinhança para fins de aquecimento. A maior demanda de calor ocorre no inverno. Já no verão pode ser necessário um radiador de emergência para eliminar o excesso de calor.

Como o uso de parte da ET é utilizado para aumentar a produção de biogás e dessa forma aumentar a geração de EE, alguns autores consideram que este processo não é cogeração e sim recuperação de calor. Este trabalho considera a utilização da ET para aquecimento do biodigestor como cogeração.

Além do MCI e o gerador, um CHP é composto por trocadores de calor para a recuperação da ET dos gases de exaustão, do circuito de arrefecimento e do óleo lubrificante, dispositivos hidráulicos para a distribuição do calor e dispositivos elétricos de controle e comutação para distribuir a energia e controlar a usina (FNR, 2010).

2.5.5.1 Calor recuperável

A quantidade de calor recuperável depende da velocidade do motor, carga aplicada, regime de combustão (rica ou pobre), fabricante e da estratégia de rejeição de calor (ORLANDO, 1996).

Calor dos gases de exaustão

A temperatura dos gases de exaustão de MCI geralmente varia entre 370°C a 540°C o que permite a utilização para produzir água quente ou vapor. Aproximadamente um terço da energia do combustível é rejeitada nos gases de exaustão, porém, nem toda essa energia pode ser recuperada devido a necessidade de se manter os gases a uma temperatura mínima (~120°C) para que não ocorra a condensação do vapor d'água. O projeto do recuperador de calor dos gases de exaustão deve levar em consideração uma contrapressão máxima de 2,5 a 3 kPa para motores aspirados e 6 a 7,5 kPa para motores turbo alimentados (ORLANDO, 1996).

Calor do arrefecimento

Aproximadamente um terço da energia de entrada no MCI é rejeitada para a água de arrefecimento do motor, e essencialmente todo este calor pode ser recuperado na forma de água quente a temperaturas até 127°C ou vapor de baixa pressão até o limite de 103 kPa (manométrica). A circulação de água é feita por uma bomba externa. A

vazão da água precisa ser ajustada para manter a temperatura de saída e retorno ao motor dentro das especificações do fabricante. Vazões excessivas podem causar erosão dos componentes diminuindo a vida útil e aumentando os custos de manutenção. Para evitar estresse térmico no motor, a diferença de temperatura não deve ser superior a 8°C. Menores diferenças de temperatura resultam em menor estresse térmico, mas em maiores vazões (ORLANDO, 1996).

2.5.5.2 Distribuição de calor

O calor excedente nas usinas de biogás pode ser vendido para a vizinhança através de redes de distribuição de calor. Essas redes são linhas duplas de tubos isolados de aço ou PEAD que transportam a água geralmente a 90°C e retornam com água a 70°C, podendo variar de 4 a 8 km. Essa forma de comercialização é adotada nas chamadas vilas bioenergéticas. A venda da energia térmica pode ser decisiva na viabilidade da planta. Na Alemanha, PGEs que participam das vilas bioenergéticas recebem um bônus de 3 centavos de euro por kWh de EE produzido (FNR, 2010). Na Figura 8 podemos ver uma central de distribuição de energia térmica em construção.



Fonte: o autor (2014)

Figura 8 - Distribuição de calor em vila bioenergética na Alemanha

2.5.5.3 Produção de frio

Outra opção para o aproveitamento da energia térmica é a produção de frio. A geração de frio por meio de ET se dá pelo processo de sorção. O resfriamento pode ser por absorção ou adsorção. O processo mais difundido é a refrigeração por absorção.

Na refrigeração por absorção, o compressor mecânico é substituído por um “compressor térmico” que ao invés de usar EE, usa ET para circular o refrigerante pelo sistema (GOSNEY, 1982 apud RÜCKER, 2004).

A produção de frio pode ser utilizada na própria planta para a remoção de umidade do biogás, bem como para as demandas da propriedade como climatização de ambientes e resfriamento de leite, por exemplo.

2.5.5.4 Estudos relacionados

Segundo Silveira (1994), sistemas de microgeração utilizando motor de combustão interna podem aproveitar de 50 a 70% da energia primária na forma de calor e de 23 a 30% na forma de eletricidade com um rendimento global de 80 a 98% e calor disponível na faixa de temperatura entre 80 e 600°C. O autor coloca ainda que a menor unidade de microgeração com MCI disponível comercialmente a nível mundial na época era de 7 kW e mostra um exemplo utilizando motor Fiat 127 de 903 cc capaz de produzir 15 kW_{el} e 39 kW_t.

Thomas & Deival (1987) apud Silveira (1994), estudaram o uso da cogeração a partir do biogás em uma granja com 3.000 suínos em Taiwan. A granja possui 5 biodigestores com capacidade total de 1.650 m³ e produção de 138 Nm³/h. O PCI do biogás variou de 18 a 26 MJ/Nm³. Foi realizado o balanço energético para três cogeneradores diferentes, um com motor Fiat de 903 cc (totem) e outros dois Diesel – gás usando o sistema Duvant – Crepelle. Os rendimentos médios do motor e global para o totem foi de 27% e 95%, respectivamente. Para os motogeradores Diesel – gás esses valores foram de 37,2% e 77%. Os resultados do balanço energético para o totem estão na Tabela 6.

Tabela 6 - Balanço termodinâmico no totem de 15 kW

Porcentagem de CH ⁴	62	74
PCI (kJ/Nm ³)	22.600	29.031
Consumo de biogás (Nm ³ /h)	8,33	6,51
Energia introduzida (kW)	52,2	52,5
Energia mecânica (kW)	15,2	12,6
Rendimento do motor (%)	29	24
Potência Elétrica (kW)	13,8	11,5
Calor recuperado (kW)	36,8	37,2
Rendimento Global (%)	97	93

Fonte: Thomas & Deival (1987) apud Silveira (1994)

REIS (2006) construiu um sistema compacto de cogeração a gás natural utilizando um MCI ciclo Otto de 1.0 litro, taxa de compressão 9,4, potência e torque máximos de 44 kW e 81 N.m à 6000 rpm. Ao motor, que trabalhava com 20% de excesso de ar, foi acoplado um gerador de 4 pólos e potência de 10 kW produzindo tensão de 220 Volts em 60 Hz para uma velocidade do motor de 1800 rpm. Para o aproveitamento da água de arrefecimento do motor foi utilizado um trocador de calor casco e tubos água/água com efetividade 0,7 responsável por abaixar a temperatura da água do motor de 90°C para 84°C e produzir água quente. O aproveitamento dos gases de exaustão era feito por um trocador de calor casco e tubos água/gás efetividade 0,7 e um refrigerador por absorção amônia/água de 17,4 kW, capaz de produzir água gelada a 7°C. Os gases saíam do motor a 541°C e tinham sua temperatura reduzida no trocador água/gás para os níveis exigidos pelo sistema de absorção (197°C) e lançados na atmosfera a 149°C. O COP obtido para o sistema de refrigeração foi de 0,58 e a eficiência de segunda lei do conjunto foi de 0,23.

Brizi et al. (2014) realizaram uma comparação energética e econômica do uso de gás natural e biogás no funcionamento da unidade compacta de cogeração desenvolvida por Reis (2006). Uma potência elétrica de 13,2 kW e um excesso de ar de 20% foram fixados. O PCI do biogás e do gás natural foram 22.600 kJ/Nm³ e 37.955 kJ/Nm³, respectivamente. Obteve-se um rendimento global de 63% para o biogás e 63,14% para o gás natural. O balanço energético obtido pode ser observado na Tabela 7. Na análise econômica, levando-se em consideração um período de retorno do investimento de 5 anos, o biogás

obteve resultados econômicos melhores, necessitando de uma disponibilidade de 7.000 h/ano para competir com o preço da eletricidade no Brasil (0,07 US\$/kWh). Se o sistema fosse operado na Itália (0,16 US\$/kWh) a disponibilidade necessária cairia para 3.000 h/ano.

Tabela 7 – Balanço energético em microcogrador de 13,2 kW

	Gás Natural	Biogás
Energia primária (kW)	50,71 (100%)	51,29 (100%)
Energia elétrica (kW)	13,20 (26,03%)	13,20 (25,24%)
Calor do arrefecimento (kW)	14,23 (28,06%)	14,23 (27,21%)
Calor dos gases de exaustão (kW)	12,77 (25,18%)	16,04 (30,67%)
Calor perdido (kW)	10,51 (20,73%)	8,82 (16,88%)

Fonte: Brizi et al. (2014)

Godoy Júnior (2002) analisou a viabilidade técnica do aproveitamento de resíduos suínos para acionamento de sistemas de cogeração de energia para produção de água e/ou ar quente para aquecimento dos leitões, água e/ou ar frio para conforto térmico das matrizes e energia elétrica. O autor concluiu que para o conforto térmico das matrizes, um sistema de resfriamento evaporativo é uma alternativa mais eficiente que um sistema por absorção e que sistemas de cogeração a partir dos dejetos de suínos pode levar a uma grande redução de custos energéticos e do impacto ambiental.

A divisão de pesquisa e desenvolvimento da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2002) realizou a verificação da tecnologia ambiental: Sistema de Produção de Energia Elétrica e Térmica a partir de Dejetos Suínos, em uma granja no estado do Colorado com 5.000 suínos. Esta verificação tem por objetivo facilitar o desenvolvimento de tecnologias inovadoras através da verificação de sua performance e disseminação das informações. A granja possui um biodigestor mistura completa enterrado, na forma de cubo com capacidade para 1893 m³ e TRH de 40 dias que produz 601,81 Nm³/dia de biogás com 66,3% de CH₄ em média. O digestor possui dois agitadores que funcionam 30 minutos por dia e é aquecido por uma matriz de tubos de aço de 3 polegadas com comprimento total de aproximadamente 800 metros que mantém o substrato a 40,56°C. O calor para aquecer o biodigestor provém da recuperação de calor dos gases de exaustão de uma microturbina de 30 kW e dos gases de exaustão e arrefecimento de um motor de 100 kW que opera com 35%

A forma descentralizada de gerar energia elétrica é atualmente a forma mais comum e com maior crescimento no mundo, tendo superado a capacidade instalada de sistemas isolados em 1990 (BAZILIAN et al., 2013).

A geração, transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil são reguladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL. Em 2005 a ANEEL publicou a resolução 167/2005, a qual foi o primeiro passo para organizar a GD, mas não garantiu a regulamentação necessária para ocorrer a disseminação em larga escala de pequenos geradores (COIMBRA-ARAÚJO et al., 2014).

Um avanço importante para a GD com biogás a partir de dejetos foi a autorização dada pela ANEEL em agosto de 2008, autorizando a Copel a implantar um projeto piloto que previa a compra da energia excedente produzida a partir de dejetos animais em pequenas propriedades rurais do Paraná. O chamado Programa de Geração Distribuída com Saneamento Ambiental era para evitar que o material resultante da criação de suínos fosse parar em rios e no reservatório da ITAIPU, evitando assim sua eutrofização. O limite da potência instalada nas unidades do programa era de aproximadamente 270 kW e os geradores tinham a energia vendida exclusivamente para a Copel através de chamada pública e por meio de registro simplificado das unidades na ANEEL considerando os princípios da RN 77/2004 que garantia ainda o desconto de 100% na tarifa de uso do sistema de distribuição (MARQUES 2012).

Este avanço é fruto do programa de valorização do biogás com a geração distribuída de energia elétrica do P&D da plataforma ITAIPU de Energias Renováveis. O programa proposto pela ITAIPU considerou que projetos, mesmo empíricos, podem gerar conhecimento, e fez da cultura do “ver para crer” um componente estratégico da difusão de tecnologias, optando-se por implementar plantas de geração de energia elétrica com biogás em diferentes escalas reais em parceria com produtores rurais na região Oeste do Paraná. O primeiro projeto desta parceria foi montado na Granja Colombari em São Miguel do Iguaçu. Na época a granja possuía 3 mil suínos em terminação e já contava com um biodigestor instalado por uma empresa canadense em troca dos créditos de carbono, fruto de um contrato do MDL. A fim de aproveitar o biogás para gerar energia elétrica, o proprietário, por conta própria, instalou um motogerador. Como a estrutura de geração já estava funcionando na granja, o objetivo do projeto foi desenvolver soluções para o monitoramento, controle e proteção do microgerador e da rede elétrica para sincronizar a conexão em paralelo com a rede da

Em 2009 a ANEEL promoveu significativas mudanças na regulação, onde as RNs 390/2009 e 395/2009 mudaram critérios dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST) de energia elétrica e permitiram a conexão com a rede de geradores menores que 1 MW.

Uma chamada pública para captar sugestões para a GD e sua regulação gerou a nota técnica 4/2011 que deu subsídios para a posterior criação da RN 482/2012 que regulamentou a micro e minigeração distribuída no Brasil e criou o sistema de compensação de energia (COIMBRA-ARAÚJO et al., 2014).

2.6.1 Micro e minigeração distribuída

Em 17 de Abril de 2012 a ANEEL publicou a resolução normativa Nº 482 em 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 (SCEE).

Para efeitos da resolução, foram adotadas as seguintes definições (ANEEL, 2012):

I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;

III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração distribuída 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.

Após a publicação da resolução, as empresas distribuidoras de energia tiveram um prazo de 240 dias para elaborar ou revisar normas técnicas para tratar do acesso desses pequenos geradores, tendo como referência a regulamentação vigente, as normas brasileiras e, de forma complementar, as normas internacionais. Assim a ANEEL deixou a cargo de cada distribuidora definir alguns parâmetros da conexão tais como os requisitos de proteção da rede tendo como base as resoluções nº 414/2010, 482/2012 e o PRODIST.

2.6.1.1 Critérios básicos da conexão

A conexão não poderá prejudicar o desempenho do sistema elétrico ou comprometer a qualidade do fornecimento de energia, bem como afetar a segurança do pessoal de operação e manutenção do sistema elétrico da Celesc, a qual poderá efetuar a desconexão na ocorrência de qualquer procedimento irregular, deficiência técnica e/ou de segurança (CELESC, 2015).

O sistema de geração somente poderá operar quando estiver energizado pela Celesc, devendo sua desconexão ser automática em caso contrário.

A potência instalada fica limitada a carga instalada na unidade consumidora.

A tensão de conexão é dada pela potência instalada conforme a Tabela 8:

Tabela 8 - Nível de tensão segundo a potência instalada

Potência Instalada	Nível de Tensão da Conexão
Até 15 kW	Baixa Tensão (monofásico, bifásico ou trifásico)
Acima de 15 kW até 25 kW	Baixa Tensão (bifásico ou trifásico)
Acima de 25 kW até 75 kW	Baixa Tensão (trifásico)
Acima de 75 kW até 1.000 kW	Média Tensão

Fonte: CELESC (2015)

2.6.1.2 Requisitos do sistema de proteção

É de responsabilidade do acessante a proteção de seus equipamentos, bem como a responsabilidade pela sincronização do gerador com o sistema elétrico da Celesc.

O sistema deverá ter proteção anti-ilhamento, e sua parametrização deve permitir uma adequada coordenação com as demais funções de proteção da rede. O sistema deve desconectar os geradores em até 2,0 s após a perda da rede.

Caso a conexão seja em média tensão (>75 kW), o acessante deverá prever a instalação de um modem GPRS em seu sistema de geração para telesupervisão/telecontrole e também um transformador de acoplamento (CELESC, 2015).

Os valores de referência a serem adotados como parâmetros para as variáveis da EE estão estabelecidos na Seção 8.1 do módulo 8 do PRODIST– Qualidade da Energia Elétrica. Desde que justificada tecnicamente, a acessada pode propor proteções adicionais, exceto para centrais classificadas como microgeradoras.

Para se conectar a rede da Celesc, a planta que faz uso de geradores síncronos, deverá prover as funções de proteção de sua instalação conforme a Tabela 9.

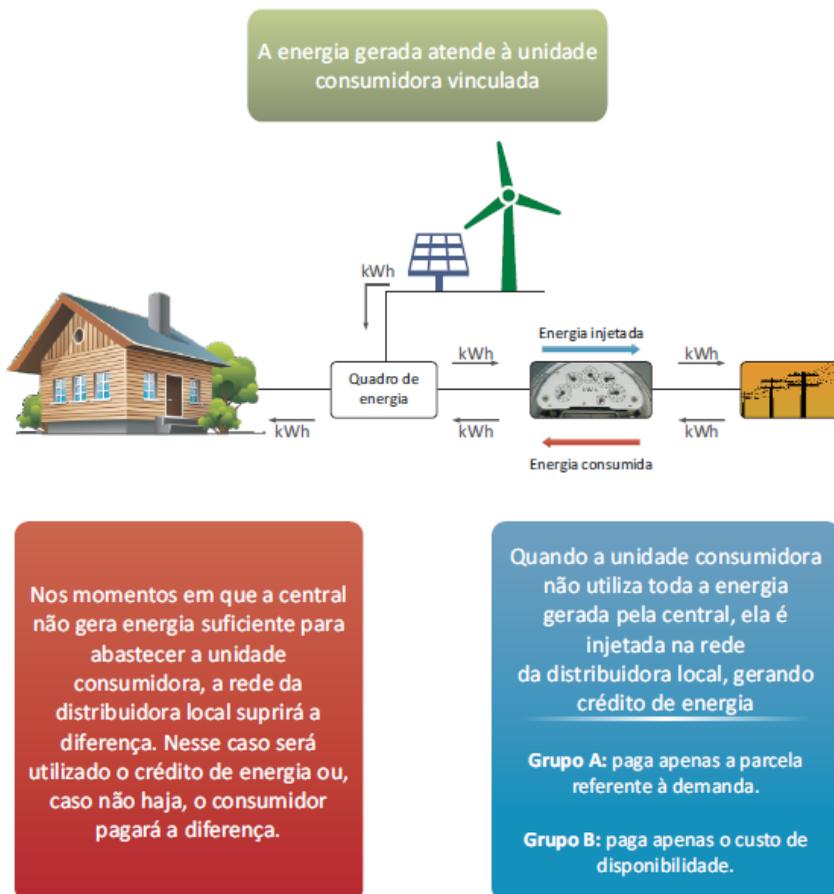
Tabela 9 - Requisitos de proteção para acesso de geradores síncronos a rede da Celesc

Requisito de Proteção	Parametrização (Referência)	Tempo Máximo de Atuação
Proteção de subtensão (27) Nível 1	0,85 pu	1,0 s
Proteção de Subtensão (27) Nível 2	0,5 pu	0,2 s
Proteção de sobretensão (59) Nível 1	1,1 pu	1,0 s
Proteção de sobretensão (59) Nível 2	1,2 pu	0,2 s
Proteção de desequilíbrio Tensão (59N) – (3V0)	1,0 pu	0,2 s
Proteção de subfrequência (81U) Nível 1	59,5 Hz	2,0 s
Proteção de subfrequência (81U) Nível 2	57,0 Hz	0,2 s
Proteção de sobrefrequência (81O) Nível 1	60,5 Hz	2,0 s
Proteção de sobrefrequência (81O) Nível 2	62,0 Hz	0,2 s
Proteção de sobrecorrente (50/51)	Conforme padrão de entrada de energia	N/A
Relé de sincronismo (25)	10° / 10 % tensão / 0,5 Hz	N/A

Os sistemas devem ser capazes de suportar o religamento automático da rede fora de fase, na pior condição possível.

2.6.2 O Sistema de Compensação de Energia Elétrica SCEE

Esse sistema permite que a energia excedente gerada pela unidade consumidora (UC) com micro ou minigeração distribuída seja injetada na rede da distribuidora, a qual funcionará como uma bateria, armazenando o excedente até o momento em que a UC necessite de energia proveniente da distribuidora, conforme ilustra a Figura 11.



Fonte: ANEEL (2014)

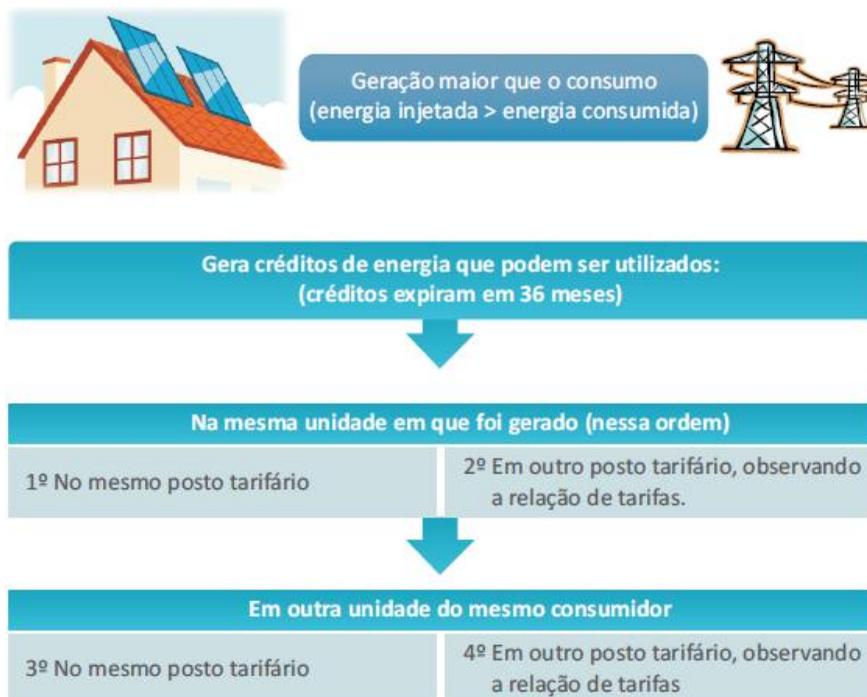
Figura 11 - Sistema de compensação de energia elétrica

Se a energia injetada na rede for maior que a energia consumida em um determinado mês, o consumidor receberá créditos de energia

elétrica (kWh) com validade de 36 meses, que poderão ser utilizados em meses que o consumo for maior que a geração, ou em outras unidades consumidoras de mesma titularidade e mesma área de concessão (ANEEL, 2014).

Nas unidades consumidoras conectadas em baixa tensão, quando a energia injetada for maior que a consumida, será devido apenas o custo de disponibilidade, que é o valor em reais equivalente a 30 kWh (monofásico), 50 kWh (bifásico) e 100 kWh (trifásico).

Nas situações em que existam postos tarifários (ponta e fora de ponta), e nas quais a energia injetada exceda a energia consumida em determinado posto, a diferença deverá ser utilizada na compensação em outros postos tarifários dentro do mesmo ciclo de faturamento, após a aplicação de um fator de ajuste conforme mostra a Figura 12.



Fonte: ANEEL (2014)

Figura 12 - Compensação do crédito de energia elétrica ativa excedente

2.6.2.1 Incidência de impostos

O Conselho Nacional de Política Fazendária – CONFAZ aprovou em 2013 o convênio ICMS 6 que estabeleceu que o ICMS apurado tem como base toda a energia consumida pela unidade consumidora, inclusive os créditos de energia disponibilizados gratuitamente à concessionária e que foram compensados posteriormente (ANEEL, 2015).

É importante destacar a iniciativa do estado de Minas Gerais que através da lei 20.824 de julho de 2013, estabeleceu que o ICMS devesse ser cobrado somente sobre a diferença entre a energia consumida e a injetada pelo prazo de 5 anos.

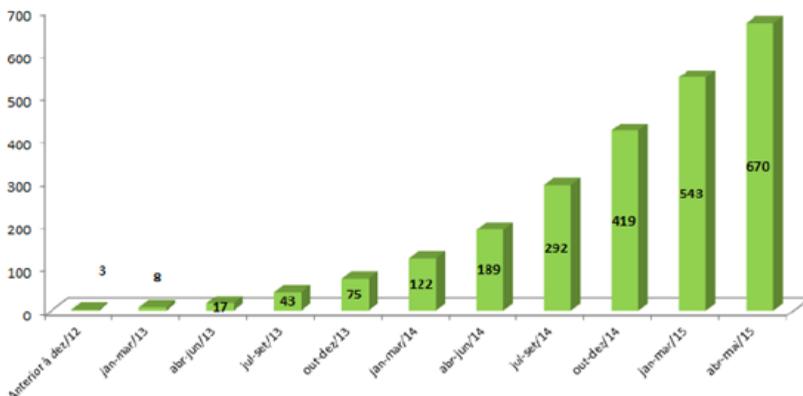
O CONFAZ por meio do convênio ICMS 16, de abril de 2015 autorizou a concessão pelos estados, da isenção do ICMS sobre os créditos de energia elétrica. Na ocasião os estados de Goiás, Pernambuco e São Paulo aderiram ao convênio. Posteriormente no convênio 44 de 3 de junho foi a vez do Rio Grande do Norte aderir ao convênio ICMS 16 e em 30 de Junho no convênio 52 a vez do Ceará e do Tocantins, o que demonstra uma adesão crescente a isenção.

Recentemente, através da lei Nº 13.169 de 06 de outubro de 2015 foi reduzido a zero a alíquota do PIS e a COFINS incidentes sobre os créditos de energia gerados no SCEE, o que demonstra um grande avanço no sentido de viabilizar tais projetos.

2.6.3 A RN 482 e o SCEE em números

Considerando que as distribuidoras tiveram um prazo de 8 meses para se adequar, o SCEE teve início prático em janeiro de 2013 e até maio de 2015 contava com 670 conexões, como pode ser observado na Figura 13, apresentando um crescimento médio de 20% ao mês. Embora seja um crescimento expressivo, o número de conexões está bem abaixo do potencial de expansão previsto pela ANEEL.

A Cemig (MG) é a concessionária com maior número de consumidores que aderiram ao sistema de compensação com 18,5% do total, o que pode ser explicado pela criação da lei estadual que isenta os micro e minigeradores de pagar ICMS dos créditos de energia elétrica gerados pelo prazo de 5 anos. A Celesc é responsável por 6,3% das conexões.

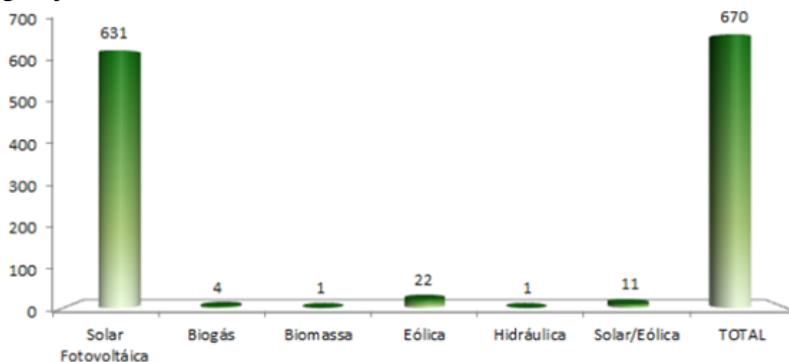


Fonte: ANEEL (2015a)

Figura 13 - Número de conexões acumulado até maio 2015

Dos 670 consumidores que aderiram ao SCEE, 94% têm sua geração por meio da solar fotovoltaica, demonstrando assim a melhor adequação do SCEE para esse tipo de fonte, que produz energia durante o dia e consome a noite, usando a rede como uma bateria.

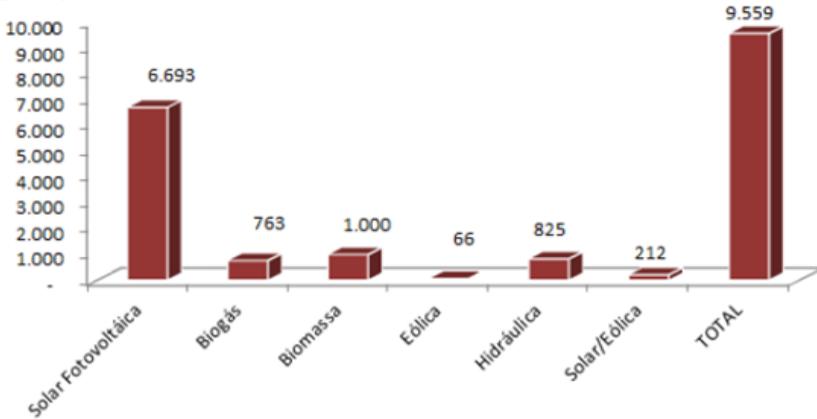
Por outro lado, como pode ser observado na Figura 14, apenas 4 consumidores (0,6%) com geração de EE à biogás aderiram ao sistema, mostrando sua inadequação para este tipo de fonte, pois é característico desta fonte, a produção de energia a partir do biogás de resíduos, que por sua vez são produzidos durante todo o dia, como é o caso da suinocultura, o que implicaria numa geração de créditos maior que o consumo, inviabilizando assim os investimentos necessários para a geração com esta fonte se conectar a rede.



Fonte: ANEEL (2015a)

Figura 14 - Número de conexões por fonte

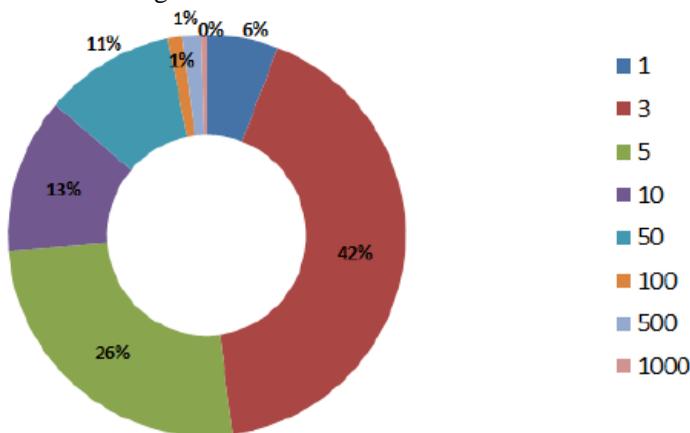
A potência total instalada dos usuários do sistema de compensação até maio de 2015 era de 9559 kW, como mostra a Figura 15. A potência média dos sistemas à biogás é de 190 kW, o que indica que somente grandes unidades com alta carga instala e alto consumo se tornam viáveis pois diluem os custos dos equipamentos de conexão e proteção da rede.



Fonte: ANEEL (2015a)

Figura 15 - Potência total instalada

Quanto à potência das instalações, podemos observar na Figura 16, que 81% são de até 10 kW, reflexo da norma em limitar o tamanho dos geradores a carga instalada do consumidor.



Fonte: ANEEL (2015a)

Figura 16 - Distribuição em faixas de potências das conexões

2.6.4 Revisão da RN 482

Entre maio e junho de 2015 a ANEEL abriu consulta pública e realizou audiências públicas com o objetivo de obter subsídios e informações adicionais para o aprimoramento da proposta de Resolução Normativa que revisa a RN 482 com expectativa de ser publicada até o final do ano. Dentre as possíveis novidades estão a redução do limite máximo da microgeração de 100 kW para 75 kW, o aumento da potência máxima da minigeração para 5 MW e a possibilidade de condomínios aderirem ao SCEE (ANEEL, 2015).

Além destas mudanças, a revisão prevê ainda a desconsideração das cargas auxiliares da planta de geração de EE para justificar a carga instalada da UC.

2.7 ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS

Existem várias publicações sobre a análise técnica e econômica da geração de EE a partir do biogás nos últimos anos. Desde estudos de casos reais, a simulações.

Porém nenhuma das publicações brasileiras contempla o sistema de compensação de energia nem levam em consideração a influência do clima, aquecimento e perdas térmicas do biodigestor na produção de biogás e EE. Algumas delas já foram comentadas anteriormente.

Estudo desenvolvido por Zago (2003), avaliando o potencial de produção de energia integrada por meio do biogás, na região do Meio Oeste Catarinense, concluiu que o consumo médio de energia nas propriedades é de (600 a 1.800 kWh/mês), tomando como base apenas a criação de suínos, (produção média de 50 Nm³ de biogás/dia). Teoricamente, a capacidade de gerar energia por propriedade é de 2.700 KVA/mês, o que equivale aproximadamente a 2.160 kWh/mês. Com essa produção, as propriedades podem se tornar autossuficientes em energia elétrica, adotando um sistema que seja capaz de gerar 25 KVA/h de energia elétrica. Segundo estimativas, o empreendimento passa a ser viável economicamente quando a propriedade possui capacidade de produção de 200 m³/dia de gás, o que daria uma produção aproximada de 300 kVAh/dia.

Em trabalho publicado por Martins e Oliveira (2011) analisando a viabilidade econômica da geração de EE com o uso do biogás verificou-se que o aumento do número de horas de geração, exige maior número de animais, maior volume de biogás e aumento do volume da biomassa

nos biodigestores. Porém se na propriedade houver atividades cuja demanda por energia justifiquem a geração, essas condições aumentam o retorno econômico e aceleram o tempo de retorno do capital investido, pois o ganho provém da redução do consumo de energia da concessionária e será maior quanto maior for a tarifa. Atividades complementares como a fabricação de ração, sistemas de aquecimento, ventilação ou distribuição de fertilizante líquido podem se beneficiar da EE gerando redução de custos de produção. Os fatores determinantes na viabilidade econômica da geração de EE a partir do biogás, são a demanda e o preço da energia necessária para atender o consumo nas atividades produtivas. O aumento na demanda associada à elevação no preço da energia elétrica torna mais atrativo o investimento em geração independente, porém é fundamental possuir um plantel capaz de gerar o volume de biomassa para a produção de biogás compatível com a demanda do conjunto de geração de EE.

Na maioria dos estudos são usados MCI ciclo Otto na geração de energia, sem o uso da cogeração, onde são levantados os dados de consumo e produção de energia elétrica, produção de biogás, eficiência do grupo gerador e análise econômica do sistema.

Percebe-se com clareza que a viabilidade econômica das plantas depende significativamente do consumo de energia elétrica de cada produtor, pois, na impossibilidade da venda do excedente, é a redução deste consumo que irá amortizar o investimento.

A viabilidade técnica está amplamente comprovada, porém quando esta análise é feita numa propriedade que já está em operação, o que não poderia ser diferente. Agora quando se olha mais de perto para as características das granjas produtoras de suíno da região Extremo Oeste de Santa Catarina, percebe-se que a viabilidade técnica da geração de EE a partir do biogás não está evidente, principalmente devido ao tamanho reduzido destas propriedades.

Não se encontrou na literatura, uma análise de viabilidade técnica e econômica que levasse em consideração as características de uma população inteira de criadores de suíno bem como a influência do clima, do aquecimento do biodigestor e o SCEE na produção de biogás e EE, o que permitiria determinar com mais certeza a viabilidade de implantação de tais projetos e poderia servir para guiar ações dos envolvidos na cadeia do biogás para desenvolver o setor.

Normalmente as estimativas de produção de biogás adotam uma temperatura média anual para o dejetos, o que gera imprecisão na estimativa, pois não considera as oscilações na produção devido as diferentes condições climáticas.

As estimativas de produção de biogás de dejetos suínos normalmente consideram todo o rebanho, porém, o mesmo não pode ser feito para o potencial de energia elétrica, pois uma parcela considerável do rebanho pode estar em propriedades que sozinhas não apresentam viabilidade técnica para a conversão do biogás em EE e injeção na rede da distribuidora.

Nesse sentido, existem também estudos de diferentes arranjos de produtores de suíno, com a finalidade de alcançar a viabilidade técnica e econômica da produção de EE à partir do biogás.

Coinbra-Araújo et al. (2014) relataram o estudo de caso de um condomínio de agroenergia de agricultores familiares na microbacia da sanga Ajuricaba na cidade de Marechal Cândido Rondon/PR. O projeto integra 33 propriedades rurais que possuem um rebanho de 400 vacas e 5000 suínos. Cada propriedade possui o seu biodigestor, que são conectados por um gasoduto de 25,5 km que leva a produção diária de 570 m³/dia de biogás até uma micro central termelétrica (MCT). A MCT possui um motogerador a biogás de 80 kW e um secador de grãos com capacidade para 470 sacos. O biogás é purificado e entra no motor com 90% de metano. A energia gerada é usada pelos produtores para reduzir seu consumo, e o excedente pode vir a ser armazenado na rede na forma de créditos de energia.

2.8 BALANÇO ENERGÉTICO NA CRIAÇÃO DE SUÍNOS

Existem ainda estudos de como a produção de biogás e a utilização do biofertilizante influenciam no balanço energético da criação de suínos.

Angonese et al. (2006) realizaram o balanço energético da criação de suínos para um lote de 650 animais em terminação no período de 120 dias. A propriedade possui 2 digestores de 15 m³ com TRH de 10 dias; produção diária de 31,5 Nm³ e específica de 0,63 Nm³ de biogás por m³ do biodigestor. Foi contabilizada a energia direta de entrada na forma de ração, leitões (22 kg), energia elétrica e mão de obra, e indireta na forma de equipamentos e instalações. A energia considerada na saída foi na forma de suínos para o abate (110 kg), biofertilizante e biogás. Da energia de entrada, 99,43% foi na forma direta, e desta 95,28% na forma de ração. Na energia de saída, os animais representaram 56,8%, o biofertilizante 30,1% e o biogás 13%. Obteve-se um rendimento (Energia entrada/Energia saída) de 38%. O rendimento sem aproveitamento do biofertilizante e do biogás seria de 21,6%, representando uma diminuição de 43,14% quando comparado aos 38%.

Pode-se inferir que a baixa contribuição do biogás (13%) é devida a sua baixa produção ($0,0485 \text{ Nm}^3/\text{animal.dia}$), consequência de um sistema de biodigestão inadequado.

Lira (2009) realizou o balanço energético da produção de suínos numa granja UPL com 1500 matrizes e produção estimada de biogás em $460 \text{ m}^3/\text{dia}$. Como energia de entrada foi considerada a energia elétrica (3,2%), o óleo diesel das máquinas (1,70%), a ração (95,09%) e a água (0,002%). Como energia de saída foi considerada os leitões com 23,25 kg de massa média (64,53%), o biogás (32,77%) e o biofertilizante (2,7%). A eficiência energética foi de 25% sem a produção de biogás e de 37% com a produção de biogás, uma melhora de 48%.

Ao calcular o balanço energético para uma granja de suínos em ciclo completo com 2.165 matrizes, Nishimura (2009), num estudo de caso, obteve uma eficiência energética de 22,5% sem o uso de biodigestores e 31,7% com o uso de biodigestores e produção de biogás, obtendo um aumento de 40,88%. A propriedade possui 3 biodigestores de 1.700 m^3 cada, com TRH de 30 dias e produção total de $1.947 \text{ m}^3/\text{dia}$ de biogás. Da energia de entrada considerada, 99,75% foi energia aplicada diretamente ao processo de criação, sendo a parcela mais expressiva a ração (96,57%). Da energia de saída, o suíno correspondeu por 71%, o biogás por 26,6% e o biofertilizante por 2,4%.

Observa-se dos estudos relatados que o uso do biodigestor promove um aumento da eficiência energética na produção de suínos na casa dos 40%, que em termos energéticos é um aumento muito significativo.

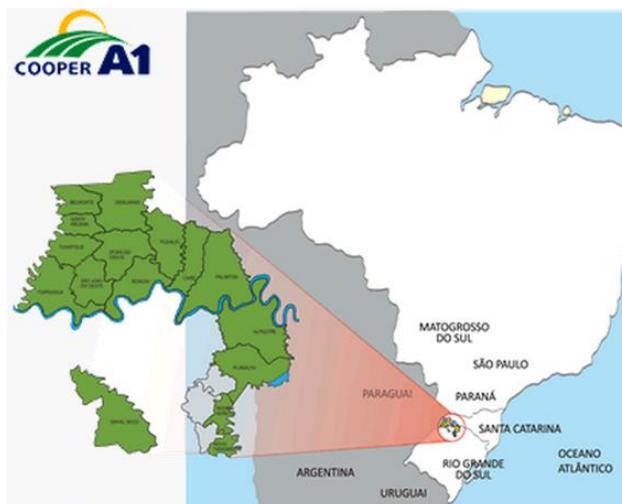
3 CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA POPULAÇÃO

Esta pesquisa possui abordagem indutiva, baseada no método monográfico e com procedimento documental e contato direto para a coleta de dados. Ao se analisar a viabilidade técnica e econômica da microgeração de energia elétrica na população estudada, pretendeu-se levantar, além dos aspectos particulares da região escolhida, aspectos genéricos que possam ser aplicáveis a outras regiões com características semelhantes. O estudo foi baseado no método monográfico, em que determinados objetos foram avaliados permitindo a obtenção de generalizações. A pesquisa foi fundamentada no levantamento de dados da população, de relatórios empresariais, orçamentos, imagens, visitas e conversas com os envolvidos na cadeia do biogás (LAKATOS & MARCONI, 2003).

3.1 LOCALIZAÇÃO E TAMANHO

Para a realização deste trabalho, foram considerados os dados de 619 produtores de suínos associados da Cooperativa A1 localizada no Extremo Oeste de Santa Catarina.

A Cooper A1 com sede no município de Palmitos/SC, abrange 17 cidades, 11 no Extremo Oeste de Santa Catarina e 6 no Noroeste do Rio Grande do Sul, como pode ser observado na Figura 17.



Fonte: COOPER A1 (2015)

Figura 17 - Área de atuação da Cooper A1

A área de abrangência da Cooper A1 compreende 122.654 habitantes, 85.446 deles em Santa Catarina, 1,27% da população do estado.

A parte catarinense do seu rebanho representa 4,15 % dos suínos do estado, com média de 3 suínos por pessoa, enquanto a média no estado é de 1 suíno por pessoa.

Com 1.021 funcionários, 7.966 associados e faturamento de R\$ 815,7 milhões no final de 2014, a Cooperativa A1 é a segunda maior do segmento no estado de Santa Catarina, tendo 91% dos seus cooperados na agricultura familiar com propriedades de 15 hectares de área média (COOPER A1, 2015).

A região catarinense é caracterizada por pequenas propriedades rurais, com pouca produção de grãos e intensa atividade pecuária, principalmente com a avicultura, suinocultura e bovinocultura de leite. Já a região gaúcha, apresenta uma maior produção de grãos e propriedades maiores com uma recente penetração da pecuária.

Atualmente, o plantel da cooperativa é de 266189 suínos na fase crescimento/ terminação (UCT) e 33131 matrizes (UPL) totalizando 299320 suínos. O número médio de matrizes e suínos em terminação na população é de 259 e 542, respectivamente. O rebanho da Cooper A1 representa aproximadamente 5% do rebanho catarinense, o que qualifica a população em estudo para representar a criação de suínos no estado de Santa Catarina, podendo-se assim estender os resultados obtidos por este trabalho a todo estado e também aos demais estados da região Sul devido à semelhança entre estes.

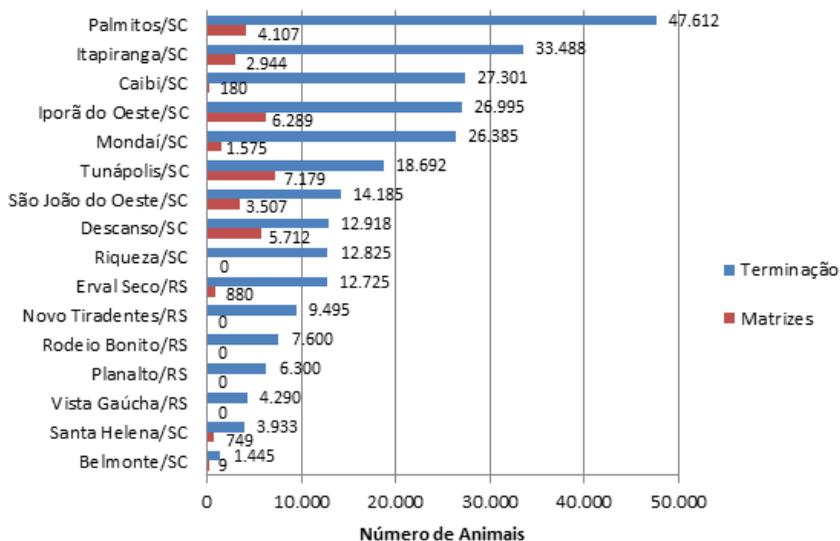
O rebanho está dividido conforme mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 - Características do plantel de suínos da Cooper A1

Tipo de Granja	UCT	UPL	Total
Número de animais	266189	33131	299320
Número de produtores	491	128	619
Média de animais por produtor	542	259	484

Fonte: Elaborado pelo autor.

