

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA PROJETOS DE
BIODIGESTORES RURAIS**

ZARA APARECIDA PORTES

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura

BOTUCATU – SP

Agosto – 2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**APLICATIVO COMPUTACIONAL PARA PROJETOS DE
BIODIGESTORES RURAIS**

ZARA APARECIDA PORTES

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Helenice de Oliveira Florentino Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura

BOTUCATU – SP

Agosto - 2005

Dedico essa dissertação...

À minha filha Ana Beatriz, pelo amor em todos os instantes.

Aos meus pais Paulo e Maria de Lourdes, pelo carinho, pelo incentivo e pela compreensão.

À minha irmã Sharon, pelo constante estímulo.

Ofereço...

Ao meu primo Vinícius de Almeida Portes com muitas saudades...

Agradecimentos...

Agradeço em primeiro lugar a Deus por toda ajuda e proteção dada a mim e a minha família.

A minha orientadora Prof^a. Dr^a. Helenice de Oliveira Florentino Silva, pela confiança, pela compreensão, pela amizade e apoio em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Rui Vieira de Moraes do Departamento de Bioestatística do Instituto Biociências, pelo auxílio dado na parte computacional do trabalho.

Aos amigos da pós-graduação Carlos Alberto Neme Daré, Geraldo Pinneli, Leila Issa, Ivo Mathias, Paulo Jesuíno e outros que não estão citados, mas que com sua amizade, contribuíram para a finalização da minha pós-graduação.

Aos amigos Jose Ricardo de Moraes e Elizeu Areco Neto pelos desenhos.

Aos funcionários da Biblioteca Prof. Paulo de Carvalho Mattos, em especial Denise Melo Nogueira de Assis, Solange Aparecida Paulossi Spadin, Nilson de Camargo, Ermete Nibi Neto e Maria Aparecida Martins Alho pela amizade e pela atenção dada em todos os momentos.

Aos amigos Luiza Amália Pinto Cantão, Renato Fernandes Cantão e Aguinaldo Pereira que deram sugestões na parte computacional.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS.....	X
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE EQUAÇÕES.....	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIX
1 RESUMO.....	1
2 SUMMARY.....	2
3 INTRODUÇÃO.....	3
4 REVISÃO DE LITERATURA.....	5
4.1 Biodigestores.....	5
4.1.1 Vantagens do uso de biodigestores.....	8
4.1.2 Tipos de biodigestores rurais.....	8
4.1.2.1 Biodigestor modelo indiano.....	8
4.1.2.2 Biodigestor modelo chinês.....	9
4.1.2.3 Biodigestor modelo batelada.....	10
4.2 Biodigestão anaeróbia.....	11
4.3 Partida de um biodigestor.....	17
4.4 Fatores que interferem na biodigestão anaeróbia.....	18
4.4.1 Temperatura.....	19
4.4.2 Alcalinidade e pH.....	20
4.4.3 Relação carbono/nitrogênio.....	21
4.4.4 Tempo de retenção hidráulica (TRH).....	21

4.4.5 Teores de sólidos e composição do substrato.....	21
4.5 Biogás.....	22
4.6 Biofertilizante.....	25
4.7 Otimização.....	26
4.8 MATLAB.....	28
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	30
5.1 Metodologia utilizada por Ortolani et al. (1991) para dimensionamento de biodigestores.....	31
5.1.1 Biodigestor modelo indiano.....	32
5.1.2 Biodigestor modelo chinês.....	38
5.1.3 Biodigestor modelo batelada.....	43
5.2 Cálculo dos parâmetros iniciais utilizados no dimensionamento de biodigestores modelos indiano, chinês e batelada.....	48
5.2.1 Programação não linear.....	48
5.2.2 Biodigestor modelo indiano.....	50
5.2.3 Biodigestor modelo chinês.....	51
5.2.4 Biodigestor modelo batelada.....	51
5.3 Construção dos biodigestores.....	52
5.3.1 Biodigestor modelo indiano.....	53
5.3.2 Biodigestor modelo chinês.....	58
5.3.3 Biodigestor modelo batelada.....	61
5.4 Aplicativo computacional.....	64
5.4.1 Fluxograma.....	65
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
7 CONCLUSÃO.....	69
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

APÊNDICE.....	77
A.1 Como utilizar o aplicativo.....	78
A.2 Exemplo.....	81

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1 Grupos de microrganismos e substrato utilizados para produção de metano.....	14
2 Proporção da mistura do substrato.....	22
3 Composição do biogás.....	24

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Biodigestor Modelo Indiano.....	9
2 Biodigestor Modelo Chinês.....	10
3 Biodigestor Modelo Batelada.....	11
4 Microbiologia da digestão anaeróbia.....	12
5 Sequência metabólica e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.....	15
6 Janela de comandos do MATLAB.....	29
7 Croqui do Biodigestor Modelo Indiano.....	33
8 Croqui do Biodigestor Modelo Chinês.....	39
9 Croqui do Biodigestor Modelo Batelada.....	47
10 Área mínima necessária do terreno para implantação do biodigestor modelo indiano.....	54
11 Croqui do Biodigestor Modelo Indiano.....	55
12 Caixa de abastecimento ou caixa de entrada.....	57
13 Área mínima necessária do terreno para a implantação do biodigestor modelo chinês.....	59
14 Croqui do Biodigestor Modelo Chinês.....	60

15	Área mínima necessária do terreno para a implantação do biodigestor modelo batelada...	62
16	Croqui do Biodigestor Modelo Batelada.....	63
17	Fluxograma.....	65
18	Janela de comandos do MATLAB.....	67
19	Janela de entrada de dados.....	68

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação	Página
$A = M - N$	31
$Z = X - Y$	32
$V = K \cdot B$	32
$V_b = \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot H}{4} \geq 1,1 \cdot V$	34
$D_g = D_i + 0,10$	34
$V_g = V_1 + V_2$	34
$V_1 = \frac{\pi \cdot D_g^2 \cdot h_1}{4}$	34
$V_2 = \frac{\pi \cdot D_g^2 \cdot h_2}{4}$	34
$E = \frac{p \cdot r}{\sigma}$	35
$P_g = \frac{\pi \cdot p \cdot D_g^2}{4}$	35
$L = P_g - P_R$	35
$h = H - h_2$	36

$V_p = h \cdot D_i \cdot \text{spessura}$	37
$D_s = D_g + 0,10$	37
$v_e = \frac{V}{n}$	37
$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$	37
$D_e = D_i + 2 \cdot \text{spessura}$	38
$D_b = D_e + 0,20$	38
$P_s = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot D_b^2}$	38
$\frac{V_f}{V} = \frac{1}{7}$	40
$V_c = V - V_f$	40
$V_c = \frac{\pi \cdot D_e^2 \cdot H_c}{4}$	40
$\frac{h_f}{D_c} = \frac{1}{8}$	41
$V_f = \frac{\pi \cdot h_f}{6} \cdot \left(\frac{3D_e^2}{4} + h_f^2 \right)$	41
$R_f = \frac{\frac{D_e^2}{4} + h_f^2}{2 \cdot h_f}$	41

$$\frac{h_g}{D_c} = \frac{1}{4} \dots\dots\dots 41$$

$$V_g = \frac{\pi \cdot h_g}{6} \cdot \left(\frac{3D_c^2}{4} + h_g^2 \right) \dots\dots\dots 42$$

$$R_g = \frac{\frac{D_c^2}{4} + h_g^2}{2 \cdot h_g} \dots\dots\dots 42$$

$$h_s = h_g + af + 0,20 \dots\dots\dots 42$$

$$D_s^2 = \frac{D_c^2 \cdot H_c}{3(h_s - 0,10)} \dots\dots\dots 42$$

$$v_e = \frac{\pi \cdot D_{ce}^2 \cdot (h_e - 0,10)}{4} \dots\dots\dots 42$$

$$P_{\text{máx}} = \frac{H_c}{3} + (h_s - 0,10) \dots\dots\dots 43$$

$$V_b = \left(\frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \cdot \frac{H_c}{3} \right) + V_g + \left(\frac{\pi \cdot 0,6^2 \cdot (a + 0,20)}{4} \right) \dots\dots\dots 43$$

$$N = \frac{\text{PUF}}{\text{PBC}} \dots\dots\dots 44$$

$$\text{CB} = B \cdot \text{PBC} \dots\dots\dots 44$$

$$\text{PBPEP} = \frac{\text{BPEP}}{\text{PEP}} \dots\dots\dots 44$$

$$\text{PBB} = \text{PBPEP} \cdot \text{PBC} \cdot N \dots\dots\dots 45$$

$E_u = \frac{CB}{PBB}$	45
$E_s = E_u \cdot S_{t1}$	45
$W = \frac{E_s}{S_{t2}}$	45
$V_d = \frac{W}{1000}$	46
$h_1 = b + c$	48
$A_{lit} = \left(D_b + 2 \cdot C_{es} + 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{V_e}{0,6}} + 0,58 \right) \right) \cdot D_b$	54
$V_{tebi} = \pi \cdot \frac{D_b^2}{4} \cdot (H + esp_b)$	54
$V_{tet} = (H-e) \cdot ((H-e) \cdot 0,58) \cdot D_t$	55
$V_{te} = V_{tebi} + V_{tet}$	55
$C_t = C_{te} + C_{ts}$	55
$C_{te} = 1 + n = (H-e+a) / 0,86$	56
$C_{ts} = 1 = (H-e) / 0,86$	56
$V_{lc} = \frac{D_b^2}{4} \cdot esp_b$	56

$$A_{pci} = \pi \cdot D_i \cdot (H - h_2) \dots \dots \dots 56$$

$$A_{pcs} = \pi \cdot D_s \cdot (h_1 + h_2) \dots \dots \dots 56$$

$$A_{pd} = 2 \cdot D_i \cdot h + 0,24 \cdot D_i \dots \dots \dots 56$$

$$M_1 = \sqrt{\frac{V_c}{0,6}} \dots \dots \dots 57$$

$$A_{tca} = 4(h_{ca} + esp_{ofca} + a) \cdot M_1 + 4h_{ca} \cdot M_1 + M_1^2 \dots \dots \dots 58$$

$$A_{sc} = \left(\frac{\pi \cdot D_g^2}{4} \right) + \pi \cdot D_g \cdot (h_1 + h_2) \dots \dots \dots 58$$

$$A_{itc} = (M_2 + D_c + D_s) \cdot D_c \dots \dots \dots 58$$

$$V_{tcc} = (h_g + H_c + h_f + 0,25) \cdot \pi \cdot \frac{D_c^2}{4} \dots \dots \dots 59$$

$$V_{tet} = \frac{1}{2} M_2 \cdot \left(\frac{3}{4} H_c + H_g \cdot af \right) \cdot D_t \dots \dots \dots 59$$

$$V_{ecs} = \pi \cdot \frac{D_s^2}{4} \cdot h_s + \pi \left(\frac{0,30}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{H}{3} + 0,20 \right) \dots \dots \dots 59$$

$$V_{tec} = V_{tcc} + V_{tet} + V_{ecs} \dots \dots \dots 59$$

$$C_{tc} = z + n_2 \dots \dots \dots 60$$

$$V_{cc} = \frac{\pi}{6} \cdot (1,2 \cdot R_f + 0,4 \cdot h_f + 0,16) \dots \dots \dots 60$$

$$A_{\text{sic}} = 2 \cdot \pi \cdot R_g \cdot h_g - 0,09 \cdot \pi \dots\dots\dots 61$$

$$A_{\text{cac}} = \pi \cdot D_e \cdot (h_e + \text{esp}_{\text{bfca}} + a + \text{esp}_b) \dots\dots\dots 61$$

$$V_{\text{cca}} = \pi \cdot \frac{D_e^2}{4} \cdot \text{esp}_{\text{bfca}} \dots\dots\dots 61$$

$$A_{\text{rcs}} = \pi \cdot D_s \cdot h_s - 0,09\pi \dots\dots\dots 61$$

$$A_{\text{ltb}} = [N \cdot D_b + (N-1) \cdot 0,5] \cdot D_b \dots\dots\dots 62$$

$$V_{\text{bb}} = N \cdot \left[\pi \cdot \frac{D_b^2}{4} \cdot (H + 0,20) \right] \dots\dots\dots 62$$

$$V_{\text{lcb}} = N \cdot \pi \cdot \frac{D_b^2}{4} \cdot \text{esp}_b \dots\dots\dots 62$$

$$A_{\text{pcib}} = \pi \cdot D_i \cdot (H - h_2) \dots\dots\dots 62$$

$$A_{\text{pcsb}} = \pi \cdot D_s \cdot (h_1 + h_2) \dots\dots\dots 63$$

$$A_{\text{cg}} = \left(\frac{\pi \cdot D_g^2}{4} \right) + \pi \cdot D_g \cdot (h_1 + h_2) \dots\dots\dots 63$$