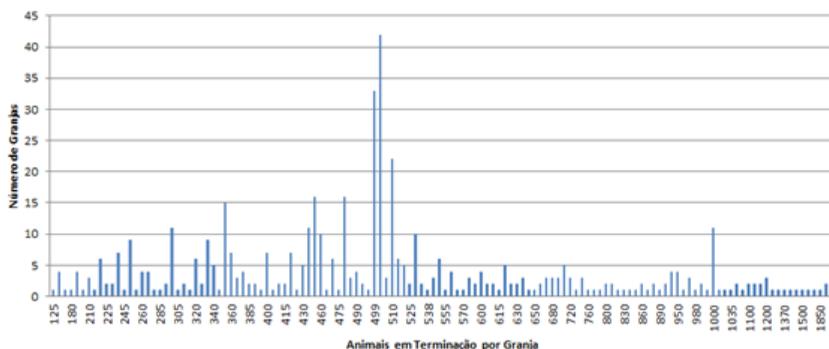
Na Figura 18 podemos observar a distribuição do plantel da cooperativa nas cidades que possui a atividade de suinocultura. Nota-se uma maior concentração no estado de Santa Catarina.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 18 - Localização do plantel da Cooper A1

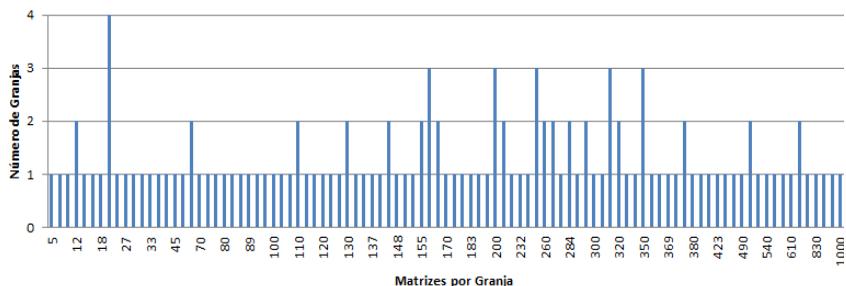
A Figura 19 mostra o tamanho e a frequência das granjas classificadas como Unidade de Crescimento e Terminação (UCT). Pode-se notar a maior frequência próxima a 500 suínos, com 33 propriedades de 499 suínos e 42 de 500 suínos. Observa-se também que o número mínimo de animais é 125 e o máximo de 2400.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 19 – Distribuição do número de granjas X número de animais em terminação por granja

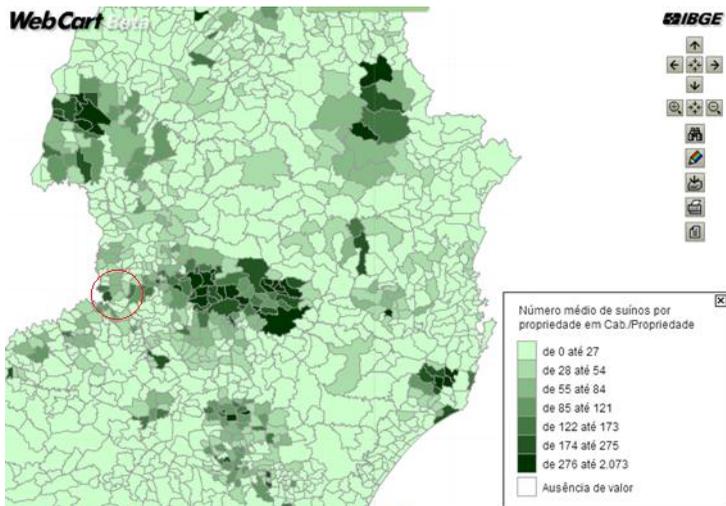
A Figura 20 mostra o tamanho e a frequência das granjas classificadas como Unidade de Produção de Leitão (UPL). Observa-se a maior frequência próximo a média de 259 matrizes. O número mínimo de matrizes é 5 e o máximo 2000.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 20 - Distribuição do número de granjas X número de matrizes por granja

Como pode ser observado na Figura 21, que representa o número médio de suínos por propriedade em parte da região Sul, as granjas na região da população são menores quando comparadas com a região Meio Oeste por exemplo. O tamanho reduzido das granjas pode inviabilizar o aproveitamento do biogás na geração de EE.



Fonte: elaborado pelo autor com dados de IBGE (2006)

Figura 21 - Número médio de suínos por propriedade rural

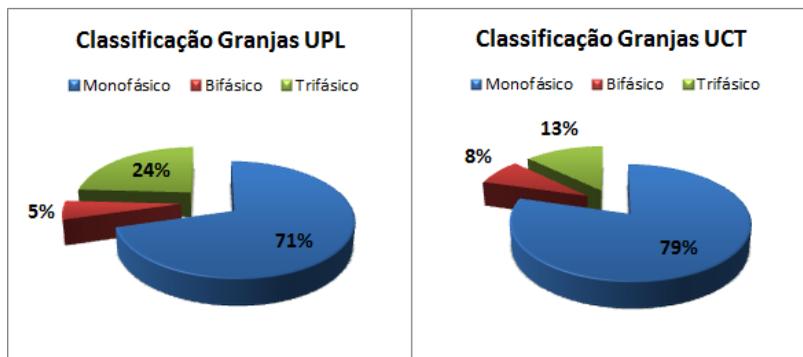
3.2 ENERGIA ELÉTRICA E SEU CONSUMO

O consumo de energia elétrica na população é fundamental tanto para a análise da viabilidade técnica quanto econômica. É através da redução no valor gasto com EE que o produtor irá pagar o investimento. Assim quanto maior o consumo mais rápido será o retorno.

Algumas características como a carga instalada e o número de fios que atende a unidade consumidora (UC) são importantes quanto se deseja aderir ao SCEE, pois a RN 482 limita a potência do sistema de GD à carga instalada e determina a potência máxima para cada tipo de rede.

Para analisar as características referentes a EE e seu consumo foram obtidas as contas de EE de 69,7% dos produtores com UCT e 87,5% dos produtores com UPL totalizando 456 UC, todos de Santa Catarina.

Na Figura 22 podemos observar a classificação das granjas quanto ao tipo da rede de distribuição que as atende. Observa-se que a grande maioria é atendida ainda por rede monofásica.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 22 - Distribuição das granjas quanto ao tipo da rede elétrica

Aproximadamente 77% das UC na população são atendidas por rede monofásica, permitindo assim a conexão de potências até 15 kW. Granjas com carga e potencial maiores que 15 kW necessitam obras de reforço na rede como aumento do número de fios e colocação de transformadores. Segundo o parágrafo único do artigo quinto do capítulo II da RN 482, os custos de eventuais ampliações ou reforços no sistema de distribuição em função exclusivamente da conexão de micro e minigerador participante do SCEE não deverão fazer parte do cálculo da

participação financeira do consumidor, sendo integralmente arcados pela distribuidora. Na revisão da norma prevista para o final de 2015, a ANEEL, com a justificativa de “uniformizar” os conceitos entre regulamentos, propõe mudar as palavras “ampliações e reforços” no parágrafo, para o termo “melhorias”, colocando assim, dúvidas na interpretação do termo e podendo eximir as distribuidoras das obras de melhoria da rede que já deveriam ter sido feitas.

A Tabela 11 mostra a distribuição do consumo de EE na região Extremo Oeste de Santa Catarina. Podemos observar que o consumo rural é responsável pela maior parcela com 29,61% do total da região totalizando um consumo anual de 142.743.648 kWh, apesar de possuir a energia elétrica de pior qualidade.

Tabela 11 - Consumo de energia elétrica na microregião Extremo Oeste Catarinense

Tipo de consumidor	Nº de unidades consumidoras	Consumo total (kWh/ano)	Representatividade no consumo
Residencial	51.502	100.133.624	20,77%
Industrial	2.723	124.284.648	25,78%
Comercial	8.481	69.871.160	14,49%
Rural	34.065	142.743.648	29,61%
Poderes Públicos	1.484	14.711.927	3,05%
Iluminação Pública	33	17.316.642	3,59%
Serviço Público	95	12.828.222	2,66%
Consumo Próprio	27	196.876	0,04%
Total	98.409	482.086.747	100%

Fonte: SEBRAE (2013)

Os resultados obtidos para o consumo de EE na população são apresentados na Tabela 12 e na Figura 23.

Tabela 12 - Consumo e preço da EE na população estudada

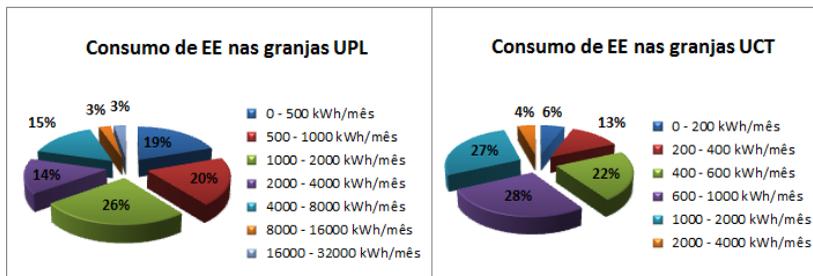
Granja	Valor	Máximo	Médio	Mínimo	Desv. Padrão	Total Parcial
UCT	Tarifa (R\$/kWh)	0,69	0,44	0,37	0,04	R\$ 131.683
	Consumo (kWh/mês)	3.645	870	30	575	299.280
	UC	344				
UPL	Tarifa (R\$/kWh)	0,64	0,45	0,41	0,04	R\$ 143.136
	Consumo (kWh/mês)	31.011	2.840	30	4.110	318.080
	UC	112				
Total Geral	Gasto com EE (R\$/mês)	R\$ 274.819				
	Consumo (kWh/mês)	617.360				
	UC	456				

Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar um elevado consumo de EE na população quando comparado com o consumo médio na região, principalmente nos produtores com granja UPL com média de 2.840 kWh/mês, o que já era esperado, pois este tipo de granja necessita de energia elétrica tanto para refrigerar as matrizes como para aquecer os leitões recém-nascidos.

Mesmo o consumo médio das granjas UCT com 870 kWh/mês é elevado, pois ficou acima da média do consumo rural na região Extremo Oeste, que é de aproximadamente 350 kWh/mês. Juntos, os produtores pesquisados representam 1,33% das UC e 5% do consumo rural na região com 7.408.320 kWh anuais.

Na Figura 23 pode-se observar a distribuição por faixas de consumo nas granjas UPL e UCT. Nas granjas UPL aproximadamente 21% apresentam um consumo acima de 4.000 kWh/mês, já nas granjas UCT uma expressiva parcela da população (59%) possui consumo médio acima de 600 kWh/mês.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 23 - Distribuição das granjas em faixas de consumo de energia elétrica

É importante notar que o consumo das granjas UCT é em média 3,25 vezes menor que nas granjas UPL.

3.2.1 Impostos e bandeiras tarifárias

As unidades consumidoras do grupo B, subgrupo B1 classificadas como rurais (a grande maioria na população), sofrem a incidência de 12% de ICMS até os primeiros 500 kWh e 25% sobre o restante. Incidem ainda sobre a energia o PIS e a COFINS com alíquotas que variam mensalmente e apresentam médias próximas a 0,6% e 3% respectivamente.

A alíquota média do ICMS na população foi de 18,5% nas granjas UPL e 15,6% nas granjas UCT.

Desde o início de 2015 vigora no país o sistema de bandeiras tarifárias. Esse sistema sinaliza aos consumidores os custos reais da geração de energia elétrica. As cores das bandeiras (verde, amarela ou vermelha) indicam se a energia custa mais ou menos em função das condições de geração de eletricidade, como segue (ANEEL, 2015b):

- **Bandeira verde**: condições favoráveis de geração de energia. A tarifa não sofre nenhum acréscimo;
- **Bandeira amarela**: condições de geração menos favoráveis. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,025 para cada kWh consumido;
- **Bandeira vermelha**: condições mais custosas de geração. A tarifa sofre acréscimo de R\$ 0,045 para cada kWh consumido.

Desde que começaram a ser utilizadas, a única bandeira aplicada foi a vermelha, refletindo a crise energética provocada pelo baixo nível dos reservatórios e o inadequado planejamento do sistema elétrico Brasileiro, o que obrigou a ligação de usinas com alto custo de funcionamento.

O adicional provocado pela bandeira tarifária vermelha na população representa em média 16% do preço final da conta de EE.

3.3 POTÊNCIA MÍNIMA NECESSÁRIA

Analisando o consumo médio de EE e a carga instalada na população, pode-se estimar a potência líquida necessária para suprir a demanda de cada propriedade. Porém a determinação desta potência depende também da curva de carga e se ela irá trabalhar isolada ou conectada a rede.

Quando o sistema é isolado da rede da distribuidora, toda a energia do sistema será provida pelo grupo gerador a biogás. Sendo assim, se o mesmo falhar, seja por falta de biogás, ou por sobre carga, o fornecimento de energia para todo sistema ficará comprometido. Por essa razão, sistemas isolados da rede são projetados com base na análise da curva de carga diária de onde se obtêm o pico de carga. Recomenda-se deixar uma margem de segurança de aproximadamente 15% acima do pico e dividir a carga entre três grupos geradores (ORLANDO, 1996). Além do pico de carga, é preciso levar em consideração que o acionamento de motores elétricos (cargas indutivas) de forma direta pode requerer picos de corrente 8 vezes maior que a nominal, causando uma grande queda de tensão na EE gerada. Dessa forma recomenda-se especificar um gerador que tenha uma queda de tensão de no máximo 15%, o que requer, na maioria dos casos, uma potência aproximadamente 50% maior que a carga instalada (WEG, 2012).

Como o sistema não está conectado a rede, recomenda-se também instalar um grupo gerador extra para o caso de manutenções. Dessa forma, uma unidade que tenha um pico de carga de 20 kW, idealmente precisaria de 4 geradores de 8 kW totalizando uma potência de 32 kW, 60% maior que o pico de carga do sistema. O custo em instalar 160% da carga de pico impacta na viabilidade econômica do sistema, além do que, dessa forma os motores irão funcionar grande parte do tempo em carga parcial, o que compromete a eficiência do motor.

Pôde-se observar que a grande maioria das instalações são monofásicas e possuem disjuntores entre 40 e 60 ampères. Assim podemos considerar a carga média dada pela multiplicação da tensão nominal de 220 Volts pela corrente média dos disjuntores que foi de aproximadamente 50 Ampères, obtendo uma carga média de aproximadamente 11 kW.

Portanto, para sistemas isolados da rede, a potência mínima média do motogerador com 15% de folga seria de aproximadamente 13

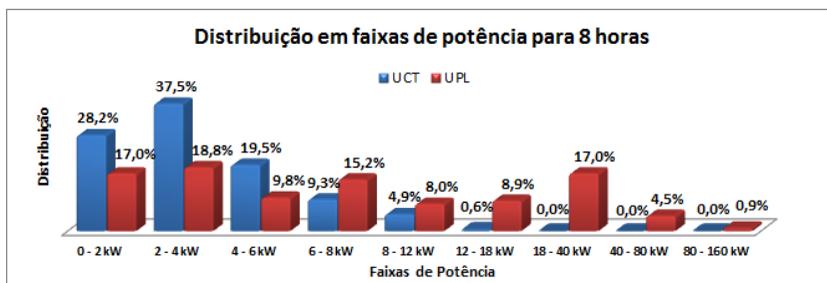
kW, sem levar em consideração, por razões econômicas, a divisão da potência em três geradores com um quarto gerador para o caso de manutenções. Devido a necessidade do acionamento de cargas indutivas, e analisando a ocorrência destas na população chega-se a uma potência necessária de aproximadamente 20 kW.

O SCEE permite o funcionamento do sistema em paralelo com a rede da distribuidora, o que elimina a necessidade por potência extra, pois esta será suprida pela rede. Assim o sistema pode ser projetado para a carga base (baseload), eliminando a operação em carga parcial e permitindo um rendimento maior do motor (ORLANDO, 1996). Por exemplo, se a menor carga diária na unidade for 10 kW, essa poderia ser a potência instalada e ser provida por um único grupo gerador trabalhando no ponto de eficiência máxima, pois a disponibilidade para os picos de carga e manutenção são satisfeitos pela rede, permitindo assim uma grande economia no sistema e reduzindo em 22 kW a potência necessária se comparado com o sistema isolado. Esse arranjo maximiza a capacidade de produção de energia e a eficiência no consumo de combustível, resultando numa maior redução do custo do kWh.

Assim, no caso das propriedades conectadas e aderidas ao SCEE, o cálculo da potência líquida necessária pode ser feito levando-se em consideração o consumo médio mensal.

Como a rede funciona como uma grande bateria, a potência e o regime de funcionamento independem da carga instalada, mas sim do consumo total mensal. Para se gerar toda a energia necessária para a propriedade, basta que a multiplicação da potência líquida pelo tempo de funcionamento garanta a produção da energia necessária. Isto permite uma variedade de configurações entre potência e regime de funcionamento.

A Figura 24 mostra a distribuição das granjas UCT e UPL em faixas de potência líquida necessária para suprir a demanda de energia com regime de funcionamento de 8 horas diárias. Podemos notar a considerável redução na potência para suprir a carga quando comparado com o sistema isolado (20 kW), sendo este um dos principais benefícios do SCEE. Neste regime de operação, as maiores potências líquidas nas granjas UCT e UPL foram 15 kW e 129 kW, respectivamente, e as menores foram 0,13 kW para ambas.

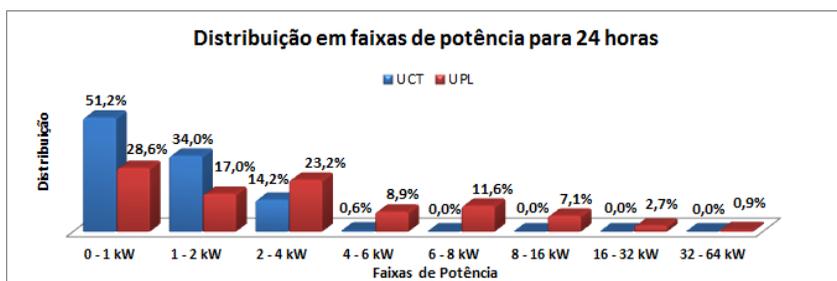


Fonte: elaborado pelo autor

Figura 24 - Distribuição das granjas em faixas de potência líquida para 8h de funcionamento

Destaca-se que com 8 horas de funcionamento diário, 94,5% das granjas UCT necessitam uma potência menor que 8 kW e 68,8% das granjas UPL necessitam uma potência menor que 12 kW.

A Figura 25 mostra a distribuição das granjas UCT e UPL em faixas de potência necessária para suprir a demanda de energia com regime de funcionamento contínuo. Neste regime de operação, as maiores potências nas granjas UCT e UPL foram 6 kW e 48 kW respectivamente e as menores foram 0,05 kW para ambas.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 25- Distribuição das granjas em faixas de potência líquida para 24h de funcionamento

Com o regime de funcionamento contínuo, a potência necessária diminui ainda mais. Nas granjas UCT 99,4% necessitam uma potência de até 4 kW e nas UPL, 77,7% necessitam uma potência de até 6 kW.

Este levantamento é da mínima potência líquida necessária, não considera, portanto, a potência das cargas auxiliares da planta de geração de energia elétrica a biogás. Dessa forma se o dimensionamento

do grupo gerador for feito apenas para suprir a demanda de EE da granja, é necessário incluir a potência das cargas auxiliares.

É importante também destacar que as UC que necessitam potências de 0,13 kW e 0,05 kW são aquelas que consumiram abaixo ou próximo ao mínimo de 30 kWh/mês que representa a taxa de disponibilidade da energia, e provavelmente não estão sendo usadas e não foi possível obter a conta de EE daquelas que de fato representam o consumo dessas granjas, porém sem prejuízo para a análise pois seu número não é representativo.

3.4 O CLIMA

A região da população caracteriza-se pelo clima mesotérmico úmido de verões quentes (Cfa), segundo o atlas climático de Santa Catarina, a região apresenta altitude entre 300 e 500 metros, sua temperatura média anual é de 19°C, com elevada amplitude térmica e apresentando mínimas próximas a zero graus no inverno e máximas próximas a 35°C no verão. As estações do ano são bem definidas, ocorrendo um aumento gradual da temperatura entre inverno e verão (PANDOLFO, 2002).

3.5 PRODUÇÃO DE DEJETOS E O TRATAMENTO ATUAL

A produção de dejetos por animal na região tem diminuído gradativamente, a medida que são adotadas boas práticas para a dessedentação dos animais e limpeza das baias. Essa medida é fundamental para se garantir uma maior concentração de SV nos dejetos e por consequência uma maior produção de biogás.

Para estimar a produção de dejetos na população foram adotados os valores de 4,84 L/animal.dia para as granjas UCT obtido por Tavares (2012) e 22,8 L/matriz.dia especificado pela FATMA (2014).

Com base nestes dados e no tamanho do rebanho, estimou-se a produção diária de dejetos em 2.044 m³ por dia, que não tem uma destinação adequada e nem são aproveitados energeticamente.

A grande maioria dos produtores (aproximadamente 98%) não possuem biodigestores, e fazem o tratamento dos dejetos em lagoas anaeróbias mal projetadas, as populares “esterqueiras” como mostra a Figura 26, e em seguida distribuem o dejetos nas lavouras, ainda com grande carga poluidora e na maioria das vezes no mesmo lugar, sem levar em consideração uma rotação de áreas.



Fonte: o autor (2015)

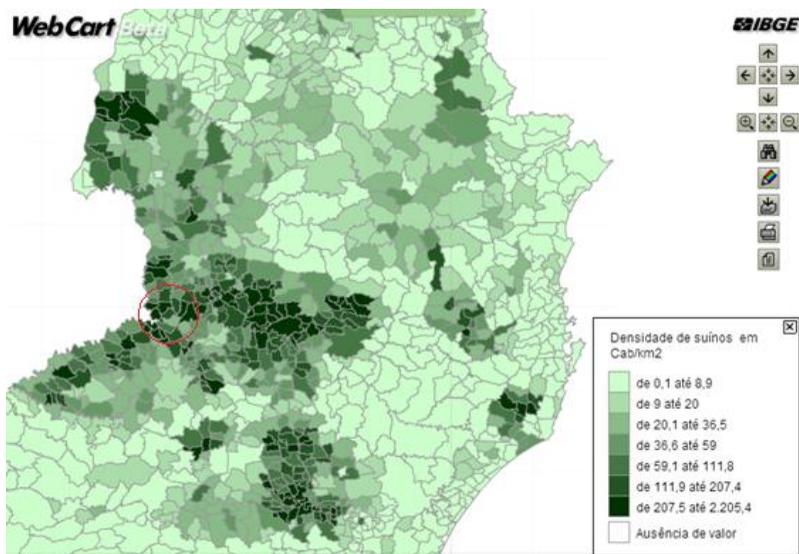
Figura 26 - Sistema de tratamento atual: Esterqueira

Esta forma de tratamento é a mais simples, porém é a que apresenta maior potencial de poluição, devido à possibilidade de infiltração no solo e contaminação de águas subterrâneas em vazamentos nas esterqueiras, saturação de matéria orgânica e inorgânica no solo e contaminação de rios adjacentes devido à disposição dos dejetos sempre no mesmo lugar, e principalmente a emissão de metano para a atmosfera, o que contribui significativamente para o efeito estufa.

Como pode ser observado na Figura 27, a região de abrangência da Cooper A1 possui elevada densidade de suínos, o que aliado ao relevo acidentado, evidencia o risco ambiental e a necessidade de adequados sistemas de tratamento e disposição dos dejetos no solo.

Além da forma atual de tratamento ser a com maior potencial de poluição, ela é também a com menor eficiência energética, pois não recupera a energia ainda presente nos dejetos.

Mesmo nos biodigestores existentes na população, a maioria instalados por projetos de P&D, não é feito o aproveitamento energético do biogás que é queimado para que tenha seu potencial de poluição reduzido.



Fonte: elaborado pelo autor com dados de IBGE (2009)

Figura 27 - Densidade de suínos em parte da região Sul

3.6 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Para determinar o potencial de produção de EE na população e especificar a potência necessária dos motogeradores para converter este potencial em EE, é necessário estimar a produção de biogás em cada granja.

O biodigestor adotado para o cálculo da estimativa de produção de biogás na população será do modelo canadense com TRH de 20 dias, classificado por digestão úmida em uma fase e três estágios, alimentação contínua e mesofílico. O digestor considerado não é aquecido.

Nos estados do Sul a faixa de temperatura da biomassa situa-se entre 20 e 25°C (OLIVEIRA, 2005; KUNZ et al., 2005). Assim, para estimar a produção de biogás na população foi adotada a temperatura média de 20°C para o substrato.

A referência na produção de dejetos adotada foi de 4,84 L/animal.dia (TAVARES, 2012) para as granjas UCT e 22,8 L/matriz.dia (FATMA, 2014) para as granjas UPL.

O volume do biodigestor em m^3 é dado pela equação 3.1:

$$V_{bio} = \frac{TRH * n^{\circ} de animais * V_{dejetos}}{1000} \quad (3.1)$$

onde TRH é o tempo de retenção hidráulica adotado e $V_{dejetos}$ é o volume de dejetos produzido por animal por dia.

A produção de metano e por consequência a de biogás nos modelos de biodigestores existentes no Brasil, pode ser estimada em função da alimentação diária de SV, pois para o caso da produção de suínos, a produção específica de metano (B_o) é de $0,45 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ de SV (OLIVEIRA & HIGARASHI, 2006).

A referência de SV adotada neste estudo é de $47,67 \text{ kg/m}^3$ (TAVARES, 2012).

O modelo matemático utilizado para estimar a produção de metano e por consequência a de biogás neste trabalho foi o desenvolvido por Chen & Hashimoto (1978). Este modelo tem sido empregado com sucesso, principalmente porque o número de variáveis exigidas para alimentar o modelo (SV, TRH, Temperatura, Volume de dejetos e Número de animais) é baixo e de fácil obtenção, sendo que o modelo considera a temperatura de operação da biomassa no biodigestor, fornecendo resultados adequados para temperaturas entre 13 e 45°C . Este modelo foi escolhido, pois tem sido usado com sucesso por diferentes pesquisadores, segundo La Farge (1995).

A taxa de produção de metano γ_v (Nm^3 de CH_4/m^3 da câmara de digestão.dia) pode ser calculada pela equação 3.2, desenvolvida por Chen & Hashimoto (1978):

$$\gamma_v = \frac{B_o S_o}{TRH} \left(1 - \frac{K}{TRH * \mu_m - 1 + K} \right) \quad (3.2)$$

onde:

B_o = taxa máxima de produção de metano

(Nm^3 de CH_4/kg de SV);

S_o = concentração de SV no dejetos (kg/m^3);

TRH = tempo de retenção hidráulica (dias)

K = coeficiente cinético (adimensional)

μ_m = taxa de crescimento máximo específico (dia^{-1})

De acordo com Chen & Hashimoto (1978), o parâmetro K , para dejetos de suínos, é dado pela equação 3.3:

$$K = 0,5 + 0,0043 * e^{0,051 * S_0} \quad (3.3)$$

A taxa de crescimento máximo específico (μ_m) é calculada através da equação 3.4 (HASHIMOTO et al., 1981):

$$\mu_m = 0,013 * T_{sub} - 0,129 \quad (3.4)$$

onde T_{sub} é a temperatura do substrato no interior do biodigestor ($^{\circ}\text{C}$).

A estimativa da produção de biogás em Nm^3/h é dada pela equação 3.5, considerando uma presença de 65% (GUSMÃO, 2008) de metano em volume no biogás.

$$\dot{V}_{gás} = \frac{\gamma_v}{0,65} * \frac{V_{bio}}{24} \quad (\text{Nm}^3/\text{h}) \quad (3.5)$$

Com os dados acima fornecidos ao modelo, obteve-se uma produção de $0,119 \text{ Nm}^3/\text{animal.dia}$ nas granjas UCT e $0,557 \text{ Nm}^3/\text{matriz.dia}$ nas granjas UPL. O valor obtido para as granjas UCT está de acordo com o valor médio de $0,11 \text{ Nm}^3/\text{animal.dia}$ obtido experimentalmente por Marques (2012).

O valor obtido para a granja UPL está um pouco abaixo do utilizado em OLIVEIRA & HIGARASHI 2006, de $0,75 \text{ Nm}^3/\text{matriz.dia}$.

A produção estimada de biogás na população a partir dos valores considerados é de $50.130 \text{ Nm}^3/\text{dia}$ ou $2.089 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

3.6.1 Análise de sensibilidade do modelo

3.6.1.1 Temperatura e TRH

Através da análise de sensibilidade foi possível constatar que a produção de biogás por animal aumenta com o aumento da temperatura do substrato, do TRH e de ambos.

Como pode ser observado na Figura 28, a influência da temperatura é maior que a do TRH, e uma maior produtividade é obtida quando os dois aumentam.

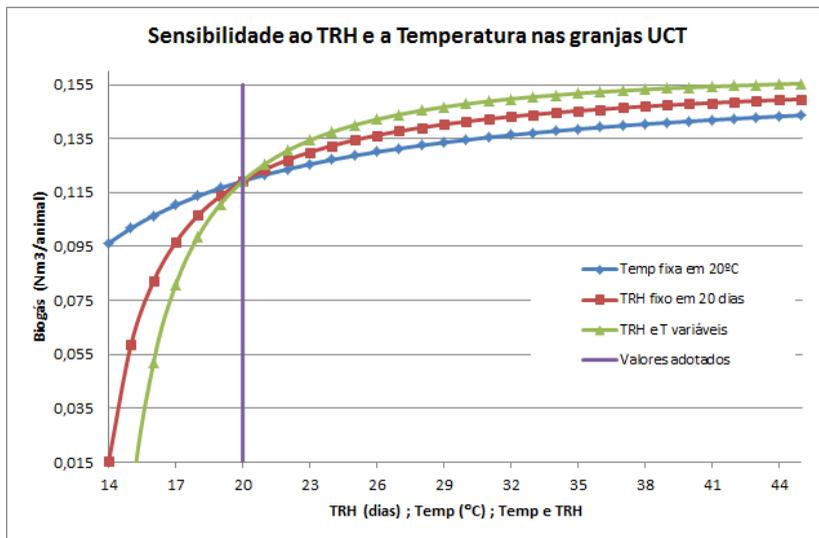


Figura 28 - Sensibilidade do modelo ao TRH e a temperatura para uma granja UCT

Constatou-se também que o aumento da produção de gás com o aumento da temperatura diminui conforme o TRH aumenta.

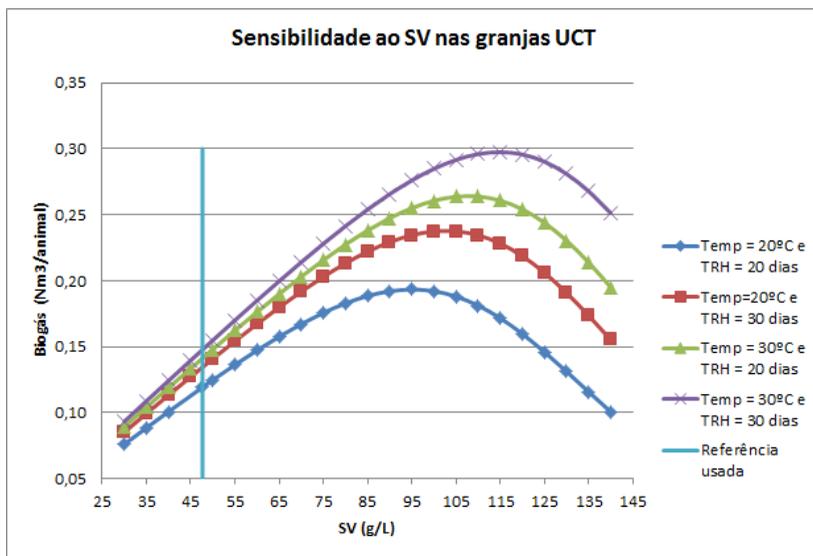
É importante notar a queda acentuada na produção de biogás nas temperaturas mais baixas, principalmente abaixo de 17°C.

Assim, para uma maior produção de biogás deve-se aumentar o TRH do digestor e também sua temperatura. O aumento do TRH é obtido a partir do aumento do biodigestor. Já o aumento da temperatura pode ser feito através do uso da cogeração aliado a um sistema de aquecimento. Porém, quanto maior o digestor, mais caro e maior a energia necessária para aquecê-lo, e a produção adicional de gás pode não compensar os custos. Portanto, devem-se priorizar aspectos econômicos e procurar obter uma produção de biogás adequada com um custo aceitável.

3.6.1.2 Sólidos voláteis

Através da análise de sensibilidade é possível constatar também que a produção de biogás aumenta com o aumento da concentração de SV no substrato até um momento em que o biodigestor se torna

sobrecarregado e então a produção começa a cair, como pode ser observado na Figura 29. Neste ponto a produção é máxima.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 29 - Sensibilidade do modelo a concentração de SV

Observou-se também que o ponto de concentração máxima aumenta com o aumento da temperatura e do TRH.

Portanto, para se obter uma máxima produção de biogás deve-se procurar aumentar a concentração de SV no substrato. Esse aumento pode ser obtido diminuindo-se ao máximo o desperdício de água nas granjas, evitando-se a infiltração de água da chuva e através da adição de outras biomassas.

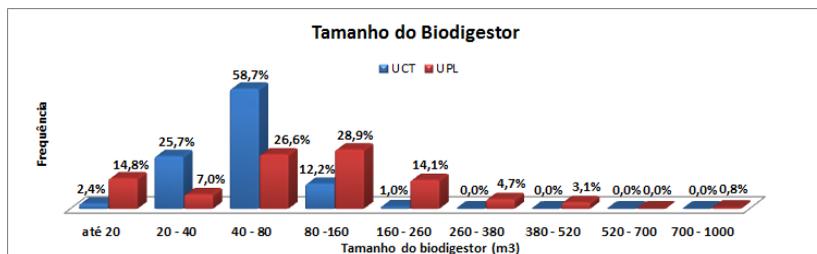
A análise de sensibilidade do modelo considerou a produção de biogás em granjas UCT. Como a produção específica de biogás e a concentração de SV adotada é a mesma para ambas as granjas, a diferença de produção de biogás por animal nas granjas vai depender da quantidade de dejetos produzida. Como a quantidade de dejetos adotada como referência para as granjas UPL é 4,71 vezes maior que nas granjas UCT, a produção de biogás por matriz pode ser obtida através da multiplicação do valor obtido para a granja UCT por este valor.

3.7 TAMANHO DOS BIODIGESTORES E TANQUES DE BIOFERTILIZANTE

A estimativa do tamanho dos digestores e tanques de biofertilizantes é fundamental na análise da adequação dos equipamentos disponíveis no mercado e para a análise da viabilidade econômica.

Adotando-se um TRH de 20 dias e produção de 4,84 e 22,8 L/dia.animal nas granjas UCT e UPL, respectivamente, a partir da equação 3.1 podemos estimar o tamanho do biodigestor para cada propriedade.

A Figura 30 apresenta a distribuição das granjas em faixas de tamanho do biodigestor.



Fonte: elaborado pelo autor

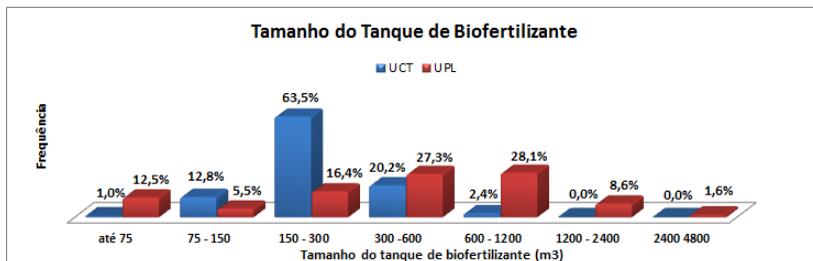
Figura 30 - Distribuição das granjas quanto ao tamanho do biodigestor

Observa-se que a grande maioria das granjas UCT (86,8%) necessita de um biodigestor de até 80 m³, sendo a faixa de 40 a 80 m³ responsável por 58,7%. O menor biodigestor foi de 12 m³ o maior de 232 m³ e o médio de 58 m³.

Já nas granjas UPL, a grande maioria (69,6%) é atendida por biodigestores de 40 a 260 m³, sendo a faixa de 80 a 160 m³ responsável por 28,9%. O menor biodigestor foi de 2 m³ o maior de 912 m³ e o médio de 118 m³.

Devido à falta de informações sobre o balanço entre a precipitação média mensal e a evaporação potencial mensal na região, os tanques de biofertilizantes foram dimensionados com volume para armazenamento de 120 dias descontando-se o volume do digestor.

A Figura 31 mostra a distribuição das granjas conforme o tamanho do tanque de biofertilizante.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 31 - Distribuição das granjas quanto ao tamanho do tanque de biofertilizante

Observa-se que a maioria das granjas UCT (63,5%) necessitam de um tanque entre 150 e 300 m³. O menor tanque é de 61 m³, o maior de 1.162 m³ e a média de 262 m³.

Nas granjas UPL, a maioria (55,4%) é atendida por um tanque de 300 a 1.200 m³. O menor tanque é de 11 m³ o maior de 4.560 m³ e a média de 590 m³.

3.8 POTÊNCIA E DISPONIBILIDADE DAS PLANTAS

Com base na produção de biogás, podemos estimar as potências dos motogeradores necessários para as plantas converterem sua produção de biogás em EE e calcular a sua disponibilidade.

3.8.1 Potência das plantas

A estimativa da potência dos grupos geradores é importante para orientar a busca por equipamentos de tamanho adequado aos projetos.

Para a estimativa da potência dos geradores, foi usada a vazão disponível de biogás que foi considerada como sendo a sua taxa de produção.

Adotou-se como requisito a utilização de todo biogás produzido.

Nesta estimativa a eficiência média de conversão do biogás em EE adotada foi de 28% referente à eficiência média dos motogeradores encontrados no mercado.

O Poder Calorífico Inferior (PCI) adotado para o biogás foi de 6,445 kWh/Nm³ (23.202 kJ/Nm³) equivalente a biogás com aproximadamente 65% de metano (50.016 kJ/kg) (TURNS, 2013; GUSMÃO, 2008).

O cálculo da potência elétrica equivalente disponível é dado pela equação 3.6:

$$P_{el} = \dot{V}_{gás} * PCI * \eta_{el} \quad (3.6)$$

onde:

P_{el} = Potência Elétrica Equivalente Disponível (kW)

$\dot{V}_{gás}$ = vazão de biogás disponível (Nm₃/h)

PCI = Poder Calorífico Inferior do biogás (kWh/Nm³)

η_{el} = eficiência de conversão do biogás em EE

Como é impossível ter uma potência para cada planta, foram especificadas potências instaladas para que não existisse um *gap* muito grande entre elas e que a potência subsequente fosse no máximo o dobro da anterior. Esse critério foi adotado para que se alguma planta que tenha potência elétrica equivalente um pouco maior que o limite da potência instalada inferior, não funcione menos de 12 horas na potência instalada posterior. Neste ponto, não se levou em consideração se as potências especificadas existem ou não no mercado, mas sim a potência ideal para atender a população.

A Figura 32 mostra a distribuição das granjas nas potências especificadas. Pode-se observar que a grande maioria (96%) das granjas UCT tem toda sua produção de biogás convertida em EE por um motogerador de até 10 kW, sendo a potência de 6 kW responsável por atender 63,3% das granjas. Apenas uma granja tem potência acima de 20 kW. Isto se deve ao tamanho reduzido das granjas UCT.

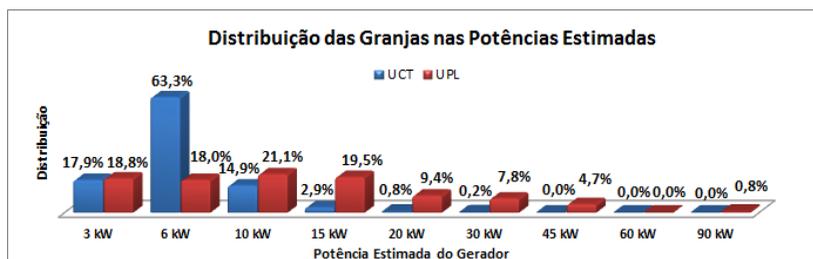


Figura 32 - Distribuição das granjas nas potências estimadas

Já nas granjas UPL, as potências estão mais igualmente distribuídas e atingem níveis maiores de potência. Porém ainda assim,

77,4% das granjas são atendidas por um motogerador de até 15 kW e apenas uma granja tem potência superior a 45 kW.

É fundamental destacar que 94,5% das granjas são atendidas com um motogerador com potência de até 15 kW.

Assim fica evidente o tamanho reduzido das granjas, o que é uma característica marcante nas propriedades suinícolas da região sul.

A potência instalada estimada nas granjas UCT foi de 3.180 kW e nas UPL de 1.755 kW.

3.8.2 Fator de disponibilidade das plantas

A redução da disponibilidade de uma planta de geração de EE pode ser devido a interrupções programadas, como no caso de manutenções preventivas e a interrupções forçadas como no caso de manutenções corretivas ou falta de combustível.

O fator de disponibilidade (*FD*) é definido como sendo a razão entre as horas disponíveis para funcionamento e as horas no período considerado.

A especificação da potência instalada superior mais próxima da potência elétrica equivalente disponível está associada a uma redução da disponibilidade da planta. Por exemplo, uma planta que possui uma potência elétrica equivalente disponível de 12,5 kW, será especificada com uma potência instalada de 15 kW com uma disponibilidade de 83,3%.

A redução da disponibilidade da planta é devido à falta de biogás em decorrência do aumento do consumo pelo motogerador de maior potência e também devido às paradas programadas para manutenção.

O fator de disponibilidade devido à falta de biogás decorrente do aumento de potência (para geradores com o mesmo rendimento) pode ser obtido dividindo-se a potência menor pela potência maior ($FD=12,5/15=0,833$).

Assim o gerador de 15 kW irá funcionar somente 20 horas por dia ($0,833 \times 24h = 20h$).

A disponibilidade em horas por dia pode ser calculada pela equação 3.7:

$$D = \frac{n^{\circ} \text{de animais} * \dot{V}_{bio/cab}}{\text{Consumo}} \quad (3.7)$$

onde:

D = disponibilidade (h/dia)

$\dot{V}_{bio/cab}$ = produção de biogás por animal ($Nm^3/dia. animal$)

Consumo = consumo de biogás pelo motor (Nm^3/h)

A disponibilidade média para as potências estimadas nas granjas UCT foi de 74,32% e nas UPL de 71%.