LISTA DE ABREVIATURAS

Significado	Abreviatura
Gás metano.....	CH ₄
Dióxido de carbono.....	CO ₂
Água.....	H ₂ O
Amônia.....	NH ₃
Sulfeto de hidrogênio.....	H ₂ S
Demanda bioquímica de oxigênio.....	DBO
Carbono/Nitrogênio.....	C/N
Tempo de retenção hidráulica.....	TRH
Carga orgânica volumétrica.....	COV
Gás liquefeito de petróleo.....	GLP
Programação Linear.....	PL
Programação Não Linear.....	PNL
Volume de biogás que deverá estar armazenado no período de alta demanda.....	A
Volume de biogás produzido no período.....	M
Volume de biogás consumido no período.....	N
Volume de biogás que deverá estar armazenado no período de consumo mínimo.....	Z
Volume de biogás produzido no período de consumo mínimo.....	X
Volume de biogás consumido no período de consumo mínimo.....	Y
Volume útil do biodigestor.....	V
Fator de rendimento.....	K
Volume de biogás necessário por dia.....	B
Volume bruto do biodigestor.....	V _b
Diâmetro interno do biodigestor.....	D _i
Altura do nível do substrato.....	H
Volume do gasômetro.....	V _g
Volume existente entre a tampa do gasômetro e o nível da mistura do biodigestor.....	V ₁
Volume útil do gasômetro.....	V ₂
Altura ociosa.....	h ₁

Altura útil.....	h_2
Diâmetro do gasômetro.....	D_g
Espessura da parede.....	E
Pressão máxima.....	p
Raio do gasômetro.....	r
Tensão de tração admissível do material da parede do gasômetro.....	σ
Massa do gasômetro.....	P_g
Massa real do gasômetro.....	P_R
Lastro.....	L
Altura entre o solo e o fundo da caixa de entrada.....	a
Altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato.....	b
Altura entre o fundo do biodigestor e os tubos de entrada e saída.....	e
Altura da parede divisória.....	h
Volume da parede divisória.....	V_p
Diâmetro da parede superior.....	D_s
Volume da caixa de entrada.....	v_e
Período de retenção.....	n
Valor da carga total que a base de sustentação irá suportar.....	W
Massa da própria base.....	W_1
Massa das paredes.....	W_2
Massa do gasômetro.....	W_3
Massa do substrato.....	W_4
Pressão sobre o solo.....	P_s
Diâmetro da base.....	D_b
Diâmetro externo.....	D_e
Altura do corpo cilíndrico.....	H_c
Diâmetro do corpo cilíndrico.....	D_c
Volume da calota do fundo.....	V_f
Volume do corpo cilíndrico.....	V_c
Altura da calota do fundo.....	h_f

Raio da calota do fundo.....	R_f
Altura da calota do gasômetro.....	h_g
Volume da calota do gasômetro.....	V_g
Raio da calota do gasômetro.....	R_g
Altura da caixa de saída.....	h_s
Diâmetro da caixa de saída.....	D_s
Afundamento da cúpula no solo.....	af
Altura da caixa de entrada.....	h_e
Diâmetro da caixa de entrada.....	D_{ce}
Pressão máxima (chinês).....	$P_{máx}$
Volume de biogás armazenado na pressão máxima.....	V_b
Período base para o cálculo.....	PBC
Período útil de fermentação.....	PUF
Período efetivo de produção.....	PEP
Número mínimo de unidades biodigestoras.....	N
Consumo de biogás durante o período base para os cálculos.....	CB
Produção de biogás durante o período efetivo de produção.....	BPEP
Potencial em biogás da bateria.....	PBB
Potencial em biogás da biomassa durante o período efetivo.....	PBPEP
Biomassa ou biomassa úmida, ou “in natura”, que é utilizada para a formulação do substrato.....	E_u
Biomassa seca que se pretende colocar no biodigestor.....	E_s
Volume útil da unidade biodigestora.....	V_d
Taxa de sólidos da biomassa.....	S_{t1}
Quantidade de substrato que se pretende colocar no biodigestor.....	W
Altura do gasômetro acima da parede do biodigestor.....	c
Altura livre para o deslocamento do gasômetro.....	h_3
Taxa de sólidos totais no substrato.....	S_{t2}
Área mínima necessária para implantação do biodigestor modelo indiano.....	A_{li}
Espaço compreendido entre o biodigestor e as caixas de entrada e saída.....	C_{es}

Volume de terra a ser escavado para a implantação do biodigestor modelo indiano.....	V_{teb}
Espessura da base de sustentação do biodigestor.....	esp_b
Volume de terra a ser escavado para a implantação dos tubos de PVC.....	V_{tet}
Diâmetro do tubo de PVC.....	D_t
Volume total a ser escavado.....	V_{te}
Comprimento do tubo PVC.....	C_t
Comprimento do tubo PVC de entrada.....	C_{te}
Comprimento do tubo PVC de saída.....	C_{ts}
Volume de concreto para a base do biodigestor.....	V_{lc}
A área da superfície interna da parede cilíndrica inferior.....	A_{pci}
Área da superfície interna da parede cilíndrica superior a ser revestida.....	A_{pcs}
Área da superfície da parede divisória que deve ser revestida.....	A_{pd}
Medida do lado da caixa de entrada.....	M_1
Área da superfície da caixa de abastecimento.....	A_{rca}
Espessura da base de concreto do fundo da caixa de abastecimento.....	esp_{bfca}
Área da superfície da chapa do gasômetro.....	A_{sc}
Área mínima necessária do terreno para limpeza do biodigestor modelo chinês.....	A_{ltc}
Espaço entre a caixa de entrada e o biodigestor modelo chinês.....	M_2
Volume de terra a ser escavado para a implantação do biodigestor modelo chinês.....	V_{tec}
Volume de terra a ser escavado para a instalação do corpo cilíndrico, do gasômetro, da calota do fundo.....	V_{tcc}
Volume de terra a ser escavado para a instalação do tubo de PVC.....	V_{tet}
Volume de terra a ser escavado para a instalação da caixa de saída.....	V_{ecs}
Comprimento do tubo de PVC para o biodigestor modelo chinês.....	C_{tc}
Volume de concreto a ser usado na construção da base para o biodigestor modelo chinês.....	V_{cc}
Área da superfície interna do biodigestor modelo chinês a ser revestida.....	A_{sic}
Área da superfície da caixa de abastecimento a ser revestida.....	A_{cac}
Volume de concreto a ser usado para o fundo da base da caixa de entrada.....	V_{cca}
Área da superfície da caixa de saída a ser revestida.....	A_{rcs}
Área mínima necessária do terreno para limpeza do biodigestor modelo batelada.....	A_{ltb}

Volume de terra a ser escavado para a implantação das unidades biodigestoras.....	V_{bb}
Volume de concreto para a base do biodigestor modelo batelada.....	V_{lcb}
Área da superfície interna da parede cilíndrica inferior do biodigestor modelo batelada a ser revestida.....	A_{pcib}
Área da superfície interna da parede cilíndrica superior do biodigestor modelo batelada a ser revestida.....	A_{pcsb}
Área da superfície da chapa do gasômetro para o biodigestor modelo batelada.....	A_{cg}

1 RESUMO

Nos últimos anos, o setor agropecuário do Brasil vem se modernizando, e com isto provocando um aumento significativo na demanda de energia, no volume de dejetos animais e nos restos de cultura, ocasionando muitas vezes problemas de ordem sanitária, gerando desconforto e perigo à saúde devido o alto teor de substâncias patogênicas presentes nestes resíduos. Uma alternativa bastante eficiente para estes problemas é a reciclagem controlada destes resíduos em biodigestores, que podem converter os dejetos de animais de um problema em um benefício. Pois, a biodigestão resulta em dois subprodutos: um gás rico em metano denominado biogás e um fertilizante, uma espécie de lodo, que é o resíduo da matéria orgânica depois de fermentada, chamado biofertilizante. Desta forma, os biodigestores podem promover o suprimento de energia e fertilizante para os produtores rurais.

Este trabalho enfoca a importância dos biodigestores em áreas rurais, apresenta técnicas que auxiliam tanto os projetistas como também os edificadores e operadores de biodigestores, discute os cálculos dos parâmetros para o projeto e construção de biodigestores, considerando os tipos e quantidades de resíduos presentes na propriedade rural e propõe um programa computacional para facilitar tais cálculos.

Palavras-chave: digestão anaeróbia, biodigestores, biogás, biofertilizante, otimização.

COMPUTACIONAL SOFTWARE FOR BIODIGESTORS BUILDING. Botucatu, 2005. 83p.
Dissertation (Master Science in Agronomy / Energy in Agriculture) – College of
Agronomic Sciences, State University of São Paulo.

Author: Zara Aparecida Portes

Adviser: Prof^ª. Dr^ª. Helenice de Oliveira Florentino Silva

2 SUMMARY

Lately, the Brazilian farming and cattle rising sector has been improving it self, and hereby, promoting a significant rising on energy demand, on animal screments mass, and a culture residues. It often causes problems of sanitary character, producing discomfort and danger to health due to the strong content of pathogenic substances that appear in these residues. A very efficient alternative is the controlled recycling of these residues in the biodigestors, inverting the problem into benefits, since the biodigestion results in two derivates: an abundant gas in methane, named biogas, and a fertilizer, with a mire aspect, which is the organic matter residue after fermented, named biofertilizer. Thus, the biodigestors may promote energy and fertilizer supply for the agricultural producers.

This work focuses on the importance of biodigestors in the field, introduces techniques that help both designers and biodigestor builders and operators. Besides, it discusses the calculus of parameters for the design and building of biodigestors, considering the kind and amounts of residues, which are present at the home farm. Finally, it presents computational software for favoring such calculus.

Key words: anaerobic digestion, biodigestors, biogas, biofertilizer and optimization.

3 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o setor agropecuário do Brasil vem se modernizando, e com isto provocando um aumento significativo na demanda de energia, no volume de dejetos animais e nos restos de cultura, ocasionando muitas vezes problemas de ordem sanitária, gerando desconforto e perigo à saúde devido o alto teor de substâncias patogênicas presentes nestes resíduos.

Uma alternativa bastante eficiente para estes problemas é a reciclagem controlada destes resíduos através da biodigestão anaeróbia, ocorrida em lugares apropriados denominados biodigestores, que podem converter os dejetos de animais de um problema em um benefício. Pois desta fermentação resulta dois subprodutos: um gás rico em metano denominado biogás e um fertilizante, uma espécie de lodo, que é o resíduo da matéria orgânica depois de fermentada, chamado biofertilizante. Desta forma, os biodigestores podem promover o suprimento de energia e fertilizante para os produtores rurais.

Vários países têm investido em pesquisas e tecnologias para construção e operação de biodigestores, desde os mais desenvolvidos como os Estados Unidos da América e Canadá que vêm realizando pesquisas em biodigestão anaeróbia, como Índia e China, que já possuem extensos programas de implantação de biodigestores.

No Brasil, a partir da década de 70, as propriedades rurais começaram a receber incentivos na implantação de biodigestores. Com a crise no sistema de geração de

energia elétrica e a quantidade de resíduos no meio rural, os biodigestores estão hoje entre as principais fontes de energia alternativa.

O Brasil ocupa a quinta posição do mundo em extensão territorial, o que provoca muita dificuldade na implantação de redes de transmissão elétrica e de transporte, necessitando buscar alternativas locais para o suprimento de energia. A posição geográfica do país entre o Trópico de Capricórnio e Equador favorece o clima quente em várias áreas, sendo apenas a região Sul de clima temperado. Este fato facilita explorar a digestão anaeróbia, utilizando a energia derivada dos dejetos animais e restos de cultura.

A utilização do biogás e do biofertilizante proporciona diminuição nos gastos com energia e com produtos químicos, como fertilizante para a lavoura de forma geral, além de contribuir com o saneamento das propriedades. Mas, a alternativa de instalação de biodigestores em áreas rurais requer alguns cuidados especiais como o domínio da tecnologia da digestão anaeróbia, da construção e operação dos biodigestores e o proprietário deve ter consciência de que deverá ter área e resíduo suficiente para manter seu biodigestor funcionando.

Baseado na grande importância dos fatos anteriormente abordados, é que foi escolhido este tema de pesquisa. Buscou-se apresentar um texto que mostre a importância dos biodigestores e que auxilie tanto os projetistas como também os edificadores e operadores de biodigestores, discutindo os cálculos dos parâmetros para o projeto e construção de um biodigestor, considerando os tipos e quantidades de resíduos presentes na propriedade rural, oferecendo um programa computacional que facilite tais cálculos.

Este trabalho consiste no estudo da metodologia de construção de biodigestores rurais proposta por Ortolani et al. (1991) e auxiliada pela metodologia proposta em Florentino (2003). Visa também a confecção de um aplicativo computacional para auxílio no desenvolvimento do projeto de construção e edificação destes biodigestores, obtendo para isto, os valores dos parâmetros de projeto e a quantidade de materiais a serem usados. Conforme a metodologia, estes cálculos são feitos a partir da necessidade energética e disponibilidade de matéria prima existente na propriedade.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Biodigestores

Com o aumento do rebanho no Brasil, pesquisadores e produtores têm buscado manter as propriedades rurais isentas de poluição, preocupando-se com a maneira como é tratado o dejetos e de que forma é feito esse manejo.

Nascimento (1995) define como resíduo tudo que se julga inaproveitável para a atividade humana e que, se disposto de forma inadequada, pode causar danos ao meio ambiente. Mas, o que é resíduo em determinadas atividades pode ser matéria prima em outras.

O manejo dos dejetos de bovinos criados no pasto não chega a ser problema que cause impacto ambiental, pelo contrário, em muitas situações, pela forma dispersa com que é distribuído, até contribui para reposição de parte dos nutrientes minerais que são extraídas pela forrageira que os alimenta. Mas, à medida que os animais são confinados, o volume de dejetos passa a ser um sério problema e pode, quando não devidamente manejado, causar dano ao meio ambiente (HARDOIM & LUCAS JÚNIOR, 1997).

Dentro do contexto de implementação de técnicas voltadas à minimização de impactos ambientais e racionalização do uso de energia, merece destaque a

utilização de biodigestores no meio rural, os quais se relacionam aos aspectos de saneamento e energia, além de estimularem a reciclagem orgânica de nutrientes (LUCAS JÚNIOR & SILVA, 1998).

Desta forma, os biodigestores rurais podem contribuir efetivamente para a energização do meio rural, através da utilização de esterco e resíduos agrícolas como substratos para a produção de biogás (CARIOCA & ARORA, 1984).

Um biodigestor consiste basicamente de um tanque de fermentação anaeróbia (sem a presença de oxigênio) de matérias orgânicas frescas, chamadas substrato ou biomassa, produzindo o biogás e o biofertilizante. Essa biomassa pode ser de origem animal ou vegetal.

A história dos biodigestores é antiga, a Índia foi o primeiro país a instalar biodigestores para a produção de biogás sendo a primeira unidade construída em Bombaim por volta de 1908. A China iniciou seu programa de implantação de biodigestores na década de cinquenta. No Brasil, a implantação de biodigestores começou na década de setenta e tem sido construído um número crescente de biodigestores rurais, sendo a maioria do tipo chinês e indiano (CARIOCA & ARORA, 1984).

Apesar das diversas vantagens oferecidas pelos biodigestores, seu emprego apresenta motivações específicas: no caso da China destaca-se o biofertilizante como a razão principal; nas Filipinas, o tratamento dos esgotos domésticos em projetos de colonização; na Tailândia, o controle de doenças infecto-contagiosas; e na Índia, a energia do biogás (CARIOCA & ARORA, 1984).

Os biodigestores podem ser construídos em alvenaria, em plástico de custo inferior, mas de vida útil menor devido à possibilidade de furos e vazamento. Podem também ser construídos com pedra ferro ou pedras brutas encontradas em áreas rurais.

Os Biodigestores são classificados de acordo com sua complexidade, seu dimensionamento e sua alimentação, variando de país para país, em função da experiência, da disponibilidade de resultados para elaboração de projetos mais adaptados a cada situação, do desenvolvimento técnico-científico e econômico, dos diferentes tipos de materiais de construção e de matérias-primas disponíveis para digestão. De acordo com Benincasa et al. (1991) e Nogueira (1986) os biodigestores são classificados com base em:

- seu **dimensionamento**: pequeno, médio e grande porte, ou seja o volume capaz de armazenar no seu interior;
- sua **alimentação**:
 - **contínuo** - são alimentados conforme a carga diária e a mesma quantidade que foi adicionada é retirada, neste caso a produção de gás é contínua;
 - **batelada** - os biodigestores em batelada são carregados de uma só vez, mantidos fechados por um período conveniente, sendo a matéria orgânica fermentada e descarregada posteriormente

Os biodigestores devem ser dimensionados de acordo com a quantidade de dejetos disponíveis na propriedade e são construídos de acordo com a necessidade e objetivos distintos como produção de combustível, adubo, energia e tratamento de rejeitos.

Alguns autores têm mostrado preocupações com custo, dimensionamentos, rendimentos e localização dos biodigestores. Segundo Jash & Basu (1999), o biodigestor quando alimentado com dejetos de gado pode produzir 0,5 m³/dia de biogás que é suficiente para o uso de lâmpadas por quatro horas; o mesmo pode ser construído com baixo custo de materiais e um proprietário tendo duas cabeças de gado pode ter um mini biodigestor. Para Barrera (1993), a instalação de um biodigestor não deve ficar a mais de 30 metros da casa para diminuir os custos com a instalação da tubulação que conduzirá o gás a ser aproveitado; evitar a construção de biodigestores em baixadas sujeitas a mudanças bruscas de temperatura; não deve ficar exposto ao vento dominante, deve ficar exposto ao sol na maior parte das horas do dia para aproveitar ao máximo o calor; deve ser instalado sempre à distância de mais de dois metros do poço e de preferência em local um pouco mais baixo para evitar possível contaminação das águas.

Em geral, para a escolha do modelo e do tamanho ideal de biodigestor é levado em consideração, entre outras variáveis, as condições locais do solo, capital e custo de manutenção mais baixo possíveis, alta eficiência compatibilizada com custos e operacionalidade, necessidade energética da propriedade (m³ por dia) e disponibilidade de matéria-prima.

No Brasil, existe uma grande preocupação na implantação de biodigestores em áreas rurais. Benincasa et al. (1991) definem como biodigestores rurais aqueles quando a câmara de fermentação dispõem de um volume inferior a 100 m³. O biodigestor rural pode ser construído em alvenaria ou pedra e consiste basicamente de um tanque de fermentação anaeróbia de matérias orgânicas frescas (substrato ou biomassa) produzindo um gás combustível composto essencialmente de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). A esta mistura dá-se o nome de biogás e sua utilização é bastante diversificada, sendo muito utilizado em áreas rurais para cozimento, aquecimento, iluminação, refrigerador, incubador, dentre outros.

4.1.1 Vantagens do uso de biodigestores

Segundo Nogueira (1986), Vijay et al. (1996), e Andrade et al. (2002) além da produção de energia, o biodigestor rural apresenta grandes vantagens como: saneamento rural (converte o carbono em metano, CH₄); redução de sólidos e também de microrganismos patogênicos presentes nos efluentes; estimula a reciclagem da matéria orgânica e de nutrientes; possibilitam a higienização das instalações para criação de animais, promovendo o tratamento de seus dejetos proporcionando diminuição de moscas e odores.

4.1.2 Tipos de biodigestores rurais

4.1.2.1 Biodigestor modelo indiano

Segundo Benincasa et al. (1991) e Ortolani et al. (1991) este modelo de biodigestor é abastecido continuamente, sendo composto por um corpo cilíndrico que possui uma parede divisória separando o tanque de fermentação em duas câmaras podendo ser construído em alvenaria ou pedra, um gasômetro flutuante confeccionado em aço, caixa de entrada e caixa de saída, veja figura 1. Benincasa et al. (1991) afirmam que este modelo de biodigestor trabalha com pressão constante.