3.9 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O potencial de geração de energia elétrica pode ser obtido através do produto entre a potência elétrica equivalente disponível (P_{el}) em cada planta e o tempo considerado, ou a partir da potência elétrica instalada (P_{inst}) e da disponibilidade de cada planta no período considerado. Neste trabalho adotou-se a segunda maneira.

O potencial de geração de EE é calculado pela equação 3.8:

$$PGEE = \sum P_{inst} * FD * t \quad (3.8)$$

onde:

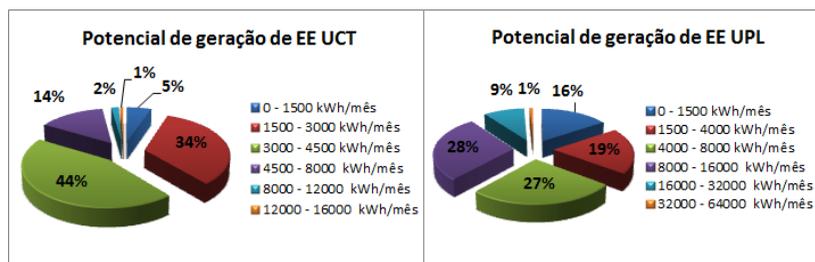
$PGEE$ = Potencial de Geração de Energia Elétrica (kWh)

P_{inst} = Potência Elétrica Instalada da planta (kW)

FD = fator de disponibilidade da planta

t = período de tempo considerado (h)

A Figura 33 mostra a distribuição do potencial de geração de EE estimado em faixas.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 33 - Distribuição das granjas em faixas de potencial de geração de EE

O PGEE foi estimado com disponibilidade de 98,60% devido a manutenções preventivas e com o fator de disponibilidade dado pela produção de biogás individual de cada planta.

Nas granjas UCTs o maior PGEE é 15.422 kWh/mês e o menor 803 kWh/mês. Nas granjas UPL o maior PGEE é 60.309 kWh/mês e o menor 150 kWh/mês.

O PGEE nas granjas UCT é de 1.710.530 kWh/mês e nas UPL de 996.668 kWh/mês totalizando 2.707.198 kWh/mês e 32.486.376 kWh/ano.

Esta estimativa não considera aspectos técnicos e econômicos. Ela foi feita para se ter ideia do tamanho do potencial teórico de produção de EE.

3.10 POSSIBILIDADES DE GERAÇÃO DE BIOGÁS, ENERGIA ELÉTRICA E TÉRMICA

Esta seção apresenta as possibilidades de arranjos físicos e os modos de operação das plantas para geração de biogás, EE e ET na população, bem como os equipamentos necessários e os disponíveis no mercado nacional e analisa a adequação destes às necessidades dos projetos.

3.10.1 Arranjos físicos para a geração de biogás e EE

Basicamente existem três diferentes arranjos para a produção de biogás e EE na população em estudo:

- 1) Geração de biogás e EE centralizados, onde a biomassa seria transportada via modal rodoviário ou dutos até uma central de geração;
- 2) Geração de biogás descentralizada e EE centralizada, onde o biogás seria produzido localmente e transportado por biogásotutos até uma central de geração;
- 3) Geração de biogás e EE de forma descentralizada, sendo o transporte da EE pela rede elétrica já existente.

O foco deste estudo está concentrado na opção 3, geração de biogás e energia elétrica descentralizada, onde cada produtor teria sua planta de geração de EE a biogás (PGEB). Para isto são necessários equipamentos adequados ao tamanho de cada propriedade.

3.10.2 Modos de operação

Basicamente existem dois modos de operação para uma PGEB. O modo isolado e o modo conectado a rede da distribuidora de EE.

3.10.2.1 O modo isolado

No modo isolado, a EE gerada na PGEB não tem contato com a rede da concessionária. Assim para alimentar as cargas da granja é necessário desconectar a UC da rede de distribuição e conectá-la ao gerador da PGEB. Caso a granja não possua produção suficiente de biogás, a geração de EE pode ser feita por um determinado número de horas durante o dia, preferencialmente nos horários de maior consumo e posteriormente reconectada ao sistema de distribuição. Outra possibilidade é alimentar determinadas cargas com a construção de uma rede exclusiva para a energia gerada na PGEB.

Dessa forma, quando desconectada da rede, toda a energia da granja será provida pela PGEB que deverá ter potência suficiente para atender o pico de carga e o acionamento de cargas indutivas.

Conforme as cargas são ligadas e desligadas, a máquina primária precisará realizar mais ou menos trabalho. Quando uma carga elétrica é acionada, o gerador irá transformar esta carga em um torque em seu eixo, que por sua vez será transmitido ao motor que, se mantiver a potência constante, irá sofrer uma queda em sua velocidade e por consequência uma queda na frequência da EE. Ao se diminuir a carga elétrica o inverso acontece e a frequência tende a aumentar.

Quando em funcionamento isolado da rede, esses efeitos são mais pronunciados, pois toda potência necessária está vindo do motor. Assim é preciso um controle rigoroso da velocidade do motor para se manter a tensão e a frequência em níveis adequados (ORLANDO, 1996). O controle da frequência é realizado através do controle de velocidade do motor, que por meio de um acelerador eletrônico regula a quantidade de ar e biogás que entra no motor e assim a sua velocidade. O controle de tensão é realizado controlando-se a corrente de excitação do campo magnético através do regulador automático de tensão (AVR) existente no gerador, maior corrente maior tensão e vice versa.

3.10.2.2 O modo conectado a rede

No modo conectado a rede da concessionária, como é o caso do SCEE, a PGEB está conectada a rede da distribuidora através do ponto

de conexão da UC. Neste caso, quando a energia gerada na PGEB não for suficiente para alimentar as cargas da propriedade ou para acionar as cargas indutivas, a energia da rede é utilizada, funcionando assim como uma grande bateria. Porém, neste modo a potência do gerador ou a potência injetada na rede fica limitada a carga instalada da unidade consumidora.

Este modo de operação permite que geradores com potências menores sejam capazes de suprir ao longo do tempo toda a energia necessária para a propriedade e caso exista um excedente de EE ele pode ser injetado na rede.

Paralelismo permanente

Quando o sistema está conectado a rede da distribuidora (paralelismo permanente), a tensão e a frequência da EE gerada são determinadas pela tensão e frequência da rede. Dessa forma, o controlador de velocidade não controla mais a frequência da EE, mas sim a potência que está sendo entregue a rede (ORLANDO, 1996).

Da mesma forma, o controlador de tensão não controla mais a tensão da EE gerada e sim a quantidade de potência reativa produzida, através da corrente de excitação do campo magnético. Baixa corrente de excitação faz com que o gerador puxe da rede potência reativa, alta corrente de excitação faz com que o gerador injete potência reativa na rede. Assim geradores síncronos conectados a rede podem ser usados para corrigir o fator de potência.

Porém para que a injeção de energia na rede seja possível, é necessário uma série de equipamentos que permitam que isto ocorra com segurança.

Controlador do Grupo Gerador

Para conectar o motogerador a rede, é preciso um controlador de grupo gerador capaz de realizar o paralelismo permanente com a rede. Este equipamento é responsável por sincronizar a forma de onda (frequência, módulo e fase) da tensão gerada com a da rede e controlar a potência ativa e reativa injetada na rede. Ele monitora a frequência e a fase da tensão da rede e envia um sinal para o controlador de velocidade do motor para que acelere ou desacelere o motor de forma que a frequência e a fase da tensão gerada seja a mesma da rede. No momento em que a forma de onda da rede e do gerador forem iguais, o controlador do grupo gerador envia um sinal para os contadores

estabeleceram a conexão. Após feita a conexão, a tensão e a frequência são dados pela rede, e o controlador do grupo gerador passa a controlar a potência ativa (através do envio de sinal ao controlador de velocidade) e reativa (através do envio de sinal ao controlador de tensão) injetada na rede.

Relé de Proteção

Para que quaisquer distúrbios na tensão da rede ou da PGEB não causem danos aos sistemas, é necessário um relé de proteção da conexão. Este relé monitora os dois lados da conexão, e caso ele detecte alguma anomalia na tensão em algum dos lados, ele envia um sinal para os contadores desfazer a conexão.

Medidor Bidirecional

Além do controlador do grupo gerador e do relé de proteção, é necessário também um medidor bidirecional de EE. Este medidor irá contabilizar de forma separada a energia que entra e a energia que sai da UC. Com estes equipamentos é possível fazer a conexão com a rede de forma segura e conforme exigido pela RN482 e a distribuidora.

Observa-se que o número de equipamentos necessários para se operar conectado a rede é maior, porém esta forma também apresenta maiores benefícios, principalmente para pequenas PGEB que sozinhas não conseguiriam dar conta das cargas indutivas das propriedades e nem funcionar de forma contínua. Mas apesar de possuir maiores benefícios, é também muito mais cara e possui limitações, sendo assim necessária uma análise técnica e econômica para cada caso.

Neste trabalho analisaram-se os dois modos de operação.

3.10.3 Uso da energia térmica

A produção de EE a partir de motogeradores tem uma eficiência média de conversão da energia primária do biogás de aproximadamente 30%. O restante desta energia é transformado em calor que é dissipado para o ambiente através dos gases de exaustão, do sistema de arrefecimento do motor, e uma parcela é perdida por atrito e radiação da carcaça do motor.

Grande parte dessa energia pode ser recuperada na forma de energia térmica útil para a produção de frio, calor ou água de processo.

Este trabalho propõe o uso da cogeração para o aquecimento do biodigestor e analisa a influência do aquecimento na produção de biogás e EE.

Para que isto seja possível é necessário à disponibilidade de cogeneradores ou trocadores de calor gás-água e água-água adequados ao tamanho das granjas.

3.10.4 Equipamentos necessários

Esta seção especifica os equipamentos básicos necessários para se implantar as PGEs na população.

3.10.4.1 Planta isolada da rede

Os componentes básicos necessários para montar uma PGE isolada da rede são:

- Tanque de homogeneização;
- Caixa de desarenação;
- Biodigestor;
- Sistema de agitação;
- Tanque de biofertilizante;
- Sistema de remoção de H_2S ;
- Sistema de remoção de umidade;
- Motogerador com controle de tensão e velocidade;
- Rede de distribuição da EE;

3.10.4.2 Planta conectada a rede

Os componentes básicos necessários para montar uma PGE conectada a rede são:

- Tanque de homogeneização;
- Caixa de desarenação;
- Biodigestor;
- Sistema de agitação;
- Tanque de biofertilizante;
- Sistema de remoção de H_2S ;
- Sistema de remoção de umidade;
- Motogerador com controle eletrônico de tensão e velocidade com ajuste remoto de *setpoint*;

- Painel de conexão com a rede com controlador de grupos geradores capaz de prover o paralelismo permanente com a rede e relé de proteção da conexão capaz de prover as proteções 27, 59, 81 e 25;
- Rede de distribuição de EE;
- Medidor Bidirecional.

3.10.4.3 Plantas com aquecimento do biodigestor

Além dos equipamentos básicos comuns as PGEBS isoladas e conectadas a rede, para aquecer o biodigestor é necessário ainda:

- Substituição do motogerador por um cogenerator ou instalação de trocadores de calor gás-água e água-água no motogerador existente;
- Instalação de sistema de aquecimento no biodigestor;

3.10.5 Equipamentos disponíveis no mercado nacional

Esta seção apresenta os equipamentos disponíveis no mercado nacional para a construção das PGEBS na população.

3.10.5.1 Tanque de homogeneização

Pode ser construído em alvenaria, fibra de vidro, aço inox ou ainda com membranas de PVC ou PEAD, materiais amplamente disponíveis no mercado nacional.

Possui capacidade para armazenar de 2 a 3 dias a produção de dejetos.

Embora necessário, geralmente as empresas de biodigestores no Brasil não utilizam.

Quando presente no projeto acresce em cerca de 10% o valor do biodigestor.

3.10.5.2 Caixa de desarenação

Geralmente construída em alvenaria, funciona também como caixa de entrada ao biodigestor. Materiais para sua construção são altamente disponíveis no mercado.

Necessária para evitar o assoreamento do biodigestor com materiais inorgânicos é pouco utilizada pelas empresas nacionais, que normalmente fazem somente uma caixa de entrada simples.

Geralmente seu valor está incluso no preço do biodigestor e representa aproximadamente 4% em digestores pequenos (50 m^3), diminuindo conforme o digestor aumenta, chegando a menos de 1% nos maiores (1.000 m^3).

3.10.5.3 Biodigestor

Existem algumas empresa que instalam biodigestores no Brasil, porém a maioria são empresas de impermeabilização que trabalham com membranas de PEAD e oferecem o biodigestor como mais um produto.

A grande maioria dos biodigestores é do tipo canadense com tempo de retenção de 20 a 50 dias, construídos de PEAD ou PVC, alguns possuem sistema de agitação hidráulica e nenhum possui aquecimento. Os biodigestores podem ser construídos de qualquer tamanho.

Encontrou-se apenas uma empresa que constrói biodigestor mistura completa em geomembrana de PEAD e com agitação mecânica.

Nota-se que empresas estrangeiras, principalmente alemãs têm feito parcerias com empresas brasileiras, porém com pouquíssimos projetos realizados, todos com biodigestor mistura completa.

O preço dos biodigestores modelo canadense simples (lagoa coberta sem agitação) depende do seu tamanho, e variam de $500 \text{ R\$/m}^3$ para biodigestores menores como 50 m^3 até $70 \text{ R\$/m}^3$ para os digestores maiores como 1.000 m^3 . O preço por metro cúbico é maior nos digestores menores devido a alguns custos não variarem muito com o tamanho, por exemplo, a escavação e o serviço de montagem. Conforme o tamanho aumenta, estes custos são diluídos. Assim o preço do biodigestor de PEAD simples (sem agitação e aquecimento) praticado no mercado atualmente varia de 25 mil reais para um de 50 m^3 até 70 mil reais para um de 1.000 m^3 . Os digestores de PVC são em média 20% mais caros.

3.10.5.4 Tanque de biofertilizante

Geralmente feito em PEAD ou PVC, é necessário para que o dejetos complete um tempo mínimo de tratamento antes da aplicação no solo como fertilizante líquido. A menos que a estrutura existente possa ser reutilizada, é necessário quando da instalação do biodigestor.

Seu preço varia entre 80 R\$/m³ para os menores como 50 m³ até 12 R\$/m³ nos maiores como 5000 m³. Seu preço diminui com o tamanho pelos mesmos motivos do digestor.

Normalmente é feito pela empresa que faz o biodigestor.

3.10.5.5 Sistema de remoção de H₂S

São poucas as empresas que vendem filtros para remoção de H₂S no Brasil. Normalmente as empresa que vendem são as mesmas que vendem os motogeradores.

A falta ou a ineficiência de um filtro para a remoção do H₂S pode comprometer o sucesso de uma PGEb, pois o uso de biogás não purificado proveniente de dejetos suínos reduz de maneira drástica a vida de um motogerador.

Destaca-se também a dificuldade de achar elementos filtrantes como o óxido de ferro peletizado e o carvão ativado peletizado no mercado nacional.

O preço e características dos filtros para H₂S encontrados estão na Tabela 13.

Tabela 13 - Filtros para H₂S encontrados no mercado

Marca	Vazão (m ³ /h)	Máx. H ₂ S na entrada (ppm)	Elemento filtrante (kg)	Preço (R\$)	Compressor (cv)
A	35	1.200	50	10.500,00	2
A	35	2.500	100	15.900,00	3
A	70	1.200	100	15.900,00	3
A	70	2.500	200	22.950,00	5
A	140	1.200	200	22.950,00	5
A	140	2.500	400	45.900,00	7

Fonte: Elaborado pelo autor

Os filtros encontrados utilizam o princípio da adsorção, não são regeneráveis e tem duração de 8.760 horas. Devido à perda de carga, é necessário também o uso de um compressor radial para aumentar a pressão do biogás.

3.10.5.6 Sistema de remoção de umidade

A maioria das empresas realiza a remoção de umidade por condensação nas tubulações de biogás e utilização de purgas. Encontrou-se somente uma fabricante de desumidificador por

refrigeração mecânica. O preço deste sistema de remoção de umidade representa menos de 2% do valor do biodigestor.

3.10.5.7 Motogeradores e cogeneradores

Os motogeradores á biogás encontrados no mercado nacional e suas características encontram-se resumidas na Tabela 58 do apêndice C.

Exceto os motogeradores de 2,9 kW e 6,4 kW, todos utilizam motores a Diesel adaptados para o ciclo Otto.

Nenhum deles se constitui em cogenerador (CHP), sendo os trocadores de calor para aproveitamento somente da energia dos gases de exaustão vendidos por algumas empresas como opcionais.

Devido ao arrefecimento dos motogeradores de 2,9 e 6,4 kW ser a ar, fica inviável recuperar esta energia para a produção de água quente, ficando disponível para recuperação somente a energia dos gases de exaustão.

Esses dois geradores também não podem se conectar a rede da maneira convencional, pois não permitem o ajuste remoto do *setpoint* da velocidade do motor e da tensão, necessários para o controlador do grupo gerador fazer a conexão com a rede.

Todos os demais grupos geradores permitem o aproveitamento do calor dos gases de exaustão e arrefecimento do motor, bem como a conexão com a rede da distribuidora.

Observa-se da Tabela 58 que o motogerador de menor potência disponível no mercado nacional capaz de ser conectado a rede é de 20 kW com ligação trifásica.

3.10.5.8 Painel de Conexão com a rede

O painel de conexão com a rede é necessário nas PGEs que querem aderir ao SCEE. É formado basicamente pelo controlador do grupo gerador, relé de proteção e contadores.

Controlador de Grupos Geradores

Através da pesquisa, não foi possível encontrar nenhum controlador nacional de grupos geradores capaz de fazer paralelismo permanente com a rede. Isto pode inviabilizar economicamente o projeto ou parte dele, pois as linhas de crédito a juros atrativos para este tipo de projeto requerem que máquinas e equipamentos tenham no mínimo 60% de peças nacionais.

Os controladores encontrados normalmente são utilizados no paralelismo permanente com a rede no horário de ponta. Estes controladores permitem a sincronia de vários geradores entre si e destes com a rede da distribuidora, fornecendo ainda várias informações sobre a energia gerada e uma série de proteção para o grupo gerador.

Sem o controlador do grupo gerador é inviável se conectar a rede. Os controladores encontrados no mercado têm seu preço ajustado pelo dólar e na época da pesquisa (US\$ 1 = R\$ 2,10) custavam entre 7 e 12 mil reais.

Relé de Proteção

O relé de proteção que fornece as proteções necessárias exigidas pela Celesc para os microgeradores se conectar a rede é o mesmo utilizado em PCH's e subestações, o que contribui para o alto valor deste equipamento.

A maioria destes equipamentos é importada e ajustadas pelo dólar. Encontrou-se somente uma fabricante nacional e com preço superior aos importados. Os equipamentos encontrados no mercado variaram de 8 a 15 mil reais.

É possível fazer a conexão com a rede sem este equipamento, porém não permitida por regulamentação.

Cotatores

Os cotatores são equipamentos eletromecânicos mais simples e são encontrados com mais facilidade no mercado nacional. Seu preço varia entre 1.000 e 3.000 mil reais.

Painel de proteção e conexão completo

Embora os equipamentos que constituem o painel estejam disponíveis individualmente, a aplicação requer o trabalho deles de forma sincronizada e geralmente montada em um ou mais painéis. Então além do preço dos componentes individuais, é necessária a montagem e programação destes equipamentos o que encarece ainda mais o produto final.

Algumas empresas de motogeradores, assim como algumas empresas fabricantes destes equipamentos fornecem o painel pronto para uso. Como os equipamentos mais caros do painel são importados, o preço do painel é ajustado com o dólar. O preço dos painéis cotados quando o dólar estava R\$ 2,20 foi de 45 a 60 mil reais.

3.10.5.9 Trocadores de Calor

Os trocadores de calor são vendidos pelas empresas de motogeradores como um opcional, mas podem ser fabricados sob medida por empresas nacionais e não são difíceis de encontrar.

Os preços encontrados para trocadores gás-água variaram de 4,3 mil para um grupo gerador de 20 kW até 17,2 mil para um de 211 kW.

3.10.5.10 Sistema de Agitação

Normalmente as empresas de biodigestores oferecem a opção de instalar ou não o sistema de agitação. A maioria das empresas utilizam a agitação hidráulica. Apenas uma empresa nacional possui agitador mecânico.

O sistema de agitação hidráulico é adaptado com bombas e canos disponíveis no mercado.

Não existe empresa nacional que produza agitadores específicos para biodigestores.

O sistema de agitação representa em média um acréscimo de 40% no valor do biodigestor.

3.10.5.11 Sistema de Aquecimento

O aquecimento do digestor pode ser realizado de diversas formas, a mais comum é a circulação de água quente proveniente do cogador em seu interior. Para isso, podem ser usados tubos de PEAD ou aço inox no interior do digestor, que funcionam como trocadores de calor água-água.

Além dos tubos, pode ser necessário um isolante térmico nas paredes do digestor para evitar a troca térmica com o solo. Este isolante pode ser de diferentes materiais, tais como poliestireno e poliuretano.

Não se encontrou nenhuma empresa nacional que utiliza aquecimento do biodigestor, embora ele possa aumentar consideravelmente a produção de biogás.

O sistema de aquecimento pode representar um acréscimo de 35% no preço do biodigestor simples.

3.10.5.12 Rede de distribuição de EE

É responsável por conduzir a energia da PGEB até o ponto de conexão da UC com a rede da distribuidora. Normalmente é feito pela empresa que vendeu o motogerador ou algum parceiro.

Construída geralmente de cabos de alumínio multiplexados, isolantes e postes de concreto ou madeira tratada, fáceis de encontrar no mercado.

Seu custo é de aproximadamente 50 R\$/m para uma rede trifásica e 45 R\$/m para uma rede monofásica.

3.10.5.13 Medidor Bidirecional

Responsável por contabilizar a energia que entra e que sai da propriedade, deve ser instalado pela distribuidora de energia. O seu pagamento é descontado na conta de energia elétrica do consumidor. Na revisão da RN 482 a ANEEL pretende eximir o consumidor do pagamento deste valor, ficando assim a cargo da concessionária.

Seu valor varia de 500 a 3.000 reais e são todos importados.

3.10.6 Adequação dos equipamentos a população

A partir da especificação dos equipamentos necessários para a implantação das PGEs na população, e do levantamento dos equipamentos disponíveis no mercado, pode-se analisar a adequação destes aos projetos.

3.10.6.1 Estudo de caso para o motogerador de 2,9 kW

Além da especificação e do levantamento dos equipamentos necessários e disponíveis, a análise da adequação dos equipamentos para geração de EE a partir do biogás na população leva em consideração um estudo de caso prático realizado pelo autor na instalação de um motogerador de 2,9 kW numa propriedade com 25 matrizes em ciclo completo.

No estudo, foi construída uma rede exclusiva para levar a energia do gerador até a casa do produtor e a maternidade dos suínos. A proposta era alimentar 4 refrigeradores de 400W na casa do produtor e mais 10 lâmpadas de 100W responsáveis por aquecer os leitões recém nascidos na maternidade, totalizando 2,6 kW de carga.

A produção estimada de biogás por matriz era de $1,15 \text{ Nm}^3/\text{dia}$ o que representa uma produção de $28,75 \text{ Nm}^3/\text{dia}$. Baseado no consumo fornecido pelo fabricante de $2 \text{ Nm}^3/\text{h}$, o motogerador deveria funcionar 14,4 horas por dia. Na prática o grupo gerador funcionou de 3 a 4 horas diárias, chegando ao máximo de 12 h/dia. Este tempo de funcionamento reduzido deveu-se principalmente a menor produção de biogás em dias frios e o pequeno volume da campânula.

Outra informação importante para a análise da viabilidade técnica de projetos com este gerador são os fatos dele não possuir controle da quantidade de biogás fornecida ao motor, e o controle da velocidade do motor ser mecânico. O primeiro fato faz com que o motogerador não possa trabalhar com cargas variáveis, principalmente indutivas. O segundo fato impede que o motogerador seja sincronizado com a rede, e dessa forma não pode participar do SCEE.

A proposta inicial de alimentar 4 refrigeradores e 10 lâmpadas não foi possível pois os refrigeradores representam o funcionamento intermitente de cargas indutivas, o que fazia com que o gerador funcionasse em frequências muito abaixo de 60 Hz quando estas eram acionadas.

Dessa forma, somente as 10 lâmpadas puderam ser alimentadas de forma satisfatória pelo gerador.

Uma informação de fundamental importância para a análise econômica de projetos com este gerador, descoberta somente através do manual do proprietário, está na necessidade de se trocar o óleo do motor (1litro) a cada 20 horas de uso. Supondo o preço do kWh pago pelo produtor de R\$ 0,40, em 20 horas de funcionamento, o motogerador pode produzir o equivalente a R\$ 23,20 reais. Se considerarmos o preço do óleo de R\$ 10,00 reais por litro, a economia por kWh produzido é de R\$ 0,23 reais sem contar os demais custos de manutenção e amortização do investimento.

O gerador de 6,4 kW é do mesmo fabricante do de 2,9 kW e possui as mesmas características.

Portanto, baseado nestas informações os geradores de 2,9 kW e 6,4 kW são considerados inadequados tecnicamente para alimentar uma granja de forma isolada e também para se conectar a rede da distribuidora de EE, ficando assim impedidos de participar do SCEE.

Uso de inversores e retificadores

Existe a possibilidade de corrigir os problemas técnicos desses dois geradores utilizando-se inversores de frequência aliado a retificadores.

Estes equipamentos podem ser utilizados para deixar a carga dos geradores constante ao mesmo tempo em que fazem a conexão com a rede da distribuidora. Como estes equipamentos possuem as proteções necessárias para se conectar a rede segundo o módulo 3 do PRODIST, teoricamente eles poderiam participar do SCEE de forma muito semelhante a geradores eólicos.

Esta possibilidade foi levantada pelo autor e precisa ser validada por meio de teste para que possa ser autorizada pela ANEEL.

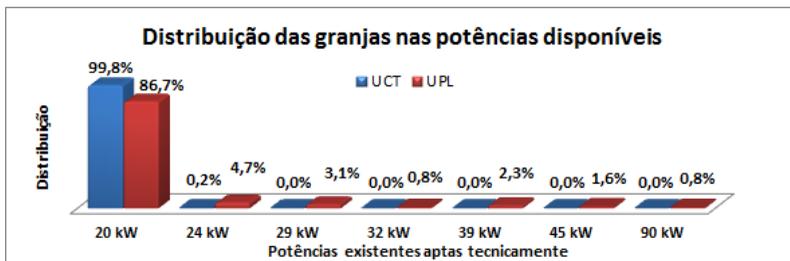
3.10.6.2 Tamanho dos Geradores

Percebe-se que os motogeradores disponíveis no mercado e capazes de se conectar a rede, são para grandes granjas e atendidas por rede trifásica. Para poder ser utilizado conectado a rede na maioria da população o menor grupo gerador disponível no mercado apto a ser conectado a rede (20 kW) precisa ser “adaptado” mudando-se seu esquema de ligação de trifásico para monofásico, o que reduz em aproximadamente 40% sua potência máxima e 8% de seu rendimento (WEG, 2015). Essa modificação faz com que o menor gerador apto tenha uma potência máxima de 12 kW, consumo de 8,5 Nm³/h e um rendimento reduzido para 22%. Isto é aparentemente bom, pois a potência está mais próxima da necessária pela população aumentando a disponibilidade do grupo, mas é pior do que se a mudança não ocorresse, pois a mudança na ligação faz com que seu rendimento diminua consideravelmente, pois o motor fica superdimensionado para o gerador e trabalha em carga parcial mesmo quando o gerador está com 100% da carga.

Para funcionar o motogerador de 12 kW monofásico conectado a rede (o menor apto disponível) de forma contínua em carga máxima, são necessários 1715 suínos em terminação (0,119 Nm³/dia), ou 364 matrizes (0,557 Nm³/dia). Esses valores são respectivamente 3,15 vezes a média de suínos em terminação e 1,41 vezes a média de matrizes na população.

Nas granjas isoladas da rede o gerador trifásico com a potência original (20 kW) pode ser utilizado.

A Figura 34 mostra a distribuição das granjas nas potências disponíveis no mercado nacional aptas para atender os projetos tanto isolados como conectados a rede.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 34 - Distribuição das granjas nas potências disponíveis no mercado

Ao comparar-se este gráfico com o da distribuição nas potências estimadas (Figura 32), percebe-se claramente o tamanho inadequado dos motogeradores para as granjas conectadas. Nas granjas UCT apenas uma tem potência acima de 20 kW e nas UPL apenas uma maior que 45 kW.

Essa maior potência, aumenta consideravelmente a potência instalada e diminui a disponibilidade da planta na mesma proporção.

A nova potência instalada neste caso é de 9.824 kW nas granjas UCT e 2.809 kW nas granjas UPL. Essa potência é 3,1 vezes maior que a potência instalada estimada para as granjas UCT e 1,6 para as UPL. O que implica em um custo de instalação substancialmente maior que o necessário para as plantas conectadas.

Como a potência mínima necessária para as granjas isoladas é aproximadamente 20 kW o menor gerador disponível é razoavelmente adequado.

Devido ao tamanho reduzido das propriedades, principalmente as UCTs, a disponibilidade do motogerador reduz consideravelmente.

A nova disponibilidade média neste caso é de 24% nas UCT e 45% nas UPL.

3.10.6.3 Condicionamento do biogás

Existe uma grande carência em equipamentos para condicionamento do biogás, principalmente no que se refere à remoção de H₂S e umidade, o que pode comprometer a vida útil dos motores.

3.10.6.4 Conexão com a rede

Os equipamentos para conexão com a rede são na sua grande maioria importados, cotados em dólar e provém de aplicações de megawatts, o que é responsável pelo seu alto preço. Assim existe uma carência muito grande de equipamentos nacionais que viabilizem a conexão com a rede de forma segura e mais barata.

O fato dos equipamentos serem nacionais é fundamental para atender o índice de nacionalização e garantir o financiamento com linhas de crédito subsidiadas do BNDES.

3.10.6.5 Conclusão

Diante do exposto, conclui-se que alguns dos fatores limitantes tecnicamente são a falta de motogeradores de tamanho e tecnologia adequados as granjas no caso de PGEBS conectadas a rede, e o tamanho reduzido das granjas no caso das PGEB isoladas da rede.

3.11 GRANJAS REPRESENTATIVAS

Para realizar uma análise técnica e econômica detalhada, a fim de obter generalizações, foram definidas granjas representativas da população. Devido às características distintas das granjas UCT e UPL, foram definidas uma para cada tipo.

Para que as unidades escolhidas representem o maior número de granjas possível, os valores adotados para as variáveis serão dados pelos valores médios obtidos no estudo da população.

A Tabela 14 apresenta os dados das granjas que representam a população.

Tabela 14 - Dados das granjas representativas

Granja	Número de animais	Consumo de EE	Preço do kWh	ICMS	Rede	Disjuntor (A)
UCT	542	870	0,44	15,60%	monofásica	40
UPL	259	2840	0,45	18,50%	monofásica	60

Vale destacar que quanto ao número de animais, produção de dejetos e biogás, uma matriz equivale a 4,7 suínos em terminação. Dessa forma, 542 suínos em terminação equivalem a 115 matrizes e 259 matrizes equivalem a 1.220 suínos em terminação.

A configuração da PGEB é a mesma para as granjas UCT e UPL, o que irá variar será o tamanho/disponibilidade do biodigestor, tanque de biofertilizante e motogerador devido a maior ou menor produção de dejetos e biogás conforme o número/tipo de animal.

O número de animais determinará a produção de biogás e dessa maneira a potência elétrica equivalente disponível.

O consumo de EE, tipo de rede e corrente do disjuntor têm importância para a determinação da potência mínima necessária, tipo do

gerador (mono ou trifásico) e potência máxima que pode ser injetada na rede.

O consumo de EE, preço da EE, e a alíquota dos impostos têm grande importância na análise econômica das granjas, pois determinam se a planta é viável economicamente.

4 ANÁLISE TÉCNICA DAS GRANJAS REPRESENTATIVAS

A análise técnica das granjas representativas compreende:

- Descrição das granjas representativas;
- Descrição das PGEBs propostas;
- Análise termodinâmica dos Biosistemas Integrados (BSI) formados;
- Simulação dinâmica dos BSIs levando em consideração as condições climáticas locais e a curva de carga da propriedade;

4.1 DESCRIÇÃO DAS GRANJAS REPRESENTATIVAS

As informações utilizadas nas descrições das granjas foram obtidas da análise dos dados da população, de informações obtidas com a gerência da área de suinocultura da Cooper A1 e em conversas com produtores, técnicos e funcionários da cooperativa.

4.1.1 Localização e tamanho

As granjas propostas localizam-se na cidade de Palmitos, Extremo Oeste de Santa Catarina.

A granja UCT possui 542 animais e a granja UPL possui 259 matrizes.

Na granja UCT os animais entram com 23,5 kg em média, permanecem por aproximadamente 120 dias no regime de engorda, e saem para o abate com 120 kg.

Na granja UPL são produzidos em média 26 leitões de 23,5 kg/matriz.ano. Durante um ano, 45% do plantel de matrizes é renovado. As matrizes são descartadas com peso médio de 230 kg e as matrizes novas entram na granja com 100 kg em média.

Neste trabalho considerou-se a energia no suíno sendo 9.205 kJ/kg (COMITRE, 1995).

4.1.2 Quantidade e qualidade dos dejetos

São produzidos diariamente 2,62 m³ e 5,9 m³ de dejetos nas granjas UCT e UPL, respectivamente.

A concentração de sólidos voláteis em ambas as granjas é de 47,67 kg/m³ de dejetos.

4.1.3 Consumo de EE, ração e água

O consumo mensal de energia elétrica nas granjas são 870 kWh/mês para UCT e 2840 kWh/mês para UPL.

O consumo médio diário de ração e água na granja UCT são 2 kg (Cooper A1, 2015a) e 7,87 L (TAVARES, 2012) por animal ao dia, respectivamente.

O consumo médio diário de ração e água na granja UPL são 4,52 kg (Cooper A1, 2015a) e 35,3 L (FATMA, 2014) por matriz ao dia. Estes valores já incluem o consumo de água e ração pelos leitões na creche.

O conteúdo energético médio da ração em ambas as granjas é 14.216,14 kJ/kg (Cooper A1, 2015a).

4.1.4 Preço da EE e impostos

O preço do kWh médio pago pela granja UCT é R\$ 0,44 centavos e a alíquota média do ICMS é 15,6%.

O preço do kWh médio pago pela granja UPL é R\$ 0,45 centavos e a alíquota média do ICMS é 18,5%.

O PIS e a COFINS representam 3,6% em ambas as granjas.

O adicional provocado pela bandeira tarifária vermelha representa 16% do preço pago pelo kWh em ambas as granjas.

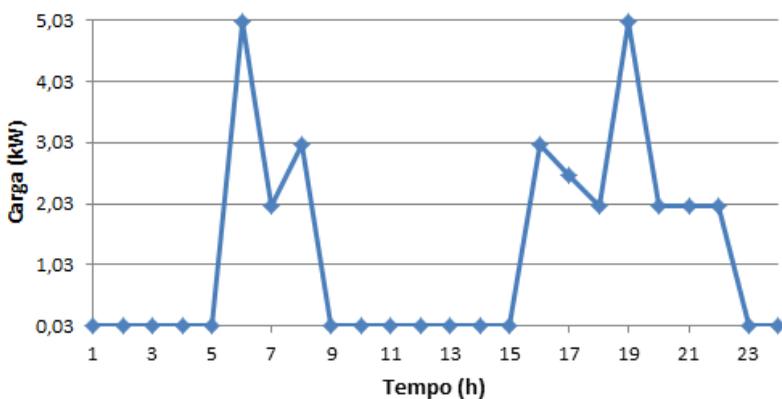
4.1.5 Rede, carga instalada e curva de carga

A granja UCT é atendida por uma rede monofásica e possui um disjuntor de 40A, o que corresponde a uma carga instalada de 8,8 kW.

A granja UPL é atendida por uma rede monofásica e possui um disjuntor de 60A, o que corresponde a uma carga instalada de 13,2 kW.

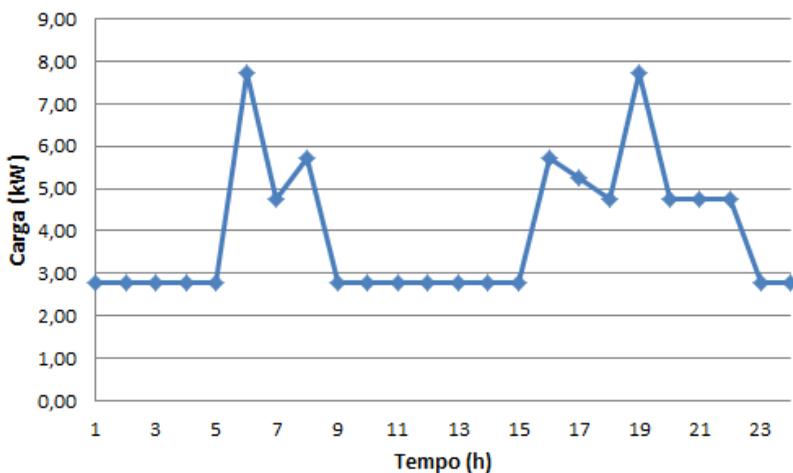
Com base nas conversas com os produtores e técnicos da cooperativa pôde-se obter uma curva de carga aproximada para as granjas conforme mostra as Figuras 35 e 36.

Observa-se que as curvas são muito semelhantes, diferindo apenas na carga base, que na granja UPL é devida a carga constante resultado do aquecimento dos leitões.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 35 - Curva de carga da granja UCT



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 36 - Curva de carga da granja UPL

4.1.6 O clima

O clima na região das granjas apresenta temperatura média anual de 19°C, com elevada amplitude térmica, mínimas próximas a zero grau no inverno e máximas próximas a 35°C no verão.

4.2 DESCRIÇÃO DAS PGEB

Para cada uma das granjas representativas (UCT e UPL) foram propostas quatro diferentes configurações de Plantas de Geração de Energia Elétrica a biogás, são elas:

- PGEB isolada da rede e sem aquecimento (PGEB1)
- PGEB isolada da rede e com aquecimento (PGEB2)
- PGEB conectada a rede e sem aquecimento (PGEB3)
- PGEB conectada a rede e com aquecimento (PGEB4)

A integração das granjas UCT e UPL com as PGEBs formam os Biosistemas 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 seguir são descritas as quatro plantas propostas e seus componentes.

4.2.1 PGEB isolada da rede e sem aquecimento (PGEB1)

A Figura 37 ilustra uma granja com PGEB isolada da rede e sem aquecimento do biodigestor.

Essa planta apresenta a configuração mais simples e de menor custo, pois não necessita do painel de conexão e proteção da rede e não possui aquecimento do biodigestor.

Os dejetos vão, diariamente, por gravidade até o tanque de homogeneização que serve para homogeneizar e regular o fluxo de alimentação do biodigestor.

Após ter sua vazão diminuída, os dejetos seguem também por gravidade ao biodigestor, onde permanecem em média o tempo definido pelo TRH e são convertidos em biogás e biofertilizante.

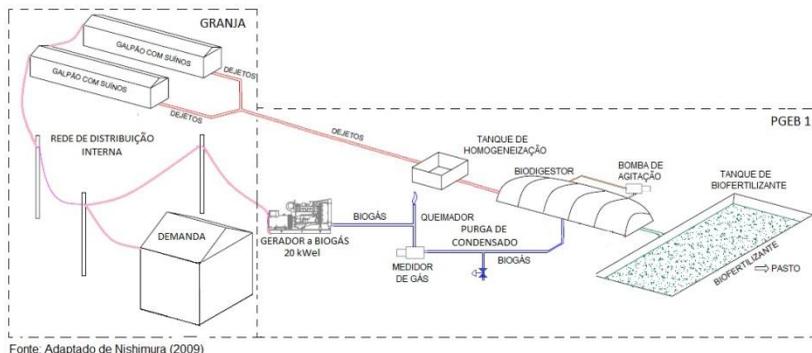


Figura 37 - PGEB1: Isolada da rede e sem aquecimento

Aproximadamente a mesma quantidade de dejetos que entra no biodigestor sai para o tanque de biofertilizante, de onde é aplicado ao solo com uma carga orgânica muito menor.

O biogás sai do biodigestor quente e saturado de umidade. Para a remoção da umidade e seu resfriamento, ele segue por uma tubulação enterrada até o motogerador. Para remover o condensado existem purgas ao longo da canalização.

A remoção de H_2S é feita através da biodesulfurização com injeção de ar no biodigestor na quantidade de 5% do volume de biogás produzido.

No motogerador o biogás é convertido em EE que alimenta as cargas da propriedade sem ter contato com a rede da distribuidora.

A energia gerada segue através de uma rede de distribuição interna exclusiva da propriedade.

Nas PGEBs isoladas da rede, como é o caso, a potência elétrica gerada é variável e igual a soma das cargas da granja e auxiliares da PGEB em cada instante.

Como a rede interna da granja é isolada da rede da concessionária, nas PGEBs isoladas a ligação do gerador é trifásica, aumentando assim a potência máxima do gerador e seu rendimento.

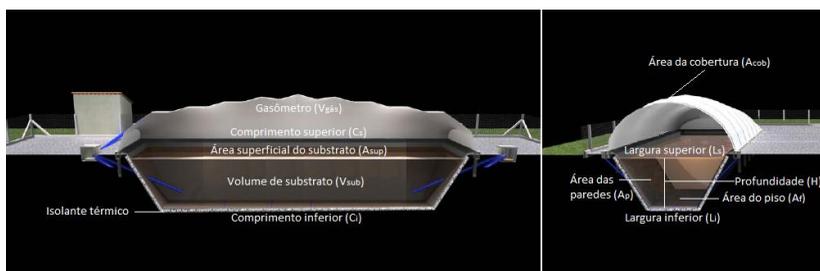
É importante salientar também, que as PGEBs sem aquecimento apesar de não possuírem as cargas auxiliares do sistema de cogeração, elas ainda apresentam a carga auxiliar referente a bomba de agitação do substrato no biodigestor. Essa carga, ao contrário das cargas auxiliares do sistema de cogeração, é fixa e funciona permanentemente, mesmo com o motogerador desligado.

Caso exista excesso de biogás no gasômetro, este é direcionado para um queimador para evitar sobre pressão e diminuir o potencial de efeito estufa do metano.

A seguir são apresentados os componentes principais da planta:

Biodigestor

O biodigestor utilizado na planta é do modelo canadense, com configuração tronco trapezoidal regular, confeccionado em geomembrana de PEAD e PEBDL com TRH de 20 dias, conforme ilustra a Figura 38. O biodigestor classifica-se por digestão úmida em uma fase e três estágios com alimentação contínua e mesofílico. O mesmo modelo de biodigestor é utilizado nas quatro diferentes configurações de PGEB, porém aquelas com aquecimento, o biodigestor possui uma camada de 5 cm de isolante térmico (0,035 W/m°C) entre as paredes, piso e o solo (1 W/m°C). A geomembrana de PEAD inferior possui 1,00 mm de espessura e a de PEBDL superior possui 1,25 mm de espessura, ambas com condutividade térmica de 0,35 W/m°C.



Fonte: Adaptado de Uruguai (2008)

Figura 38 - Modelo do biodigestor utilizado

Na granja UCT possui volume de 53 m³ e na granja UPL de 118 m³.