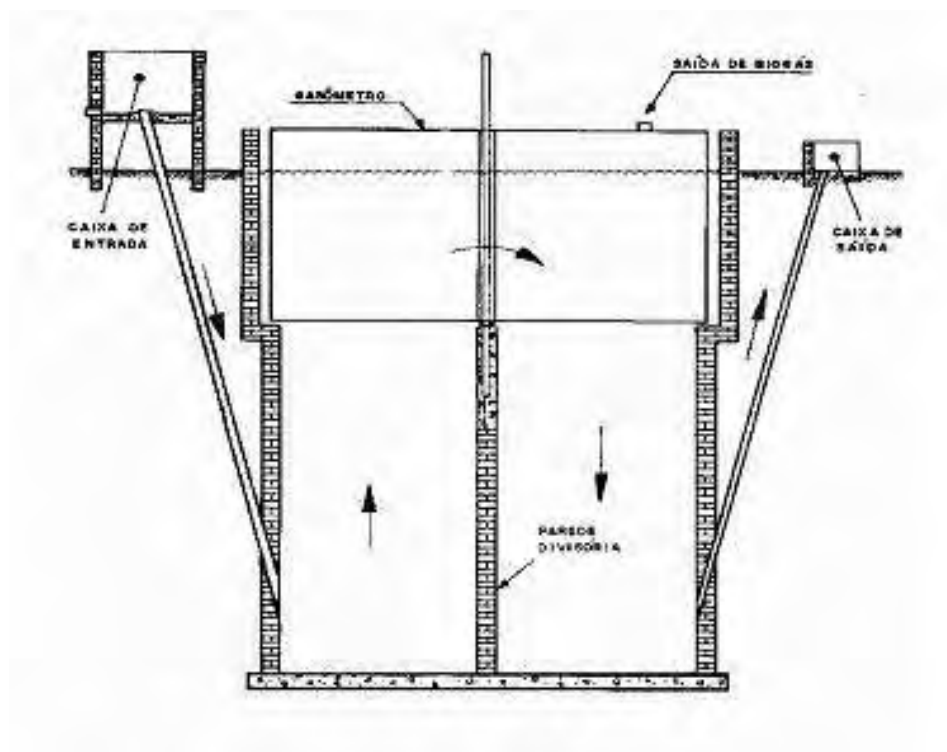


Figura 1. Biodigestor Modelo Indiano

(Fonte: Benincasa et al., 1991)

4.1.2.2 Biodigestor modelo chinês

Benincasa et al. (1991) e Ortolani et al. (1991) descrevem este modelo basicamente constituído de um corpo cilíndrico de alvenaria, duas calotas esféricas, caixa de entrada, caixa de saída e uma boca de inspeção, veja figura 2.

Segundo Ortolani et al. (1991) seu funcionamento difere do modelo indiano, por trabalhar com pressão variável; não possuir saída automática do efluente e também por possuir fluxo e refluxo do substrato, através do orifício de saída, conforme a pressão do biogás aumenta e diminui em seu interior.

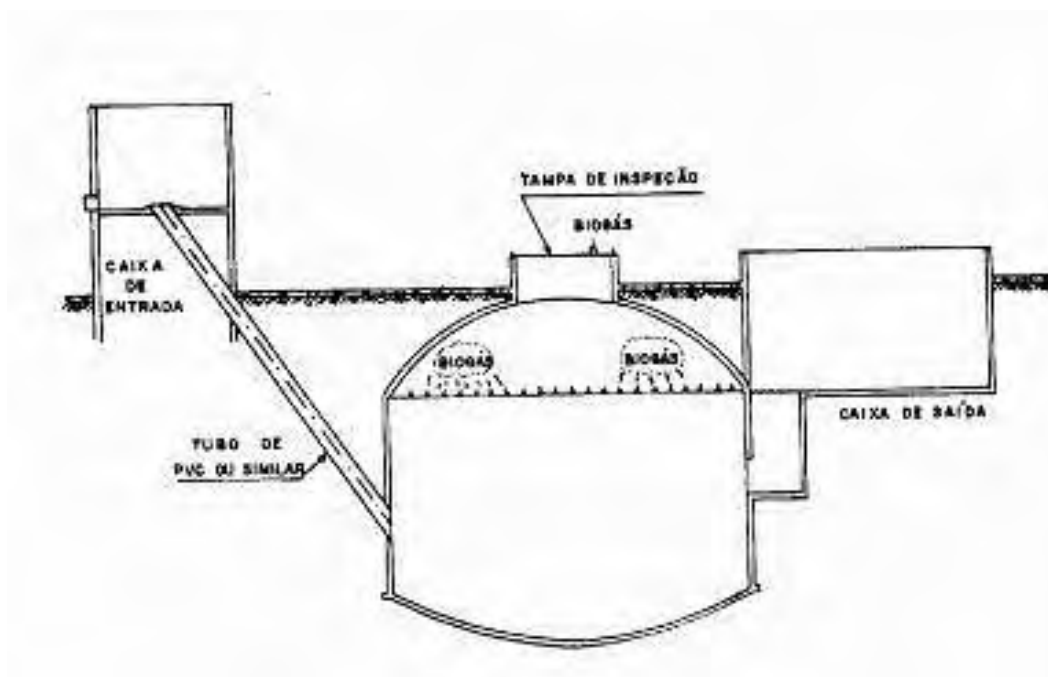


Figura 2. Biodigestor Modelo Chinês

(Fonte: Benincasa et al., 1991)

4.1.2.3 Biodigestor modelo batelada

Nogueira (1986), Benincasa et al. (1991) e Ortolani et al. (1991) definem como biodigestor modelo batelada, aqueles que são abastecidos de uma só vez permanecendo fechado por um período necessário e esvaziados após um período conveniente de fermentação.

Ortolani et al. (1991) diferem os biodigestores em batelada dos biodigestores contínuos por possuírem características que diferem o seu funcionamento do modelo indiano e chinês, como: o abastecimento, a produção de biogás na forma de pico e por não possuir caixas de entrada e saída e também não necessitar de ter parede divisória.

Segundo Ortolani et al. (1991) este modelo é formado basicamente, por um corpo cilíndrico, um gasômetro flutuante e uma estrutura para guia do gasômetro, que poderá ser adotado um sistema de trave e roldana, tratando-se de um sistema simples e não

exigindo uma preocupação operacional, veja figura 3. Sua instalação poderá ser um tanque anaeróbio ou vários, em série, dependendo da demanda de biogás, da disponibilidade e da qualidade de matéria prima a ser utilizada.



Figura 3. Biodigestor Modelo Batelada

(Fonte: Benincasa et al., 1991)

4.2 Biodigestão anaeróbia

Chernicharo (1997) e Lastella et al. (2002) consideram a digestão anaeróbia um processo pelo qual os restos orgânicos, na ausência do oxigênio, podem ser biologicamente convertido em biogás, ou seja, um ecossistema onde diferentes grupos de microorganismos trabalham para a conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico, amônia e novas células bacterianas, como está resumido na figura 4. Seixas et al. (1980) afirmam que, quanto maior a população bacteriana, mais eficiente e rápida será a digestão.

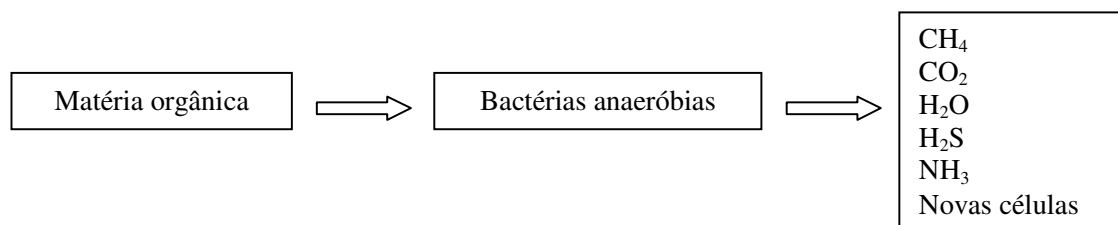


Figura 4. Microbiologia da digestão anaeróbia

Fonte: Chernicharo, 1997

Assim, o processo de digestão anaeróbia que ocorre nos biodigestores é uma fermentação conduzida por inúmeras espécies de bactérias que, na ausência de oxigênio livre, transformam os compostos orgânicos complexos em outras substâncias mais simples que são metabolizadas, resultando em uma mistura de gases que inclui o gás metano (CH₄), o gás carbônico (CO₂), a amônia (NH₃), sulfeto de hidrogênio (H₂S) e uma série de compostos reduzidos, além da energia (CARIOCA & ARORA, 1984; MAGALHÃES, 1986).

Segundo Carioca & Arora (1984), a fermentação anaeróbia oferece as seguintes vantagens: produz um gás combustível que pode ser utilizado para fins domésticos, rurais ou industriais; reduz a carga poluidora de matéria orgânica através da diminuição da demanda bioquímica de oxigênio – DBO, com produção simultânea de biofertilizante; dispensa o uso de equipamentos sofisticados, uma vez que o processo se realiza à pressão atmosférica e temperatura ambiente nos climas tropicais, utiliza praticamente todos os tipos de resíduos orgânicos produzidos na natureza, dispensa insumos energéticos, podendo utilizar os diversos resíduos numa faixa de concentração muito ampla, variando de 0,1% a 20%.

De forma geral, a digestão anaeróbia pode ser utilizada no tratamento de resíduos, para a redução do poder poluente dos riscos sanitários dos dejetos e obtenção de subprodutos como o biogás e o biofertilizante, contribuindo para a diminuição da poluição ambiental, contaminação de solos e contaminação da água subterrânea e de superfície (SCHOCKEN-ITURRINO et al., 1995; NAMIUCHI, 2002; BISCARO, 2003).

Cézar (2001) afirma que o processo de biodigestão anaeróbio está sendo utilizado por vários países, devido sua capacidade de estabilizar grande volume de

matéria orgânica, com pequena produção de biomassa, alta taxa de destruição de patógenos e produção de metano.

Segundo Amaral et al. (2000), o processo de biodigestão anaeróbia melhora a qualidade microbiológica do estrume no que diz respeito à redução dos valores médios de coliformes totais e fecais constituindo-se uma medida preventiva importante no sentido de se preservar a qualidade do solo e dos mananciais de água, quando da sua aplicação como biofertilizante.

A avaliação qualitativa e quantitativa da biomassa presente no sistema de tratamento é de fundamental importância não apenas para o entendimento do processo, como também para alcançar melhor desempenho e estabilidade no tratamento de resíduos (STEIL, 2001).

A técnica da digestão anaeróbia pode ser usada para resíduos, tanto na forma sólida quanto na líquida, constituindo uma forma eficiente de tratamento, por trabalhar quantidades consideráveis de matéria orgânica, produzindo como resultado o biogás e o biofertilizante, ambos com várias aplicações práticas na propriedade rural (HARDOIM, 1999).

Souza (2001) afirma que a variabilidade nas características dos dejetos impede um sistema padrão de biodigestão. Diante da necessidade da adoção de técnicas voltadas para a conservação ambiental, torna-se essencial à mudança rigorosa no manejo dos animais; no que diz respeito principalmente a alimentação e técnicas de coleta e transporte dos dejetos, de forma a resultar em resíduos de características mais homogêneas.

Os microrganismos responsáveis pelo processo de estabilização da matéria orgânica via digestão anaeróbia podem ser divididos em três grupos de bactérias com comportamentos fisiológicos distintos. O primeiro é o grupo das bactérias fermentativas que por hidrólise transformam os polímeros em monômeros, e estes em acetato, hidrogênio, dióxido de carbono, ácidos orgânicos de cadeia curta, aminoácidos e outros produtos como glicose. No segundo grupo, as bactérias acetogênicas produtoras de hidrogênio convertem os produtos gerados pelas bactérias fermentativas (aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e álcoois) em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Os produtos finais do segundo grupo são os substratos essenciais para o terceiro grupo, que por sua vez constitui dois diferentes grupos de bactérias metanogênicas. Um grupo de bactérias acetoclásticas que usa o acetato, transformando-o em metano e dióxido de carbono e outro grupo de bactérias metanogênicas,

que produzem metano através da redução do dióxido de carbono (STERLING JÚNIOR et al., 2001, CHERNICHARO, 1997 e COLEN, 2000).