A Tabela 15 apresenta as dimensões dos biodigestores.

Tabela 15 - Dimensões dos biodigestores utilizados

Granja	H (m)	C _s (m)	C _i (m)	L _s (m)	L _i (m)	A _{sup} (m ²)	A _p (m ²)	A _f (m ²)	A _{cob} (m ²)	V _{sub} (m ³)	V _{gás} (m ³)
UCT	2,00	12,00	9,20	4,00	1,20	48,00	64,50	14,43	75,00	53,00	75,00
UPL	2,70	15,65	11,87	5,22	1,44	81,00	112,62	22,46	147,00	118,00	165,00

Fonte: elaborado pelo autor

Sistema de agitação

O sistema de agitação é formado por agitadores hidráulicos e uma bomba que retira o substrato de certo ponto e o injeta em diversos pontos do biodigestor. A bomba, conforme ilustra a Figura 39, foi dimensionada para aumentar o contato do substrato fresco com as bactérias, evitar gradientes pronunciados de temperatura e promover a dispersão dos metabólicos.



Fonte: FAL (2015)

Figura 39 - Modelo da bomba de agitação utilizada

Assume-se que a agitação proporciona uma velocidade mínima do substrato de 0,05 m/s. A agitação é utilizada em todas as PGEs com as mesmas configurações. O sistema de agitação funciona de forma contínua em todas as PGEs, constituindo-se assim em uma carga auxiliar fixa. Caso o motogerador estiver desligado a bomba consumirá energia da rede. A bomba de agitação funciona em potência máxima durante todo tempo.

Os dados técnicos das bombas de agitação são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Dados técnicos das bombas de agitação utilizadas

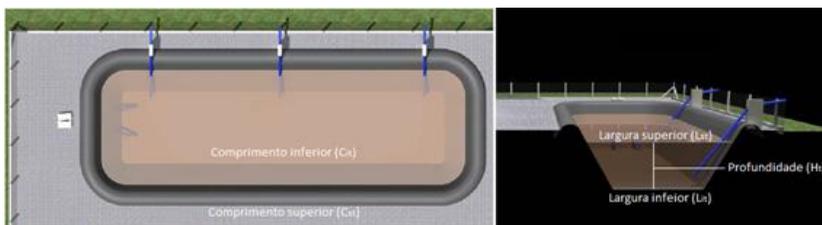
Granja	Potência (kW)	Vazão máx. (m ³ /h)	Pressão máx. (kPa)	Rendimento (%)
UCT	2,205	12,00	208,00	32,50
UPL	2,94	16,00	255,00	39,00

Fonte: elaborado pelo autor

Tanque de Biofertilizante

Após ser digerido no biodigestor, o agora biofertilizante flui para o tanque de armazenamento. Os tanques de biofertilizante foram

projetados com 100 dias de TRH, possuem geometria tronco trapezoidal regular e são confeccionados em geomembrana de PEAD de 1,00 mm de espessura. Os mesmos tanques de biofertilizante são utilizados nas quatro plantas. A Figura 40 ilustra um tanque de biofertilizante.



Fonte: Adaptado de Uruguai (2008)

Figura 40 - Modelo de tanque de biofertilizante

A Tabela 17 apresenta as dimensões dos tanques de biofertilizante.

Tabela 17 - Dimensões dos tanques de biofertilizante utilizados

Granja	$H_t(m)$	$C_{s,t}(m)$	$C_{i,t}(m)$	$L_{s,t}(m)$	$L_{i,t}(m)$	$V_t(m^3)$
UCT	2,00	13,40	9,40	13,40	9,40	262
UPL	2,00	19,15	15,15	19,15	14,15	590

Fonte: elaborado pelo autor

Motogerador

O motogerador utilizado nas plantas é o de menor potência encontrado no mercado capaz de alimentar uma granja isolada da rede e também o menor capaz de ser conectado a rede.

É composto por um motor de combustão interna de 2,94L, três cilindros e aspiração natural, modificado do ciclo Diesel para o ciclo Otto acoplado a um gerador elétrico originalmente trifásico, conforme mostra a Figura 41.

Em razão da rede elétrica das granjas ser monofásica, no caso das granjas conectadas a rede, a ligação do gerador também deve ser monofásica. Como o gerador é originalmente trifásico, a ligação monofásica faz com que a potência máxima do gerador seja reduzida em aproximadamente 40% e o rendimento reduzido em aproximadamente 8%. Isso faz com que mesmo quando o gerador estiver com carga

máxima, o motor trabalhe com apenas 65,8% de carga, reduzindo o rendimento do grupo gerador para uma mesma carga.



Fonte: ERBR (2015)

Figura 41 - Motogerador utilizado nas PGEBs

Em razão da rede elétrica das granjas ser monofásica, no caso das granjas conectadas a rede, a ligação do gerador também deve ser monofásica. Como o gerador é originalmente trifásico, a ligação monofásica faz com que a potência máxima do gerador seja reduzida em aproximadamente 40% e o rendimento reduzido em aproximadamente 8%. Isso faz com que mesmo quando o gerador estiver com carga máxima, o motor trabalhe com apenas 65,8% de carga, reduzindo o rendimento do grupo gerador para uma mesma carga.

A ligação trifásica é utilizada nas plantas isoladas da rede.

Nas PGEBs sem aquecimento do biodigestor (1 e 3) o calor dos gases de exaustão e do arrefecimento do motor são perdidos para a atmosfera na tubulação de descarga e no radiador respectivamente.

Devido à inexistência de potências menores, o mesmo motogerador é usado nos oito BSI, porém nas plantas com aquecimento do biodigestor, o radiador é substituído por um trocador água-água responsável por recuperar o calor de arrefecimento do motor. Nestas plantas o radiador é utilizado somente em momentos de excesso de temperatura no motor ou no biodigestor causado por elevada temperatura do ar ambiente.

A temperatura da água de arrefecimento na entrada do motor é mantida a 76°C e a água de saída a 84°C, de forma a manter uma diferença de temperatura de 8°C para evitar estresse térmico no motor e elevada vazão do líquido de arrefecimento. A Tabela 18 resume as características técnicas do motogerador.

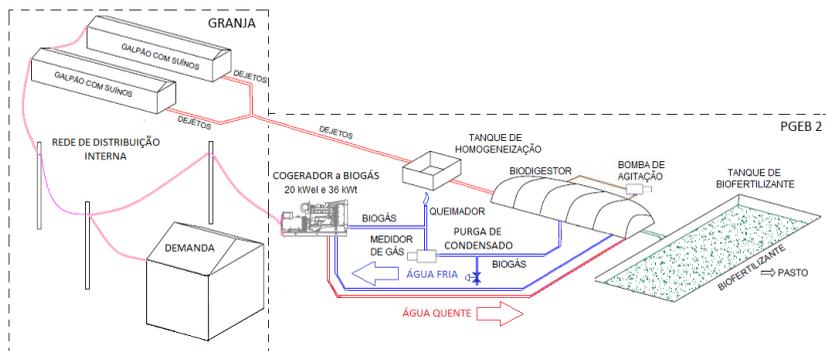
Tabela 18 - Dados técnicos do motogerador utilizado

Granja	UCT/UPL	
	Monofásico	Trifásico
Ligação		
Potência máxima contínuo $Pot_{m\acute{a}x}$ (kW)	12	20
Tensão (V)	220	220
Consumo de biogás $\dot{V}_{biog\acute{a}s}$ (Nm ³ /h)	$0,3953 * \dot{W}_{GER} + 3,6929$	$0,3695 * \dot{W}_{GER} + 3,6079$
Temperatura dos gases de exaustão T_3 (°C)	525	525
Potência dissipada pelo sistema de arrefecimento \dot{Q}_{gex} (kW)	$0,3 * 6,445 * \dot{V}_{biog\acute{a}s}$	$0,3 * 6,445 * \dot{V}_{biog\acute{a}s}$
Rendimento do gerador η_{GER}	0,82	0,90

Fonte: elaborado pelo autor

4.2.2 PGEB isolada da rede e com aquecimento (PGEB2)

A Figura 42 ilustra uma granja com PGEB isolada da rede e com aquecimento do biodigestor.



Fonte: Adaptado de Nishimura (2009)

Figura 42 - PGEB2: Isolada da rede e com aquecimento

O fluxo dos dejetos, biogás, EE e a remoção de H_2S desta planta são os mesmos da PGEB1.

No sistema de cogeração, o biogás é convertido em EE e ET útil.

A ET é recuperada do líquido de arrefecimento do motor através de um trocador de calor água-água e dos gases de exaustão através de um trocador de calor gás-água.

A água quente produzida dessa forma é circulada através de uma bomba no interior do biodigestor para manter a temperatura do substrato próxima a $35^{\circ}C$. Uma segunda bomba circula o líquido de arrefecimento através do motor e do trocador água-água arrefecimento. Pretende-se dessa forma obter uma maior produção de biogás e EE que na PGEB1.

A seguir são apresentados os componentes da planta que não foram descritos anteriormente:

Trocador de calor água-água arrefecimento

O trocador de calor água-água arrefecimento é utilizado para recuperar o calor do líquido de arrefecimento do motor (fluido quente) através da passagem da água de aquecimento do biodigestor (fluido frio). A água de aquecimento do biodigestor após sair do trocador de calor água-água biodigestor tem sua temperatura elevada no trocador água-água arrefecimento e em seguida no trocador de calor gás-água para entrar novamente no trocador de calor água-água biodigestor.

O trocador de calor considerado é do tipo tubos concêntricos e escoamento em contra corrente conforme ilustra a Figura 43, fabricado em aço inox.



Fonte: Wikipedia (2015)

Figura 43 – Tipo de trocador de calor água-água arrefecimento utilizado

O fluido quente escoar por dentro e o fluido frio por fora. O trocador de calor foi dimensionado considerando o funcionamento do motor em carga máxima. Nesta carga a potência necessária no arrefecimento do motor são 21,2 kW. O mesmo trocador de calor é utilizado em todas as plantas com cogeração. Os parâmetros de projeto do trocador são apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 - Parâmetros de projeto do trocador de calor água-água arrefecimento

Parâmetros	Interno	Externo
Fluido	Água	Água
Fluxo de massa	0,633 (kg/s)	1,579 (kg/s)
Calor específico	4,194 (kJ/kg°C)	4,182 (kJ/kg°C)
Temperatura de entrada	84 (°C)	38,45 (°C)
Temperatura de saída	76 (°C)	41,67 (°C)
Pressão de operação	200 kPa	287 kPa
Perda de carga	30 kPa	40 kPa
Área de troca térmica	0,45 m ²	

Fonte: elaborado pelo autor

Bomba do circuito de arrefecimento

Para promover a circulação do líquido de arrefecimento entre o motor e o trocador de calor água-água arrefecimento é necessário o uso de uma bomba externa. A bomba foi dimensionada para o funcionamento do motor em carga máxima. A Figura 44 mostra o modelo da bomba utilizado.



Fonte: Schneider (2015)

Figura 44 - Modelo da bomba do circuito de arrefecimento

Neste estudo a potência da bomba é mantida constante no ponto de operação especificado. A bomba do circuito de arrefecimento do

motor somente funciona quando o motogerador também estiver em funcionamento.

Os dados técnicos da bomba utilizada estão na Tabela 20.

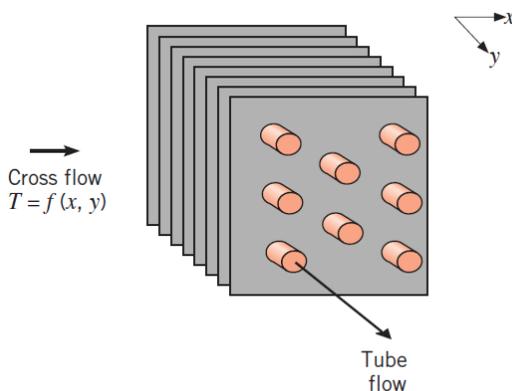
Tabela 20 - Dados técnicos da bomba do circuito de arrefecimento

Granja	Potência (kW)	Vazão (m ³ /h)	Pressão (kPa)	Rendimento (%)
	Máximo			
UCT/UPL	0,1225	7,50	113,00	66,00
	No ponto de operação			
	0,1000	2,20	100,00	60,00

Fonte: elaborado pelo autor

Trocador de calor gás-água

Este trocador é responsável por recuperar parte da energia dos gases de exaustão do MCI através do líquido de aquecimento do biodigestor. Em carga máxima, os gases de exaustão saem do motor e entram no trocador a 525°C onde escoam através da região aletada e são lançados na atmosfera a 120°C. O líquido de aquecimento do biodigestor após passar pelo trocador água-água arrefecimento entra no trocador gás-água a 41,67°C e tem sua temperatura elevada para 44°C antes de entrar no trocador de calor água-água biodigestor. Foi proposto o uso de um trocador de calor com escoamento cruzado, aletado, com múltiplos passes nos tubos e fluidos não misturados, conforme ilustra a Figura 45.



Fonte: Bergman et. al. (2011)

Figura 45 - Tipo de trocador de calor gás-água utilizado

O trocador foi projetado considerando o motor com carga máxima. Nesta situação o calor recuperado dos gases de exaustão são 15,4 kW. O mesmo trocador de calor é utilizado em todas as plantas com aquecimento do biodigestor. Para evitar que a temperatura do substrato no interior do biodigestor exceda 40°C, existe um direcionador do fluxo dos gases de exaustão para controlar a quantidade de calor recuperada, podendo variar de zero a 15,4 kW. Os dados de projeto do trocador estão na Tabela 21.

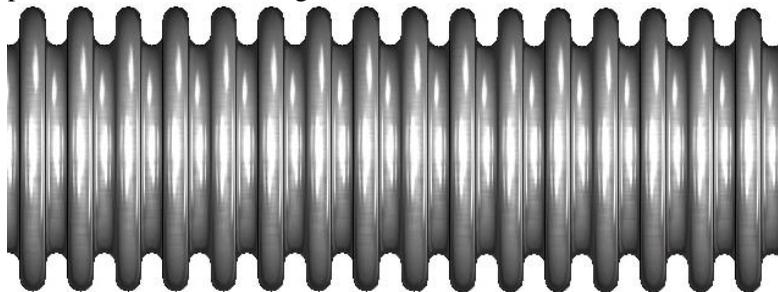
Tabela 21 - Parâmetros de projeto do trocador de calor gás-água

Parâmetros	Lado dos tubos	Lado das aletas
Fluído	Água	Gases de Exaustão
Fluxo de massa	1,57 (kg/s)	0,0326 (kg/s)
Calor específico	4,183 (kJ/kg°C)	1,165 (kJ/kg°C)
Temperatura de entrada	41,67°C	525°C
Temperatura de saída	44°C	120°C
Pressão de operação	274 kPa	101,325 kPa
Perda de carga	47 kPa	0,13 Pa
Área de troca térmica	14,8 m ²	

Fonte: elaborado pelo autor

Trocador de calor água-água biodigestor

O trocador de calor água-água biodigestor é formado por um tubo corrugado de aço inox imerso no substrato, com diâmetro externo equivalente de 56,7 mm, diâmetro hidráulico de 50 mm e 0,3 mm de espessura, como ilustra a Figura 46.



Fonte: Adaptado de HAENKE (2015)

Figura 46 - Tipo do trocador de calor água-água biodigestor

O tubo entra por um dos lados, dá quatro passes ao longo do comprimento e sai pelo mesmo lado que entrou.

O fato de o tubo ser corrugado favorece a troca térmica, pois aumenta a área de contato com o substrato e principalmente porque provoca turbulência no escoamento, aumentando o número de Reynolds, o Nusselt e por consequência o coeficiente de transferência de calor por convecção interno. A troca térmica é limitada pelo coeficiente de transferência de calor externo devido às características do escoamento no lado do substrato. No dimensionamento do trocador, adotou-se uma velocidade de 0,05 m/s para o substrato, garantida pelo sistema de agitação. O trocador foi dimensionado considerando-se o tamanho do biodigestor, funcionamento do motor em carga máxima e temperatura interna do digestor constante em aproximadamente 35°C. Devido ao trocador de calor ser um pouco maior e consequentemente maior área de troca térmica, a temperatura teórica alcançada no substrato na granja UPL é um pouco superior que na granja UCT. No ponto de operação de projeto (carga máxima), a água entra no trocador de calor a 44°C, sai a 38,45 °C e 36,6 kW de calor são fornecidos ao substrato. Os dados de projeto dos trocadores estão na Tabela 22.

Tabela 22 - Parâmetros de projeto dos trocadores de calor água-água biodigestor

Parâmetros	UCT		UPL	
	Interno	Externo	Interno	Externo
Fluído	Água	Dejeto suíno	Água	Dejeto suíno
Fluxo de massa	1,579 (kg/s)	-----	1,579 (kg/s)	-----
Velocidade do escoamento	0,80 m/s	0,05 m/s	0,80 m/s	0,05 m/s
Temperatura de entrada	44°C	32,1°C	44°C	34°C
Temperatura de saída	38,44°C	32,1°C	38,45°C	34°C
Pressão de operação	200 kPa	110 kPa	200 kPa	110 kPa
Perda de carga	100 kPa	0	100 kPa	0
Área de troca térmica	7,48 m ²		9,62 m ²	
Coefficiente global de transferência de calor	554,37 W/m ² °C		554,37W/m ² °C	

Fonte: elaborado pelo autor

Bomba do circuito de aquecimento do biodigestor

Essa bomba é necessária para promover a circulação do fluído entre os trocadores de calor do sistema de aquecimento do biodigestor e

vencer suas perdas de carga. Da mesma forma que a bomba de circulação do líquido de arrefecimento do motor, esta bomba somente funciona quando o motor estiver em funcionamento. Devido a este fato ela é uma carga auxiliar intermitente. Neste estudo a bomba do circuito de aquecimento do biodigestor irá trabalhar com a potência fixa no ponto especificado. A Figura 47 mostra a bomba utilizada.



Fonte: Schneider (2015)

Figura 47 - Modelo da bomba do circuito de aquecimento

Os dados técnicos da bomba de circulação do fluido de aquecimento do biodigestor são mostrados na Tabela 23.

Tabela 23 - Dados técnicos da bomba do circuito de aquecimento

Granja	Potência (kW)	Vazão (m ³ /h)	Pressão (kPa)	Rendimento (%)
	Máximo			
UCT/UPL	1,47	20,00	210,00	48,00
	No ponto de operação			
	1,00	5,70	190,00	30,00

Fonte: elaborado pelo autor

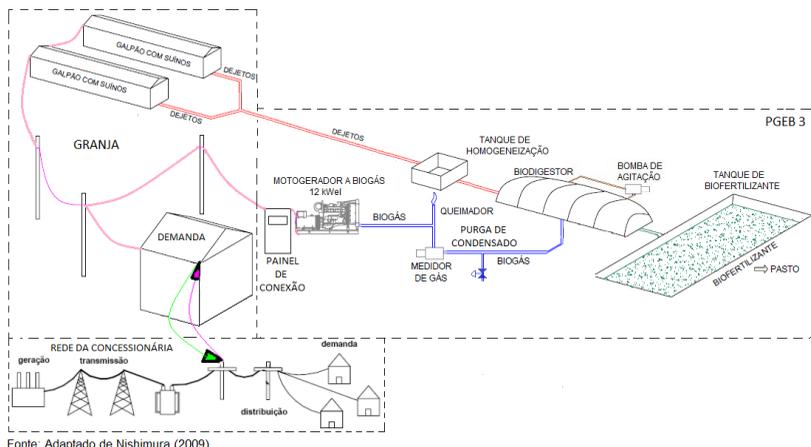
4.2.3 PGEB conectada a rede e sem aquecimento (PGEB3)

A Figura 48 ilustra uma granja com PGEB conectada a rede e sem aquecimento do biodigestor.

O fluxo dos dejetos, biogás e a remoção de H₂S desta e das demais plantas são os mesmos da PGEB1.

Como esta planta não possui o sistema de recuperação de calor, o arrefecimento do motor é realizado por um radiador, dessa forma o calor proveniente do arrefecimento do motor e também o calor dos gases de exaustão são perdidos para a atmosfera. A circulação do líquido de arrefecimento do motor é promovida pela bomba interna do motor.

Assim a única carga auxiliar da planta é a bomba de agitação do biodigestor.



Fonte: Adaptado de Nishimura (2009)

Figura 48 - PGE B3: Conectada a rede e sem aquecimento

Esta planta está conectada a rede segundo a RN 482 da ANEEL e participa do SCEE. Dessa forma a energia gerada pela PGE B3 que não for consumida no BSI será injetada na rede da concessionária e será convertida em créditos de energia elétrica válidos por três anos. Quando o BSI integrado não estiver gerando energia elétrica, os créditos serão consumidos.

O fato de o grupo gerador estar conectado a rede permite seu funcionamento com potência constante.

A máxima potência que pode ser injetada na rede da concessionária é definida pela carga instalada da granja.

O tipo de rede que atende a granja e a potência do gerador que se deseja instalar definem o tipo de ligação necessária. Como as duas granjas são atendidas por uma rede monofásica, o gerador deverá ter ligação monofásica.

Em virtude da potência injetada estar limitada a carga instalada, a potência na granja UCT será limitada a 8,8 kW e na granja UPL a 13,2 kW. Esta limitação faz com que o gerador da granja UCT trabalhe no máximo com 73,35% de carga e o motor com 65,85% de carga, o que reduz a eficiência do grupo gerador. Como a potência máxima do gerador com ligação monofásica são 12 kW, a limitação não influencia a potência máxima injetada pela granja UPL.

A seguir são apresentados os componentes da planta que não foram descritos nas plantas anteriores:

Painel de conexão e proteção

Para conectar a PGEB a rede, é necessário um painel de paralelismo e proteção da rede e do grupo gerador. Este painel é formado por um controlador de grupo gerador e por um relé de proteção. O controlador é responsável por promover o sincronismo da energia gerada com a energia da rede e o controle da potência gerada. O relé de proteção monitora ambos os lados da conexão, desfazendo-a caso ocorra alguma anomalia em algum dos lados. O relé impede também que a PGEB funcione caso a rede da concessionária esteja desenergizada, evitando assim riscos ao pessoal de manutenção.

O relé de proteção deverá ser capaz de prover proteção contra sub (27) e sobretensão (59) em dois níveis, desequilíbrio de tensão (59N e 3V0), sub (81U) e sobrefrequência (81O) em dois níveis, sobrecorrente (50/51) e verificação de sincronismo (25). A Figura 49 mostra um exemplo de painel de conexão com a rede.



Fonte: o autor (2014)

Figura 49 - Painel de conexão com a rede

Para contabilizar a energia consumida pela PGEB e a energia injetada, existe um medidor bidirecional que mede ambas as energias separadamente.

4.2.4 PGEB conectada a rede e com aquecimento (PGEB4)

A Figura 50 ilustra uma granja com PGEB conectada a rede e com aquecimento do biodigestor.

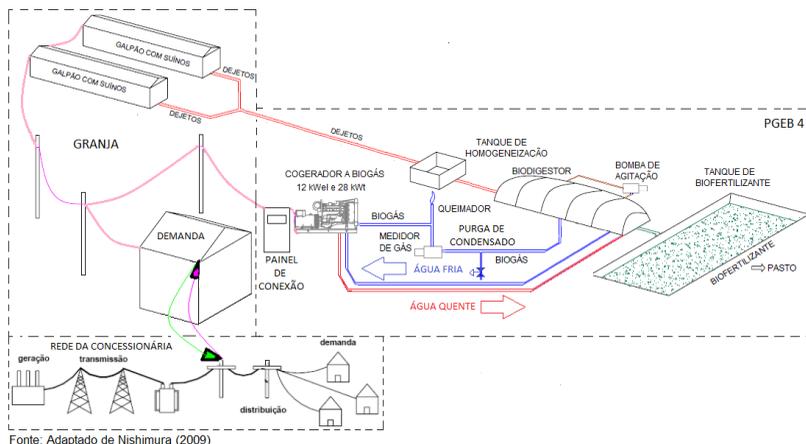


Figura 50 - PGEB4: Conectada a rede e com aquecimento

O fluxo dos dejetos, biogás e a remoção de H_2S desta planta são os mesmos das anteriores.

Esta planta faz o uso da cogeração para aquecer o biodigestor como descrito na PGEB2 e está conectada a rede conforme a PGEB3. Desta forma almeja-se obter uma maior produção de biogás e EE devido ao aquecimento do biodigestor, e uma operação em carga máxima com a possibilidade de armazenamento de EE devido a conexão com a rede.

A proposta de quatro diferentes tipos de PGEB é para descobrir aquela que apresenta a maior viabilidade técnica e econômica, além de indicar os caminhos para obtê-la.

4.3 ANÁLISE TERMODINÂMICA DO BSI

A análise técnica dos BSIs propostos leva em consideração formulação termodinâmica pertinente amplamente disponível na

literatura (ÇENGEL, 2006; MORAN, 2012; INCROPERA, 1998; TURNS, 2013).

O modelo adotado para análise termodinâmica dos BSIs considera as equações de conservação da massa, energia e combustão.

A formulação foi implementada computacionalmente através dos softwares EES – Engineering Equation Solver, de onde também se obteve as propriedades termodinâmicas, Microsoft Excel e MatLAB Simulink. Relações complementares foram obtidas a partir de dados e informações fornecidos pelos fabricantes.

Através do EES foram obtidos os pontos de operação (estados) em regime permanente e carga máxima para o sistema de geração de energia elétrica e para o sistema de aquecimento do biodigestor. A obtenção dos estados termodinâmicos do sistema de cogeração e do calor disponível para aquecer o biodigestor permitiu o dimensionamento dos trocadores de calor e das bombas da PGEB.

As informações obtidas destes pontos e do dimensionamento dos equipamentos, juntamente com parte da formulação apresentada nesta seção foram implementados no software MatLAB Simulink, para dessa forma simular o comportamento dinâmico do BSI levando em consideração as condições climáticas locais e sua influência sobre a produção de biogás e EE. A simulação dinâmica permite trabalhar com pontos de operação variáveis como é o caso das plantas isoladas da rede. A simulação permite também avaliar aspectos como nível do gasômetro, uso de isolante térmico e a influência do uso da cogeração e da conexão com a rede na produção de biogás e EE nas diferentes estações do ano.

Para a análise termodinâmica o BSI foi dividido em quatro subsistemas:

- 1) Subsistema de geração de energia elétrica (SGEE);
- 2) Subsistema de aquecimento do biodigestor (SAB);
- 3) Subsistema de geração de biogás (SGB);
- 4) Subsistema de criação de suínos (SCS);

Os subsistemas relacionam-se da seguinte forma:

$SGEE + SAB = \text{Sistema de Cogeração (SC)}$

$SGEE + SAB + SGB = \text{Planta de Geração de EE a biogás (PGEB)}$

$SGEE + SAB + SGB + SCS = \text{Biosistema Integrado (BSI)}$

A Figura 51 ilustra de forma esquemática a configuração de um BSI completo dividido em subsistemas e o ciclo de cogeração proposto.

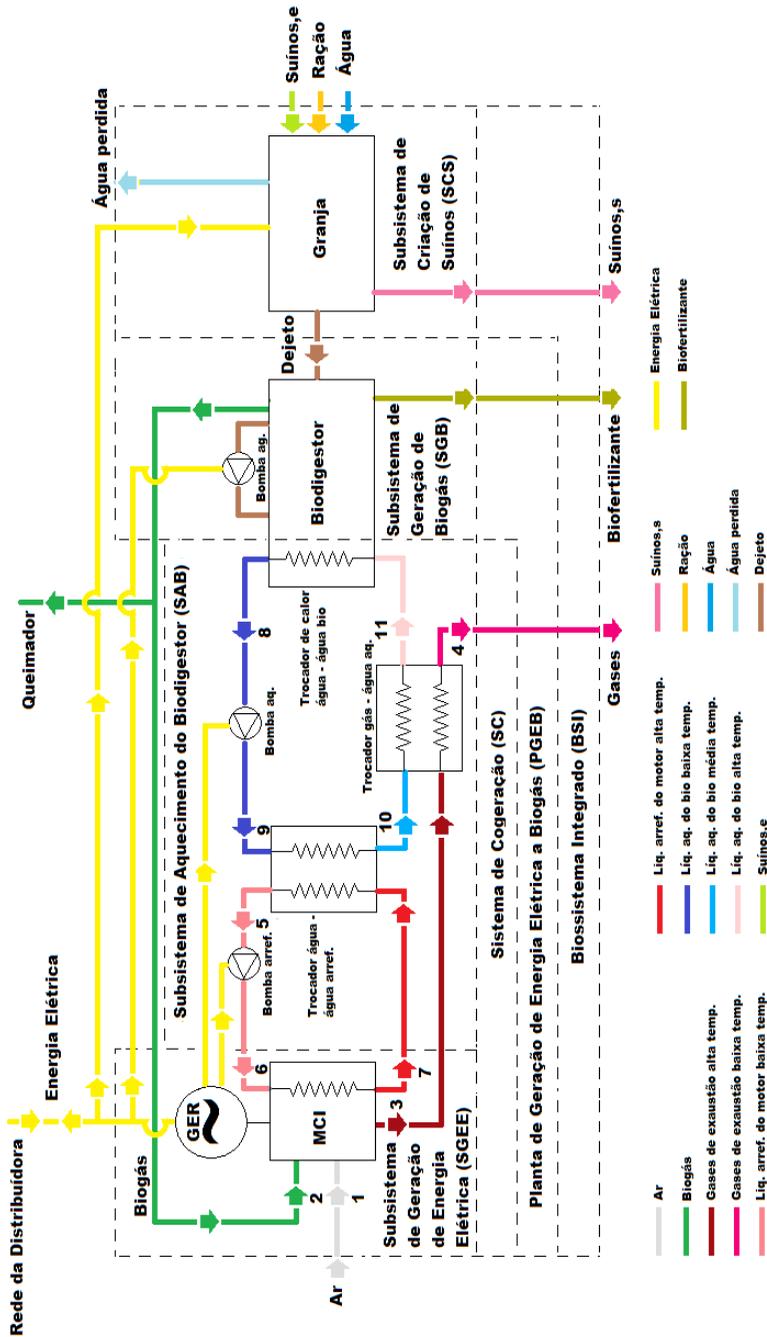


Figura 51 - Representação esquemática do BSI completo dividido em subsistemas e o ciclo de cogeração

4.3.1 Subsistema de geração de energia elétrica (SGEE)

O subsistema de geração de energia elétrica é constituído por um MCI a biogás e um gerador.

4.3.1.1 Valores conhecidos

Os seguintes dados foram obtidos a partir de informações do fabricante do motogerador especificado:

- Potência máxima do motogerador com ligação trifásica:
 $Pot_{m\acute{a}x} = 20 \text{ kW}$;
- Potência máxima do motogerador com ligação monofásica:
 $Pot_{m\acute{a}x} = 12 \text{ kW}$;
- Consumo de biogás (6,445 kWh/Nm³) com ligação trifásica:
 $\dot{V}_{\text{biogás}} = 0,3695 * \dot{W}_{\text{GER}} + 3,6079 \text{ Nm}^3/\text{h}$;
- Consumo de biogás (6,445 kWh/Nm³) com ligação monofásica:
 $\dot{V}_{\text{biogás}} = 0,3953 * \dot{W}_{\text{GER}} + 3,6929 \text{ Nm}^3/\text{h}$;
- Temperatura dos gases de exaustão do motor $T_4 = 525 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Pressão na saída do líquido de arrefecimento do motor $P_7 = 200 \text{ kPa}$;

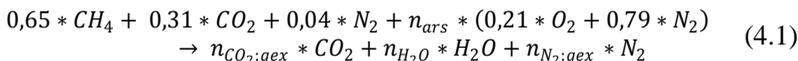
4.3.1.2 Hipóteses consideradas

- Funcionamento em regime permanente e carga máxima (20 kW);
- O motor funciona com 20% de ar;
- A temperatura do líquido de arrefecimento na saída do motor $T_7 = 84^\circ\text{C}$;
- A temperatura do líquido de arrefecimento na entrada do motor $T_6 = 76^\circ\text{C}$;
- O biogás considerado é composto por 65% CH₄, 31% CO₂ e 4% N₂;

- A composição do ar é 21% O₂ e 79% N₂;
- O calor dissipado pelo sistema de arrefecimento do motor é 30% da energia fornecida ao motor ($\dot{Q}_{arref} = 0,3 * 6,445 * \dot{V}_{biogás}$);
- Os fluxos gasosos do sistema (ar, biogás e gases de exaustão), foram considerados misturas de gases ideais;
- As variações da energia cinética e potencial são desprezadas;
- O líquido de arrefecimento do motor tem propriedades iguais a da água líquida;
- A temperatura e pressão de referência são 25°C e 101,325 kPa;
- O ar e o biogás entram no MCI na temperatura de referência;
- A perda de carga do líquido de arrefecimento do motor é 50 kPa.

4.3.1.3 Reação de Combustão

A reação estequiométrica de combustão de 1 kmol do biogás adotado obedece a seguinte equação:



onde:

$n_{ar,s}$ = número de mols de ar estequiométrico;

$n_{CO_2,gex}$ = número do mols de CO₂ nos gases de exaustão;

n_{H_2O} = número de mols de H₂O nos gases de exaustão;

$n_{N_2,gex}$ = número de mols de N₂ nos gases de exaustão;

Os coeficientes estequiométricos n_{ars} , $n_{CO_2,gex}$, n_{H_2O} , $n_{N_2,gex}$ são determinados através da aplicação do princípio de conservação da massa e dos elementos químicos, obtendo-se o seguinte sistema de equações:

$$C: \quad 0,65 + 0,31 = n_{CO_2,gex} \quad (4.2)$$

$$H: \quad 4 * 0,65 = 2 * n_{H_2O} \quad (4.3)$$

$$\text{O: } 2 * 0,31 + 2 * 0,21 * n_{ars} = 2 * n_{CO_2;gex} + n_{H_2O} \quad (4.4)$$

$$\text{N: } 2 * 0,02 + 2 * 0,79 * n_{ars} = 2 * n_{N_2;gex} \quad (4.5)$$

4.3.1.4 Relações Importantes

Razão massa de combustível por massa de ar:

$$f = m_f / m_{ar} \quad (4.6)$$

onde:

f = razão mássica combustível ar;

m_f = massa de combustível;

m_{ar} = massa de ar;

Razão Lambda:

$$\lambda = \frac{f_s}{f} = \frac{n_{ar,r}}{n_{ar,s}} \quad (4.7)$$

onde:

f_s = razão mássica combustível/ar estequiométrica;

f = razão mássica combustível/ar real;

$n_{ar,r}$ = número de mols de ar real;

$n_{ar,s}$ = número de mols de ar estequiométrico;

Para:

$\lambda = 1 \rightarrow$ mistura estequiométrica

$\lambda > 1 \rightarrow n_{arr} > n_{ars} \rightarrow$ mistura pobre

$\lambda < 1 \rightarrow n_{arr} < n_{ars} \rightarrow$ mistura rica

Percentual de ar estequiométrico:

$$Ars(\%) = \lambda * 100\% \quad (4.8)$$

Percentual de excesso de ar:

$$e(\%) = (\lambda - 1) * 100\% \quad (4.9)$$

4.3.1.5 Modelagem dos componentes do SGEE

Motor

A modelagem do motor emprega as seguintes equações:

$$\dot{m}_2 = (\dot{V}_{biog\acute{a}s} * \rho_{biog\acute{a}s})/3600 \quad (4.10)$$

$$\dot{m}_1 = (\dot{m}_2 * \lambda)/f_s \quad (4.11)$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (4.12)$$

$$\dot{m}_6 = \dot{Q}_{arref} / (c_{p,arref} * \Delta T_{motor}) \quad (4.13)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_6 \quad (4.14)$$

$$\dot{Q}_{gex} = \dot{m}_3 * h_3 \quad (4.15)$$

$$\dot{m}_1 * h_1 + \dot{m}_2 * PCI = \dot{Q}_{arref} + \dot{Q}_{gex} + \dot{Q}_{MCI,loss} + \dot{W}_{MCI} \quad (4.16)$$

$$P_7 = 200 \text{ kPa} \quad (4.17)$$

$$P_6 = P_7 + \Delta P_{motor} \quad (4.18)$$

onde $\dot{V}_{biog\acute{a}s}$, $\rho_{biog\acute{a}s}$ e PCI são o consumo, massa específica e poder calorífico inferior do biogás respectivamente, $c_{p,arref}$ é o calor específico de líquido de arrefecimento, ΔT_{motor} é a diferença de temperatura do líquido de arrefecimento do motor, \dot{Q}_{arref} é a taxa de transferência de calor no arrefecimento do motor, \dot{Q}_{gex} é a quantidade de energia presente nos gases de exaustão, h_3 é a entalpia dos gases de escape em relação a referência, $\dot{Q}_{MCI,loss}$ representa as perdas por atrito e por radiação na carcaça, \dot{W}_{MCI} representa a potência líquida produzida pelo motor, ΔP_{motor} representa a perda de carga do líquido de arrefecimento no motor.

Gerador

O gerador é modelado pelas seguintes equações:

$$\dot{W}_{GER} = \dot{W}_{MCI} * \eta_{GER} \quad (4.19)$$

$$\dot{W}_{SGEE} = \dot{W}_{GER} - (\dot{W}_{SAB} + \dot{W}_{SGB}) \quad (4.20)$$

onde \dot{W}_{GER} é a potência elétrica gerada pelo gerador (igual a carga aplicada), η_{GER} é a eficiência do gerador, \dot{W}_{SGEE} é a potência elétrica líquida entregue pelo SGEE, \dot{W}_{SAB} é a potência consumida pelo SAB e \dot{W}_{SGB} é a potência consumida pelo SGB.

Quando a planta não possui o sistema de aquecimento do biodigestor, \dot{W}_{SAB} é zero, restando apenas a potência da bomba do SGB \dot{W}_{SGB} .

4.3.1.6 Fator de capacidade do grupo gerador

O fator de capacidade (FC) do grupo gerador é a razão entre a potência gerada (\dot{W}_{GER}) e a potência máxima que poderia ser gerada ($Pot_{m\acute{a}x}$), conforme a equação.

$$FC = \frac{\dot{W}_{GER}}{Pot_{m\acute{a}x}} \quad (4.21)$$

Falta de carga, falta de biogás e paradas, programadas ou não, para manutenção reduzem o fator de capacidade.

4.3.1.7 Eficiência do grupo gerador

A eficiência do grupo gerador determina o quanto da energia do biogás foi transformada em energia elétrica.

$$\eta_{GRUPO} = \frac{\dot{W}_{GER}}{\dot{V}_{biog\acute{a}s} * PCI} \quad (4.22)$$

4.3.1.8 Balanço de energia no SGEE

$$\dot{E}_{biog\acute{a}s,SGEE} = \dot{Q}_{arref} + \dot{Q}_{ex} + \dot{W}_{SGEE} + \dot{W}_{SAB} + \dot{W}_{SGB} + \dot{Q}_{SGEE,loss} \quad (4.23)$$

onde $\dot{E}_{biog\acute{a}s,SGEE}$ é a potência do biogás que entra no SGEE e $\dot{Q}_{SGEE,loss}$ é o calor perdido pelo SGEE.

4.3.1.9 Eficiência do SGEE

A eficiência do SGEE determina quanto da energia do biogás foi convertida em energia elétrica líquida, descontando-se o consumo de energia elétrica pelas cargas auxiliares.

$$\eta_{SGEE} = \frac{\dot{W}_{SGEE}}{\dot{E}_{biogás,SGEE}} \quad (4.24)$$

4.3.2 Subsistema de aquecimento do biodigestor (SAB)

O SAB tem por função recuperar a energia térmica que seria perdida no arrefecimento e nos gases de exaustão do motor e entregar ao substrato e dessa forma aumentar a produção de biogás.

4.3.2.1 Hipóteses consideradas

- A temperatura do líquido de aquecimento na entrada do biodigestor é $T_{11} = 44^{\circ}\text{C}$;
- A temperatura do líquido de aquecimento na saída do biodigestor é $T_8 = 38,45^{\circ}\text{C}$;
- líquido de aquecimento do biodigestor tem propriedades iguais a da água líquida;
- As perdas de calor e de carga nas tubulações são desconsideradas;
- As perdas de calor nos trocadores de calor são desconsideradas;
- As variações da energia cinética e potencial são desconsideradas;
- escoamento incompressível.

4.3.2.2 Componentes do SAB

Trocador de calor água-água arrefecimento

O trocador de calor água-água arrefecimento é responsável por recuperar o calor dissipado no arrefecimento do motor. As seguintes equações foram usadas no seu dimensionamento:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_7 \quad (4.25)$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (4.26)$$

$$T_9 = T_8 \quad (4.27)$$

$$T_5 = T_6 \quad (4.28)$$

$$\dot{Q}_{arref} = \dot{m}_7 * (h_7 - h_6) = \dot{m}_9 * (h_{10} - h_9) \quad (4.29)$$

$$\dot{Q}_{arref} = \dot{m}_7 * c_{p,arref} * (T_7 - T_6) = \dot{m}_{10} * c_{p,aq} * (T_{10} - T_9) \\ = U_{arref} * A_{arref} * \Delta T_{ML,arref} \quad (4.30)$$

$$\Delta T_{ML,arref} = \frac{(T_7 - T_{10}) - (T_5 - T_9)}{\ln \frac{(T_7 - T_{10})}{(T_5 - T_9)}} \quad (4.31)$$

$$P_5 = 100 - \Delta P_{arref,q} \quad (4.32)$$

$$P_9 = P_{10} + \Delta P_{arref,f} \quad (4.33)$$

onde $U_{arref} * A_{arref}$ representa a condutância global do trocador de calor, $c_{p,aq}$ é o calor específico médio do líquido de aquecimento do biodigestor, $\Delta T_{ML,arref}$ é a temperatura média logarítmica no trocador, $\Delta P_{arref,q}$ e $\Delta P_{arref,f}$ são as perdas de carga sofridas pelos fluidos quente e frio, respectivamente.

Bomba do líquido de arrefecimento do motor

O dimensionamento da bomba do líquido de arrefecimento do motor emprega as seguintes equações:

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad (4.34)$$

$$\dot{W}_{el,arref} = (\dot{m}_5 * v_{arref} * \Delta P_{bomba,arref}) / \eta_{bomba,arref} \quad (4.35)$$

$$\Delta P_{bomba,arref} = \Delta P_{motor} + \Delta P_{arref,q} \quad (4.36)$$

onde $\dot{W}_{el,arref}$, $\Delta P_{bomba,arref}$, $\eta_{bomba,arref}$, representam a potência elétrica, aumento de pressão, e eficiência da bomba de arrefecimento, respectivamente, v_{arref} é o volume específico do líquido de arrefecimento.

Trocador de calor gás-água

O dimensionamento do trocador de calor gás-água emprega as seguintes equações:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 \quad (4.37)$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \quad (4.38)$$

$$\dot{Q}_{gases} = \dot{m}_{10} * (h_{11} - h_{10}) = \dot{m}_3 * (h_3 - h_4) \quad (4.39)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{gases} &= \dot{m}_3 * c_{p,gex} * (T_3 - T_4) = \dot{m}_{10} * c_{p,aq} * (T_{11} - T_{10}) \\ &= U_{gases} * A_{gases} * \Delta T_{ML,gases} \end{aligned} \quad (4.40)$$

$$\Delta T_{ML,gases} = \frac{(T_3 - T_{11}) - (T_4 - T_{10})}{\ln \frac{(T_3 - T_{11})}{(T_4 - T_{10})}} \quad (4.41)$$

$$P_{11} = 100 \text{ kPa} \quad (4.42)$$

$$P_{10} = P_{11} + \Delta P_{gases} \quad (4.43)$$

onde \dot{Q}_{gases} representa a taxa de transferência de calor recuperada dos gases de exaustão do motor, $U_{gases} * A_{gases}$, $\Delta T_{ML,gases}$ e ΔP_{gases} representam a condutância global, a temperatura média logarítmica e a perda de carga do lado frio do recuperador de calor dos gases de escape respectivamente.