Segundo Kirsop et al. (1984), o processo de formação de metano como produto final do processo de estabilização anaeróbia depende da existência de populações microbianas com funções metabólicas distintas. Nessas considerações, pode-se afirmar que os principais substratos precursores de metano são diretamente, o propionato e o butirato. O Quadro 1 apresenta os grupos de microrganismos e substrato que trabalham para produção de metano.

Quadro 1. Grupos de microrganismos e substrato utilizados para produção de metano.

Microrganismos	Substrato
<i>Methanobacterium formicicum</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanobacterium bryantii</i>	H ₂ + CO ₂
<i>Methanobacterium hermoautotrophicum</i>	H ₂ + CO ₂
<i>Methanobrevibacter ruminantium</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanobrevibacter smithii</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanobrevibacter arboriphilus</i>	H ₂ + CO ₂
<i>Methanococcus voltae</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanococcus maripaludis</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanococcus deltae</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanococcus jannaschii</i>	H ₂ + CO ₂
<i>Methanococcus thermolithotrophicus</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanomicrobium mobile</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanomicrobium paynteri</i>	H ₂ + CO ₂
<i>Methanogenium cariaci</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanogenium marisnigri</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanogenium olentangyi</i>	H ₂ + CO ₂
<i>Methanogenium thermophilicum</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanospirillum hungatei</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanoplanus limicola</i>	H ₂ + CO ₂ ; formiato
<i>Methanothermus fervidus</i>	H ₂ + CO ₂
<i>Methanotrrix soehngenii</i>	Acetato
<i>Methanlobus tindarius</i>	Metanol, metilaminas
<i>Methanococoides methylutens</i>	Metanol, metilaminas
<i>Methanosarcina bareri</i>	H ₂ / CO ₂ ; metanol / Acetato, metilaminas
<i>Methanosarcina mazei</i>	H ₂ / CO ₂ ; metanol / Acetato, metilaminas

Fonte: Kirsop et al., (1984).

Segundo Chernicharo (1997) o processo de digestão anaeróbia pode ser subdividido em quatro fases principais: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese, como mostra a figura 5.

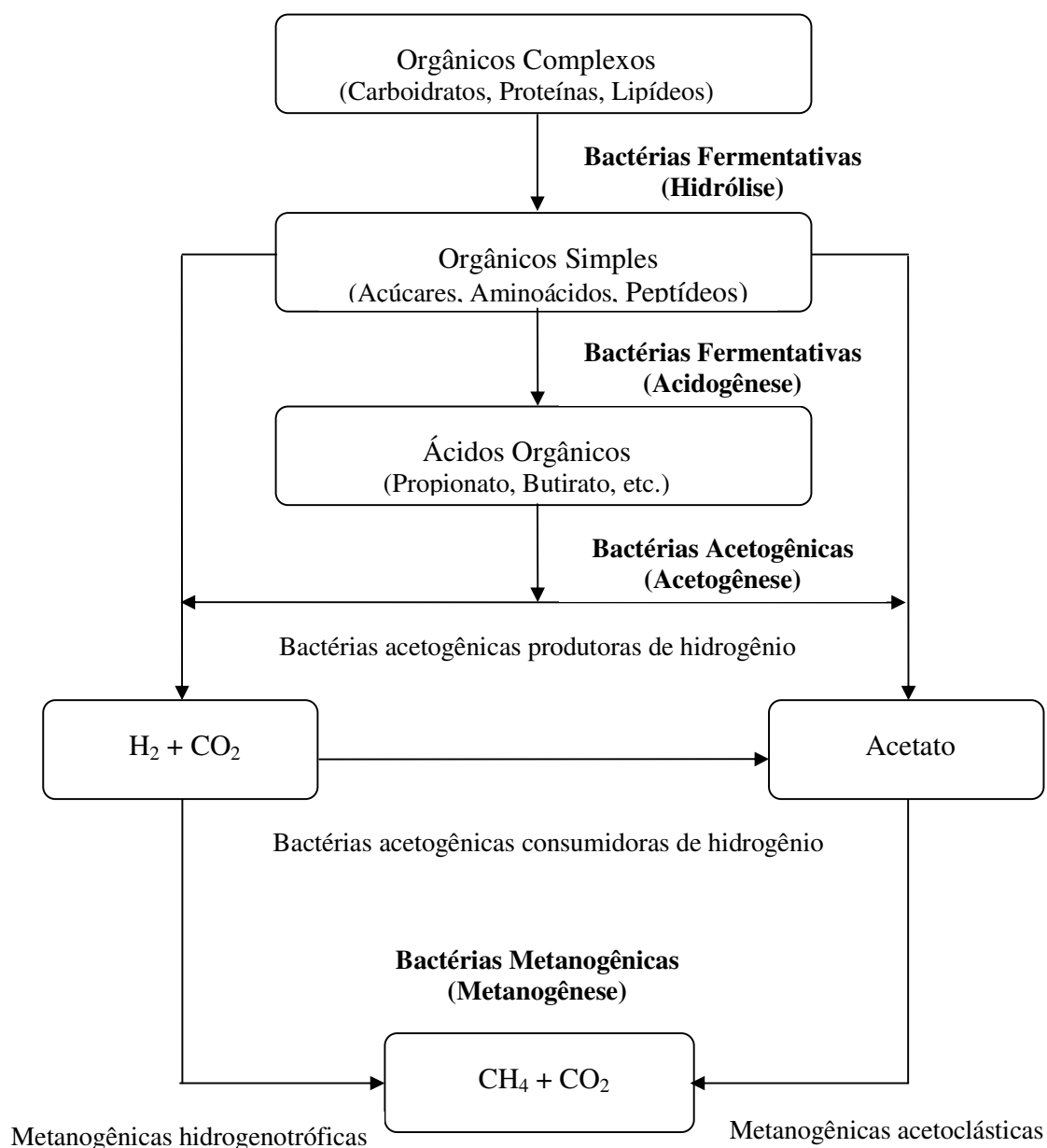


Figura 5. Sequência metabólica e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia (Fonte: Chernicharo, 1997).

Segundo Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras (1981), os organismos responsáveis em primeiro lugar, pelo processo de digestão anaeróbia são os anaeróbios esporulados, as bactérias metanogênicas e os organismos responsáveis pelo rompimento das gorduras. As bactérias metanogênicas são rigorosamente anaeróbias.

Na fase de Hidrólise, as bactérias liberam no meio as chamadas enzimas extracelulares, as quais irão promover a hidrólise das partículas e transformar as moléculas maiores em moléculas menores e solúveis ao meio, os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas. Esta conversão de materiais particulados em materiais dissolvidos é conseguida através da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas.

Na Acidogênese, as bactérias produtoras de ácidos transformam moléculas de proteínas, gorduras e carboidratos em ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas, ou seja, solúveis oriundos da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, sendo convertidos em diversos compostos mais simples, os quais são então excretados pelas células. Como os ácidos graxos voláteis são os principais produtos dos organismos fermentativos, estes são usualmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas.

Na Acetogênese, as bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para bactérias metanogênicas. Dessa forma, as bactérias acetogênicas fazem parte de um grupo metabólico intermediário, que produz substrato para as metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato. Somente o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas metanogênicas.

A etapa final no processo global de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono, Metanogênese, é efetuada pelas bactérias metanogênicas, que atuam sobre o hidrogênio e o dióxido de carbono, transformando-os em metano (CH_4). Esta fase limita a velocidade da cadeia de reações devido principalmente à formação de microbolhas de metano e dióxido de carbono em torno da bactéria metanogênica, isolando-a do contato direto com a mistura em digestão.

4.3 Partida de um biodigestor

Segundo Lucas Júnior et al. (1987) a partida de um biodigestor é caracterizada como o início do processo de inoculação dos microrganismos, para que estes possam se adaptar ao resíduo em suas condições de vazão e carga orgânica. Os resíduos orgânicos mais convenientes para alimentar biodigestores são fezes animais, como esterco bovino, avícola, suíno e outros. Resíduos de fazendas consistindo principalmente de dejetos animais tem um teor de umidade variando entre 75% e 95% e possuem alto teor orgânico, maior que resíduos domésticos (NOGUEIRA, 1986).

Lucas Júnior (1994) afirma que o início da operação de um biodigestor está inteiramente ligado à seqüência bioquímica das transformações metabólicas do processo de biodigestão anaeróbia, implicando na ocorrência de um intervalo de tempo, às vezes muito longo, até que atinja a estabilidade harmônica entre seus diferentes estágios.

Nascimento (1995) afirma que a partida de um biodigestor é tarefa de fundamental importância, haja visto que, se esse processo for mal conduzido o êxito de funcionamento do reator será prejudicado.

A fase de partida de um biodigestor deve ser bem conduzida. O aumento gradativo na produção de biogás é um indicativo de que está ocorrendo a adaptação ao substrato. Barrera (1993) aconselha que na primeira carga, o biodigestor seja abastecido apenas com esterco de gado bovino, pois este quando é expelido pelos animais, já está carregado de bactérias anaeróbias, que formarão uma primeira colônia dentro biodigestor. Lucas Júnior et al. (1987) também afirmam que alguns resíduos produzidos no meio rural, como os dejetos de ruminantes, sofrem um pré-tratamento no trato digestivo dos animais, que são verdadeiras câmaras naturais de fermentação anaeróbia onde se desenvolvem harmonicamente as bactérias da digestão anaeróbia, portanto, ao colocar estes resíduos num biodigestor em pouco tempo haverá produção de biogás. Porém, quando se trabalha com outros resíduos, dentre eles o estrume de suínos, se não forem tomados alguns cuidados na partida, o processo poderá ser levado ao insucesso ou levar muito tempo para que ocorra a produção de metano.

A partida de um biodigestor pode ser antecipada usando inóculo ou técnicas de agitação do substrato. Entre outros fatores, é necessário conhecer tanto as características do resíduo como as condições de sua inoculação do sistema (COLEN, 2000).

Queiroz (2003) afirma que a quantidade adicionada de inóculo influencia significativamente na produção de biogás, contudo, foi observado que a maior porcentagem de inóculo permitiu uma significativa redução no tempo de retenção hidráulica.

Lucas Júnior et al. (1987) concluíram que o uso de inóculo não somente antecipa o pico de produção de biogás como também pode aumentar o potencial efetivo da biomassa. Por outro lado, uma baixa eficiência do inóculo poderá agir negativamente na produção de biogás uma vez que ocupará um volume que poderia ser preenchido pelo substrato a ser tratado.

Carioca & Arora (1984) afirmam que dependendo do tipo de biodigestor, a agitação do material é importante para acelerar o processo. Essa agitação pode ser feita por bombeamento de líquido, ou de gás, ou por agitação mecânica.