Bomba do líquido de aquecimento do biodigestor

O dimensionamento da bomba do circuito de aquecimento do biodigestor emprega as seguintes equações:

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (4.44)$$

$$\dot{W}_{el,aq} = (\dot{m}_8 * v_{aq} * \Delta P_{bomba,aq}) / \eta_{bomba,aq} \quad (4.45)$$

$$\Delta P_{bomba, aq} = \Delta P_{arref, f} + \Delta P_{gases} + \Delta P_{bio} \quad (4.46)$$

onde $\dot{W}_{el, aq}$, $\Delta P_{bomba, aq}$, $\eta_{bomba, aq}$, representam a potência elétrica, aumento de pressão, e eficiência da bomba de aquecimento do biodigestor, respectivamente, v_{aq} é o volume específico do líquido de aquecimento.

Trocador de calor água-água de aquecimento do biodigestor

O dimensionamento do trocador de calor água-água de aquecimento do biodigestor emprega as seguintes equações:

$$\dot{m}_{11} = \dot{Q}_{bio} / (\Delta T_{bio} * c_{p, aq}) \quad (4.47)$$

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_8 \quad (4.48)$$

$$\dot{Q}_{bio} = \dot{Q}_{arref} + \dot{Q}_{gases} \quad (4.49)$$

$$\dot{Q}_{bio} = \dot{m}_{11} * c_{p, aq} * (T_{11} - T_8) = U_{bio} * A_{bio} * \Delta T_{ML, bio} \quad (4.50)$$

$$\Delta T_{ML, bio} = \frac{(T_{11} - T_{sub}) - (T_8 - T_{sub})}{\ln \frac{(T_{11} - T_{sub})}{(T_8 - T_{sub})}} \quad (4.51)$$

$$P_8 = P_{11} - \Delta P_{bio} \quad (4.52)$$

onde \dot{Q}_{bio} é a taxa de calor disponível para aquecer o biodigestor, ΔT_{bio} , $U_{bio} * A_{bio}$, $\Delta T_{ML, bio}$, ΔP_{bio} representam a diferença de temperatura, condutância global, temperatura média logarítmica e perda de carga no trocador de calor do biodigestor respectivamente.

Controlador de temperatura

O controlador de temperatura é responsável por descartar o excesso de calor existente no SAB através do desvio dos gases de exaustão e do acionamento de um radiador. A modelagem do controlador emprega a seguinte equação:

$$\dot{Q}_{bio, \acute{u}til} = \dot{Q}_{bio} - \dot{Q}_{sobra} \quad (4.53)$$

onde $\dot{Q}_{bio, \acute{u}til}$ é o calor utilizado no aquecimento do biodigestor e \dot{Q}_{sobra} é o calor que foi descartado pelo controlador.

4.3.2.3 Balanço de energia no SAB

$$\dot{Q}_{arref} + \dot{Q}_{gex} + \dot{W}_{SAB} = \dot{Q}_{bio,util} + \dot{Q}_{SAB,loss} \quad (4.54)$$

onde $\dot{Q}_{SAB,loss}$ representa o calor perdido no SAB.

4.3.2.4 Desempenho do SAB

O desempenho do SAB pode ser medido através da razão entre a EE equivalente ao acréscimo da produção de biogás e a EE utilizada no SAB conforme a equação 4.55.

$$COP_{SAB} = \frac{\dot{E}_{biogás_com} * \eta_{GRUPO_com} - \dot{E}_{biogás_sem} * \eta_{GRUPO_sem}}{\dot{W}_{SAB}} \quad (4.55)$$

onde $\dot{E}_{biogás_com}$ e η_{GRUPO_com} são a energia do biogás produzido e a eficiência do motogerador com o SAB, $\dot{E}_{biogás_sem}$ e η_{GRUPO_sem} são a energia do biogás produzido e a eficiência do motogerador sem o SAB e \dot{W}_{SAB} é energia elétrica utilizada pelo SAB. Quando o COP_{SAB} for maior que um o SAB resulta em um acréscimo de EE líquida.

4.3.3 Subsistema de geração de biogás (SGB)

A análise termodinâmica do SGB compreende:

- Dimensionamento da bomba de agitação;
- Modelagem do queimador;
- Balanço de energia sensível no biodigestor;
- Balanço da energia total no SGB;
- Cálculo da eficiência do SGB.

Objetivos:

- Obter um modelo dependente do tempo para o cálculo da temperatura do dejetto e do biogás no interior do biodigestor;
- Obter a eficiência da conversão da energia de entrada em biogás.

4.3.3.1 Bomba de agitação do substrato

O dimensionamento da bomba de agitação considerou a seguinte equação:

$$\dot{W}_{SGB} = \dot{m}_{sub} * v_{sub} * (\Delta P_{bomba,ag}) / \eta_{bomba,ag} \quad (4.56)$$

onde \dot{W}_{SGB} , $\Delta P_{bomba,ag}$, $\eta_{bomba,ag}$ são a potência, aumento de pressão e rendimento da bomba de agitação do biodigestor respectivamente, \dot{m}_{sub} e v_{sub} são vazão mássica e volume específico do substrato, respectivamente. Na simulação a potência da bomba de agitação foi considerada fixa.

4.3.3.2 Queimador

O queimador é utilizado quando existe excesso de biogás no gasômetro. É modelado pela seguinte equação:

$$\dot{E}_{biogás,queimador} = \dot{E}_{biogás} - \dot{E}_{biogás,SGEE} \quad (4.57)$$

onde $\dot{E}_{biogás,queimador}$ é a energia do biogás que foi para o queimador e $\dot{E}_{biogás}$ é a energia do biogás produzido.

4.3.3.3 Balanço de energia sensível no biodigestor

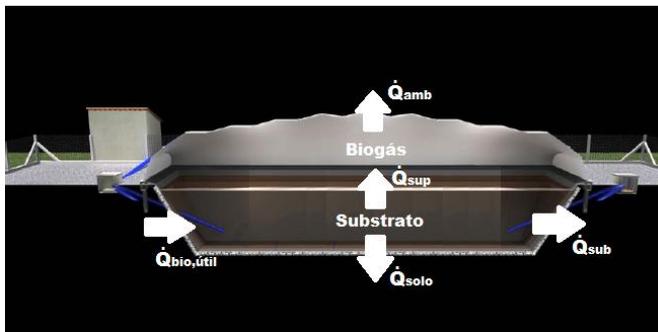
Através do balanço de energia sensível no biodigestor é possível obter a temperatura do substrato e do biogás em função do tempo no interior do biodigestor.

Suposições:

- O dejetto está bem misturado e conseqüentemente encontra-se a temperatura uniforme (T_{sub}) a qual varia somente com o tempo;
- A umidade relativa do biogás é considerada 100% e a perda de calor por evaporação considerada zero;

Representação esquemática

A Figura 52 mostra a representação esquemática das trocas térmicas do biodigestor.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 52- Representação esquemática das trocas térmicas no biodigestor

Balço de energia no substrato:

$$\rho_{sub} * V_{sub} * cp_{sub} * \frac{dT_{sub}}{dt} = \dot{Q}_{bio,útil} - \dot{Q}_{sup} - \dot{Q}_{sub} - \dot{Q}_{solo} \quad (4.58)$$

Balço de energia no biogás:

$$\rho_{gás} * V_{gás} * cp_{gás} * \frac{dT_{gás}}{dt} = \dot{Q}_{sup} - \dot{Q}_{amb} \quad (4.59)$$

onde:

ρ_{sub} = densidade do substrato;

V_{sub} = Volume de substrato;

cp_{sub} = Calor específico do substrato;

$\frac{dT_{sub}}{dt}$ = Variação da temperatura do substrato com o tempo;

$\dot{Q}_{bio,útil}$ = Taxa de transferência de calor fornecida ao biodigestor;

\dot{Q}_{sup} = Taxa de transferência de calor perdida pela superfície do substrato ao biogás;

\dot{Q}_{sub} = Taxa de transferência de calor necessária para aquecer o substrato que entra;

\dot{Q}_{solo} = Taxa de transferência de calor perdido para o solo;

$\rho_{gás}$ = densidade do biogás;

$V_{gás}$ = Volume de biogás;

$cp_{gás}$ = Calor específico do biogás;

$\frac{dT_{gás}}{dt}$ = Variação da temperatura do biogás com o tempo;

\dot{Q}_{amb} = Taxa de transferência de calor perdida para o ambiente;

Rearranjando e integrando em relação ao tempo entre t e $t + 1$ temos:

Para o substrato:

$$\int_t^{t+1} dT_{sub} = \frac{(\dot{Q}_{bio,útil} - \dot{Q}_{sup} - \dot{Q}_{sub,e} - \dot{Q}_{solo})}{\rho_{sub} * V_{sub} * cp_{sub}} * \int_t^{t+1} dt \quad (4.60)$$

$$T_{sub}(t + 1) = T_{sub}(t) + \frac{(Q_{bio,útil} - Q_{sup} - Q_{sub,e} - Q_{solo})}{\rho_{sub} * V_{sub} * cp_{sub}} \quad (4.61)$$

Para o biogás:

$$\int_t^{t+1} dT_{gás} = \frac{(\dot{Q}_{sup} - \dot{Q}_{amb})}{\rho_{gás} * V_{gás} * cp_{gás}} * \int_t^{t+1} dt \quad (4.62)$$

$$T_{gás}(t + 1) = T_{gás}(t) + \frac{(Q_{sup} - Q_{amb})}{\rho_{gás} * V_{gás} * cp_{gás}} \quad (4.63)$$

Como o tempo da simulação é dado em horas, as taxas de transferência de calor precisam ser convertidas para $[kJ/h]$ através da multiplicação por 3,6.

Cálculo da perda de calor na superfície do substrato (\dot{Q}_{sup})

O substrato perde calor para o biogás por meio de convecção natural na interface substrato-biogás e também por radiação da superfície do substrato para a superfície interna da campânula do biodigestor conforme a equação 4.64.

$$\dot{Q}_{sup} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (4.64)$$

onde \dot{Q}_{conv} é a taxa de transferência de calor por convecção entre o substrato e o biogás dada pela equação 4.65 e \dot{Q}_{rad} é a taxa de transferência de calor por radiação entre o substrato e o biogás dada pela equação 4.66.

$$\dot{Q}_{conv} = h_{sup} A_{sup} (T_{sub} - T_{gás}) \quad (4.65)$$

$$\dot{Q}_{rad} = A_{sup} \varepsilon_{sub} \sigma (T_{sub}^4 - T_{gás}^4) \quad (4.66)$$

onde $h_{sup} = 2,36 \text{ W/m}^2\text{°C}$ é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o substrato e o biogás dado por Ram et al. (1985) apud Axaopoulos et al. (2001), A_{sup} é a área superficial do substrato, T_{sub} e $T_{gás}$ são as temperaturas do substrato e do biogás, respectivamente, $\varepsilon_{sub} = 0,95$ é a emissividade do substrato dada por Kreider and Kreith (1981) apud Axaopoulos et al. (2001), e σ é a constante de Steffan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$).

Cálculo do calor perdido para o substrato que entra no biodigestor (\dot{Q}_{sub})

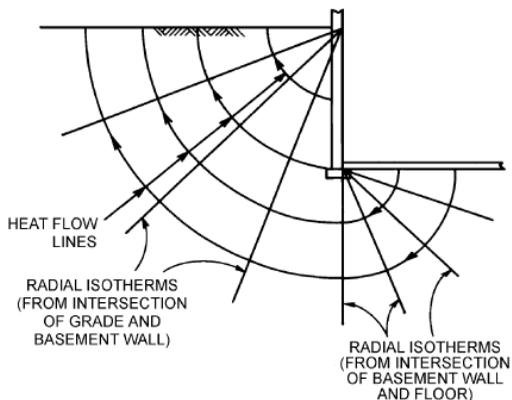
A taxa de transferência de calor perdida para o substrato que entra no biodigestor é dada pela equação 4.67.

$$\dot{Q}_{sub} = \dot{m}_{sub,e} cp_{sub} (T_{sub} - T_{sub,e}) \quad (4.67)$$

onde $\dot{m}_{sub,e}$ é a vazão mássica do substrato que entra, cp_{sub} é o calor específico médio do substrato, T_{sub} e $T_{sub,e}$ são as temperaturas do substrato no interior do biodigestor e do substrato que entra respectivamente.

Cálculo do calor perdido para o solo (\dot{Q}_{solo})

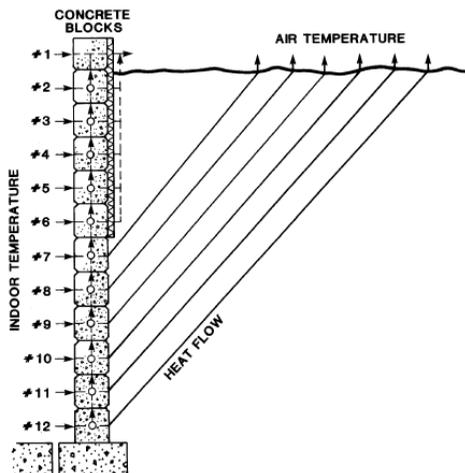
A transmissão de calor, em construções abaixo do solo, não pode ser estimada simplesmente usando a condução unidimensional do calor (ASHRAE, 2001). Baseado em medições Latta e Boileau (1969) apud Ashrae (2001) mostraram que as isotermas próximas a parede são linhas radiais centradas na intersecção do solo com a parede, fazendo com que as linhas de fluxo de calor tenham um padrão circular concêntrico conforme a Figura 53.



Fonte: ASHRAE (2001)

Figura 53 - Forma das isotermas e do fluxo de calor sem isolante térmico

Quando um isolante térmico é adicionado a parede, as isotermas, no caso de um isolante infinito, tendem a linhas horizontais paralelas ao solo e o fluxo de calor seria vertical. No caso de um isolante finito, as linhas de fluxo de calor assumem uma forma entre linhas circulares e verticais, como na Figura 54.



Fonte: ASHRAE (2001)

Figura 54 - Fluxo de calor através do solo com isolante finito

A taxa de calor perdida pelo substrato para o solo nas paredes e no piso pode ser calculada com base na condutância efetiva, definida como a combinação do valor para a parede do digestor e o solo ao longo do correspondente fluxo de calor para o ar ambiente. O coeficiente médio de transferência de calor calculado desta maneira é então usado, juntamente com a temperatura ambiente e a temperatura do substrato, para calcular a taxa de transferência de calor para o solo conforme a equação 4.68:

$$\dot{Q}_{solo} = U_{solo} (A_p + A_f) (T_{sub} - T_{ar}) \quad (4.68)$$

onde \dot{Q}_{solo} é a taxa de calor perdida pelo substrato para o solo, U_{solo} é o coeficiente médio de transferência de calor através do solo para o ar, A_p e A_f são as áreas da parede e do piso do biodigestor respectivamente, T_{sub} e T_{ar} são as temperaturas do substrato e do ar ambiente respectivamente.

O coeficiente global médio de transferência de calor através do solo é calculado pela equação 4.69 (CIRA, 1982) apud Axaopoulos et al. (2001):

$$U_{solo} = \frac{2\lambda}{\pi H} \ln \left(1 + \frac{\pi H}{2\lambda R} \right) \quad (4.69)$$

onde $\lambda = 1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (LIENHARD, 2012) é a condutividade térmica do solo, H é a profundidade do biodigestor em metros e R é a resistência térmica da parede do biodigestor igual a $1,43 \text{ m}^2\text{C/W}$ nos sistemas aquecidos (com isolante térmico) e $2,86 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2\text{C/W}$ nos sistemas não aquecidos (sem isolante térmico).

Cálculo da troca de calor entre o biogás e o ambiente (\dot{Q}_{amb})

No cálculo da taxa de troca térmica entre o biogás e o ambiente exterior, foram consideradas as trocas de calor por convecção entre o biogás e a superfície interna da cobertura, condução através da cobertura, e radiação e convecção na superfície externa da cobertura.

No cálculo da taxa de troca térmica entre o biogás e o ar ambiente, por meio da campânula do digestor, foi usado o conceito da temperatura sol-ar.

A temperatura sol-ar, é a temperatura equivalente do ar ambiente que, na ausência de transferência de calor por radiação, resulta na mesma taxa de transferência de calor entrando/saindo da superfície com a combinação da radiação solar incidente, troca de energia por radiação

com o céu e arredores, e a troca de calor por convecção com o ar ambiente (ASHRAE,1997).

A temperatura sol-ar é calculada pela equação 4.70 (ASHRAE,1997):

$$T_{sol-ar} = T_{amb} + \frac{\alpha I_t}{h_o} - \frac{\varepsilon_{cob} \Delta R}{h_o} \quad (4.70)$$

onde:

T_{sol-ar} = Temperatura equivalente sol – ar (°C);

T_{amb} = Temperatura do ar ambiente (°C);

α = absortividade da cobertura para radiação solar;

I_t = radiação solar total incidente na superfície (W/m^2);

ε_{cob} = emissividade hemisférica da cobertura do biodigestor;

ΔR = Diferença entre a radiação de ondas longas incidentes na superfície proveniente do céu e arredores e a radiação emitida pelo corpo negro

a temperatura do ar ambiente ($\frac{W}{m^2}$);

h_o = coeficiente combinado de transferência de calor por radiação de ondas longas e convecção na superfície exterior ($W/m^2°C$);

O coeficiente de transferência de calor combinado da superfície exterior (h_o) pode ser relacionado com a velocidade do vento (V_{vento}) pela equação 4.71 (ROHSENOW et al., 1985):

$$h_o = 11,6 + 2,6 * V_{vento} \quad (4.71)$$

Para superfícies horizontais, um valor apropriado para ΔR é $63 W/m^2$ (ASHRAE, 1997).

O valor adotado para α e ε_{cob} foi de 0,3 (ASHRAE, 1989).

A taxa de troca de calor do biogás com o ambiente é dada pela equação 4.72 (AXAPOULOS et al., 2001):

$$\dot{Q}_{amb} = U_{cob} A_{cob} * (T_{gás} - T_{sol-ar}) \quad (4.72)$$

onde:

A_{cob} = Área da cobertura do biodigestor (m^2);

$T_{gás}$ = Temperatura do biogás (°C);

T_{sol-ar} = Temperatura sol – ar equivalente ($^{\circ}\text{C}$);

U_{cob} = Coeficiente global de transferencia de calor através da cobertura do biodigestor ($\text{W}/\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}}$);

O coeficiente global de transferência de calor através da cobertura do biodigestor (U_{cob}) é calculado pela equação 4.73:

$$U_{cob} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{l_{cob}}{k_{cob}} + \frac{1}{h_o}} \quad (4.73)$$

onde:

h_i = coeficiente de transferência de calor por convecção interna ($8,2 \text{ W}/\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}}$, ASHRAE, 1989)

l_{cob} = espessura da cobertura do biodigestor (0,00125 m)

k_{cob} = condutividade térmica do material da cobertura ($0,35 \text{ W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)

h_o = coeficiente de transferencia de calor por radiação de ondas longas e convecção na superfície exterior ($\text{W}/\text{m}^2\text{^{\circ}\text{C}}$)

A direção da taxa de calor trocada com o ambiente vai depender da diferença de temperatura entre o biogás e a temperatura sol-ar. Se esta diferença for positiva, isto é, se a temperatura do biogás for maior que a temperatura sol-ar, o biogás irá perder calor para o ar ambiente, caso contrário o biogás irá receber calor do ambiente, aumentando assim sua temperatura.

4.3.3.4 Balanço de energia total no SGB

$$\dot{E}_{dejeta} + \dot{Q}_{bio,\acute{u}til} + \dot{W}_{SGB} = \dot{E}_{biog\acute{a}s} + \dot{E}_{efluente} + \dot{Q}_{sub} + \dot{Q}_{solo} + \dot{Q}_{amb} \quad (4.74)$$

onde \dot{E}_{dejeta} é a taxa de energia química do dejetto que entra no biodigestor, $\dot{Q}_{bio,\acute{u}til}$ é a taxa de energia térmica utilizada no aquecimento do biodigestor, \dot{W}_{SGB} é a potência da bomba de agitação, $\dot{E}_{biog\acute{a}s}$ é a potência do biogás produzido, $\dot{E}_{efluente}$ é a taxa de energia química perdida no efluente que sai, \dot{Q}_{sub} , \dot{Q}_{solo} e \dot{Q}_{amb} são as taxas de transferência de calor para o substrato que entra, para o solo e para o ambiente respectivamente. A taxa de energia química perdida no efluente $\dot{E}_{efluente}$ é obtida no balanço.

4.3.3.5 Eficiência do SGB

A eficiência do SGB representa o quanto da energia (química e sensível) fornecida ao SGB foi convertida efetivamente em biogás.

$$\eta_{SGB} = \frac{\dot{E}_{biogás}}{\dot{E}_{dejetos} + \dot{Q}_{bio,útil} + \dot{W}_{SGB} + \dot{Q}_{sub} + \dot{Q}_{solo} + \dot{Q}_{amb}} \quad (4.75)$$

onde η_{SGB} representa a eficiência do sistema de geração de biogás. As taxas de perda de calor para o substrato que entra, para o solo e para o ambiente foram incluídas para que não influenciem na avaliação de SGB em climas diferentes, pois, apesar de consideradas perdas, essa taxas podem ser ora negativas, ora positivas dependendo das condições climáticas e das temperaturas do substrato e do biogás no biodigestor.

4.3.4 Subsistema de criação de suínos (SCS)

Objetivo

O objetivo da análise termodinâmica do SCS é determinar a taxa de energia que é perdida na forma de dejetos e a eficiência energética do SCS.

4.3.4.1 Balanço de energia no SCS

$$\dot{E}_{suínos,e} + \dot{E}_{ração} + \dot{W}_{SCS} = \dot{E}_{suínos,s} + \dot{E}_{dejetos} \quad (4.76)$$

onde $\dot{E}_{suínos,e}$ e $\dot{E}_{suínos,s}$ são as taxas de entrada e saída de energia na forma de suínos respectivamente, \dot{W}_{SCS} é a taxa de entrada de energia elétrica, $\dot{E}_{ração}$ é a taxa de entrada de energia na forma de ração e $\dot{E}_{dejetos}$ é a taxa de energia perdida na forma de dejetos.

A taxas $\dot{E}_{suínos,e}$, $\dot{E}_{suínos,s}$, $\dot{E}_{ração}$ são obtidas através do produto entre suas respectivas vazões mássicas e seus conteúdos energéticos. A taxa de consumo de energia elétrica \dot{W}_{SCS} é dada pela razão entre o consumo de energia elétrica do SCS e o tempo em horas considerado na análise, sendo igual a carga elétrica média apurada no período. Na simulação dinâmica será usada a curva de carga apurada. A taxa $\dot{E}_{dejetos}$ é obtida a partir do balanço.

4.3.4.2 Eficiência energética do SCS

A eficiência do SCS é definida como a relação entre a energia dos suínos que saem da granja e a energia que entra na granja durante o período analisado. A eficiência do SCS não muda com a instalação ou não da PGEB, então ela servirá de linha de base para comparação com a eficiência dos BSI formados.

$$\eta_{SCS} = \frac{\dot{E}_{suínos,s}}{\dot{E}_{suínos,e} + \dot{E}_{ração} + \dot{W}_{SCS}} \quad (4.77)$$

4.3.5 Biosistema integrado

4.3.5.1 Balanço de energia no BSI

$$\begin{aligned} & \dot{E}_{ração} + \dot{E}_{suínos,e} + \dot{W}_{SCS} \\ = & \dot{E}_{suínos,s} + \dot{W}_{SGEE} + \dot{Q}_{SGEE,loss} + \dot{Q}_{SAB,loss} \\ & + \dot{E}_{biogás,queimador} + \dot{E}_{efluente} + \dot{Q}_{sub} + \dot{Q}_{solo} \\ & + \dot{Q}_{amb} \end{aligned} \quad (4.78)$$

4.3.5.2 Eficiência do BSI

A eficiência do BSI é avaliada para os seguintes casos:

- A energia útil considerada são os suínos e o biogás ($\eta_{BSI,Biogás}$);
- A energia útil considerada são os suínos e a energia elétrica total produzida ($\eta_{BSI,EE}$);
- A energia útil considerada são os suínos e a energia elétrica líquida produzida ($\eta_{BSI,EEL}$);

Eficiência do BSI com produção de biogás

A eficiência do BSI com produção de biogás avalia quanto da energia de entrada foi convertida em suínos e em biogás conforme a equação 4.79.

$$\eta_{BSI,Biogás} = \frac{\dot{E}_{suínos,s} + \dot{E}_{biogás}}{\dot{E}_{suínos,e} + \dot{E}_{ração} + \dot{W}_{SCS} + \dot{W}_{SGB} + \dot{W}_{SAB}} \quad (4.79)$$

Eficiência do BSI com produção de EE

A eficiência do BSI com produção de EE avalia quanto da energia de entrada foi convertida em suínos e EE conforme a equação 4.80:

$$\eta_{BSI,EE} = \frac{\dot{E}_{suínos,s} + \dot{W}_{GER}}{\dot{E}_{suínos,e} + \dot{E}_{ração} + \dot{W}_{SCS} + \dot{W}_{SGB} + \dot{W}_{SAB}} \quad (4.80)$$

Eficiência do BSI com a produção líquida de energia

A eficiência do BSI com produção líquida de EE avalia quanto da energia de entrada foi convertida em suínos e EE líquida conforme a equação 4.81:

$$\eta_{BSI,EEL} = \frac{\dot{E}_{suínos,s} + \dot{W}_{SGEE}}{\dot{E}_{suínos,e} + \dot{E}_{ração} + \dot{W}_{SCS} + \dot{W}_{SGB} + \dot{W}_{SAB}} \quad (4.81)$$

4.3.5.3 Índice de recuperação da energia da ração na forma de biogás

Este índice determina o quanto da energia da ração foi recuperada na forma de biogás e é calculado conforme a equação 4.82:

$$IRR_{Biogás} = \frac{\dot{E}_{Biogás}}{\dot{E}_{ração}} \quad (4.82)$$

4.3.5.4 Índice de recuperação da energia da ração na forma de EE

Este índice determina o quanto da energia da ração foi recuperada na forma de energia elétrica e é calculada conforme a equação 4.83:

$$IRR_{EE} = \frac{\dot{W}_{GER}}{\dot{E}_{ração}} \quad (4.83)$$

4.3.5.5 Índice de recuperação da energia da ração na forma de EE líquida

Este índice determina o quanto da energia da ração foi recuperada na forma de energia elétrica líquida e é calculado conforme a equação 4.84:

$$IRR_{EEL} = \frac{\dot{W}_{SGEE}}{\dot{E}_{ração}} \quad (4.84)$$

4.3.5.6 Índice de desempenho do BSI

O índice de desempenho do BSI compara a eficiência na produção de suínos antes e depois da instalação da PGEB em termos relativos, sendo calculado conforme a equação 4.85.

$$ID_{BSI} = \left(\frac{\eta_{BSI,EEL}}{\eta_{SCS}} - 1 \right) * 100 \quad (4.85)$$

Se este índice for maior que zero a eficiência na criação de suínos melhorou, se menor, piorou.

4.4 SIMULAÇÃO DINÂMICA DOS BSI

Devido à produção de biogás sofrer forte influência da temperatura do substrato no interior do biodigestor e esta por sua vez depender de grandezas variáveis como as condições climáticas locais e o calor fornecido ao biodigestor, optou-se por simular o comportamento dinâmico dos BSIs ao longo de um ano inteiro. Dessa forma pôde-se compreender melhor o comportamento do BSI nas diferentes estações do ano e com cargas variáveis no caso das PGEB isoladas.

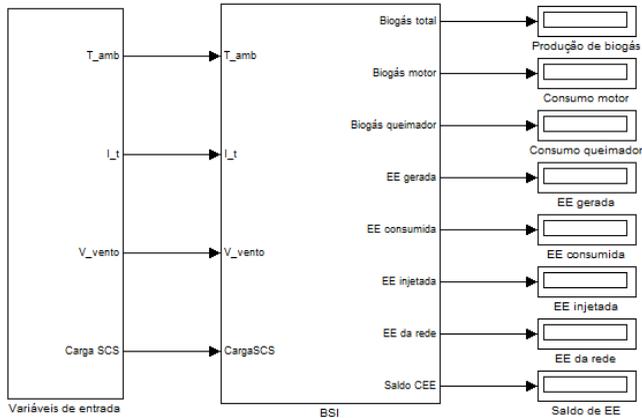
Esta seção apresenta o modelo de simulação desenvolvido e os dados climáticos considerados.

4.4.1 O modelo de simulação

O modelo dinâmico para simular os BSIs foi desenvolvido com a ferramenta de modelagem simulação e análise de sistemas dinâmicos Simulink. Parte integrante do software Matlab, é uma ferramenta de diagramação gráfica por blocos e bibliotecas customizáveis, amplamente utilizado para projeto e simulação de sistemas dinâmicos.

Para sua construção foram utilizados dados e equações obtidos da análise termodinâmica do BSI.

O modelo de simulação foi dividido em blocos principais e secundários. São dois os blocos principais, um com os dados de entrada da simulação que são variáveis no tempo (variáveis de entrada) e outro representando o BSI e as saídas principais da simulação, conforme pode ser observado na Figura 55.

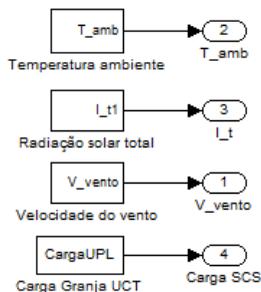


Fonte: elaborado pelo autor

Figura 55 - Blocos principais da simulação

O bloco das variáveis de entrada possui os seguintes blocos secundários em seu interior, como pode ser observado na Figura 56:

- Temperatura ambiente (T_{amb});
- Radiação solar total (I_t);
- Velocidade do vento (V_{vento});
- Carga SCS;



Fonte: elaborado pelo autor

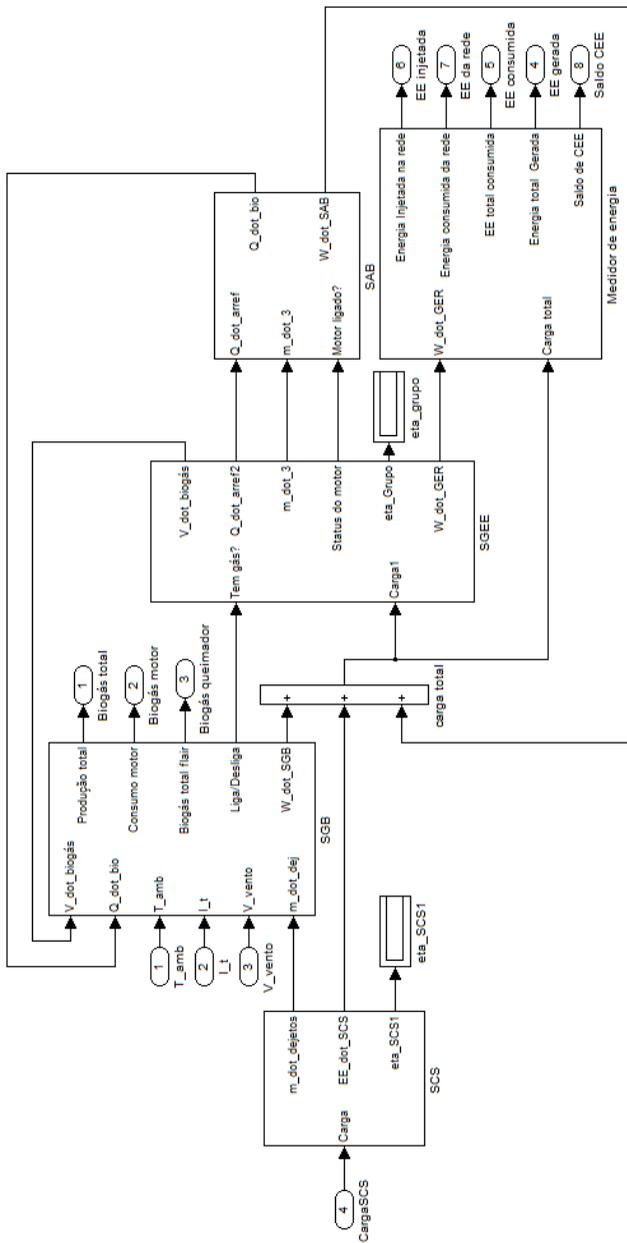
Figura 56 – Bloco Variáveis de entrada

Cada bloco é responsável por ler uma tabela que possui os referidos dados e envia-los ao bloco BSI.

Os dados são lidos, enviados ao BSI e processados a cada intervalo de tempo definido no *sample time* do simulador. Como o tempo de amostragem dos dados climáticos utilizados são de uma hora, o *sample time* precisou ser definido em uma hora.

O bloco BSI é formado pelos seguintes blocos secundários conforme mostra a Figura 57:

- SCS
- SGB
- SGEE
- SAB
- Medidor de energia



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 57 - Bloco BSI

4.4.1.1 Bloco SCS

Este bloco é responsável por calcular os fluxos e o balanço de energia e obter a eficiência do SCS. O diagrama de blocos do SCS é mostrado na Figura 58.

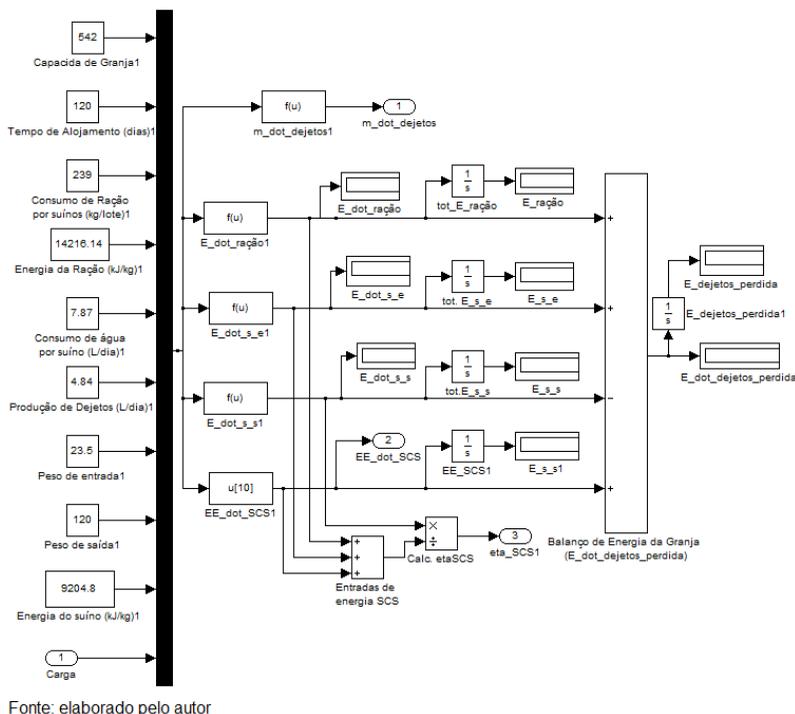


Figura 58 - Bloco SCS

4.4.1.2 Bloco SGB

Este bloco é subdividido em outros três blocos, conforme mostra a Figura 59:

- Cálculo da temperatura do substrato e do biogás
- Cálculo da produção de biogás
- Gasômetro

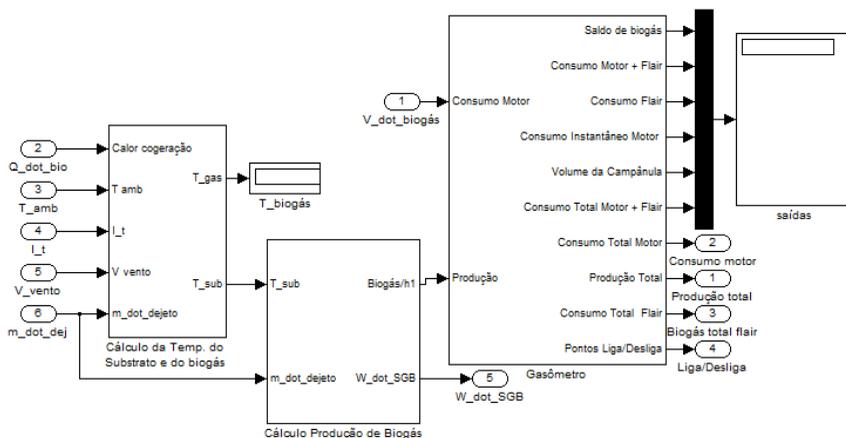
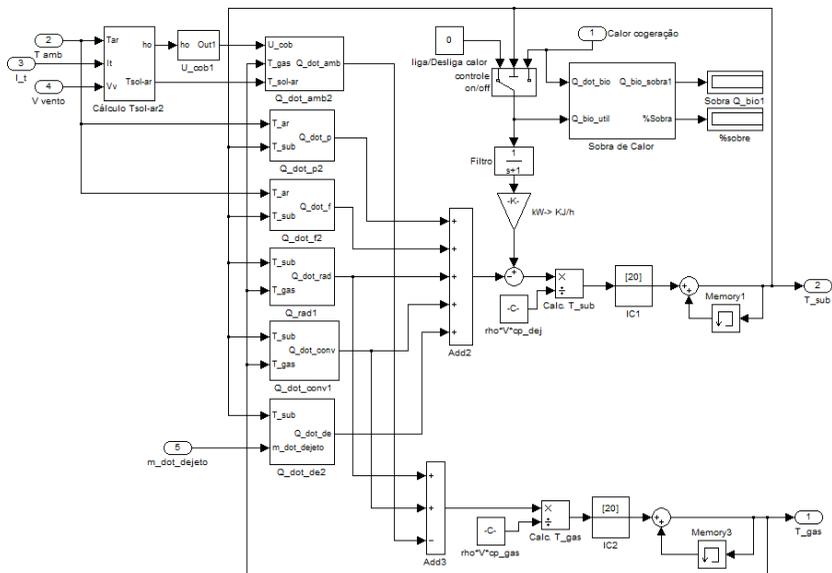


Figura 59 - Bloco SGB

Cálculo da temperatura do substrato e do biogás

Este bloco é responsável por calcular a temperatura instantânea do biogás e do dejetos através das equações 4.61 e 4.63, dos dados climáticos e do calor de aquecimento do biodigestor proveniente do SAB. Para isto ele calcula todas as taxas de calor trocadas pelo biodigestor conforme o modelo apresentado na seção 4.3.3. Devido a possibilidade do excesso de fornecimento de calor ao biodigestor, foi implementado um controlador on/off para controlar a taxa de calor entregue ao digestor pelo SAB que começa a atuar quando a temperatura do substrato atinge 40°C. Este controlador simula o funcionamento de um direcionador que desvia os gases de exaustão do trocador gás-água e de um radiador no circuito de arrefecimento do motor. O bloco também contabiliza quanto do calor de aquecimento precisou ser jogado fora. A Figura 60 mostra o seu diagrama de blocos.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 60 - Bloco Cálculo da temperatura do substrato e do biogás

Cálculo da produção de biogás

Este bloco calcula a produção instantânea de biogás baseado na temperatura calculada para o substrato e as constantes utilizadas para o modelo de produção de biogás adotado, como mostra a Figura 61. O modelo e as constantes utilizadas foram os mesmo utilizados para estimar a produção de biogás adotando-se uma temperatura média conforme descrito na seção 3.6.

Este bloco tem por função também representar a carga elétrica da bomba de agitação do biodigestor e calcular o seu consumo. A potência da bomba de agitação foi considerada constante e permanente, ou seja, ela funciona de maneira contínua.

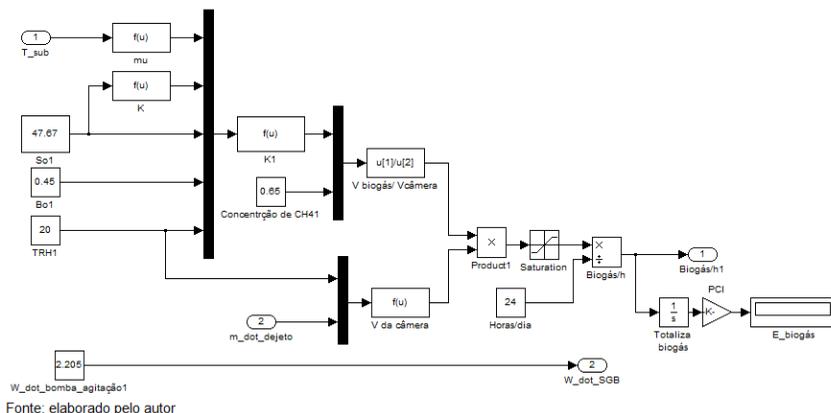
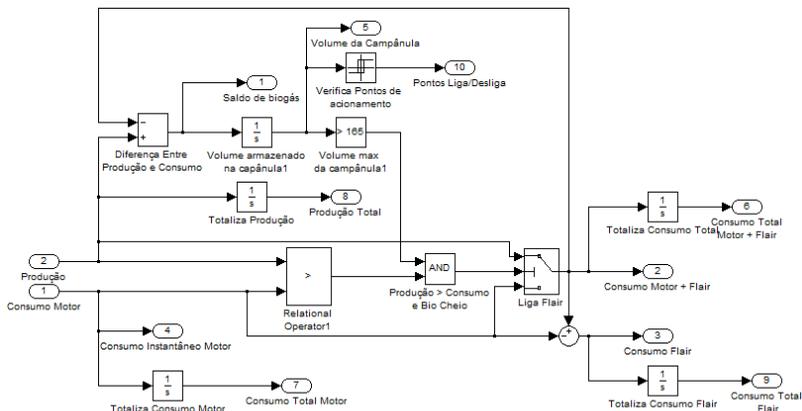


Figura 61 - Bloco Cálculo da produção de biogás

Gasômetro

Este bloco é responsável por contabilizar a produção e o consumo de biogás e atualizar o volume do gasômetro. O volume de biogás no gasômetro é calculado pela integral da diferença entre produção e consumo, como pode ser observado na Figura 62. O gasômetro envia um sinal para o motor começar a funcionar somente depois que atingir o nível de 90% e para desligar quando atinge 20%. Esta estratégia permite avaliar a influência do tamanho do gasômetro na produção de EE. Quando o consumo for maior que a produção o gasômetro irá esvaziar até o volume mínimo determinado. Neste ponto o motor desliga e o gasômetro começa a encher novamente. Quando a produção é maior que o consumo e o gasômetro estiver cheio, o biogás excedente é enviado para um queimador. Esta estratégia foi desenvolvida para avaliar a sincronia da produção de biogás e seu consumo, ou a falta dela nas PGEs isoladas e representa com certa fidelidade o que ocorre na prática. A grande dificuldade de avaliar a produção de energia elétrica em PGEs decorre do combustível nem sempre estar disponível e a dificuldade em prever a sua disponibilidade.