4.4 Fatores que interferem na biodigestão anaeróbia

Segundo Steil (2001) o processo de digestão anaeróbia pode ser influenciado por uma série de fatores, favorecendo ou não a partida do processo, a degradação do substrato, o crescimento e declínio dos microrganismos envolvidos, a produção de biogás, assim como, podem determinar o sucesso ou a falência do tratamento de determinado resíduo.

Nascimento (1995), afirma que antibióticos, desinfetantes e pesticidas também tem efeito prejudicial, esses compostos podem ser encontrados em larga escala nas propriedades rurais e atingir os digestores após a lavagem dos estábulos.

Outra substância que interfere no processo segundo Nogueira (1986) é a lignina, pois é uma molécula complexa que forma a estrutura rígida e lenhosa da planta, de difícil digestão para as bactérias. Se a matéria orgânica contém muita lignina, com a dificuldade de digestão, o material lenhoso tenderá a flutuar e formar um sobrenadante, uma nata dentro do biodigestor. A palha contém uma quantidade apreciável de lignina e pode representar um problema em biodigestores.

Sterling et al. (2001), concluíram que pequena quantidade de amônia no biodigestor resultou no aumento de hidrogênio e produção de metano, sendo que grande concentração da substância causou a inibição de hidrogênio e produção de metano.

Colen (2000) afirma que substâncias como metais alcalinos, alcalinos terrosos, sulfitos e solventes orgânicos como álcoois e ácidos graxos de cadeia longa também são prejudiciais.

Lallai, Mura e Onnis (2002) afirmam que certos antibióticos, usados como suplemento alimentar em suínos para promover o crescimento e prevenir infecções, encontrados em dejetos suínos podem alterar a produção de biogás. A amoxicilina é considerada um inibidor na produção de biogás.

Além desses fatores podemos citar a temperatura, alcalinidade e pH, relação carbono/nitrogênio, teor de sólidos totais e a composição do substrato, tempo de retenção hidráulica, e como consequência destes, a interação entre microrganismos envolvidos no processo. Segue uma discussão de cada um destes fatores.

4.4.1 Temperatura

A temperatura no interior do biodigestor afeta sensivelmente a produção do biogás. É preciso assegurar uma relativa estabilidade de temperatura, pois os microrganismos produtores de metano são muito sensíveis a alterações de temperatura, ou seja, qualquer mudança brusca pode afetar a produção.

Segundo Nogueira (1986), a faixa ideal é de 30°C e 35°C para um bom funcionamento do biodigestor e existem três grupos de bactérias metanogênicas que são identificadas quanto à temperatura:

- **Bactérias Termofílicas** – temperaturas acima de 45°C.
- **Bactérias Mesofílicas** – temperaturas entre 20° a 45°C.
- **Bactérias Psicofílicas** – temperaturas abaixo de 20°C.

Segundo Lucas Júnior (1994), definir uma temperatura operacional é extremamente importante do ponto de vista biológico e econômico, pois, a taxa de produção

de biogás depende da temperatura, biodigestores operando na faixa termofílica produzem maior quantidade de biogás, mais rapidamente que aqueles operando na faixa mesofílica, resultando um tempo de retenção hidráulica mais curto, o que implica em biodigestores com câmaras menores e conseqüentemente de menores custos. Apesar de 35°C ser considerado ótimo, a maioria dos biodigestores anaeróbios operam na faixa mesofílica, pois temperaturas entre 25°C e 35°C podem ser mais econômicas em algumas situações.

Segundo Barrera (1993) o tempo de biodigestão é inversamente proporcional à temperatura, dentro da faixa suportável. Quanto mais elevado a temperatura, mais curto será o período. A taxa de produção de biogás aumenta com a elevação da temperatura (NOGUEIRA, 1986; LUCAS JÚNIOR, 1987).

Hardoim (1999) afirma que o emprego de aquecimento aumenta a eficiência dos biodigestores anaeróbios no tratamento de dejetos de gado leiteiro, reduzindo o tempo necessário para início de carga dos biodigestores. A temperatura de 35,3 °C permitiu o início de carga com 9,6 dias ao passo que nos biodigestores aquecidos com as temperaturas de 40°C e 25°C os tempos requeridos para o início de carga foram 11,9 e de 17,6 dias respectivamente.

4.4.2 Alcalinidade e pH

O processo de biodigestão pode ser acompanhado pelas variações de acidez do meio. Uma forma de medir o quanto o meio está ácido ou alcalino é medindo seu pH. A presença de ácidos, meio com pH menor que 7, pode paralisar o processo, e pH maior que 7 ocorre a inibição do processo ou seja, o meio está alcalino. A produção de metano tem seu pico quando pH se eleva. A amplitude eficiente do pH para a formação do metano é de 6,4 a 7,2. (COMPANHIA AUXILIAR DE EMPRESAS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, 1981).

Segundo Nogueira (1986) o pH ótimo situa-se entre 7 e 8 em torno de 7,2 levemente alcalino. O pH menor que 7 líquido ácido e pH maior que 7 líquido alcalino. A amônia pode aumentar o pH do meio, já o bicarbonato torna o meio alcalino.

4.4.3 Relação carbono/nitrogênio (C/N)

De acordo com Nogueira (1986), o componente fundamental para a biodigestão é o teor de carbono que geralmente, se a concentração de sólidos orgânicos for alta, por volta de 5%, esta condição estará satisfeita. Além do carbono, a quantidade de nitrogênio na matéria orgânica é muito importante, todos os organismos vivos necessitam de nitrogênio para sintetizar proteínas, devendo existir uma correta proporção entre o carbono e o nitrogênio, caso contrário as bactérias não serão capazes de consumir todo o carbono presente, e a performance do processo será baixa. Se houver nitrogênio demais, ele não será consumido e se acumulará usualmente como amônia, cujos altos teores podem impedir ou inibir o crescimento das bactérias, especialmente as metanogênicas. O índice C/N situa-se otimamente entre 20 e 30.

4.4.4 Tempo de retenção hidráulica (TRH)

Biscaro (2003) define como tempo de retenção hidráulica o período em que o material orgânico permanece no digestor, isto é, o tempo entre a entrada e saída do digestor. O TRH é o principal fator de avaliação do desempenho e eficiência de um biodigestor (NOGUEIRA, 1986).

4.4.5 Teores de sólidos e composição do substrato.

O desempenho dos biodigestores depende também de fatores que podem ser definidos a partir do teor de sólidos e da diluição do substrato, tais como o tempo de retenção hidráulica (TRH), que como vimos é o período em dias ou em horas que o substrato correspondente a uma carga orgânica volumétrica (COV) e a concentração do substrato expressa em massa de matéria orgânica, sólido volátil ou carbono orgânico por volume de biodigestor por dia.

De acordo com Leite & Povinelli (1999), concentração de sólidos refere-se ao resíduo total presente no substrato, quer seja de origem orgânica ou inorgânica, e é um indicador da massa total a ser tratada. Como no processo anaeróbio a bioconversão só irá

acontecer na fração teoricamente orgânica do substrato, quanto maior a concentração de sólidos totais voláteis maior também, deverá ser a taxa de bioconversão do resíduo.

Tanto o excesso, quanto à falta de água são prejudiciais. O teor de água varia de acordo com as diferenças apresentadas pelas matérias-primas destinadas à fermentação. Segundo Barrera (1993) o material orgânico deve ser sempre carregado na forma líquida, para que não haja bloqueio na produção de gás. Existem algumas porcentagens de mistura já amplamente analisadas e que podem ser observadas pelo produto, garantindo um maior índice de produção, como se especifica a seguir:

Quadro 2. Proporção da mistura do substrato

Matéria Orgânica	Proporção da Mistura	
Esterco de vaca fresco	1 : 1	(1 litro de esterco para 1 litro de água)
Esterco de vaca seco à superfície	1 : 2	(1 litro de esterco para 2 litros de água)
Esterco de cavalo	1 : 1	(1 litro de esterco para 1 litro de água)
Esterco de ovelha	1 : 3	(1 litro de esterco para 3 litros de água)
Restos culturais verdes	1 : 0,5 a 1 : 2	(1 litro de esterco para de 0,5 litro a 2 litros de água)
Esterco de galinha	1 : 2	(1 litro de esterco para 2 litros de água)
Esterco de porco	1 : 1	(1 litro de esterco para 1 litro de água)
Esterco humano	1 : 1	(1 litro de esterco para 1 litro de água)

Fonte: Barrera, (1993).

4.5 Biogás

O biogás é uma mistura de gases originada da biodigestão anaeróbia, isto é, produzido por microorganismos quando matérias orgânicas são fermentadas dentro de um ambiente (biodigestores) que possui determinado limite de temperatura, teor de umidade e acidez e não há a presença de oxigênio. O biogás é um gás combustível composto essencialmente de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), também se encontram outros gases em menor proporção (SMITH et al., 1979).

De acordo com Carioca & Aurora (1984) é possível a produção de biogás a partir de diversos resíduos orgânicos, como esterco de animais, lodo de esgoto, lixo doméstico, resíduos agrícolas, efluentes industriais e plantas aquáticas.

Para a produção de biogás é importante que se otimize as condições para todas as reações bioquímicas que levam à formação dos precursores da metanogênese, e mais importante ainda, para todas as reações que levam a formação do metano propriamente. (NAMIUCHI, 2002).

Segundo Bari (1996), com a crise de energia, o biogás pode atuar como alternativa promissora de combustível substituindo consideravelmente os combustíveis fósseis. O biogás vindo de diferentes dejetos pode ser usado como combustível substituindo o motor a diesel. Isto não somente poupa o combustível diesel, mas também o biogás é renovável na natureza e não contribui para o efeito estufa. O biogás contendo mais de 45% de dióxido de carbono pode causar irregularidades no funcionamento do motor. O desempenho do motor varia de acordo com a presença da quantidade de dióxido de carbono.

Segundo Adeoti (2000) na Nigéria, um mini-biodigestor com capacidade de 6 m³ abastecido com dejetos animais e outros tipos de biomassa, é suficiente para atender a demanda de nove pessoas, cada uma com uma demanda de 0,26 m³ por dia e usando 2,4 m³ para o cozimento. Jash & Basu (1999) afirmam que um biodigestor pode ser construído com a própria mão de obra da propriedade rural e com materiais do local, sendo necessário de 6 a 8 cabeças de gado para obter 2 m³ de biogás por dia.

Para Colen (2000), à medida que é diminuído o TRH, ocorre um decréscimo na produção específica de biogás, isso implica em dizer que o TRH pode ser determinado mediante uma maior necessidade de redução da carga orgânica e ou da necessidade em se produzir mais biogás. Mandal, Kiran e Mandal (1999) mostram que durante um TRH de catorze dias, um biodigestor abastecido com esterco de bovino, demonstrou que a qualidade do biogás pode ser analisada em função da temperatura de sua chama. A porcentagem de metano no biogás varia de acordo com o período de retenção. A temperatura da chama do biogás aumenta com o aumento na porcentagem de metano contido no biogás.

De acordo com Dangoggo (1996), a produção de biogás pode ser afetada por alguns parâmetros semelhantes, como natureza do substrato, concentração, pH, temperatura e predomínio de algumas bactérias.

Segundo Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras (1981) a composição média de um bom biogás de estrume é a seguinte:

Quadro 3. Composição do biogás

GASES	PORCENTAGEM
Metano (CH ₄)	50 a 60
Dióxido de Carbono(CO ₂)	35 a 40
Oxigênio (O ₂)	0,5 a 1
Hidrogênio (H ₂)	1 a 3
Gases Diversos	1 a 5

Fonte: Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras, (1981).

Segundo Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras (1981) o peso específico do metano é cerca de 1kg/m^3 . Em igual volume e nas mesmas condições de temperatura e pressão, o biogás é mais leve do que o ar, sendo a sua densidade em relação a este de $1 : 1.3 = 0.77$. Em caso de vazamento, a tendência é o gás escapar para cima e não para baixo, como é o caso do butano e do propano. A toxidez do biogás é nula, pois não contém monóxido de carbono. Seu odor é conhecido como odor de estábulo ou de pântanos.

Para Barrera (1993), o metano não tem cheiro, cor ou sabor. É a porcentagem de metano que confere ao biogás um alto poder calorífico, que varia de 5000 à 7000 kcal por m^3 . O biogás altamente purificado pode alcançar até 12000kcal por m^3 . Sendo assim cada m^3 de biogás equivale aproximadamente ao valor energético de:

- 0,454 litro de GLP.
- 0,553 litro de óleo diesel.
- 0,613 litro de gasolina.
- 0,579 litros de querosene.
- 1,536 kg de lenha.
- 1,428 kW de eletricidade.
- 0,790 litro de álcool hidratado.

A produção de biogás representa um avanço importante no sentido de solucionar o problema da disponibilidade de combustível no meio rural e a falta de energia elétrica em algumas propriedades.

A utilização do biogás é muito diversificada em áreas rurais de pequeno e médio porte, podendo ser utilizado em fogões, lampiões, geladeiras, chuveiros, motores, etc. Muitas indústrias que tratam seus próprios resíduos por digestão anaeróbia, utiliza o biogás para geração de vapor, economizando dessa forma o óleo combustível ou outros combustíveis. Outras usam para produção de energia elétrica, o biogás alimenta um gerador e produz energia elétrica que pode ser conectada à rede elétrica ou utilizada pelo próprio usuário. O biogás pode ser usado em motores de bomba de recalque para obter água para irrigação e abastecimento de residências, pode também substituir o uso de gasolina em motores. Para usufruir desta tecnologia basta apenas algumas adaptações (CARIOCA & AURORA, 1984; COMO FAZER, s.d.).

O desenvolvimento de um programa de biogás também representa um recurso eficiente para tratar os excrementos e melhorar a higiene e o padrão do meio rural.

4.6 Biofertilizante

Os dejetos humanos e animais contêm grande número de bactérias, dentre elas, as patogênicas, e quando são espalhadas na terra como fertilizantes sem tratamento acarretam sérios riscos de infecção para os animais que pastam e para o ser humano. Esses microrganismos podem, principalmente, através das chuvas, serem levados às fontes de água superficiais e subterrâneas, comprometendo a qualidade microbiológica de mananciais (AMARAL et al., 2000).

Os resíduos, depois de passarem no biodigestor, quando diluído apresentam alta qualidade para uso como fertilizante agrícola. Este produto com aspecto de lodo é chamado de biofertilizante e apresenta grande quantidade de nitrogênio e de fósforo.

Para Souza (2001), a biodigestão anaeróbia é uma alternativa viável pois, após este tratamento, o efluente com pH próximo ao neutro torna-se estável e sua aplicação no solo possibilita a reciclagem dos nutrientes. O material a ser descartado no solo,

deve estar estável para que não ocorra competição da matéria orgânica do resíduo pelo oxigênio com os microrganismos do solo e com as plantas.

Segundo Barrera (1993), o pH médio de 7.5 é levemente alcalino, portanto este índice é extremamente favorável ao crescimento de microrganismos úteis a terra.

Segundo a Companhia Auxiliar de Empresas Elétricas Brasileiras (1981), o biofertilizante apresenta como vantagens:

- O conteúdo de matéria orgânica do resíduo resulta em uma capacidade de retenção de umidade pelo solo, evitando demora no crescimento das plantas durante o período de estiagem.
- Melhoria na estrutura do solo, especialmente em argilas, permitindo maior penetração de ar com conseqüente estímulo à oxidação da matéria orgânica pelos organismos do solo.
- Introdução de grande número de microrganismos e protozoários, resultando em aumento da velocidade de decomposição, o que torna os nutrientes mais assimiláveis pelas plantas.
- Introdução de certos minerais necessários ao crescimento das plantas.

4.7 Otimização

Observa-se na literatura o uso de modelos matemáticos como ferramentas para auxílio em problemas reais de diversas áreas da ciência, inclusive Ciências Agrárias. A busca incessante por modelos matemáticos, que visa achar o ótimo de uma função aumenta cada dia mais. A este processo damos o nome de otimização. Que surgiu durante a segunda Guerra Mundial quando a Inglaterra contratou cientistas para estudar problemas de estratégias e de tática associadas com a defesa do país.

Um problema a ser otimizado é composto por um conjunto de variáveis independentes, também chamadas de parâmetros; as restrições, que são condições que definem os valores aceitáveis para os parâmetros e a função objetivo, que depende das variáveis independentes para obter uma situação de melhoria.

A elaboração de um problema matemático a ser otimizado implica na análise detalhada do processo tendo como critério a elaboração de uma função objetivo, a qual deve ser minimizada ou maximizada. De acordo com a natureza do problema, classificamos os métodos otimizadores em alguns grupos, dentre estes grupos temos dois de grande importância, que é a Programação Linear (PL) – utilizada para analisar modelos onde as restrições e a função objetivo são lineares e Programação Não Linear (PNL) utilizada em modelos com funções não lineares. Todos estes métodos podem ser vistos mais detalhadamente em literaturas como Luenberger (1984), Bazaraa et al. (1993), e Bertsekas (1999).

Segundo Bertsekas (1999) a programação não linear é um campo da matemática aplicada que teve um desenvolvimento significativo. O primeiro ponto a se destacar foi a união dos algoritmos de programação linear com a programação não linear através do uso do método do ponto interior. Um segundo fator foi o aumento de problemas em grande escala e o terceiro avanço é o uso extensivo da otimização iterativa sem restrição para resolver os difíceis problemas dos mínimos quadrados surgido no treinamento de redes neurais.

A escolha de um método mais eficaz para um determinado problema não é feito aleatoriamente, é importante e necessário determinar as características específicas do problema a ser resolvido, para permitir a escolha do método mais apropriado para caso.

Para os problemas abordados neste trabalho, o método mais adequado é o método das Penalidades, que será utilizado para determinar os parâmetros iniciais (altura e diâmetro) a serem usados no projeto de construção do biodigestor, conforme discutido em Florentino (2003).

A idéia deste método é transformar o problema com restrição num problema irrestrito, utilizando uma função penalidade que pondera a influência da restrição na função objetivo, isto é, à função objetivo original é acrescentado termos que, dependem das restrições e do parâmetro de penalização. No início do algoritmo o problema é tratado como irrestrito e gradualmente o parâmetro de penalização diminui penalizando as violações das restrições (LUENBERGER, 1984; BAZARAA et al., 1993; BERTSEKAS, 1999).

Florentino (2003) propôs uma técnica para auxílio no dimensionamento de biodigestores modelos indiano, chinês e batelada utilizando o método Quase-Newton da Programação não linear.

4.8 MATLAB

O aplicativo computacional desenvolvido nesta dissertação, para auxílio no dimensionamento de biodigestores rurais, foi desenvolvido usando o *software* MATLAB versão 6.1.0.450 (R12.1) produzido pela *Mathworks, Inc.*

O MATLAB é um *software* interativo que possui uma linguagem de programação para computação técnica e científica. O nome MATLAB é uma abreviação de *Matrix Laboratory*, pois originalmente ele foi escrito para facilitar o acesso aos *softwares* de cálculo matricial (*MATHWORKS, INC, 1992; OGATA, 1996; HANSELMAN & LITTEFIELD, 1997*).

O MATLAB trabalha com algumas ferramentas que facilitam a programação, permitindo implementar e resolver problemas matemáticos muito mais rápido e eficientemente que através de outras linguagens como C, Basic, Pascal ou Fortran. Sua interface é composta por janelas que podem ser habilitadas ou desabilitadas através de comandos. Segundo Matsumoto (2001), Hanselman & Littefield (2003) a área de trabalho na versão MATLAB 6.1.0.450 (R12.1) para ambiente Windows é composta de janelas definidas por:

- **Command Window** : área de trabalho na qual as instruções são digitadas.
- **Launch Pad**: área na qual são exibidas informações, textos explicativos e exemplos de utilização dos produtos instalados.
- **Workspace**: área na qual são exibidas e armazenadas as variáveis definidas na área de trabalho do MATLAB. As variáveis devem ser alfanuméricas iniciadas com letras, exemplos x1, x2, mat1, mat2, podendo ter no máximo 32 caracteres.
- **Comand History**
- **Current Directory**: exibe/ configura o diretório de trabalho corrente.
- **Menus pop-up**: comandos para configuração do ambiente MATLAB.

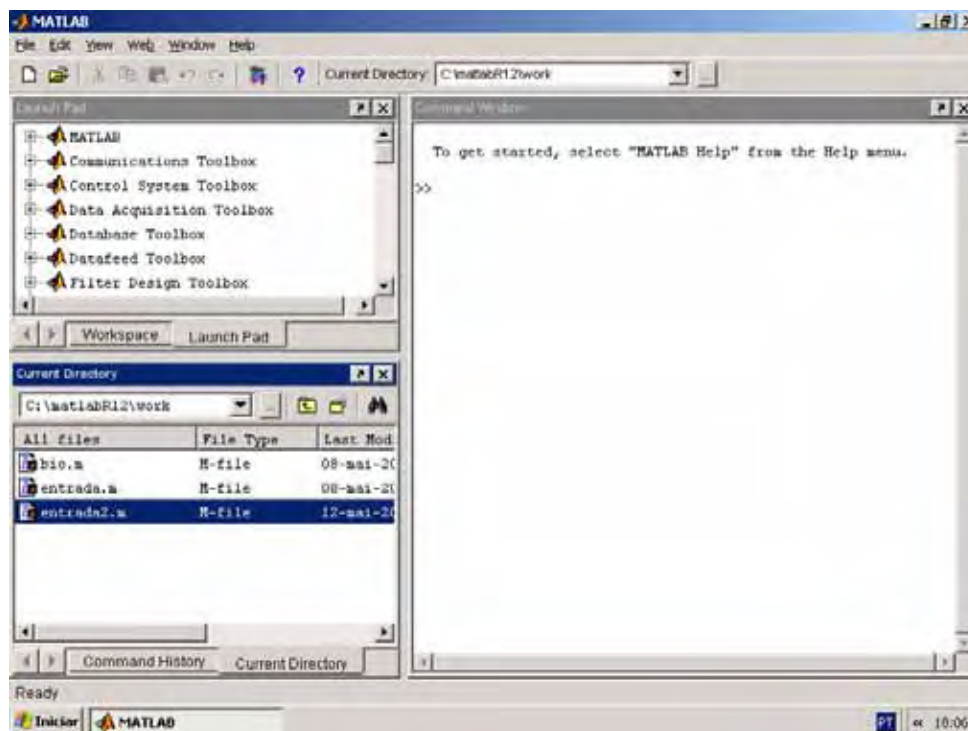


Figura 6. Janela de comandos do MATLAB

Este *software* dispõe de uma biblioteca bastante abrangente de funções matemáticas, geração de gráficos e manipulação de dados que auxiliam muito o trabalho do programador, e ainda possui uma família de aplicativos específicos, chamado *toolbox*, que são coleções de funções usadas para resolver determinados problemas tais como otimização, manipulação algébrica, estatística, redes neurais, processamento de sinais, simulação de sistemas dinâmicos, entre outros

5 MATERIAL E MÉTODOS

A construção de um biodigestor requer alguns conhecimentos técnicos. De acordo com Ortolani et al. (1991) para construção de biodigestores em alvenaria e chapa de ferro, inicialmente há necessidade de dados de consumo de energia da propriedade (motores, iluminação, cozimento, aquecimento, etc), tipo e quantidade de matéria prima disponível na propriedade. A partir destes dados e conhecendo o fator de rendimento do dejetto (medidos em laboratório ou adquirido na literatura), calcula-se alguns parâmetros iniciais do biodigestor, como altura e diâmetros internos, tomando o cuidado de manter algumas relações fundamentais para o bom funcionamento do biodigestor.