Fonte: elaborado pelo autor

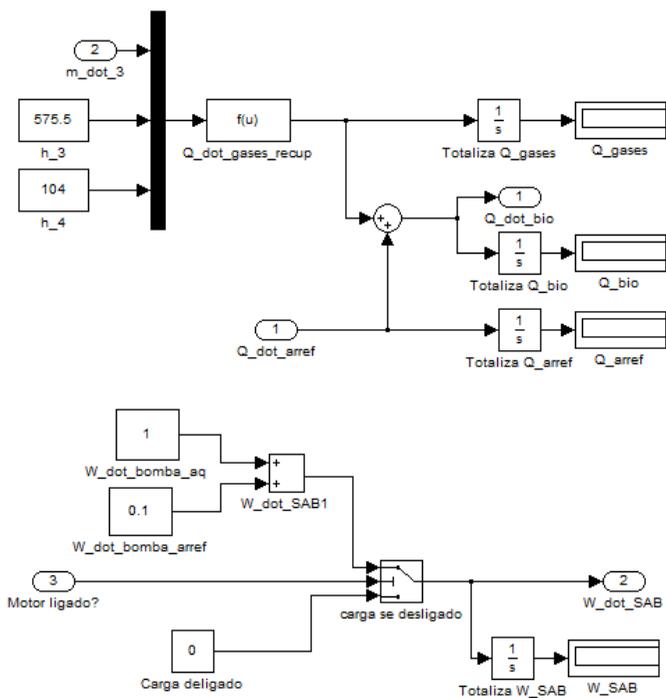
Figura 62 - Bloco Gasômetro

4.4.1.3 Bloco SGEE

Este bloco recebe os dados referentes à carga elétrica instantânea total e o sinal do nível do gasômetro. Quando existe biogás no gasômetro ele calcula os resultados referentes ao consumo de biogás, calor rejeitado e geração de EE utilizando as equações empregadas na análise termodinâmica. Quando o nível do gasômetro é mínimo o motor transfere a carga para rede, pois será desligado, desligando dessa maneira também o SAB. O consumo de combustível depende da carga aplicada ao motor e é calculado conforme as equações da Tabela 18. A taxa de calor rejeitada no arrefecimento do motor foi considerada fixa em 30% da energia do biogás consumido. No cálculo da taxa de calor dissipada nos gases de escape a temperatura dos gases foi considerada constante em 525°C, variando apenas com a vazão dos gases de exaustão. A Figura 63 mostra o diagrama de blocos do SGEE.

4.4.1.4 Bloco SAB

Este bloco tem por função calcular o calor recuperado dos gases de exaustão, e o calor total disponível para aquecer o biodigestor, bem como representar as cargas auxiliares do SAB e calcular o seu consumo, conforme mostra a Figura 64. As cargas do SAB foram consideradas constantes, pois suas vazões são mantidas constantes. Este bloco recebe a informação referente ao *status* do motor e somente funciona quando o motor está em funcionamento, ou seja, a carga auxiliar do SAB é intermitente.



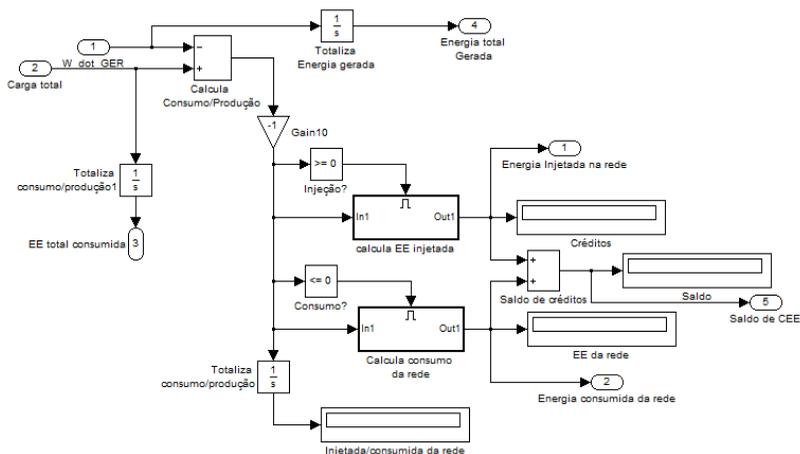
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 64 - Bloco SAB

4.4.1.5 Bloco Medidor de Energia

Este bloco representa a rede da distribuidora de EE e é responsável por contabilizar a energia total gerada, total consumida,

consumo da rede, créditos de energia elétrica gerados e créditos de energia elétrica recuperados conforme mostra a Figura 65.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 65 - Bloco Medidor de energia

4.4.2 Os dados Climáticos

Os dados climáticos utilizados foram obtidos de uma estação meteorológica automática experimental localizada na cidade de Erechim-RS. A estação possui localização $27^{\circ}38'45,5''S$ $52^{\circ}16'19,1''W$ e altitude de 664 m (MADALOZZO, 2015).

Os dados utilizados foram a temperatura ambiente ($^{\circ}C$), a irradiação solar total (W/m^2) e a velocidade do vento (m/s) referentes ao ano de 2014 e possuem o tempo de amostragem de uma hora.

A Figura 66 mostra os dados referentes ao ano inteiro de 2014 para as três variáveis.

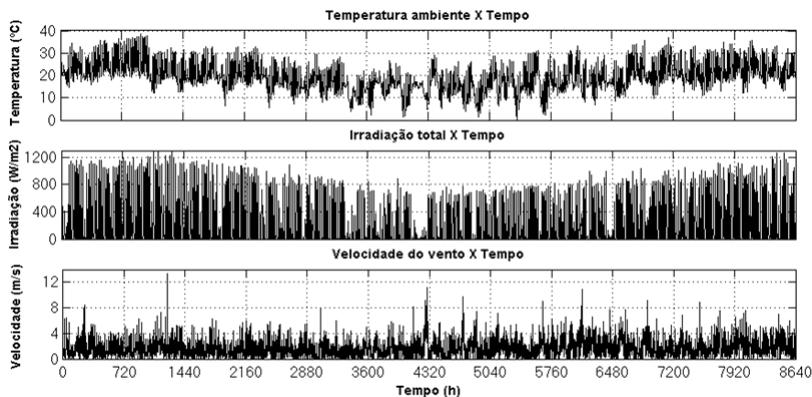


Figura 66 - Dados climáticos utilizados

4.4.3 Fluxograma da simulação

A Figura 67 apresenta o fluxograma da simulação dinâmica dos BSIs.

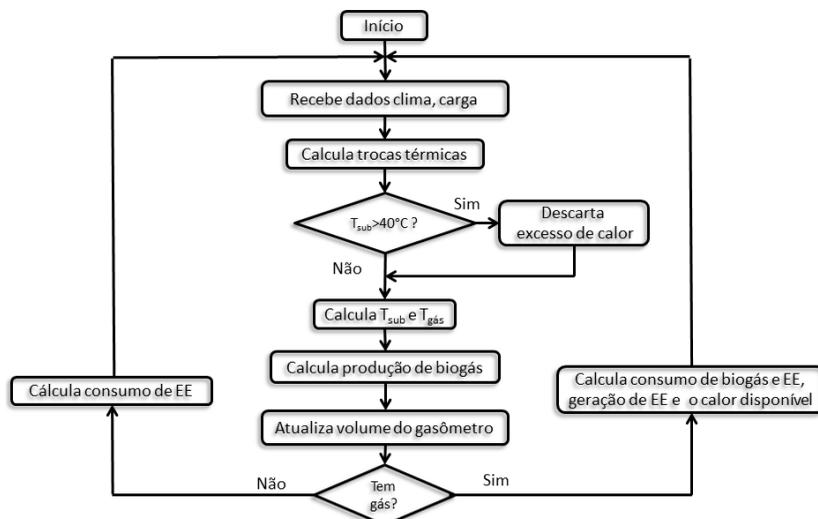


Figura 67 - Fluxograma da simulação dinâmica do BSIs

5 ANÁLISE ECONÔMICA

A partir dos resultados obtidos nas simulações dinâmicas dos BSI foi possível realizar a análise da viabilidade econômica com maior precisão. Para isto foram levantados os custos de instalação, operação e manutenção das plantas e as receitas provenientes da operação para um prazo de 15 anos, que corresponde a vida útil do biodigestor.

A análise da viabilidade econômica das plantas compreende:

- Levantamento dos investimentos para instalação;
- Levantamento dos custos de operação e manutenção das plantas;
- Levantamento das receitas proveniente das plantas;
- Levantamento das linhas de crédito para este tipo de investimento;
- Definição da taxa mínima de atratividade;
- Cálculo do valor presente líquido do investimento;
- Cálculo da taxa interna de retorno;
- Cálculo do *payback*;
- Cálculo do custo do kWh bruto produzido;
- Cálculo do custo do kWh líquido produzido;
- Valor máximo do investimento;
- Valor mínimo da EE;

5.1 LEVANTAMENTO DOS INVESTIMENTOS PARA INSTALAÇÃO DAS PLANTAS

Os investimentos na instalação das plantas levam em consideração todos aqueles necessários para a planta entrar em operação. As Tabelas 24 e 25 apresentam os investimentos nos sistemas principais das plantas, seus componentes e o investimento total em cada BSI.

O levantamento dos investimentos considerou o preço médio de cada componente praticado no mercado, obtidos através de orçamentos e de conversas com fabricantes de equipamentos para plantas de biogás. É difícil obter um orçamento da planta inteira, pois cada empresa faz uma parte do sistema.

Tabela 24 - Levantamento dos investimentos nos BSIs da granja UCT

Investimento nas plantas nos BSI com a UCT				
Biossistema	BSI1	BSI2	BSI3	BSI4
Sistema de Biodigestão				
Tanque de homogeneização	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00
Caixa de desarenação	500,00	500,00	500,00	500,00
Biodigestor	14.000,00	14.000,00	14.000,00	14.000,00
Tanque de biofertilizante	8.500,00	8.500,00	8.500,00	8.500,00
Sistema de agitação	12.500,00	12.500,00	12.500,00	12.500,00
Sistema de dessulfurização	3.500,00	3.500,00	3.500,00	3.500,00
Escavação	10.000,00	10.000,00	10.000,00	10.000,00
Acessórios	500,00	500,00	500,00	500,00
Subtotal Biodigestão	R\$ 51.000,00	R\$ 51.000,00	R\$ 51.000,00	R\$ 51.000,00
Sistema de Geração de EE				
Motogerador	77.600,00	77.600,00	77.600,00	77.600,00
Casa de máquinas	6.000,00	6.000,00	6.000,00	6.000,00
Rede de distribuição	7.400,00	7.400,00	7.400,00	7.400,00
Subtotal Geração de EE	R\$ 91.000,00	R\$ 91.000,00	R\$ 91.000,00	R\$ 91.000,00
Sistema de Aquecimento				
Trocadores de calor	0,00	10.760,00	0,00	10.760,00
Bombas	0,00	1.920,00	0,00	1.920,00
Isolante térmico	0,00	1.200,00	0,00	1.200,00
Acessórios	0,00	5.120,00	0,00	5.120,00
Subtotal Aquecimento	R\$ 0,00	R\$ 19.000,00	R\$ 0,00	R\$ 19.000,00
Sistema de Conexão com a rede				
Painel de conexão e proteção	0,00	0,00	60.000,00	60.000,00
Medidor bidirecional	0,00	0,00	2.000,00	2.000,00
Subtotal Conexão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 62.000,00	R\$ 62.000,00
Total do BSI	R\$ 142.000,0	R\$ 161.000,0	R\$ 204.000,0	R\$ 223.000,0

Fonte: elaborado pelo autor

Observa-se das tabelas, que o investimento não varia muito de uma planta para outra, principalmente devido aos investimentos comuns entre as plantas, independente no número de animais. A falta de equipamentos de tamanho adequado as plantas também faz essa diferença diminuir. Dessa forma as PGEs para 542 suínos são em média apenas 11,3% mais baratas que as PGEs para 259 matrizes, que corresponde a uma granja UCT com 1220 suínos.

Tabela 25 - Levantamentos dos investimentos nos BSIs da granja UPL

Investimento nas plantas nos BSI com a UPL				
Biossistema	BSI5	BSI6	BSI7	BSI8
Sistema de Biodigestão				
Tanque de homogeneização	2.500,00	2.500,00	2.500,00	2.500,00
Caixa de desarenação	500,00	500,00	500,00	500,00
Biodigestor	17.000,00	17.000,00	17.000,00	17.000,00
Tanque de biofertilizante	13.271,00	13.271,00	13.271,00	13.271,00
Sistema de agitação	14.500,00	14.500,00	14.500,00	14.500,00
Sistema de dessulfurização	6.500,00	6.500,00	6.500,00	6.500,00
Escavação	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00
Acessórios	729,00	729,00	729,00	729,00
Subtotal Biodigestão	R\$ 70.000,00	R\$ 70.000,00	R\$ 70.000,00	R\$ 70.000,00
Sistema de Geração de EE				
Motogerador	77.600,00	77.600,00	77.600,00	77.600,00
Casa de máquinas	6.000,00	6.000,00	6.000,00	6.000,00
Rede de distribuição	7.400,00	7.400,00	7.400,00	7.400,00
Subtotal Geração de EE	R\$ 91.000,00	R\$ 91.000,00	R\$ 91.000,00	R\$ 91.000,00
Sistema de Aquecimento				
Trocadores de calor	0,00	11.500,00	0,00	11.500,00
Bombas	0,00	1.920,00	0,00	1.920,00
Isolante térmico	0,00	1.800,00	0,00	1.800,00
Acessórios	0,00	5.780,00	0,00	5.780,00
Subtotal Aquecimento	R\$ 0,00	R\$ 21.000,00	R\$ 0,00	R\$ 21.000,00
Sistema de Conexão com a rede				
Painel de conexão e proteção	0,00	0,00	60.000,00	60.000,00
Medidor bidirecional	0,00	0,00	2.000,00	2.000,00
Subtotal Conexão	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 62.000,00	R\$ 62.000,00
Total do BSI	R\$ 161.000,0	R\$ 182.000,0	R\$ 223.000,0	R\$ 244.000,0

Fonte: elaborado pelo autor

5.2 LEVANTAMENTO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO

Os custos de manutenção e operação das plantas foram estimados seguindo as instruções de manutenção do fabricante, levantamento dos custos das peças e serviços necessários na O&M e dos tempos de funcionamento do motogerador obtidos nas simulações.

A Tabela 26 apresenta as principais ações, peças e custos envolvidos na O&M das plantas.

Tabela 26 - Peças, serviços e custos na O&M das plantas

Componente	Ação	Custo/Ação (R\$)
Óleo lubrificante e filtro	Verificar a cada 100 h e trocar a cada 200 h	144,60
Filtro de ar	Limpeza a cada 100 h e troca a cada 2.000 h	50,00
Velas e cabos de vela	Checar desgaste a cada 360 h e trocar a cada 2.000 h	152,20
Rolamento do Alternador	Verificar a cada 360 h e trocar a cada 2.000 h	10,04
Correia do alternador	Trocar a cada 1.000 h	30,00
Rolamento do gerador	Lubrificar a cada 2.000 h	65,70
Motor	Retificar a cada 17.520 h	10.000,00
Motor	Trocar a cada 3 retíficas	25.000,00
Toda Planta	Verificação mensal	150,00

Fonte: elaborado pelo autor

As Tabelas 27 e 28 apresentam os custos de O&M dos BSIs para um prazo de 15 anos.

Tabela 27 - Custos de O&M dos BSIs da granja UCT

Custos de O&M dos BSIs na UCT (R\$)				
Sistema	BSI1	BSI2	BSI3	BSI4
Custo total (15 anos)	118.000,00	155.000,00	88.000,00	110.000,00
Custo anual	7.867,00	10.333,00	5.867,00	7.334,00
% do investimento inicial	5,54%	6,42%	2,88%	3,29%

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 28 - Custos de O&M dos BSIs na granja UPL

Custos de O&M dos BSIs na UPL (R\$)				
Sistema	BSI5	BSI6	BSI7	BSI8
Custo total (15 anos)	208.000,00	227.000,00	172.000,00	204.000,00
Custo anual	13.867,00	15.134,00	11.467,00	13.600,00
% do investimento inicial	8,61%	8,32%	5,14%	5,57%

Fonte: elaborado pelo autor

O levantamento dos custos de O&M revelou que o maior gasto é com óleo lubrificante, representando em média 40% do total.

5.3 LEVANTAMENTO DA RECEITA DAS PGEB

Como a venda da energia elétrica não é permitida, será considerado como receita o valor correspondente a energia elétrica que deixará de ser usada da distribuidora. Este valor depende se a PGEB é isolada ou conectada a rede.

5.3.1 PGEBs isoladas

Nas PGEBs isoladas, o valor economizado por kWh corresponde ao valor integral que era pago anteriormente pela granja. Assim as receitas com a PGEB serão dadas pelo produto entre a diferença de consumo de energia elétrica proveniente da distribuidora ($EE_{D,antes}$) antes e depois ($EE_{D,depos}$) da planta pelo preço “cheio” do kWh pago anteriormente conforme a equação 5.1:

$$R_{isolado} = (EE_{D,antes} - EE_{D,depos}) * \$kWh \quad (5.1)$$

Sendo o preço do $\$kWh$ de R\$ 0,44 para a granja UCT e R\$ 0,45 para a UPL.

5.3.2 PGEBs Conectadas

Nas PGEBs conectadas as receitas são compostas por três parcelas da seguinte maneira:

- Receita referente ao valor do consumo evitado (R_{EEE});
- Receita referente ao valor do saldo dos créditos de EE (R_{CEE});
- Despesa referente a recuperação de créditos (D_{RCEE});

5.3.2.1 Receita do consumo evitado

A receita referente ao consumo evitado é dada pelo produto entre a diferença de consumo de energia elétrica proveniente da distribuidora ($EE_{D,antes}$) antes e depois ($EE_{D,depos}$) da planta pelo preço “cheio” do kWh pago anteriormente conforme a equação 5.2:

$$R_{EEE} = (EE_{D,antes} - EE_{D,depos}) * \$kWh \quad (5.2)$$

Sendo o preço do $\$kWh$ de R\$ 0,44 para a granja UCT e R\$ 0,45 para a UPL.

5.3.2.2 Receita do saldo de créditos

A receita proveniente do saldo dos créditos de EE (CEE) representa o valor que será economizado quando o saldo de CEE for utilizado e é calculado pela equação 5.3:

$$R_{CEE} = (CEEG - CEER) * \$CEE \quad (5.3)$$

onde *CEEG* representa os créditos de EE gerados durante o período analisado, *CEER* representa os créditos recuperados no período analisado e *\$CEE* é o valor dos créditos de EE.

O valor dos CEE (*\$CEE*) depende dos seguintes fatores:

- Se o estado cobra ou não ICMS sobre os créditos recuperados da rede;
- Se o adicional de bandeira tarifária é cobrado sobre os créditos de EE;
- Cobrança ou não da PIS/COFINS sobre os créditos;

Como recentemente um crescente número de estados vem isentando o pagamento de ICMS sobre os créditos resgatados, serão analisados os casos com e sem a cobrança do imposto. Santa Catarina ainda cobra o imposto.

Existe a dúvida se o adicional causado pela bandeira tarifária é cobrado sobre os CEE, e também se ele continuará a ser cobrado no futuro. Dessa forma serão analisados os dois casos.

Recentemente o governo federal isentou os créditos da cobrança da PIS/COFINS, porém não se sabe até quando. Assim também serão analisados ambos os casos.

A Tabela 29 mostra os valores referentes a estes itens na composição do preço da EE (\$kWh).

A Tabela 30 mostra o valor do CEE em cada situação descrita anteriormente.

Quanto menos encargos incidirem sobre os CEE, maior o *\$CEE* e maior será a receita gerada.

Tabela 29 - Composição do preço da EE na população

Composição do preço da EE nas granjas					
Granja	Preço do kWh	ICMS	PIS/COFINS	Adicional	Restante (EE,Dist.,Trans.)
UCT	R\$ 0,440	R\$ 0,069	R\$ 0,016	R\$ 0,070	R\$ 0,285
UPL	R\$ 0,450	R\$ 0,083	R\$ 0,016	R\$ 0,072	R\$ 0,279

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 30 - Valor do CEE conforme a incidência de ICMS, PIS/COFINS e bandeira tarifária

SCEE (R\$/kWh)								
Granja	Valor "Cheio"	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

Fonte: elaborado pelo autor

5.3.2.3 Despesa na recuperação de créditos

A despesa referente a recuperação de créditos pode ser interpretada como uma compra de EE da rede ao um preço mais baixo, necessária para funcionar a PGEB (gasto extra e não economia). Outra maneira de interpreta-la é como se fosse o custo de utilização do sistema de compensação de energia elétrica (\$USC) (custo do armazenamento do CEE). Essa despesa é gerada devido ao aumento do consumo de EE provocado pelas cargas auxiliares, que não existiria se a PGEB não fosse instalada.

A despesa com a recuperação de créditos é calculada pela equação 5.4:

$$D_{RCEE} = CEER * \$USC \quad (5.4)$$

onde $CEER$ são os CEE recuperados no período analisado e $\$USC$ é o valor referente ao uso do SCEE e pode ser calculado pela equação 5.5.

$$\$USC = \$kWh - \$CEE \quad (5.5)$$

onde $\$kWh$ é o preço "cheio" pago anteriormente de R\$ 0,44 para a granja UCT e R\$ 0,45 para a UPL. E $\$CEE$ é o valor dos CEE conforme a Tabela 30.

5.3.2.4 Custo da disponibilidade da EE

A conta de EE da UC aderida ao SCEE nunca será zero, mesmo que nenhum dos itens descritos anteriormente incida sobre o preço do kWh, pois mesmo que a UC injete mais energia que consome, ainda será devido o pagamento referente ao custo da disponibilidade da EE que é o valor em reais equivalente a 30 kWh para UC com ligação monofásica,

50 kWh para bifásicas e 100 kWh para trifásicas, que no caso da população corresponde aproximadamente a R\$ 10,50, R\$ 17,50 e R\$ 35,00 respectivamente. Devido a pequena magnitude destes valores frente aos demais valores apurados, eles serão desprezados.

5.3.2.5 Receita total conectado

Dessa forma a receita com as plantas conectadas será dada pela seguinte equação:

$$R_{conectado} = R_{EEE} + R_{CEE} - D_{RCEE} \quad (5.6)$$

5.3.3 Receita Líquida das PGEBs

A receita líquida da PGEB é a diferença entre as receitas apuradas em cada ano de operação e seus custos de O&M conforme a equação:

$$R_{PGEB} = R - O\&M \quad (5.7)$$

onde R é dado conforme as equações 5.1 e 5.6 e $O\&M$ é obtido das Tabelas 27 e 28.

5.4 LINHAS DE FINANCIAMENTO

5.4.1 Pronaf Eco

O BNDES possui uma linha de financiamento para pessoas físicas enquadradas como agricultores familiares para projetos com a finalidade de implantar tecnologias de produção sustentável chamado Pronaf Eco.

Para projetos de PGEBs a taxa desta linha de crédito é 5,5% a.a. com prazo para pagamento de até 12 anos, prazo de carência de até 5 anos e limite de até 300 mil reais.

5.4.2 Programa ABC

Para aqueles que não são enquadrados na agricultura familiar, o BNDES possui a linha de crédito do Programa para Redução da Emissão de Gases de efeito Estufa na Agricultura – Programa ABC (Agricultura de Baixo Carbono). Este programa tem por objetivo:

- Reduzir as emissões de gases de efeito estufa oriundas das atividades agropecuárias;
- Reduzir o desmatamento;
- Aumentar a produção agropecuária em bases sustentáveis;
- Adequar as propriedades rurais à legislação ambiental;
- Ampliar a área de florestas cultivadas; e
- Estimular a recuperação de áreas degradadas.

A taxa de Juros deste programa é de 8% a.a. com prazo para pagamento de até 10 anos, prazo de carência de até 5 anos com limite de até 2 milhões de reais.

5.5 TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE

A taxa mínima de atratividade é a taxa definida pelo investidor como sendo a mínima taxa de retorno do capital investido no projeto. Quanto maior o risco do projeto, recomenda-se que maior seja a TMA adotada. Para investimentos de pessoas físicas, é praxe adotar uma taxa igual aquela que o capital investido no projeto renderia se fosse aplicada em fundos de renda fixa como a poupança (7,5% a.a.).

Como a grande maioria da população de estudo é pertencente a agricultura familiar e se encaixa na linha de financiamento PRONAF ECO, a TMA considerada será igual a taxa de juros desta linha de financiamento, portanto a TMA será de 5,5% a.a..

5.6 VALOR PRESENTE LÍQUIDO

O valor presente líquido (VPL) de um investimento é o somatório de todos os fluxos de caixa trazidos para o valor presente (início do projeto) através da aplicação de uma taxa de juros. Dadas as receitas líquidas futuras R_{PGEB} e o investimento presente I_{BSI} , o VPL pode ser calculado conforme a equação 5.8.

$$VPL = -I_{BSI} + \sum_{t=1}^n \frac{R_{PGEB}}{(1+i)^t} \quad (5.8)$$

onde t é o ano correspondente ao fluxo de caixa, n é o período de análise e i é a taxa de juros considerada.

Como método de análise de investimentos, um projeto é considerado viável se seu VPL é maior que zero quando a taxa de juros considerada é a TMA.

5.7 TAXA INTERNA DE RETORNO

A taxa interna de retorno é a taxa de juros que faz com que o VPL do investimento seja nulo. É obtido a partir da equação 5.8 fazendo $VPL = 0$ e $i = TIR$. Através deste método de análise, um investimento é viável quando a TIR for maior ou igual a TMA.

5.8 PAYBACK

O Payback ou prazo de retorno do investimento é o tempo necessário para que a soma das receitas líquidas seja igual ao valor do investimento inicial.

5.9 CÁLCULO DO CUSTO DO KWH BRUTO PRODUZIDO

O custo do kWh produzido é dado pela razão entre o montante monetário dispendido com a planta (instalação + O&M) e o montante de EE produzido ao longo da vida útil da planta, conforme a equação 5.9:

$$\text{\$kWh}_{\text{Bruto,BSI}} = \frac{I_{BSI} + O\&M}{W_{GER} * n} \quad (5.9)$$

onde I_{BSI} é o investimento no BSI dado pelas Tabelas 24 e 25, e $O\&M$ é o custo de manutenção e operação do BSI dado pelas tabelas 27 e 28, W_{GER} é a energia EE total gerada por ano e n é o número de períodos (anos) considerado na análise.

5.10 CÁLCULO DO CUSTO DO KWH LÍQUIDO PRODUZIDO

O custo do kWh líquido é dado pela razão entre o montante monetário dispendido com a planta (instalação + O&M) e o montante líquido de EE produzido ao longo da vida útil da planta, conforme a equação 5.10:

$$\text{\$kWh}_{BSI} = \frac{I_{BSI} + O\&M}{[(EE_{D,antes} - EE_{D,depois}) + (CEEG - CEER)] * n} \quad (5.10)$$

As variáveis $EE_{D,antes}$, $EE_{D,depois}$ são o consumo de energia elétrica da distribuidora antes e depois da instalação da planta, respectivamente e $CEEG$, $CEER$ são os CEE gerados e os recuperados, respectivamente, caso a PGEB participe do SCEE.

É importante destacar que a parcela $(EE_{D,antes} - EE_{D,depois})$ pode ser negativa caso o consumo de EE da rede aumente depois da instalação da PGEB. Quando isso ocorrer essa parcela será limitada em zero e o $\$kWh_{BSI}$ será infinito.

5.11 PREÇO DA EE PARA TORNAR O BSI VIÁVEL

O preço da EE ($\$kWh$) necessário para tornar o BSI viável é obtido a partir das equações 5.8, 5.7, 5.6 e 5.1. Fazendo o $VPL = 0$, $i = TMA$, $n =$ período de tempo analisado e I_{BSI} conforme as Tabelas 24 e 25 na equação 5.8 é possível encontrar a receita líquida necessária. A partir das equações 5.7, 5.6 e 5.1 é possível determinar o $\$kWh$ necessário para tornar os BSIs viáveis. É importante destacar que ao aumentar o $\$kWh$, os valores $\$USC$ e $\$CEE$ aumentam na mesma proporção. A relação entre $\$CEE$ e $\$kWh$ pode ser obtida da Tabela 30 dividindo-se o $\$CEE$ pelo preço “cheio” do $\$kWh$ correspondente. Esse procedimento é equivalente a achar o custo nivelado da energia elétrica proposta por Salvadore (2010).

5.12 VALOR DO INVESTIMENTO PARA TORNAR O BSI VIÁVEL

Utilizando as receitas líquidas obtidas para as PGEBs (R_{PGEB}), o valor do investimento (I_{BSI}) que torna o BSI viável, pode ser obtido através da equação 5.8 fazendo $VPL = 0$, $i = TMA$, $n =$ período de tempo analisado. Nesta análise os custos de $O\&M$ seguem as relações (%) com os investimentos iniciais dadas pelas Tabelas 27 e 28. Ou seja eles variam na mesma proporção que o investimento.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 ANÁLISE TÉCNICA DOS BSI

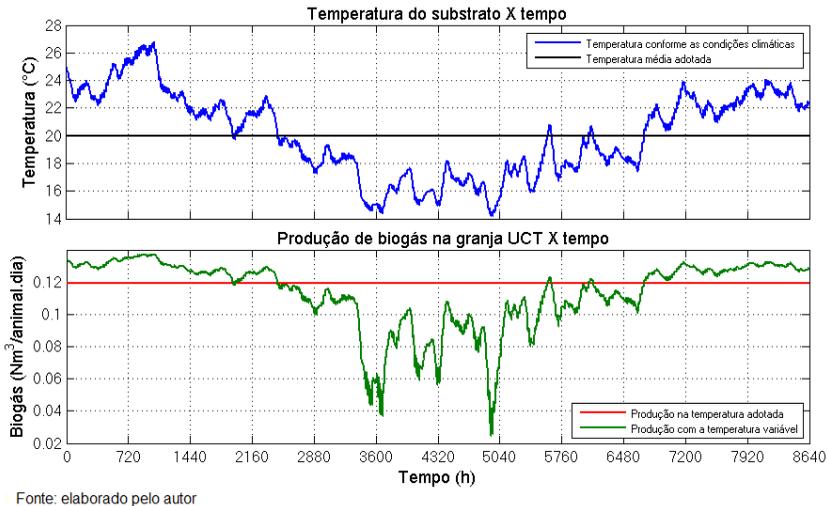
Com o propósito de melhor entender o comportamento dos BSI, as análises foram estruturadas da seguinte maneira:

- Influência das condições climáticas na produção de biogás;
- Influência do aquecimento do biodigestor na produção de biogás e no funcionamento do motogerador;
- Influência do isolante térmico do biodigestor na produção de biogás;
- Influência do volume de armazenamento no funcionamento do motogerador;
- Influência da conexão com a rede na produção de EE;
- Estados termodinâmicos do Sistema de Cogeração em regime permanente;
- Análise termodinâmica dos subsistemas;
- Análise termodinâmica do BSI;
- Produção e consumo de Biogás;
- Produção e consumo de Energia Elétrica;
- BSI otimizado;

6.1.1 Influência das condições climáticas na produção de biogás

A influência das condições climáticas na produção de biogás foi avaliada comparando os resultados obtidos na seção 3.6 com os obtidos pelo simulador. Os dados de entrada para o modelo de produção de biogás são os mesmo, diferindo apenas na temperatura do substrato.

A Figura 68 mostra a comparação entre a temperatura do substrato e a produção de biogás obtida na simulação e a média adotada na seção 3.6 para uma PGEB não aquecida.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 68 - Influência das condições climáticas na produção de biogás

Pode-se observar a partir da Figura 68 que a produção de biogás acompanha a temperatura do substrato, chegando a praticamente parar quando a temperatura do substrato chega próxima a 14°C.

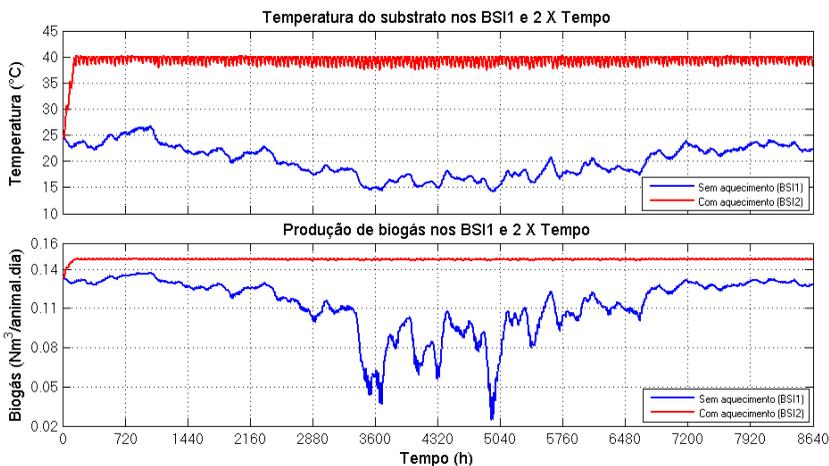
Quando comparada com a produção de biogás adotando-se 20°C de temperatura média para o substrato, as PGEs não aquecidas tiveram uma redução de 6,7% e 4,1% nas granjas UCT e UPL, respectivamente, indicando uma pequena sobre estimativa. As PGEs aquecidas apresentaram um aumento de 21,84% e 23,16% nas granjas UCT e UPL, respectivamente, na comparação com os resultados na temperatura média.

6.1.2 Influência do aquecimento do biodigestor na produção de biogás e no funcionamento do motogerador

A Figura 69 compara a temperatura do substrato e a produção de biogás em uma PGE não aquecida (BSI1) e aquecida (BSI2).

Pode-se notar que o calor recuperado no sistema de cogeração é suficiente para manter o substrato em 40°C.

As PGEs aquecidas apresentaram um aumento de 30,6% e 28,5% nas granjas UCT e UPL quando comparadas com aquelas sem aquecimento, representando um aumento significativo na produção de biogás.



Fonte: elaborado pelo autor

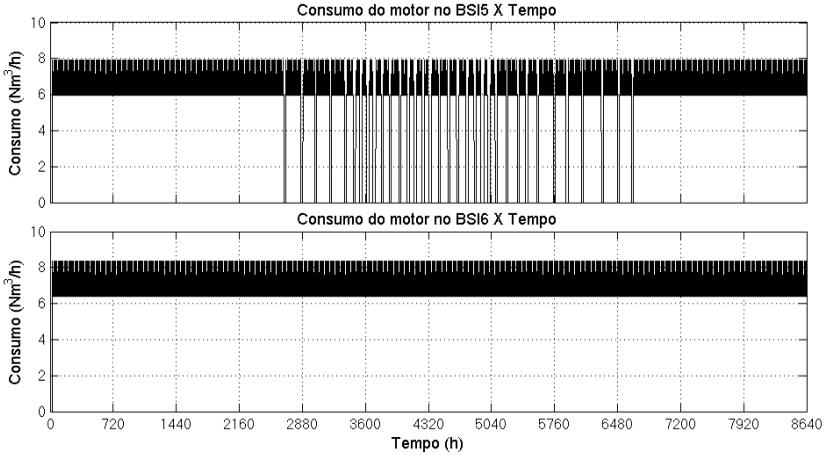
Figura 69 - Produção de biogás com e sem aquecimento

Além de aumentar a produção de biogás, o sistema de aquecimento proporcionou estabilidade na produção de biogás, o que é fundamental para a geração de EE nos BSI isolados da rede, pois dessa forma o funcionamento do motor torna-se mais regular, principalmente nos meses de inverno como pode ser observado nas Figuras 70 e 71.

A Figura 70 compara o consumo do motor (funcionamento) nos BSI5 e 6.

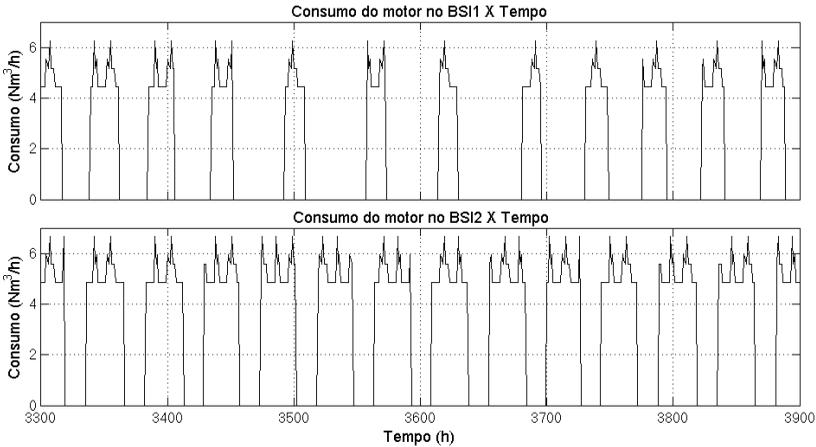
Pode-se observar que no sistema não aquecido (BSI5) o motogerador desligou por várias vezes no inverno, o que não aconteceu no sistema aquecido devido a elevada e constante produção de biogás. O consumo variável entre 6 e 8 Nm³/h é devido ao funcionamento com cargas parciais variáveis nos sistemas isolados. O consumo mais elevado no BSI6 é devido a carga do SAB.

A Figura 71 compara o consumo do motor (funcionamento) nos BSI1 e 2.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 70 - Operação do motor com e sem aquecimento nas plantas isoladas da granja UPL



Fonte: elaborado pelo autor

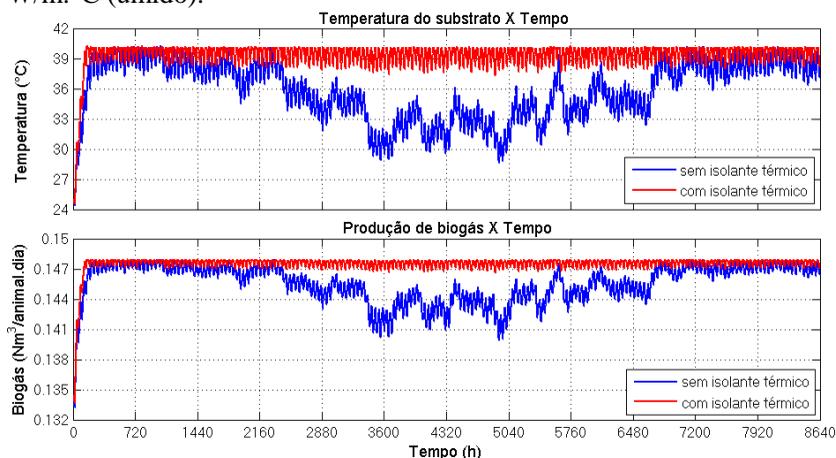
Figura 71 - Operação do motor com e sem aquecimento nas plantas isoladas da granja UCT

Percebe-se que além de tornar o funcionamento do motogerador mais regular no inverno, a maior produção de biogás resultante do aquecimento aumenta o tempo entre funcionamentos ininterruptos. O consumo variável entre 4 e 6 Nm^3/h é devido ao funcionamento com

cargas parciais variáveis nos sistemas isolados. O consumo mais elevado no BSI2 é devido à carga do SAB. No detalhe pode-se notar a carga base e os picos de carga.

6.1.3 Influência do isolante térmico do biodigestor na produção de biogás

A Figura 72 compara a produção de biogás em uma planta aquecida com e sem a utilização de 5 cm de isolante térmico nas paredes e no piso do biodigestor. Nesta análise foi considerado o pior caso, na situação em que o solo fosse úmido durante o ano inteiro. Isto é feito passando a condutividade térmica do solo de 1 W/m.°C (seco) para 2 W/m.°C (úmido).



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 72 - Temperatura do substrato e produção de biogás com e sem isolante térmico

Pode-se observar que mesmo com o aquecimento do biodigestor, sem o isolante térmico não é possível manter a temperatura do substrato em 40°C, chegando a uma temperatura de 29°C no inverno. Essa queda na temperatura é agravada pelo funcionamento intermitente do motor devido a falta de biogás e foi mais sentida nos BSI com menor produção de gás. Apesar da redução da temperatura do substrato, a redução na produção do biogás é menor que 2%. Dessa forma, como a redução não é significativa, o uso do isolante térmico em biodigestores com as mesmas características dos utilizados pode ser descartado, ajudando

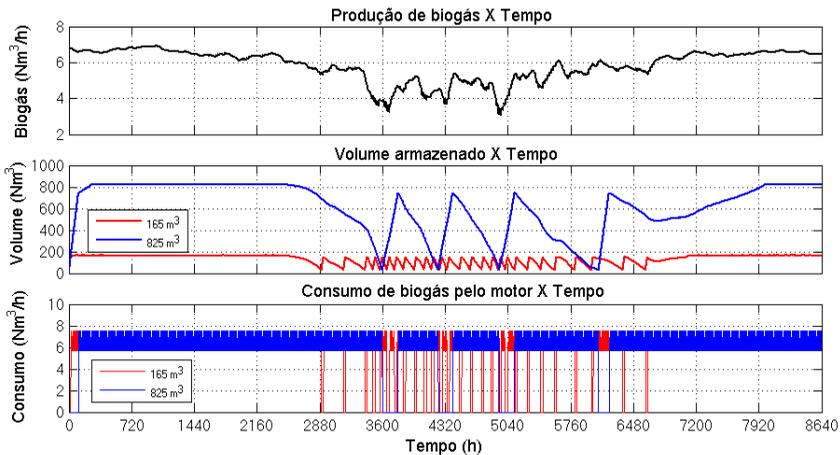
assim a reduzir o investimento de instalação. É importante lembrar que o TRH adotado nestes biodigestores é de 20 dias, o que resulta em biodigestores menores. Com o aumento do TRH aumenta as dimensões do biodigestor, o volume de substrato armazenado e consequentemente as perdas térmicas, o que pode acarretar na necessidade de isolante térmico. O mesmo pode-se dizer quando além do aquecimento do biodigestor existe outra carga térmica.

6.1.4 Influência do volume de armazenamento no funcionamento do motogerador

A combinação entre produção, consumo e capacidade de armazenamento do biogás determina o tempo em que o motogerador poderá trabalhar de maneira ininterrupta, o que é extremamente importante nos BSI isolados.

Uma forma de aumentar este tempo é aumentando o volume de armazenamento de biogás. O aumento da capacidade de armazenamento resulta também no aumento da estabilidade de fornecimento de biogás devido à criação de uma espécie de tanque pulmão.

Esses efeitos podem ser observados na Figura 73 que compara o funcionamento de um BSI isolado e não aquecido com duas capacidades de armazenamento diferentes. Uma 5 vezes maior que a outra.



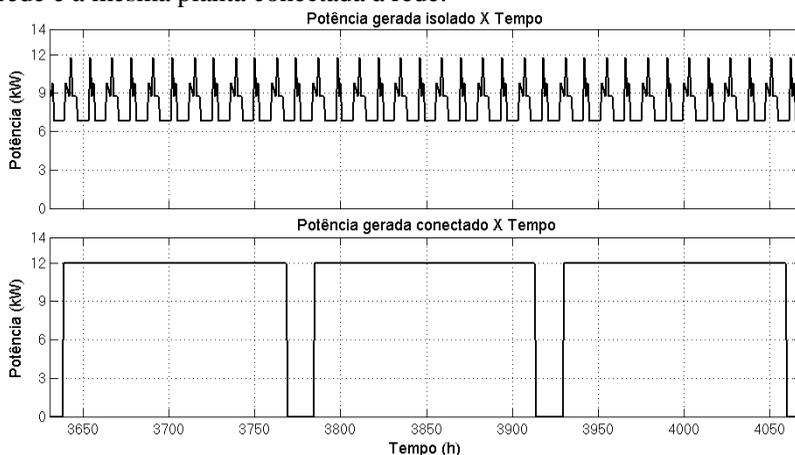
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 73 - Operação do motor em PGEB isolada e não aquecida para diferentes volumes de armazenamento

Pode-se perceber que o motor na planta com menor capacidade de armazenamento (vermelho) ligou e desligou de maneira mais frequente devido à falta de biogás. Já na maior capacidade de armazenamento (azul) este número foi bem menor.

6.1.5 Influência da conexão com a rede na produção de EE

A Figura 74 compara a potência gerada em uma planta isolada da rede e a mesma planta conectada à rede.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 74 - Produção de EE em PGEB isolada X conectada

Pode-se perceber o funcionamento em carga parcial do motogerador no sistema isolado, enquanto no sistema conectado a carga permanece fixa na potência máxima.

Dessa forma a conexão com a rede resulta em um aumento significativo da eficiência do grupo gerador.

Nota-se que o motogerador conectado é desligado devido a falta de biogás resultante do maior consumo em carga máxima, porém a conexão com a rede permite gerar energia quando não existe demanda na granja e armazená-la na forma de créditos de energia elétrica, o que evita jogar fora o excesso de biogás que pode ocorrer devido ao menor consumo em carga parcial nos sistemas isolados.

O sistema conectado resulta na maior produção de energia possível, desde que a máxima potência injetada não seja limitada pela carga instalada da UC e a rede seja trifásica.

6.1.6 Estados termodinâmicos do Sistema de Cogeração em regime permanente

A Tabela 31 mostra os estados termodinâmicos obtidos para o sistema de cogeração em regime permanente e carga máxima (20 kW).

Tabela 31 - Estados termodinâmicos do sistema de cogeração

Corrente	Descrição	T [°C]	P [kPa]	m_dot [kg/s]	h [kJ/kg] ^a
1	Ar de entrada	25	101,3	0,02921	0
2	Biogás de entrada	25	101,3	0,003432	20657
3	Gases de exaustão	525	101,6	0,03264	575,5
4	Gases de exaustão enviados para a atmosfera	120	101,3	0,03264	104
5	Líquido de arrefecimento de baixa temperatura e baixa pressão	76	170	0,634	213,4
6	Líquido de arrefecimento de baixa temperatura e alta pressão	76	250	0,634	213,5
7	Líquido de arrefecimento de alta temperatura	84	200	0,634	247
8	Líquido de aquecimento do biodigestor de baixa temperatura e baixa pressão	38,45	100	1,579	56,26
9	Líquido de aquecimento do biodigestor de baixa temperatura e alta pressão	38,45	287	1,579	56,43
10	Líquido de aquecimento do biodigestor de média temperatura e alta pressão	41,67	247	1,579	69,86
11	Líquido de aquecimento do biodigestor de alta temperatura e alta pressão	44	200	1,579	79,56

a Entalpia em relação ao estado de referência.

Fonte: elaborado pelo autor

6.1.7 Análise termodinâmica dos subsistemas

6.1.7.1 Análise termodinâmica do SCS

A Tabela 32 apresenta os resultados da análise termodinâmica do SCS nas granjas UCT e UPL. Os resultados são os mesmos para todos os BSI formados por elas.

Tabela 32 – Resultados da análise termodinâmica do SCS

Análise termodinâmica do SCS						
Sentido	Entrada			Saída		η_{SCS}
Granja	$\dot{E}_{ração}$ (kW)	$\dot{E}_{suínos,e}$ (kW)	\dot{W}_{SCS} (kW)	$\dot{E}_{suínos,s}$ (kW)	$\dot{E}_{dejeito}$ (kW)	
UCT	177,62	11,31	1,21	-57,74	-132,39	0,3037
UPL	192,65	3,4	3,95	-54,01	-145,98	0,2701

Fonte: elaborado pelo autor

Como a eficiência do SCS não muda com a instalação da PGEB, ela é utilizada como linha de base para avaliar a influência da PGEB na eficiência energética das granjas.

Podemos perceber que a eficiência energética da granja UPL é um pouco menor que a granja UCT. Uma menor eficiência no SCS aumenta a energia perdida nos dejetos e desta forma a disponibilidade de energia que pode ser recuperada pela PGEB.

Os resultados obtidos para as granjas são semelhantes aos obtidos por Angonese (2006), Lira (2009) e Nishimura (2009).

6.1.7.2 Análise termodinâmica do SGB

A Tabela 33 apresenta todos os fluxos de entrada e saída de energia do SGB de todos os BSI.

Tabela 33 - Resultados dos balanços energéticos no SGB dos BSIs

Balanço de energia no SGB									
Granja		UCT				UPL			
Sentido	Fluxo	BSI1	BSI2	BSI3	BSI4	BSI5	BSI6	BSI7	BSI8
Entrada	$\dot{E}_{deje\grave{t}o}$ [kW]	132,39	132,39	132,39	132,39	145,98	145,98	145,98	145,98
	$\dot{Q}_{bio,\acute{u}til}$ [kW]	0,00	7,24	0,00	7,31	0,00	14,55	0,00	14,29
	\dot{W}_{SGB} [kW]	2,21	2,21	2,21	2,21	2,94	2,94	2,94	2,94
Saída	$\dot{E}_{biog\grave{a}s}$ [kW]	-16,44	-21,47	-16,44	-21,46	-37,66	-48,39	-37,66	-48,38
	\dot{Q}_{sub} [kW]	-0,15	-2,67	-0,15	-2,66	-0,34	-6,17	-0,34	-6,13
	\dot{Q}_{solo} [kW]	-0,15	-0,59	-0,15	-0,58	-0,21	-0,90	-0,21	-0,90
	\dot{Q}_{amb} [kW]	0,28	-3,82	0,28	-3,79	0,50	-7,10	0,50	-7,05
	$\dot{E}_{efluente}$ [kW]	-118,13	-113,30	-118,13	-113,42	-111,20	-100,90	-111,21	-100,75

Fonte: elaborado pelo autor

Observa-se que nas PGEs não aquecidas o biodigestor recebe calor do ambiente através da sua cobertura e perde calor para o dejetto que entra e para o solo. Com o aquecimento, o calor perdido para o dejetto que entra aumenta significativamente. Nas plantas aquecidas a maior taxa de perda de calor no biodigestor é por convecção e radiação na sua cobertura. As taxas de perda de calor com o solo mantiveram-se baixas devido a utilização do isolante térmico. Sem o isolante e considerando o solo úmido as taxas de perda de calor para o solo sobem para 5,27 kW nos BSI2 e 4 e para 8,04 kW nos BSI6 e 8.

É importante destacar a alta potência utilizada pela bomba de agitação do SGB. Nos BSI das UCTs ela é responsável por triplicar o consumo de EE, indicando que qualquer redução da potência da bomba de agitação, desde que mantida a sua eficácia, resulta em um acréscimo significativo da potência líquida gerada.

A Tabela 34 apresenta os resultados obtidos para a eficiência do SGB.

Tabela 34 - Resultados do desempenho do SGB

Desempenho do SGB								
Granja	UCT				UPL			
Sistema	BSI1	BSI2	BSI3	BSI4	BSI5	BSI6	BSI7	BSI8
η_{SGB}	0,12	0,16	0,12	0,16	0,25	0,32	0,25	0,32

Fonte: elaborado pelo autor

Podemos observar que os BSI formados pelas granjas UPL apresentaram uma eficiência muito maior que nas granjas UCT. A principal justificativa para este aumento está nos valores adotados para a produção de dejetos e para os sólidos voláteis nos dejetos das matrizes.

Um alto teor de sólidos voláteis indica uma baixa diluição dos dejetos e um manejo adequado da água na propriedade e vice versa. Os valores utilizados para os SV de 47,67 kg/m³ obtidos por Tavares (2012) foram altos e por consequência a produção de dejetos foi baixa (4,84 L/animal.dia). Como a concentração de SV utilizada foi a mesma e considerou-se uma produção de 22,8 L/matriz.dia de dejetos dada pela FATMA (2014), a produção de biogás cresceu na mesma proporção. Os resultados obtidos do balanço energético no biodigestor indicam que uma granja UPL com o mesmo manejo de água adotado pelas granjas estudadas por Tavares (2012) teriam uma produção de dejetos de aproximadamente 12 L/matriz.dia. Para uma produção de dejetos de 22,8 L/matriz.dia uma concentração mais adequada para os SV seria de 25 kg/m³. Esta conclusão somente foi possível após a realização do balanço energético no SGB e mostra a importância da adoção do valor correto da produção de dejetos e dos SV no dimensionamento das PGEBS e na estimativa da produção de biogás.

Embora os valores para a produção de dejetos ou para os SV possam estar superestimados, os valores obtidos para a produção de biogás por matriz estão de acordo com os utilizados por Oliveira & Higarashi (2006).

6.1.7.3 Análise termodinâmica do SGEE

A Tabela 35 apresenta os resultados obtidos para o balanço energético do SGEE.

Tabela 35 - Resultados do balanço energético no SGEE

Balanço de energia no SGEE									
Granja		UCT				UPL			
Sentido	Fluxo	BSI1	BSI2	BSI3	BSI4	BSI5	BSI6	BSI7	BSI8
Entrada	$\dot{E}_{biog\ as,SGEE}$ [kW]	16,43	21,42	16,41	21,44	36,38	42,16	37,66	48,38
Saídas	\dot{W}_{GER} [kW]	-1,78	-2,82	-3,12	-4,08	-6,32	-7,96	-8,29	-10,66
	\dot{Q}_{arref} [kW]	-----	-6,42	-----	-6,43	-----	-12,65	-----	-14,49
	\dot{Q}_{gex} [kW]	-----	-5,67	-----	-5,68	-----	-11,17	-----	-12,80
	$\dot{Q}_{SGEE,loss}$ [kW]	-14,64	-6,50	-13,29	-5,24	-30,07	-10,38	-29,28	-10,35

Fonte: elaborado pelo autor

Nesta tabela os valores dos gases de exaustão (\dot{Q}_{gex}) e do arrefecimento do motor (\dot{Q}_{arref}) nos BSI sem SAB foram considerados nas perdas de calor do SGEE ($\dot{Q}_{SGEE,loss}$).

É importante notar que nos BSI5 e 6 a energia do biogás no SGEE não corresponde a energia do biogás produzida pelo SGB. A diferença entre essas taxas corresponde ao excesso de biogás que precisou ser queimado devido ao menor consumo do motor nos sistemas isolados, decorrência do funcionamento em carga parcial.

A Tabela 36 apresenta os resultados do desempenho do SGEE.

Tabela 36 - Resultados do desempenho do SGEE

Desempenho do SGEE								
Granja	UCT				UPL			
Indicador	BSI1	BSI2	BSI3	BSI4	BSI5	BSI6	BSI7	BSI8
Tempo de funcionamento (h)	4532	5461	3067	4007	7927	8618	5971	7674
% do tempo em funcionamento	52,45%	63,21%	35,50%	46,38%	91,75%	99,75%	69,11%	88,82%
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

Fonte: elaborado pelo autor

Chama a atenção nos resultados de desempenho do SGEE o baixo fator de capacidade das plantas isoladas. O fator de capacidade da PGEB depende da disponibilidade de biogás, do motor e da carga do BSI. Quanto maior a produção de biogás e maior a carga, maior será o fator de capacidade e vice versa, chegando ao máximo quando o biogás e o motor tiver 100% disponível e a carga for máxima. Devido a limitação da potência injetada na rede pela RN 482, o máximo fator de capacidade nos BSI3 e 4 é 73,33%.

O baixo fator de capacidade nos BSI conectados da granja UCT 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 em carga máxima e a maior disponibilidade de biogás.

O aquecimento do biodigestor aumenta o fator de capacidade, pois aumenta a disponibilidade de biogás.

A conexão com a rede aumenta o fator de capacidade, pois aumenta a carga imposta ao gerador.

Percebe-se a baixa eficiência do motogerador (η_{GRUPO}) principalmente nos sistemas isolados e não aquecidos. A baixa eficiência dos sistemas isolados é devida principalmente ao funcionamento em carga parcial.

A potência e a eficiência máxima do gerador trifásico (BSI1, 2, 5 e 6) são 20 kW e 28,2%. No gerador monofásico (BSI3, 4, 7 e 8) a potência e eficiência máxima são 12 kW e 22% respectivamente.

Quando comparados com os valores máximos para a eficiência pode-se perceber que os BSI conectados da granja UPL atingiram este valor. Os BSI das granjas UCT não atingiram este valor devido a limitação de potência máxima injetada na rede em 8,8 kW. A maior eficiência dos BSI conectados é devida ao funcionamento com carga máxima constante (UPL) ou próximo a ela (UCT).

Há de se destacar a eficiência do SGEE que considera a energia líquida produzida. 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. No desempenho do melhor BSI proposto (BSI8), apenas 14% da energia do biogás é convertida em energia elétrica líquida. Essa baixa eficiência é devida principalmente a limitação imposta pela rede monofásica e a adaptação necessária ao gerador trifásico aliada a limitação da potência máxima injetada na rede.

O tempo de funcionamento e a porcentagem do tempo em que o motor funcionou são especialmente importantes nos BSI isolados. Quanto maior estes valores, menor foram as vezes em que o sistema precisou ser ligado a rede da distribuidora devido a falta de biogás. Este tempo de funcionamento foi utilizado para levantar os custos de O&M das plantas.

Pode-se observar que mesmo a produção de biogás sendo menor que o consumo nominal do gerador, devido ao menor consumo em cargas parciais, o BSI isolado e aquecido da granja UPL (BSI6) foi capaz de funcionar ininterruptamente. Isto somente foi possível devido ao sistema de aquecimento proporcionar uma produção estável de biogás ao longo do ano.

De forma geral nota-se que a medida que a granja aumenta e dessa forma a carga instalada e a produção de biogás, os valores de desempenho do gerador se aproximam dos nominais pois a granja se aproxima do tamanho do motogerador, quando deveria ser ao contrário.

6.1.7.4 Análise termodinâmica do SAB

A Tabela 37 apresenta os resultados obtidos para o balanço energético do SAB.

Tabela 37 - Resultados dos balanços energéticos no SAB

Balanço de energia no SAB					
Granja		UCT		UPL	
Sentido	Sistema	BSI2	BSI4	BSI6	BSI8
Entrada	\dot{W}_{SAB} [kW]	0,6953	0,5102	1,097	0,977
	\dot{Q}_{arref} [kW]	6,42	6,43	12,65	14,49
	\dot{Q}_{gex} [kW]	5,67	5,68	11,17	12,8
Saídas	$\dot{Q}_{bio,util}$ [kW]	-7,244	-7,313	-14,55	-14,29
	$\dot{Q}_{SAB,loss}$ [kW]	-5,5413	-5,3072	-10,367	-13,968

Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 38 apresenta os resultados obtidos para o desempenho do SAB.

Tabela 38 - Resultados do desempenho do SAB

Desempenho do SAB				
Granja	UCT		UPL	
Sistema	BSI2	BSI4	BSI6	BSI8
$\dot{E}_{biog\acute{a}s,antes}$ [kW]	16,44	16,44	37,66	37,66
$\eta_{GRUPO,antes}$ [kW]	0,11	0,19	0,17	0,22
$\dot{E}_{biog\acute{a}s,depois}$ [kW]	21,42	21,46	48,39	48,38
$\eta_{GRUPO,depois}$ [kW]	0,13	0,19	0,19	0,22
% aumento no biogás	30,54%	30,50%	28,51%	28,47%
\dot{W}_{SAB} [kW]	0,70	0,51	1,10	0,98
\dot{Q}_{bio} [kW]	11,07	11,08	21,80	24,97
$\dot{Q}_{bio,\acute{u}til}$ [kW]	7,24	7,31	14,55	14,29
\dot{Q}_{sobra} [kW]	3,83	3,77	7,25	10,68
% Q sobra	35,00%	34,00%	33,00%	43,00%
COP_{SAB}	1,50	1,87	2,37	2,42

Fonte: elaborado pelo autor

Destaca-se 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 aquecidos representado pelo (COP_{SAB}). Dessa forma é recomendável a adoção de sistemas de aquecimento nos biodigestores, principalmente nas PGEB localizadas na região Sul devido ao inverso mais rigoroso.

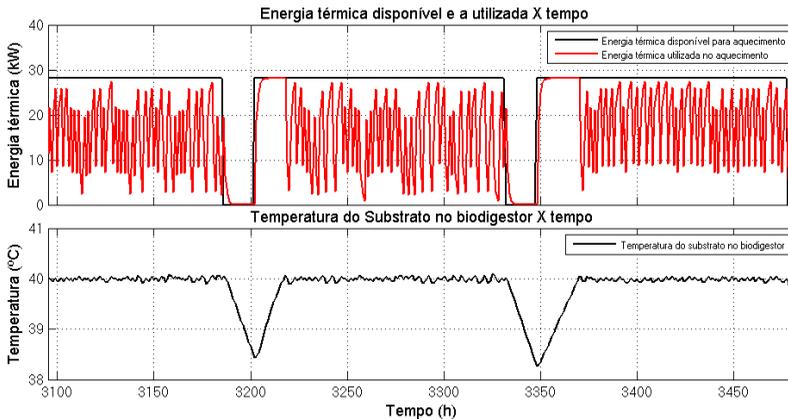
Além de proporcionar um aumento significativo na produção de biogás, o SAB contribuiu para aumentar a eficiência do motogerador nos BSI isolados devido ao aumento da carga.

Observa-se uma maior quantidade de calor disponível para aquecer o biodigestor (\dot{Q}_{bio}) no BSI8. Essa maior disponibilidade de calor é devido ao funcionamento em carga máxima quando comparado com o BSI6. Dessa forma a conexão do gerador com a rede aumenta também a disponibilidade de calor para aquecimento do biodigestor.

Porém o aumento da disponibilidade de calor não tem influência na produção de biogás, pois este já estava disponível em excesso. Em

média 36,25% do calor disponível precisou ser descartado. A maior sobra de calor foi no BSI8 com 43%.

Na Figura 75 podemos observar a energia térmica disponível, a utilizada e a temperatura resultante do substrato. Nota-se a atuação do controlador de temperatura para rejeitar parte do calor disponível. Quando o motogerador desliga devido à falta de biogás, a energia térmica cessa e a temperatura do substrato começa a cair de maneira lenta devido a inércia térmica do substrato. Após o gasômetro encher novamente, o motogerador religa e mais calor é necessário para elevar a temperatura do substrato para 40 graus novamente.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 75 – Atuação do controlador de temperatura

6.1.8 Análise termodinâmica do BSI

A Tabela 39 apresenta os resultados dos balanços termodinâmicos obtidos para todos os BSI.

Pode-se observar na Tabela 39 que o BSI8 que é conectado e aquecido obteve a maior potência elétrica líquida com 6,74 kW para uma potência de entrada da ração de 192,65 kW.

Chama atenção a alta taxa de energia que é perdida no efluente, em média 218 W por suíno nos BSI da granja UCT não aquecidos e 209 W nos aquecidos. Nos BSI não aquecidos da granja UPL este valor é de 429,4 W por matriz e nos aquecidos de 389,4 W.

É importante notar que o trabalho líquido do SGEE nos BSI1 e 2 foi positivo, significando que o BSI precisou de energia da rede para

alimentar as cargas auxiliares.

Tabela 39 - Resultados dos balanços energéticos nos BSIs

Balanço de energia nos BSIs									
Granja		UCT				UPL			
Sentido	Fluxo de energia	BSI1	BSI2	BSI3	BSI4	BSI5	BSI6	BSI7	BSI8
Entrada	$\dot{E}_{\text{ração}}$ [kW]	177,62	177,62	177,62	177,62	192,65	192,65	192,65	192,65
	$\dot{E}_{\text{suínos,e}}$ [kW]	11,31	11,31	11,31	11,31	3,40	3,40	3,40	3,40
	\dot{W}_{SCS} [kW]	1,21	1,21	1,21	1,21	3,95	3,95	3,95	3,95
Saída	$\dot{E}_{\text{suínos,s}}$ [kW]	-57,74	-57,74	-57,74	-57,74	-54,01	-54,01	-54,01	-54,01
	\dot{W}_{SGEE} [kW]	0,43	0,08	-0,92	-1,37	-3,38	-3,93	-5,35	-6,74
	$\dot{Q}_{\text{SGEE,loss}}$ [kW]	-14,64	-6,50	-13,29	-5,24	-30,07	-10,38	-29,28	-10,35
	$\dot{Q}_{\text{SAB,loss}}$ [kW]	-----	-5,54	-----	-5,31	-----	-10,37	-----	-13,97
	$\dot{E}_{\text{biogás,queimador}}$ [kW]	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,15	-6,11	0,00	0,00
	\dot{Q}_{sub} [kW]	-0,15	-2,67	-0,15	-2,66	-0,34	-6,17	-0,34	-6,13
	\dot{Q}_{solo} [kW]	-0,15	-0,59	-0,15	-0,58	-0,21	-0,90	-0,21	-0,90
	\dot{Q}_{amb} [kW]	0,28	-3,82	0,28	-3,79	0,50	-7,10	0,50	-7,05
$\dot{E}_{\text{efluente}}$ [kW]	-118,13	-113,30	-118,13	-113,42	-111,20	-100,90	-111,21	-100,75	

Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 40 apresenta os resultados obtidos para o desempenho de todos os BSI.

Tomando por base a eficiência do SCS (η_{SCS}) que não muda com a instalação da PGEB, podemos perceber que a maior melhora na eficiência da granja é obtida quando as saídas consideradas são os suínos e o biogás produzido ($\eta_{\text{BSI,biogás}}$), obtendo-se uma melhora de 27% nos BSI não aquecidos (1 e 3) da granja UCT e 35,17% nos aquecidos (2 e 4). Nos BSI não aquecidos da granja UPL (5 e 7) esse aumento foi de 67,23% e nos aquecidos (6 e 8) de 85,88%. Estes valores demonstram a significativa melhora na eficiência energética da granja com a produção de biogás.

Os valores obtidos para as granjas UCT não aquecidas estão próximos aos obtidos por Angonese (2006).

Tabela 40 - 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%
$\eta_{BSI,biog\ as}$	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%
$IRR_{biog\ as}$	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%

Fonte: elaborado pelo autor

Os valores obtidos para as granjas UPL não aquecidas estão um pouco acima dos obtidos por Lira (2009). A explicação para isto é a mesma descrita no desempenho do SGB.

Quando consideramos como saídas do BSI os suínos e a EE gerada ($\eta_{BSI,W_{GER}}$), esta apresenta uma melhora bem menor na eficiência das granjas, principalmente na granja UCT. Esta baixa melhora é devida a baixíssima eficiência na conversão do biogás em EE descrita na análise do SGEE. Conforme aumenta a carga e a disponibilidade do biogás estes valores vão melhorando. O maior aumento na eficiência da granja considerando essas entradas foi de 17,44% no BSI8.

Ao considerarmos como saídas os suínos e a energia elétrica líquida ($\eta_{BSI,W_{SGEE}}$), a melhora na eficiência é ainda menor, chegando a piorar a eficiência energética da granja UCT nos BSI isolados (1 e 2) devido ao aumento da energia consumida da rede. O menor valor para esta eficiência é devido a considerável potência das cargas auxiliares que no caso dos BSI da granja UCT são maiores que a carga média anterior a instalação da PGEB. A maior melhora na eficiência da granja considerando estas entradas foi obtida pelo BSI8 com 10,33%.

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.

Em média 11% da energia da ração são recuperados na forma de biogás nos BSI da granja UCT e 22% nos BSI da granja UPL.

Os índices de recuperação da energia da ração na forma de EE e EE líquida aumentam conforme aumenta a carga e a disponibilidade de biogás, chegando ao maior valor no BSI8 que é aquecido e conectado a rede.

O índice de desempenho do BSI (ID_{BSI}) avalia se de fato a eficiência da granja melhorou ou piorou e de quanto foi esta melhora, pois relaciona a eficiência do SCS com a eficiência considerando a EE líquida produzida.

Pode-se observar que este indicador variou desde uma piora de 1,88% para o BSI isolado e não aquecido da granja UCT (BSI1) até uma melhora de 10,31% no BSI conectado e aquecido da granja UPL.

Assim, de maneira geral a eficiência do BSI melhora a medida que a carga no motogerador e a produção de biogás aumentam.

O SAB aumenta a produção de biogás e levemente a carga no BSI resultando em maiores produções de biogás e discreta melhora na eficiência do motogerador.

A conexão com a rede aumenta a carga aplicada ao grupo gerador, aumentando assim consideravelmente a eficiência do motogerador e por consequência a de todo BSI.

6.1.9 Produção e consumo de Biogás

A Tabela 41 apresenta os resultados da produção e consumo de biogás obtidos nas simulações dos BSIs.

Tabela 41 - Resultados da produção e consumo de biogás nos BSIs

Produção e consumo de biogás (Nm ³)								
Granja	UCT				UPL			
Sistema	BSI1	BSI2	BSI3	BSI4	BSI5	BSI6	BSI7	BSI8
Produção total (Nm ³)	22044,6	28777,9	22044,6	28769,4	50482,2	64876,7	50482,2	64856,2
Produção/animal.dia (Nm ³ /dia)	0,111	0,145	0,111	0,145	0,534	0,686	0,534	0,686
Consumo motor (Nm ³)	22024,0	28708,7	22002,3	28736,4	48774,9	56519,4	50374,3	64741,7
Consumo médio Motor (Nm ³ /h)	2,5	3,3	2,5	3,3	5,6	6,5	5,8	7,5
Consumo <i>flair</i> total (Nm ³)	0,0	0,0	0,0	0,0	1542,4	8192,1	0,0	0,0

Fonte: elaborado pelo autor

Pode-se observar que as maiores produção de biogás foram nos BSI aquecidos em ambas as granjas. Os BSI aquecidos e isolados tiveram uma produção um pouco maior que os conectados, pois os motogeradores funcionaram por mais tempo nestes BSI resultando no maior tempo de aquecimento.

O valor obtido para a granja UCT sem aquecimento de 0,111 Nm³/animal.dia é o mesmo obtido em campo por Marques (2012). O valor obtido para os BSI aquecidos da granja UCT foi um pouco superior ao reportado por EPA (2012).

Em todos os BSI a produção de biogás foi menor que o consumo nominal do motor, porém o menor consumo em cargas parciais provocou um excesso de biogás no gasômetro dos BSI5 e 6 que teve que ser queimado no queimador. Isto pode ocorrer nas PGEBS isoladas onde o consumo depende da demanda variável, existindo momentos em que a produção de biogás supera o consumo. Isto não ocorreu nas PGEBS conectadas, pois elas trabalham na potência máxima que pode ser injetada na rede. Dessa forma o biogás produzido quando não existe demanda na propriedade é convertido em energia elétrica e armazenado na rede, o que não é possível nas PGEBS isoladas. O excesso de biogás nas PGEBS conectadas somente ocorre quando a produção for maior que o consumo do motor na potência máxima que pode ser injetada na rede.

O excesso de biogás pode ser evitado com um gasômetro maior ou sistemas de armazenamento secundários. Esta estratégia pode ser adotada também para lidar com a menor produção de biogás nos meses de inverno.

6.1.10 Produção e consumo de Energia Elétrica

A Tabela 42 apresenta os resultados obtidos para a produção e consumo de EE nas simulações dos BSI.

Pode-se observar que as maiores produções de EE são nos sistemas conectados devido a estes trabalharem com a maior carga possível durante todo o tempo. Dessa forma todo o biogás produzido é convertido em energia elétrica com a maior eficiência possível do grupo gerador. Isto explica o fato dos BSI1 e 3 possuírem a mesma produção de biogás, o mesmo consumo, e BSI3 possuir uma produção de EE 75,78% maior que o BSI1. O mesmo acontece com os BSI2 e 4.

A produção de EE e a eficiência do motogerador nos BSI3 e 4 poderia ter sido maior se não existisse a limitação da máxima potência

injetada pela RN482. Essa limitação não afetou a granja UPL, pois a sua máxima potência injetada coincide com a máxima potência do gerador com ligação monofásica.

Tabela 42 - Resultados da produção e consumo de EE nos BSIs

Produção e consumo de EE								
Granja	UCT				UPL			
EE [kWh]	BSI1	BSI2	BSI3	BSI4	BSI5	BSI6	BSI7	BSI8
Total gerada (W_{GER})	15.353	24.373	26.988	35.262	54.601	68.813	71.652	92.088
Total consumida	29.513	35.520	28.513	33.921	59.486	68.966	59.486	67.928
Rede antes (EE_{antes})	10.462	10.462	10.462	10.462	34.085	34.085	34.085	34.085
Rede depois (EE_{depois})	14.160	11.147	2.516	0	4.885	153	0	0
Créditos gerados ($CEEG$)	-----	-----	16.552	17.175	-----	-----	30.567	30.808
Créditos recuperados ($CEER$)	-----	-----	16.552	15.834	-----	-----	18.400	6.645
Saldo de créditos (CEE)	-----	-----	0	1.342	-----	-----	12.167	24.162

Fonte: elaborado pelo autor

A produção de EE nos BSI conectados a rede poderia ser maior se não existisse a limitação provocada pela rede monofásica que diminuiu a eficiência do gerador em 8%.

Analisando os resultados do consumo de energia da rede pelos BSI antes e depois da instalação da PGEB, podemos notar que os BSI1 e 2 aumentaram o consumo, o BSI3 e 5 tiveram uma redução no consumo e os BSI4, 6, 7 e 8 zeraram o consumo. O consumo de 153 kWh do BSI6 foi devido ao tempo necessário para o gásômetro encher e o motor ser acionado.

O aumento do consumo de EE da rede nos BSI1 e 2 foi devido ao consumo das cargas auxiliares da PGEB.

Pode-se notar que os BSI conectados a rede, principalmente os não aquecidos utilizaram a rede como forma de armazenar a energia do biogás. Nestas plantas os créditos foram produzidos nos meses mais quentes do ano e recuperados nos meses mais frios. Já a recuperação de créditos de energia elétrica da rede nos BSI aquecidos foi menor resultando num maior saldo de créditos.

6.1.11 BSI Ótimo

Esta seção analisa a influência do tipo de rede que atende as granjas e da limitação pela RN 482 da potência máxima injetada na rede no desempenho do SGEE, do BSI e na geração de EE.

A análise foi feita comparando-se os resultados obtidos para o melhor BSI proposto (BSI8) e um BSI ótimo (BSIO) que é igual ao BSI8, porém com rede trifásica e sem a limitação da potência injetada em 12 kW.

A Tabela 43 compara os resultados obtidos para a o desempenho do SGEE nos dois BSI.

Tabela 43 - Comparação entre o desempenho do SGEE do BSI8 e do BSIO

Granja	Sistema	Tempo de funcionamento	% do tempo em funcionamento	Fator de capacidade	η_{GRUPO}	η_{SGEE}
UPL	BSI8	7674	88,80%	88,80%	0,22	0,14
	BSIO	5881	68,05%	68,05%	0,28	0,21

Fonte: elaborado pelo autor

Pode-se perceber 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).

A Tabela 44 compara os resultados obtidos para a o desempenho dos dois BSI.

Tabela 44 - 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%

Fonte: elaborado pelo autor

Enquanto os índices de desempenho do BSI que dependem da produção de biogás mantiveram-se praticamente os mesmos, os índices de desempenho relacionados com a EE e a EE líquida tiveram aumentos consideráveis. Esses aumentos devem-se a maior eficiência na conversão do biogás em EE no BSIO.

Destaca-se a melhora de 57,3% no índice de desempenho do BSI (ID_{BSI}) do BSIO em relação ao BSI8.

A Tabela 45 compara os resultados obtidos para a geração e consumo de EE nos dois BSI.

Tabela 45 - Comparação dos resultados de geração e consumo de EE entre o BSI8 e o BSIO

Geração de EE		
Granja	UPL	
EE [kWh]	BSI8	BSIO
Total gerada (W_{GER})	92.088	117.620
Total consumida	67.928	65.955
Rede antes (EE_{antes})	34.085	34.085
Rede depois (EE_{depois})	0	0
Créditos gerados ($CEEG$)	30.808	70.683
Créditos recuperados ($CEER$)	6.645	19.017
Saldo de créditos (CEE)	24.162	51.666

Fonte: elaborado pelo autor

A Tabela 45 evidencia o prejuízo causado pela precária rede elétrica e pela limitação da potência injetada, tendo o BSIO uma produção de EE consideravelmente maior que o BSI8 com a mesma produção de biogás.

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.

Dessa forma é imprescindível para obter-se a viabilidade técnica dos BSI que a estrutura da rede elétrica no campo seja melhorada e a limitação da potência injetada na rede para PGEs seja revista pela ANEEL.

6.2 ANÁLISE ECONÔMICA

6.2.1 BSI isolados

A Tabela 46 apresenta os resultados obtidos na análise econômica dos BSI isolados.

Pode-se perceber que nenhum dos BSI isolados obteve viabilidade econômica. O VPL dos sistemas aquecidos foi menor devido ao maior custo com O&M (maior tempo de funcionamento) e o maior investimento. Já o preço mínimo da energia e o investimento máximo no BSI6 (aquecido) foram melhores que no BSI5 devido a maior produção de energia decorrente do aumento da carga (auxiliar de aquecimento) e

do aumento da eficiência do motogerador, pois nestes BSI sobrou biogás.

Tabela 46 - Resultados da análise econômica para os BSI isolados

Análise econômica dos BSI isolados				
Granja	UCT		UPL	
Indicador	BSI1	BSI2	BSI5	BSI6
VPL (R\$)	-237297	-267776	-168251	-180725
TIR (%)	-infinito	-infinito	-infinito	-infinito
Payback (anos)	infinito	infinito	infinito	1338
Preço mínimo da EE (R\$/kWh)	NP	NP	1,02	0,98
Investimento Máximo (R\$)	NP	NP	70.737	83.542

Fonte: elaborado pelo autor

Os BSIs da granja UCT não possuem (NP) preço mínimo da EE e investimento máximo, pois eles aumentaram o consumo de energia da rede.

No geral o aumento da carga proporcionou um aumento da eficiência do motogerador, da energia gerada e melhores resultados econômicos. Dessa forma para o investimento em uma PGEB isolada valer a pena é necessário possuir um alto consumo de EE, pois a geração depende da demanda da propriedade.

Uma análise de sensibilidade para o consumo de EE nas granjas isoladas apontou que granjas com consumo de EE acima de 7000 kWh/mês apresentam grandes chances de se tornarem viáveis.

6.2.2 BSI conectados

Para evidenciar a influência das limitações impostas pela rede monofásica e pela limitação da potência máxima injetada foram incluídos os resultados obtidos para o BSIO.

6.2.2.1 Valor presente líquido

A Tabela 47 apresenta os resultados obtidos para o VPL dos BSI conectados e para o BSIO.

Pode-se observar que, com exceção do VPL do BSIO na ausência de encargos, todos os VPLs foram negativos, indicando que a soma das receitas descontadas pela TMA de 5,5% a.a. não foram capazes de

tornar o VPL nulo. É importante ressaltar que as receitas superaram os custos de O&M somente nos BSIO, 6, 7 e 8.

Tabela 47 - VPL dos BSIs conectados e do BSIO

VPL dos BSIs conectados (R\$)					
Granja	UCT		UPL		Ótima
Encargo	BSI3	BSI4	BSI7	BSI8	BSIO
Todos	-253.635	-271.237	-181.603	-170.200	-114.412
ICMS e Adicional	-250.981	-268.484	-176.709	-165.508	-103.238
PIS/COFINS e ICMS	-241.844	-259.002	-159.512	-147.935	-63.332
PIS/COFINS e Adicional	-242.172	-259.343	-156.138	-144.534	-55.526
ICMS	-233.437	-256.408	-154.603	-142.988	-51.979
Adicional	-239.577	-256.650	-151.897	-139.586	-44.173
PIS/COFINS	-230.541	-247.275	-134.047	-122.269	-4.584
Nenhum	-227.471	-244.513	-129.137	-117.566	6.911

Fonte: elaborado pelo autor

Nota-se que à medida que diminui a incidência de encargos sobre o crédito de energia elétrica, o VPL apresenta uma tendência de melhora. Percebe-se que o sistema aquecido e conectado a rede (BSI8) obteve o VPL menos negativo dos BSI propostos, apresentando assim o melhor desempenho econômico entre eles. O pior VPL do BSI4 em relação ao BSI3 é devido aos custos de instalação e principalmente de O&M do primeiro serem maiores que o último e o aumento na receita devido ao aquecimento não ter compensado os maiores custos de O&M.

O VPL somente apresentou valor positivo no BSI ótimo (BSIO) devido a maior geração de receita que nos BSI propostos, deixando claro o impacto das limitações imposta pela rede elétrica monofásica e pela RN 482. Este valor positivo demonstra que o BSIO seria viável economicamente caso não incidisse encargos sobre o crédito de EE.

Analisando as receitas necessárias para tornar o VPL nulo, observou-se que apesar da melhora dos indicadores com a diminuição dos encargos incidentes, observou-se que com os valores dos investimentos atuais nos sistemas conectados, um BSI com a potência limitada em 12 kW não apresenta viabilidade econômica, independente do consumo de EE e do número de animais, pois a máxima receita gerada não é suficiente para pagar os custos de O&M e o investimento

inicial. Isto é devido principalmente ao baixo valor máximo da potência líquida resultante, decorrente da alta potência das cargas auxiliares e do alto custo dos sistemas de geração de EE e proteção da rede.

6.2.2.2 Taxa interna de retorno

A Tabela 48 apresenta os resultados obtidos para a TIR dos BSI conectados e para o BSIO.

Tabela 48 - TIR dos BSIs conectados e do BSIO

TIR dos BSI conectados					
Granja	UCT		UPL		Ótima
	BSI3	BSI4	BSI7	BSI8	BSIO
Todos	- infinito	- infinito	-12,94%	-8,60%	-2,76%
ICMS e Adicional	- infinito	- infinito	-12,00%	-8,01%	-1,80%
PIS/COFINS e ICMS	- infinito	- infinito	-9,17%	-6,00%	2,64%
PIS/COFINS e Adicional	- infinito	- infinito	-8,69%	-5,64%	1,85%
ICMS	-infinito	-infinito	-8,47%	-5,48%	2,10%
Adicional	- infinito	- infinito	-8,10%	-5,13%	2,64%
PIS/COFINS	- infinito	- infinito	-5,86%	-3,46%	5,22%
Nenhum	- infinito	- infinito	-5,30%	-3,04%	5,92%

Fonte: elaborado pelo autor

Nos BSIs da granja UPL observa-se a tendência de aumento da TIR resultante da menor incidência de encargos sobre os créditos de EE e da maior produção de EE proporcionada pelo aquecimento do biodigestor.

Destaca-se a melhor TIR do BSIO em relação ao BSI8, devido a maior geração de EE, resultado do aumento da carga e da eficiência na conversão do biogás em EE sem as restrições da rede monofásica e da potência máxima injetada.

Observa-se que o BSIO apresentou viabilidade econômica no cenário em que nenhum encargo incide sobre os créditos de EE, pois sua TIR foi maior que a TMA de 5,5%, demonstrando assim a necessidade da melhora na infraestrutura da rede elétrica no campo, adequação da RN 482 em relação à geração de EE a partir do biogás de dejetos suíno e isenção de encargos sobre os créditos de EE.

Os custos de O&M maiores que as receitas nos BSI da granja UCT fizeram a TIR tender para menos infinito.

6.2.2.3 Payback

A Tabela 49 apresenta os resultados obtidos para o *payback* dos BSI conectados e para o BSIO.

Nos BSI da granja UPL observa-se a mesma tendência de melhora que nos indicadores anteriores, com o BS18 obtendo o menor tempo de retorno do investimento entre os BSI propostos.

Tabela 49 - *Payback* dos BSIs conectados e do BSIO

Payback dos BSIs conectados (anos)					
Granja	UCT		UPL		Ótima
Encargo	BSI3	BSI4	BSI7	BSI8	BSIO
Todos	infinito	infinito	54,13	33,22	18,91
ICMS e Adicional	infinito	infinito	48,39	31,14	17,41
PIS/COFINS e ICMS	infinito	infinito	35,28	25,52	15,26
PIS/COFINS e Adicional	infinito	infinito	33,50	24,64	13,00
ICMS	infinito	infinito	32,74	24,27	12,76
Adicional	infinito	infinito	31,20	23,48	12,26
PIS/COFINS	infinito	infinito	25,17	20,13	10,23
Nenhum	infinito	infinito	23,86	19,34	9,75

Fonte: elaborado pelo autor

Nota-se que mesmo o BSIO sendo viável sem a incidência de encargos, ele ainda apresenta um *payback* elevado de 9,75 anos, porém bem melhor que o obtido pelo BS18.

Já nos sistemas das granjas UCTs os custos maiores que as receitas resultaram um *payback* infinito.

6.2.2.4 Preço mínimo da EE

A Tabela 50 apresenta os resultados obtidos para o preço mínimo da EE que viabilizaria economicamente os BSI conectados e o BSIO.

Nesta tabela fica claro o melhor desempenho econômico dos sistemas aquecidos em relação aqueles não aquecidos.

Percebe-se a grande influência exercida pelos encargos sobre o preço da EE que viabiliza o BSI.

O preço mínimo para viabilizar o BSIO de R\$ 0,44 ficou levemente abaixo do pago atualmente de R\$ 0,45.

À medida que a produção de biogás, o consumo e a produção de EE aumentam os custos fixos diluem-se e torna-se evidente o efeito escala.

Tabela 50 - Preço mínimo da EE que viabiliza os BSIs conectados e o BSIO

Preço mínimo da EE nos BSI conectados (R\$/kWh)					
Granja	UCT		UPL		Ótima
Encargo	BSI3	BSI4	BSI7	BSI8	BSIO
Todos	12,39	5,14	0,97	0,82	0,64
ICMS e Adicional	9,65	4,64	0,95	0,80	0,62
PIS/COFINS e ICMS	5,48	4,64	0,85	0,74	0,54
PIS/COFINS e Adicional	5,56	3,50	0,84	0,73	0,53
ICMS	4,90	3,25	0,83	0,72	0,52
Adicional	4,95	3,26	0,81	0,71	0,51
PIS/COFINS	3,57	2,75	0,75	0,66	0,46
Nenhum	3,29	2,50	0,73	0,65	0,44

Fonte: elaborado pelo autor

Os preços mínimos da EE necessários para viabilizar os BSI mostram que com os preços pagos atualmente não é possível viabilizar os BSI propostos.

É importante notar o aumento de R\$ 0,07 centavos no preço mínimo da EE com a incidência do ICMS. Vale destacar que Santa Catarina ainda é um dos estados que não abriu mão da cobrança deste imposto sobre os créditos de EE, dificultando ainda mais a viabilidade econômica destes projetos.

6.2.2.5 Investimento máximo

A Tabela 51 apresenta o investimento máximo nos BSI conectados e no BSIO para que eles apresentassem viabilidade econômica com uma TMA de 5,5% a.a..

Tabela 51 - Investimento máximo nos BSI conectados e no BSIO para a viabilidade econômica

Investimento máximo nos BSI conectados (R\$)					
Granja	UCT		UPL		
Encargo	BSI3	BSI4	BSI7	BSI8	BSIO
Todos	7.244	19.099	103.587	134.934	170.616
ICMS e Adicional	9.302	21.169	106.432	137.912	177.783
PIS/COFINS e ICMS	16.391	28.297	117.787	149.115	203.379
PIS/COFINS e Adicional	16.136	28.040	120.003	151.296	208.386
ICMS	18.335	30.249	120.999	152.252	210.660
Adicional	18.149	30.064	122.800	154.470	215.667
PIS/COFINS	25.159	37.112	134.575	165.577	241.060
Nenhum	27.265	39.188	137.813	168.642	248.433

Fonte: elaborado pelo autor

O baixo valor obtido para os BSI da granja UCT, resultado da baixa disponibilidade de biogás e do baixo consumo de EE, e indica que granjas com estas características estão longe de conseguir viabilidade econômica em PGEBs conectadas a rede com os preços dos equipamentos atuais. Para título de comparação, somente o painel de conexão com a rede custa R\$ 60.000,00. Dessa forma é preciso achar alternativas mais baratas para conectar os microgeradores a rede.

Nota-se a melhora significativa do indicador com o aquecimento do biodigestor, principalmente nos BSI da granja UCT.

Destaca-se a imensa melhora do indicador para o BSIO principalmente na inexistência de encargos sobre os créditos de EE, pois este BSI teve a maior geração de créditos.

Uma análise de sensibilidade para o consumo de EE mostrou que os BSI conectados com ligação trifásica e potência mínima de 20 kW passam a ser viáveis quando apresentam um consumo de 8000 kWh/mês.

Os valores obtidos para o investimento máximo deixam evidente que é preciso concentrar esforços no desenvolvimento de equipamentos que tornem as PGEB mais baratas, principalmente os motogeradores e o painel de conexão e proteção da rede.

6.2.3 Custo da EE gerada

A Tabela 52 apresenta os resultados obtidos para o custo da EE gerada em todos os BSIs.

Observa-se que à medida que aumenta a produção de biogás e EE o custo do kWh bruto diminui. Porém o alto consumo das cargas auxiliares em relação ao consumo antes da instalação da PGEB, a baixa produção de biogás e a baixa eficiência da conversão fazem com que os sistemas isolados da granja UCT não possuam (NP) EE líquida.

Tabela 52 - Custo da EE gerada nos BSIs

Granja	Custo da EE gerada								
	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

Fonte: elaborado pelo autor

Nos BSI das granjas UPL obteve-se um custo do kWh bruto abaixo do pago atualmente, porém o consumo das cargas auxiliares elevam consideravelmente este custo. À medida que a produção de biogás e EE aumentam, o custo relativo ao consumo das cargas auxiliares é diluído.

O custo da EE líquida foi menor que o pago atualmente somente no BSIO, resultado da maior EE líquida gerada em decorrência da maior potência e da maior eficiência na conversão do biogás em EE obtidos sem as limitações da rede e da RN 482.

Embora o custo da EE líquida obtido no BSI8 está um pouco acima do pago atualmente, se considerarmos o ganho ambiental e principalmente o ganho proporcionado pelo biofertilizante, pode ser economicamente vantajoso instalar este BSI.

7 CONCLUSÃO

Através da realização deste trabalho foi possível concluir que:

As propriedades suinícolas da região Sul possuem tamanho reduzido, principalmente as granjas UCTs. A média foi de 542 animais em terminação e 259 matrizes.

O consumo médio de EE de 870 kWh/mês nas UCTs e 2840 kWh/mês nas UPL é alto quando comparado com o consumo médio rural na região de 350 kWh/mês, porém está bem abaixo do consumo de 8000 kWh/mês necessários para tornar uma PGEB viável economicamente. Apenas 1,5% das granjas atendem este critério.

Existe uma carência muito grande de equipamentos para implantar PGEBs na população, principalmente motogeradores de potência adequada, equipamentos de conexão e proteção mais simples e baratos e equipamentos para o condicionamento do biogás.

As potências dos motogeradores existentes no mercado faz a potência instalada estimada aumentar em média 150% aumentando os custos do investimento e reduzindo a sua disponibilidade.

O aquecimento do biodigestor com o uso da cogeração se mostrou viável do ponto de vista energético, pois a EE equivalente resultante do aumento na produção de biogás foi maior que a EE consumida pelo SAB. Além disso, o calor recuperado dos gases de exaustão e arrefecimento do motor é mais que suficiente para aquecer o biodigestor. Em média existe um excedente de 36,5% do calor disponível, o que exclui a necessidade da utilização de isolamento térmico.

O aquecimento aumenta a produção de biogás em aproximadamente 30% aumentando dessa forma a disponibilidade do biogás, o fator de capacidade e por consequência a eficiência do BSI, além de garantir uma produção estável de biogás ao longo do ano, o que é fundamental para garantir o funcionamento dos sistemas isolados nos meses de inverno.

A alta potência utilizada pela bomba de agitação do SGB sugere que qualquer redução da sua potência, desde que mantida a sua eficácia, resulta em um acréscimo significativo da potência líquida gerada.

A conexão com a rede permite gerar energia quando não existe demanda na granja e armazená-la na forma de créditos de energia elétrica, o que evita jogar fora o excesso de biogás que pode ocorrer devido ao menor consumo em carga parcial nos sistemas isolados.

A conexão resulta também em um aumento significativo da eficiência do grupo gerador devido ao aumento da carga resultando assim na maior produção de EE possível.

O SCEE permite o funcionamento do sistema em paralelo com a rede da distribuidora, o que elimina a necessidade por potência extra. Assim o sistema pode ser projetado para a carga base, eliminando a operação em carga parcial e permitindo um rendimento maior do motor. Esse arranjo maximiza a capacidade de produção de energia e a eficiência da conversão do biogás em EE resultando em melhores indicadores técnicos e econômicos.

Fatores como a limitação da potência injetada na rede pela RN 482, rede monofásica que implica na adaptação do gerador reduzindo sua eficiência e o tamanho inadequado dos motogeradores, reduzem de maneira significativa a eficiência da conversão do biogás em EE, comprometendo a viabilidade econômica dos projetos.

Com os preços atuais dos equipamentos, uma PGEB conectada com a potência limitada em 12 kW não apresenta viabilidade econômica, independente do consumo de EE ou do número de animais.

A diminuição da incidência de encargos sobre os créditos de energia elétrica melhora os indicadores econômicos de forma impactante, principalmente o ICMS.

Apesar de ter como objetivo reduzir as barreiras para conexão de pequenas centrais geradoras a rede de distribuição e regulamentar o setor, a RN 482 e o SCEE representaram um retrocesso para projetos como o da Granja Colombari no Oeste do Paraná, que anteriormente a RN 482 tinha uma renda extra com a venda da EE e após passou a ganhar créditos de EE. A renda extra ajudava a amortizar o investimento feito. Com o sistema de créditos, devido à produção de energia acompanhar a produção de biogás, que por sua vez provém da produção de dejetos, a baixa demanda na granja gera um excedente de créditos de EE que poderão ser perdidos, pois os dejetos não param de ser produzidos pelos suínos, o que indica a necessidade de uma revisão da norma com diferenciações de regras entre as fontes.

A limitação da potência instalada a carga da UC está em total desacordo com a GD a partir de dejetos suínos, onde geralmente o potencial de produção de EE é superior a energia consumida, pois a potência instalada está vinculada a produção de dejetos. Caso a potência instalada seja menor que o potencial de geração de biogás e EE, ou sobrar biogás obrigando o produtor a jogá-lo fora, desperdiçando

energia, ou sobrará dejetos não tratados adequadamente aumentando o risco de poluição ambiental.

A produção de biogás melhora em média 50% a eficiência da criação de suínos, porém a baixa eficiência da conversão do biogás em EE 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 produção de biogás e EE são engrenagens fundamentais do modo de produção circular, que podem conduzir a suinocultura à sustentabilidade ambiental e econômica, mas para isto é preciso equipamentos adequados a preços acessíveis, melhora na infraestrutura da rede elétrica no campo, readequação da RN 482 e isenção de encargos sobre os créditos de energia elétrica.

Sugestão para trabalhos futuros:

- Obtenção de dados experimentais para a verificação do modelo;
- Analisar a viabilidade técnica e econômica do uso de inversores de frequência para conectar microgeradores a rede;
- Estudo da viabilidade técnica e econômica da geração de biogás e EE centralizados, onde a biomassa seria transportada via modal rodoviário ou dutos até uma central de geração termelétrica;
- Estudo da viabilidade técnica e econômica da produção de biogás descentralizada e EE centralizada, onde o biogás seria produzido localmente e transportado por gasodutos até uma central de geração de termelétrica;
- Estudo da aplicação de outras tecnologias para a conversão do biogás em EE;
- Avaliar diferentes sistemas para utilização da energia térmica excedente;
- Analisar e incluir no BSI os benefícios energéticos e econômicos resultantes da fertirrigação com o biofertilizante, de modo a avaliar o desempenho do modo circular de produção por completo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDOUN, E.; WEILAND, P.: **Optimierung der Monovergärung von nachwachsenden Rohstoffen durch die Zugabe von Spurenelementen.** Bornimer Agrartechnische Berichte n° 68, Potsdam, 2009.

ACCETTOLA, F.; GUEBITZ, G. M.; SCHOEFTNER, R. **Siloxane removal from biogas by biofiltration: biodegradation studies.** Clean Technologies and Environmental Policy, v. 10, n. 2, p. 211-218, 2008.

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos.** 142p. Dissertação (Mestrado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa ANEEL n° 482** 17 de abril de 2012.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Cadernos temáticos ANEEL. **Micro e minigeração distribuída: sistema de compensação de energia elétrica.** 2014. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>> Acessado em: 10 de mar. 2015.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Nota Técnica n° 017/2015 - SRD.** 13 de abril de 2015. 2015a Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/026/documento/nota_tecnica_0017_2015_srd.pdf> Acessado em: 20 jun. de 2015

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Informações técnicas, Bandeiras tarifárias.** 2015b Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=758>> Acessado em: jul. de 2015

ANGONESE, A. R. et al. **Eficiência energética de sistema de produção de suínos com tratamento dos resíduos em biodigestor.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, n. 3, p. 745-750, 2006.

AXAOPOULOS, P. et al. **Simulation and experimental performance of a solar-heated anaerobic digester.** Solar Energy, v.70, n.2, p.155-164, 2001.

ASHRAE et al. **Handbook of Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. Atlanta, 1989.

ASHRAE et al. **Handbook of Fundamentals: Nonresidential cooling and heating load calculation**. Chap. 28. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 1997.

ASHRAE et al. **Handbook of Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, v. 111, 2001

BAZILIAN, M. et al. **Re-considering the economics of photovoltaic power**. Renewable Energy, v. 53, p. 329-338, 2013.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2a.ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

BELLI F^o, P. **Stockage e odeurs des dejections animales, cas du lisier de porc**. Thèse de Doctorat de L'Université de Rennes I. France, 1995.

BERGMAN, T. L.; INCROPERA, F. P.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of heat and mass transfer**. John Wiley & Sons, 2011

BISCHOFF, M. **Erkenntnisse beim Einsatz von Zusatz- und Hilfsstoffen sowie Spurenelementen in Biogasanlagen**. VDI Berichte n° 2057; "Biogas 2009 – Energieträger der Zukunft"; VDI Verlag, Düsseldorf, 2009.

BENINCASA, M., ORTOLANI A. F. ; LUCAS JUNIOR J. **Biodigestores convencionais** 2.ed. Jaboticabal: UNESP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, 1991. 25 p.

BLEY JR., C. **Biogás: a energia invisível**. 2^a ed. São Paulo: CIBiogás; Foz do Iguaçu: ITAIPU Binacional, 2015.

BRAUN, R.: **Biogas – Methangärung organischer Abfallstoffe**; Springer Verlag Viena, Nova Iorque, 1982.

BRIZI, F. et al. **Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 38, p. 193-211, 2014.

CALABRÓ, L.. **Geração Distribuída : Novo Ciclo de Desenvolvimento**, São Paulo (SP): Associação de Indústrias de Cogeração de Energia (COGEN) , 2013.

ÇENGEL, Y. A; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. Tradução: Katia Aparecida Roque. 5^aed. McGraw-Hill editora. São Paulo, 2006.

CELESC Distribuição S.A. **Requisitos para a Conexão de Micro ou Mini Geradores de Energia ao Sistema Elétrico da Celesc Distribuição**. Disponível em: <<http://novoportal.celesc.com.br/portal/images/arquivos/normas/I4320004.pdf>> Acessado em: 22 de fev. de 2015

CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Manual de Construção e Operação de Biodigestores**. Belo Horizonte: CETEC, 1982.

CHEN, Y. R.; HASHIMOTO, A. G. **Kinetics of Methane Fermentation**. In: Proceedings of Symposium on Biotechnology in Energy Production and Conservation, 1978.

CHEN, Y. R.; HASHIMOTO, A. G. **Substrate Utilization Kinetic Model for Biological Treatment Processes**. Biotechnology and Bioengineering, 1980.

CIRA. **Energy Performance of Building Group**. Energy and Environmental Division. Lawrence Berkely Laboratory, University of California, Berkeley, CA. 1982.

COIMBRA-ARAÚJO, C. H. et al. **Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 40, p. 826-839, 2014.

COMITRE, V. **A questão energética e o padrão tecnológico da agricultura brasileira**. Informações Econômicas, São Paulo, v.25, n.12, p.29-35, 1995.

CENTRO PARA A CONSERVAÇÃO DE ENERGIA. **Guia técnico de biogás**. Amadora, Portugal: AGEEN – Agência para a Energia, 2000. 117p.

COOPER A1. **Jornal Cooper A1**. Edição 05. Palmitos,SC. Fevereiro de 2015. Disponível em: <

http://www.coopera1.com.br/imagens/im_jornal/COOPERA1_Jornal_Fevereiro2015_WEB.pdf> Acessado em: 01 de mai. de 2015.

COOPER A1. Relatórios técnicos. Dados não publicados, 2015^a.

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

DEUBLEIN D.; STEINHAUSER. A. **Biogas from waste and renewable resources: An Introduction**, WILEY-VCH, Weinheim, pp. 361–388. 2008.

DIAZ, G. O. **Análise de Sistemas para o Resfriamento de Leite em Fazendas Leiteiras com o Uso do Biogás Gerado em Projetos MDL**. 144p. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2006.

DIELMANN K. P. **Mikrogasturbinen Technik und Anwendung**. BWK Das Energie- Fachmagazin, 06/2001, Springer VDI Verlag. 2001

Environmental Protection Agency – EPA. **Swine Waste Electric Power and Heat Production Systems: Capstone MicroTurbine and Martin Machinery Internal Combustion Engine**. 2002.

ERBR, Energias renováveis. Disponível em: <<http://www.erbr.com.br/>>. Acessado em: mai. 2015.

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. **Einspeisung von Biogas in das Erdgasnetz**, Leipzig, 2006.

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. 5^a edição. Tradução: Marcos de Miranda Zattar. Gülzow, 2010.

FAL. Bombas FAL. Disponível em: <<http://www.bombasfal.com.br/>> Acessado em: jul. de 2015.

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.

FARIA, R. L. **A Geração de energia pela biodigestão anaeróbia de efluentes: o caso da suinocultura.** Revista Complexus – Instituto Superior de Engenharia Arquitetura e Design – CEUNSP, SALTO-SP, ANO. 02, N.3, P.28 43, 2011. Disponível em:<WWW.ENGENHO.INFO>> Acessado em: mai. de 2015

GODOY JUNIOR, E. et al. **Biodigestores associados a sistema de cogeração para o aproveitamento do biogás produzido a partir de resíduos de suinocultura.** Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

GOOCH, C. A.; PRONTO, J. **Anaerobic Digestion at New Hope View Farm: Case Study.** Manure Management Program, Cornell University. Website: www.manuremanagement.cornell.edu, 2008.

GOSNEY, W.B. **Principles of Refrigeration.** Cambridge University Press, 1982.

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.

HAAS, L. B. **Desenvolvimento de um filtro para a remoção de H₂S de Biogás.** 2013. 45p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Cascavel, 2013.

HAENKE. Tubo Metálico Flexível. Disponível em: <<http://www.haenke.com.br/tubos-metalicos-flexiveis-em-aco-inox/passos-normal.php>> Acessado em: out. de 2015.

HASHIMOTO, A. G.; CHEN, Y. R.; VAREL, V. H. **Theoretical aspects of Methane Production: State of The Art.**In: Livestock Wastes: A Renewable Resource, ASAE, 1981.

HENN, A. **Avaliação de Dois sistemas de Manejo de Dejetos em uma Pequena Propriedade Produtora de Suínos – Condição de Partida.** Dissertação (mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2005.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2006.** Rio de Janeiro, 2009.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção da Pecuária Municipal 2012.** Rio de Janeiro, 2013.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 4^a ed. LTC editora. Rio de Janeiro, 1998.

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. **O que é Geração Distribuída.** Disponível em: <http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp?Cat=gd>. Acessado em: 20 mai. 2015.

JÄKEL, K.: **Managementunterlage "Landwirtschaftliche Biogaserzeugung und -verwertung".** Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, 1998.

KALTSCHMITT, M.; Hartmann, H.: **Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren.** Springer Verlag Berlin, Heidelberg, Nova Iorque, 2001

KOSSMANN, W. et al. Biogas basics. **Biogas Digest**, v. 1, 1999.

KONZEN, E. A. **Manejo e Utilização de Dejetos de Suínos.** Circular Técnica n° 6. EMBRAPA – CNPSA: Concórdia, SC, 1983.

KREIDER, J. F. and KREITH, F. **Solar Energy Handbook.** McGraw-Hill. New York. 1981.

KUNZ, A.; PERDOMO, C. C.; OLIVEIRA, P. A. V. de. **Biodigestores: avanços e retrocessos.** Suinocultura Industrial, v.26, n.4, p.14-16, 2004.

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. V. de; HIGARASHI, M. M. **Biodigestor para o tratamento de dejetos de suínos: influência da temperatura**

ambiente. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2005. 5p. (Embrapa Suínos e Aves. Comunicado Técnico, 416).

KUNZ, A.; OLIVEIRA, P. A. **Aproveitamento de Dejetos de Animais para Geração de Biogás.** Revista de Política Agrícola, ano XV, n. 3. Brasília, jul./ago./set. 2006.

LA FARGE, B. de. **Le biogaz: procédés de fermentation méthanique.** Paris: Masson, 1995. 237p.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica.** 5ª ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LASTELLA, G. et al. **Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production and its purification.** Energy conversion and management, v. 43, n. 1, p. 63-75, 2002

LEBUHN, M.; BAUER, C.; GRONAUER, A. **Probleme der Biogasproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen im Langzeitbetrieb und molekularbiologische Analytik.** VDLUFA-Schriftenreihe 64, 2008, pp. 118 – 125

LIENHARD IV, J.H. and LIENHARD V, J.H. **A heat transfer textbook.** 4th ed. Cambridge, MA. Phlogiston Press. 2012.

LIRA, J. C. U. **Análise econômica e balanço energético do biogás em granjas de suíno.** 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2009.

LUCAS JR., J. **Algumas considerações sobre o uso do estrume de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios.** 1994. 113p. *Tese* (Livre Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

MADALOZZO, S. M. **Estação Meteorológica Automática Experimental – Erechim RS.** Disponível em: <<http://www.madalozzo.it/dados.php>> Acessado em: Ago. de 2015.

MAGO, P. J.; LUCK, R. **Energetic and exergetic analysis of waste heat recovery from a microturbine using organic Rankine cycles.** International Journal of Energy Research, v. 37, n. 8, p. 888-898, 2013.

MARQUES, C. A. **Microgeração de energia elétrica em uma propriedade rural utilizando biogás como fonte primária de energia elétrica.** 2012. 81p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura). Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. Cascavel, 2012.

MARTINS, F.M.; OLIVEIRA, P. A. V. de. **Análise econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás na suinocultura.** Engenharia Agrícola, v. 31, n. 3, p. 477-486, 2011.

MASSÉ, D. I., MASSE, L. ; CROTEAU, F. **The effect of temperature fluctuations on psychrophilic anaerobic sequencing batch reactors treating swine manure.** Bioresource Technology, v.89, p.57–62, 2003.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia.** Tradução: Gisele Maria Ribeiro Vieira. 6ª ed. LTC editora. Rio de Janeiro, 2012.

MITZLAFF, K. von. **Engines for biogas.** Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, 1988.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: a alternativa energética.** São Paulo, Ed. Nobel, 1986. 94p.

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.

OECHSNER, H.; LEMMER, A. **Was kann die Hydrolyse bei der Biogasvergärung leisten?**, VDI-Berichte 2057, p. 37 – 46, 2009.

OLIVEIRA, P. A. V. de. **Influência da temperatura na produção de biogás.** In: REUNIÃO SOBRE A INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA BIODIGESTÃO ANAERÓBICA, 1. Anais. Santa Maria: UFSM, p.32-38, 1983.

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 (coord.) et al. **Manual de manejo e utilização dos dejetos de suínos**. EMBRAPA – CNPSA. Concórdia – SC, 1993. (EMBRAPA – CNPSA. Documentos, 27). 188p.

OLIVEIRA, P. A. V. de. **Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: manual de boas práticas**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2004. 109 p. (Programa Nacional do Meio Ambiente - PNMA II).

OLIVEIRA, P. A. V. **Produção e manejo de dejetos de suínos**. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2001, Jaboticabal/ SP, Anais: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia. 2001. p. 164-177.

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).

ORLANDO, J. A. **Cogeneration design guide**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – ASHRAE. Atlanta, EUA, 346p. 1996.

PANDOLFO, C. et al. **Atlas climatológico do estado de Santa Catarina**. Florianópolis: Epagri, v. 1, 2002.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso**. Dissertação (Mestrado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia). 152p. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PERRIGAULT, T. et al. **Towards thermal design optimization of tubular digesters in cold climates: A heat transfer model**. Bioresource technology, v. 124, p. 259-268, 2012.

URUGUAI - PROJETO ALTO URUGUAI – **Minuta das especificações técnicas mínimas dos sistemas de tratamento de esterco de produções suícolas**. Dados não publicados. 2008

RAM, S. et al. **Study of na Indian biogás plant with a water pond.** Energy Reseach 9, 475 – 479. 1985.

RAMESOHL, S. et al. **Analyse und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse.** Estudo financiado pela BGW e DVGW. 2006.

REIS, J. A. dos. **Projeto e Montagem de um Sistema Compacto de Cogeração Aplicação da Análise Exergoeconômica.** 141p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista – UNESP. Guaratinguetá, 2006.

ROHSENOW, W.M. et al. **Handbook of Heat Transfer Applications,** 2th ed. McGraw-Hill. New York. 1985.

ROSSA, J. A. **Estudo teórico e experimental de um sistema compacto de cogeração consistindo de uma máquina refrigeração por absorção água amônia e microturbina a gás natural.** Dissertação (Mestrado em engenharia Macânica).Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Brasil. 2007

RÜCKER, C. P. R. **Análise exergoeconômica de uma planta de cogeração baseada em microturbina a gás natural e refrigeração por absorção.** Dissertação (Mestrado em engenharia Macânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Brasil. 2004

SALVADORE, M. S.; KEPLER, J. H.. **Projected costs of generating electricity: 2010 edition.** Paris Dauphine University, 2010.

SANCHEZ, E. et al. **Effect of organic loading rate on the stability, operational parameters and performance of a secondary upflow anaerobic sludge bed reactor treating piggery waste.** Bioresource Technology, v.96, p.335-344, 2005.

SCHNEIDER. Schneider motobombas. Disponível em: <<http://www.schneider.ind.br/produtos/motobombas-de-superf%C3%ADcie/light/centr%C3%ADfugas-monoest%C3%A1gio/bc-91/>> Acessado em: jul. de 2015

SCHÖNBUCHER, A. **Thermische Verfahrenstechnik: Grundlagen und Berechnungsmethoden für Ausrüstungen und Prozesse.** Springer-Verlag, Heidelberg, 2002

SGANZERLA, E. **Biodigestores: Uma Solução.** Porto Alegre: Agropecuária, 1983.

SEBRAE. **Santa Catarina em Números: Macrorregião Extremo Oeste.** 142p. Sebrae/SC. Florianópolis, 2013.

SEYFRIED, C.F. et al.: **Anaerobe Verfahren zur Behandlung von Industrieabwässern.** Korrespondenz Abwasser 37, pp. 1247 – 1251, 1990.

SILVEIRA, J. L.. **Cogeração disseminada para pequenos usuários: estudo de casos para o setor terciário.** 158p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, 1994.

SINGH, K.; JASH, T. **Performance analysis of micro turbine-based grid-connected biogas power plant in Purulia in West Bengal, India.** Clean Technologies and Environmental Policy, v. 17, n. 3, p. 789-795, 2014.

SOUZA, C. F.; LUCAS JUNIOR, J.; FERREIRA, W. P. M. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos sob efeito de três temperaturas e dois níveis de agitação do substrato – considerações sobre a partida.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.2, p.530-539, maio/ago. 2005.

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.

THOMAS, D. G.; DELVAL, P. **Utilisation du biogaz dans les moteurs thermiques.** Informations chimie, n. 283, p. 147-149, Paris,1987.

ATLAS SEIS. **Tratamento do Biogás.** Disponível em:< <http://www.atlasseis.com/produtos-servicos/biogas/108-tratamento-do-biogas.html?showall=1&limitstart=>>. Acessado em 15 mai. 2015

URNS, S. R. **Introdução à combustão: conceitos e aplicações**. Tradução: Amir Antônio Martins de Oliveira Júnior. 3ª Ed. AMGH editora. Porto Alegre, 2013.

URBAN, W., GIROD, K., LOHMANN, H. **Technologien und Kosten der Biogasaufbereitung und Einspeisung in das Erdgasnetz**. Resultados do estudo de mercado 2008.

VAN HAANDEL, A. C. & LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos. Um manual para regiões de clima quente**. Campina Grande – PB, 1994. Ed. egraf.

YURA, D.; TURDERA, M. V.. **Estudo da viabilidade de um biodigestor no município de Dourados**.(Trabalho de pesquisa). Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul, UEMS, 2006.

ZAGO, S. **Potencialidade de produção de energia através do biogás integrada à melhoria ambiental em propriedades rurais com criação intensiva de animais, na região do meio oeste catarinense**. 2003. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Regional de Blumenau, Centro de Ciências Tecnológicas, Blumenau, 2003.

WELLINGER, A.; MURPHY, J. D.; BAXTER, D. (Ed.). **The biogas handbook: science, production and applications**. Elsevier, 2013.

WEG. **Curso DT- 5, Características e Especificações de geradores**. 2012. 66 p. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br.pdf> . Acessado em: mai. de 2015

WEG. **Características técnicas. Alternadores**. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/TEC_CAT/tech_alter_web.asp> Acessado em: set. de 2015

WEILAND, P. **Grundlagen der Methangärung – Biologie und Substrate**. VDI-Berichte, nº 1620 "Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven"; pp. 19-32; VDI-Verlag 2001

WEILAND, P.: **Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland**, Gülzower Fachgespräche, volume 15:

Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, pp. 8 – 27, Weimar, 2000

WIKIPEDIA. **Trocador de energia térmica**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Trocador_de_energia_t%C3%A9rmica> Acessado em: jul. de 2015.

WU, B.; BIBEAU, E. L. **Development of 3-D anaerobic digester heat transfer model for cold weather applications**. TRANSACTIONS-AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, v. 49, n. 3, p. 749, 2006.

APÊNDICE A - CONEXÃO DE MICRO E MINIGERADORES A REDE

Conexão de micro e minigeradores a rede da Celesc

Procedimentos para viabilização do acesso a rede

O interessado em instalar uma micro ou minigeração junto a rede da Celesc deverá seguir o seguinte procedimento:

- 1) Solicitação de acesso: o acessante deverá encaminhar a respectiva agência regional da Celesc o formulário de solicitação de acesso com o memorial descritivo, diagrama unifilar, desenhos/projetos elétricos da instalação, especificações técnicas dos equipamentos e ART do profissional responsável pela instalação.
- 2) Parecer técnico de acesso: Documento emitido pela Celesc onde ficam estabelecidos os requisitos e características técnicas da conexão, as condições de acesso que deverão ser atendidas, e demais características do empreendimento. Junto com o parecer técnico, é feito um aditivo no contrato da unidade consumidora para formalizar as regras de faturamento do sistema de compensação e celebrado um acordo operativo ou de relacionamento operacional.
- 3) Implantação da conexão: Após a celebração dos documentos citados e da instalação do sistema, o acessante deverá solicitar a vistoria através do envio de formulário e ART de execução da obra.
- 4) Aprovação do ponto de Conexão: Caso não haja nenhuma pendência a Celesc emitirá um relatório de vistoria e a posterior aprovação do ponto de conexão.

Requisitos do sistema de proteção para conexão com inversores

A geração conectada a rede por meio de inversores eletrônicos deve possuir funções de proteção e parametrização conforme a Tabela 53:

Tabela 53- Parametrização das proteções para conexão com inversores de frequência

Função	Parametrização (Referência)
Subtensão (27)	0,8 pu (0,4 s)
Sobretensão (59)	1,1 pu (0,2 s)
Subfrequência (81U)	57,5 Hz (0,2s)
Sobrefrequência (81O)	62,0 Hz (0,2 s)
Sobrecorrente (50/51)	Conforme padrão de entrada
Sincronismo (25)	10° 10 % tensão 0,3 Hz
Anti-ilhamento (78)	Ativa

Fonte: CELESC (2015)

É necessário também que o inversor tenha homologação emitida pelo INMETRO.

Requisitos de qualidade da energia

A distorção harmônica total de corrente deve ser inferior a 5% na potência nominal. Cada harmônica individual deve estar limitada aos valores apresentados na Tabela 54.

Tabela 54 - Limites de distorção harmônica da corrente

Harmônicas ímpares	Limite de distorção
3° a 9°	< 4,0 %
11° a 15°	< 2,0 %
17° a 21°	< 1,5 %
23° a 33°	< 0,6 %
Harmônicas pares	Limite de distorção
2° a 8°	< 1,0 %
10° a 32°	< 0,5 %

Fonte: CELESC (2015)

Quando a tensão da rede sair da faixa de operação nominal, o sistema de geração conectado a rede por inversores deve interromper o fornecimento de energia à rede conforme parametrização da Tabela 55.

Tabela 55 - Resposta às condições anormais de Tensão

Tensão no ponto de conexão comum (% em relação à V_{nominal})	Tempo máximo de desligamento ⁽¹⁾
$V < 80 \%$	0,4 s
$80 \% \leq V \leq 110 \%$	Regime normal de operação
$110 < V$	0,2 s

Fonte: CELESC (2015)

Requisitos do Sistema de medição

O acessante é responsável por todas as adequações em seu padrão de entrada de energia, que deverá possuir um Dispositivo de Proteção contra Surtos (DPS).

O medidor deverá ser bidirecional, para que possa medir tanto a energia que entra na unidade consumidora, quanto a que é injetada na rede. Excepcionalmente pode ser utilizados dois medidores unidirecionais.

Diagrama orientativo

O diagrama da Figura 76 visa orientar a conexão de microgeradores síncronos, frequentemente usados na geração de EE a biogás, a rede de distribuição de baixa tensão (até 75 kW).

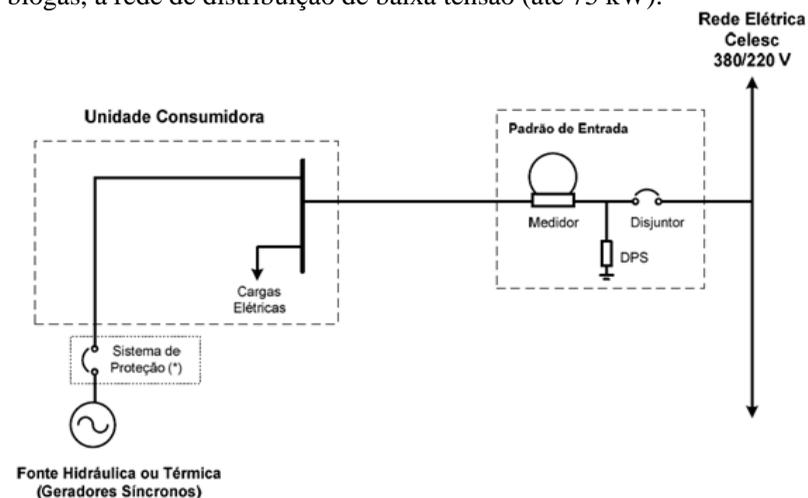


Figura 76- Diagrama orientativo para conexão de geradores síncronos

Conceitos importantes

Para entender os modos de operação das PGEB, é fundamental a revisão de alguns conceitos importantes sobre energia elétrica e sua geração.

A tensão da energia elétrica adotada pela Celesc é de 220 Volts e 60 Hz.

Essa tensão é gerada através do movimento de rotação relativo entre uma bobina e um campo magnético sendo proporcional a velocidade deste movimento e a intensidade do campo, gerando assim uma corrente alternada (AC).

A frequência da corrente irá variar proporcionalmente a velocidade da mudança de direção entre campo magnética e a bobina. Em geradores típicos, é o campo magnético (rotor) que gira em relação a bobina (estator) e a frequência da EE irá variar em função da velocidade rotacional do gerador em revoluções por minuto (rpm). Nos geradores convencionais, energia elétrica trifásica é produzida utilizando 3 bobinas com 6 polos (2 por bobina). Desta forma, para gerar EE com 60 hertz a velocidade da máquina primária que irá aciona o gerador precisa ser múltipla de 60. A velocidade da máquina primária é função do número de polos do estator e do rotor do gerador. No caso de MCI são comumente adotadas velocidades de 1800 (4 polos no rotor) e 3600 rpm (2 polos no rotor).

A potência elétrica é composta pela potência ativa e pela potência reativa.

Potência Ativa

A potência ativa é a potência usada para realizar trabalho, convertendo-se em diversas outras formas, sendo medida em kW. É definida como o produto da corrente circulando por um circuito pela tensão aplicada ao circuito.

Potência reativa

A potência reativa é a medida da energia armazenada no circuito e não realiza trabalho útil. Normalmente surge devido a presença de elementos que armazenam energia, tais como motores, geradores, capacitores, indutores e transformadores. A potência reativa não é dissipada e fica circulando (ocupando espaço) no circuito entre a fonte e a carga indutiva. É o produto da corrente indutiva circulando sobre uma carga pela queda de tensão na carga e é medida em kVar.

Potência Aparente

A potência aparente é o módulo da soma vetorial das potências ativa e reativa, medida em kVA. Representa a potência total drenada da rede, sendo parte convertida em trabalho útil (ativa) e parte armazenada e devolvida à rede posteriormente (reativa).

Fator de Potência

O fator de potência é a razão entre a potência ativa e a potência reativa, e pode ser considerada a medida da eficiência na qual a potência entregue pela fonte é usada para realizar trabalho útil.

Potência dos Geradores

Grupos Geradores de energia são geralmente especificados pela sua potência aparente (kVA). É comum obter-se a potência ativa (kW) através de um fator de potência de 0,8.

A potência que um gerador pode produzir depende também do tipo de ligação do gerador. Um gerador com ligação monofásica tem em média uma redução de 40% na sua potência máxima.

Dessa forma, o motor de motogeradores originalmente projetados para trabalharem com uma ligação trifásica tem uma redução da carga máxima também próxima a 40%.

Regime de funcionamento

A potência que um motogerador pode produzir depende do seu regime de funcionamento que pode ser de emergência, horário de ponta ou contínuo.

Geralmente o grupo gerador é especificado com sua potência nominal, que é a máxima potência que o motogerador pode produzir e diz respeito ao funcionamento de emergência, limitado a algumas horas por mês.

No horário de ponta, o funcionamento do gerador está limitado a algumas horas por dia, e para evitar danos ao equipamento sua potência é normalmente reduzida a 90% da potência nominal.

No regime contínuo, o gerador irá trabalhar 24 horas por dia, parando somente para manutenções preventivas ou forçadas. Desta maneira, para aumentar a durabilidade da máquina, a potência é limitada geralmente a 80% da potência nominal.

Os geradores podem ser síncronos ou assíncronos.

Gerador Síncrono

Os geradores síncronos são caracterizados por fornecer sua própria potência reativa para criar o campo magnético necessário e podem operar independente ou isolado de qualquer outra fonte de potência externa. Este tipo de gerador é usado na maioria das plantas de cogeração existentes.

O gerador síncrono mais comum é auto excitado ou brushless que é constituído de dois geradores. Um pequeno gerador produz uma corrente AC no rotor que é retificada para criar uma corrente DC (corrente de excitação) e criar assim um campo magnético que irá induzir uma tensão alternada nos enrolamentos do estator. A intensidade do campo magnético, e portanto a tensão produzida pelo gerador, é controlada variando-se a corrente de excitação.

Gerador Assíncrono

Os geradores assíncronos ou de indução tem construção mais simples. Basicamente eles são motores elétricos de indução que funcionam acima da velocidade síncrona (velocidade do campo girante). Ao contrário dos geradores síncronos, eles somente funcionam quando conectados a uma fonte de potência reativa externa para formar o campo magnético.

Geralmente esta fonte externa é a rede elétrica da concessionária. Estes geradores operam na mesma tensão e frequência da potência reativa que os alimenta e são mais simples de sincronizar com a rede. O trabalho executado pelo motor e a potência gerada pelo gerador depende da velocidade do gerador em relação a velocidade síncrona. Se o gerador estiver na velocidade síncrona, nenhuma potência ativa é produzida. A potência máxima está disponível a aproximadamente 105% da velocidade síncrona. Se a velocidade do gerador estiver abaixo da síncrona, ele funcionará como um motor.

Eficiência do Gerador

A eficiência típica dos geradores elétricos está entre 95 e 100%, entretanto geradores pequenos operando com carga parcial podem apresentar eficiências menores que 85%. A eficiência do gerador cai de forma não linear conforme a carga diminui. Geradores com ligação monofásica apresentam em média uma redução de 8 a 10% em relação a ligação trifásica.

Inversor de Frequência

Um equipamento importante muito utilizado na geração de EE solar e eólica é o inversor de frequência. Este equipamento é responsável por transformar a EE contínua em EE alternada e dependendo da aplicação, injetar essa energia na rede. Na geração solar ele condiciona a EE DC proveniente dos painéis fotovoltaicos em AC. Já na geração eólica, ele faz parte de um sistema de condicionamento que juntamente com retificadores é responsável por transformar a EE gerada na forma AC, de maneira irregular devido a velocidade variável do vento, em EE AC de frequência constante. Este equipamento pode vir a ser utilizado para condicionar a geração irregular de alguns geradores a biogás e fazer a sua conexão com a rede.

Cargas Indutivas

Outra informação importante na geração de EE é o tipo das cargas elétricas que serão acionadas. Cargas elétricas indutivas como motores elétricos requerem uma corrente na partida direta que pode chegar a 8 vezes a corrente nominal e causar assim uma grande queda de tensão no gerador. Portanto um gerador não consegue acionar um motor elétrico de mesma potência quando em partida direta. Dessa maneira, o dimensionamento do gerador deve levar em consideração a potência e o tipo das cargas. Existem diversos sistemas de partida para motor trifásico que diminuem a corrente de partida como o uso de chave estrela – triângulo, chave compensadora e inversores de frequência, porém não aplicáveis a motores monofásicos.

APÊNDICE B – RESULTADOS DA COMBUSTÃO

Resultados da reação de combustão

A Tabela 56 mostra os resultados da reação de combustão estequiométrica para 1 kmol do biogás utilizado.

Tabela 56 - Resultado da reação de combustão estequiométrica

Espécie Química	Reagentes		Produtos		Reagentes		Produtos	
	n_i	m_i	n_i	m_i	X_i	Y_i	X_i	Y_i
CH_4	0,650	10,430	0,000	0,000	0,090	0,051	0,000	0,000
$CO_{2,f}$	0,310	13,640	0,310	13,640	0,043	0,067	0,043	0,067
$CO_{2,c}$	0,000	0,000	0,650	28,610	0,000	0,000	0,090	0,140
$N_{2,f}$	0,040	1,121	0,040	1,121	0,006	0,005	0,006	0,005
$N_{2,ar}$	4,890	137,000	4,890	137,000	0,680	0,672	0,680	0,672
O_2	1,300	41,600	0,000	0,000	0,181	0,204	0,000	0,000
H_2O	0,000	0,000	1,300	23,420	0,000	0,000	0,181	0,115
Total	7,190	203,791	7,190	203,791	1,000	1,000	1,000	1,000

Fonte: elaborado pelo autor

Razão mássica combustível/ar estequiométrica:

$$f_s = 0,141$$

A Tabela 57 mostra os resultados da reação de combustão com 20% de excesso de ar para 1 kmol do biogás utilizado.

Tabela 57 - Resultado da reação de combustão com 20% de excesso de ar

Espécie química	Reagentes		Produtos		Reagentes		Produtos	
	n_i	m_i	n_i	m_i	X_i	Y_i	X_i	Y_i
CH_4	0,650	10,430	0	0	0,077	0,044	0,000	0,000
$CO_{2,f}$	0,310	13,640	0,31	13,64	0,037	0,057	0,037	0,057
$CO_{2,c}$	0,000	0,000	0,65	28,61	0,000	0,000	0,077	0,119
$N_{2,f}$	0,040	1,121	0,04	1,121	0,005	0,005	0,005	0,005
$N_{2,ar}$	5,869	164,400	5,869	164,4	0,696	0,686	0,696	0,686
O_2	1,560	49,920	0,26	8,32	0,185	0,208	0,031	0,035
H_2O	0,000	0,000	1,3	23,42	0,000	0,000	0,154	0,098
Total	8,429	239,511	8,429	239,51	1,000	1,000	1,000	1,000

Fonte: elaborado pelo autor

Razão mássica combustível/ar real:

$$f = 0,11$$

APÊNDICE C – CARACTERÍSTICAS DOS MOTOGERADORES ENCONTRADOS

Tabela 58 – Características dos motogeradores encontrados no mercado nacional

Marca	A	B	C	C	B	D	D	C	C	D	D	C	B	B	C	D	D	C	B	B	
Potência Ativa (kW)	2,9	20	20	24	29	32	32	39	40	45	45	56	58	64	72	77	90	90	115	160	211
Consumo (Nm ³ /h)	2	4	11	16	19	22,4	ND	ND	21	24	ND	37	ND	ND	36	50,5	49	ND	98	98	106
Eficiência (%)	24,9	27,4	28,21	25	25,4	24,5	ND	ND	31,8	31,3	ND	25,5	ND	ND	33	26,1	31	ND	29,7	28	34,1
Ligação	mono	mono	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri	tri
Arrefecimento	Ar	Ar	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água	Água
Permite recuperação de calor do sistema de arrefecimento?	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Temperatura gases de exaustão (°C)	ND	ND	525	ND	ND	589	ND	ND	ND	ND	ND	652	ND	ND	ND	654	ND	ND	ND	653	688
Permite recuperação dos gases de exaustão?	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Admite funcionamento contínuo?	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Permite controle remoto de tensão?	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Permite controle remoto de velocidade?	Não	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Preço (Mil R\$)	7	13,5	77,6	100	ND	79,9	55	65	ND	ND	75	108	95	115	ND	128	ND	140	349	382	
MH R\$/kW	2,41	2,11	3,88	5,00	ND	2,50	1,72	1,67	ND	ND	1,67	1,96	1,64	1,80	ND	1,66	ND	1,22	2,18	1,81	

Fonte: elaborado pelo autor