A partir destes valores, são calculados todos os elementos do projeto (volume e dimensões do gasômetro, espessuras de chapas a serem usadas, lastros, dimensões das caixas de entrada e saída e paredes divisórias quando existir, etc). Posteriormente são calculadas as quantidades de materiais de alvenaria e chapas necessárias para a construção do biodigestor dimensionado.

O cálculo dos parâmetros iniciais para o biodigestor, altura e diâmetro interno, pode ser feito segundo Florentino (2003), com auxílio de técnicas matemáticas de otimização. A metodologia apresentada em Ortolani et al. (1991) auxiliada pela metodologia proposta em Florentino (2003), permite a elaboração de projetos que ofereçam um baixo custo

na construção de biodigestores, visto as dificuldades econômicas de pequenas propriedades rurais.

Florentino (2003) apresenta uma ferramenta matemática que consiste em um modelo de programação não linear com o objetivo de minimizar o volume do biodigestor a ser dimensionado, respeitando suas restrições, as quais mantêm algumas relações fundamentais para o bom funcionamento do biodigestor, obtendo um valor ótimo para os parâmetros iniciais como altura e diâmetro.

5.1 Metodologia utilizada por Ortolani et al. (1991) para dimensionamento de biodigestores

No dimensionamento dos biodigestores modelos indiano, chinês e batelada deve-se tomar o cuidado em armazenar o biogás para que na hora de pico seja suficiente para manter os aparelhos funcionando. Portanto, antes de começar a projetar o biodigestor é necessário conhecer o valor a ser consumido e o período no qual a demanda é maior sendo obtido através da soma do consumo específico de cada equipamento e o tempo utilizado durante as 24 horas do dia.

No início de cada período, tanto de alta demanda (A) ou período em que não há, ou existe o mínimo de consumo (Z), deverá ser armazenada uma quantidade de biogás.

Sendo A o volume de biogás que deverá estar armazenado no início de cada período de alta demanda (m^3), temos:

$$A = M - N \dots \dots \dots (1)$$

onde,

M = volume de biogás produzido no período considerado (m^3)

N = volume de biogás consumido no período considerado (m^3)

Sendo Z o volume de biogás que deverá ser armazenado no período de consumo mínimo (m^3), temos:

$$Z = X - Y \dots \dots \dots (2)$$

onde,

X = volume de biogás produzido no período de consumo mínimo (m³)

Y = volume de biogás consumido no período de consumo mínimo (m³)

As seguintes subseções apresentam uma metodologia para o dimensionamento de biodigestores rurais, modelos indiano, chinês e batelada, com capacidade de produção de 25 m³ de biogás por dia, considerando ainda que estes biodigestores não possuem qualquer tecnologia para aumentar a eficiência, como agitadores, aquecedores e controladores de temperatura.

5.1.1 Biodigestor modelo indiano

Para este modelo de biodigestor, Ortolani et al. (1991) afirmam que para o funcionamento normal dos aparelhos, há necessidade que a pressão máxima siga a exigência dos órgãos queimadores, podendo variar de 10 a 20 centímetros de coluna d'água (c.c.a.) ou de 0,01 a 0,02 kgf/cm², sendo que em casos onde a distância do órgão queimador é muito extensa, poderão ser exigidas maiores pressões.

O volume útil do biodigestor (V), em m³, é dado pela equação:

$$V = K \cdot B \dots \dots \dots (3)$$

onde,

K = fator de rendimento da matéria prima

B = volume de biogás necessário por dia (m³)

Segundo Barrera (1993) o fator K corresponde a relação entre o volume útil do biodigestor (V) e o volume de biogás necessário por dia, que pode variar de 0,7 à 4 dependendo de fatores como: tipo de biomassa, diluição, temperatura, modelo do biodigestor, tipo de reabastecimento, etc.

As dimensões de um biodigestor modelo indiano, podem ser vistas mais detalhadamente através da figura 7:

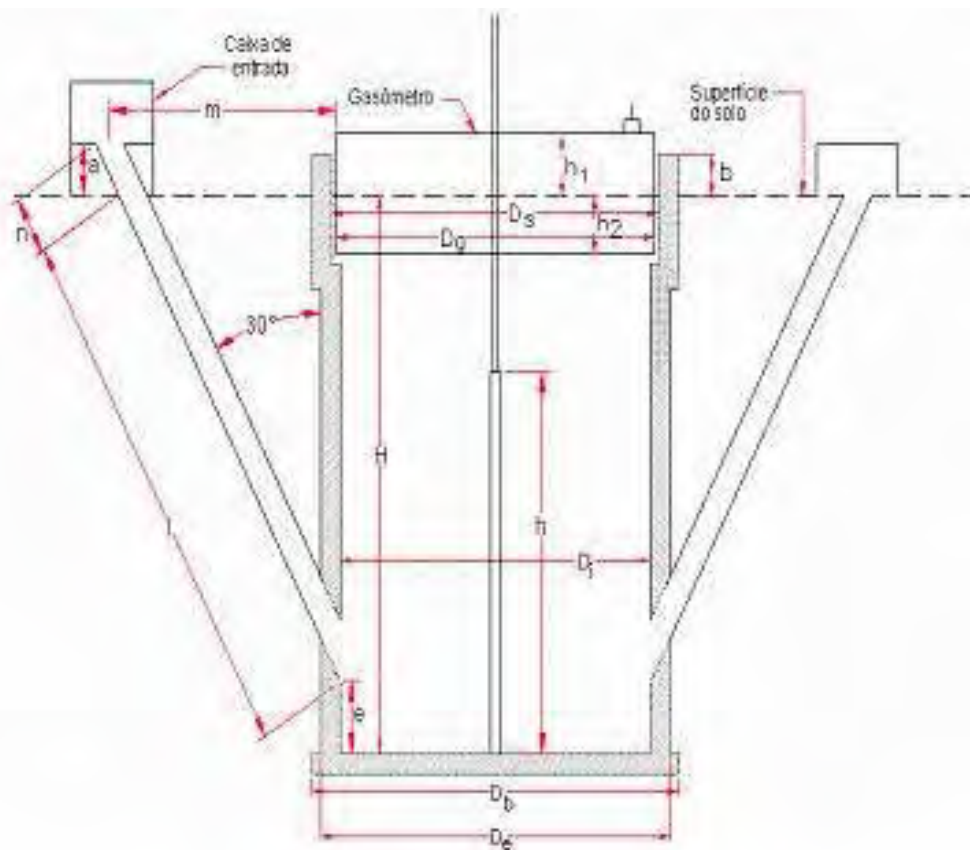


Figura 7. Croqui do Biodigestor Modelo Indiano

onde,

H → Altura do nível do substrato

h → Altura da parede divisória

h₁ → Altura ociosa do gasômetro

h₂ → Altura útil do gasômetro

D_i → Diâmetro interno do biodigestor

D_g → Diâmetro do gasômetro

D_b → Diâmetro da base

D_e → Diâmetro externo da parede inferior

D_s → Diâmetro interno da parede superior

a → Altura do fundo da caixa de entrada

b → Altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato

n → Comprimento do tubo de PVC acima da superfície do solo

e → Altura do posicionamento dos tubos de entrada e saída

m → Distância entre a parede do gasômetro e o meio da caixa de entrada

l → Comprimento do tubo de PVC até a superfície do solo

Para o cálculo do volume bruto (V_b) do biodigestor admite-se um erro de 10% a mais.

$$V_b = \frac{\pi \cdot D_i^2 \cdot H}{4} \geq 1,1 \cdot V \dots\dots\dots(4)$$

onde, D_i é o diâmetro interno do biodigestor (m) e H é a altura do nível do substrato (m) e devem obedecer as seguintes expressões, obtidas para melhorar o rendimento do biodigestor:

$$0,6 \leq \frac{D_i}{H} \leq 1,0 \dots\dots\dots(5)$$

$$3,0\text{m} \leq H \leq 6,0\text{m} \dots\dots\dots(6)$$

$$2\text{m}^3 \leq B \leq 25\text{m}^3 \dots\dots\dots(7)$$

O volume do gasômetro (V_g) é dado pela soma do volume existente entre a tampa do gasômetro e o nível da mistura do biodigestor (V_1) com o volume útil do gasômetro (V_2), ou seja,

$$D_g = D_i + 0,10 \dots\dots\dots(8)$$

$$V_g = V_1 + V_2 \dots\dots\dots(9)$$

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D_g^2 \cdot h_1}{4} \dots\dots\dots(10)$$

$$V_2 = \frac{\pi \cdot D_g^2 \cdot h_2}{4} \dots\dots\dots(11)$$

onde,

h_1 = altura ociosa (m)

h_2 = altura útil (m)

D_g = diâmetro do gasômetro (m)

De acordo com Barrera (1993) deve existir uma folga de 0,10 m entre o diâmetro interno (D_i) e o diâmetro do gasômetro (D_g) para evitar a saída de bolhas de biogás entre a parede interna do biodigestor e a parede externa do gasômetro.

A altura ociosa do gasômetro (h_1) deverá ter seu valor igual ou superior a 0,15 m que é o valor da pressão máxima prevista p , expressa em coluna d'água. Caso h_1 tenha um valor inferior ao recomendado, antes do gasômetro flutuar para manter a pressão desejada, o substrato transbordará para cima do gasômetro e o sistema não funcionará.

A espessura da chapa, peso e lastro do gasômetro também fazem parte de um bom dimensionamento. A espessura é calculada pela equação (12). A tampa deve ser construída em forma cônica para escoamento das águas de chuva.

$$E = \frac{p \cdot r}{\sigma} \dots\dots\dots(12)$$

sendo,

E = espessura da parede (cm)

p = pressão máxima (kgf/cm²)

r = raio do gasômetro (cm) = 0,5 D_g

σ = tensão de tração admissível do material da parede do gasômetro (kgf/cm²)

A massa do gasômetro, P_g , em kg, é calculada da seguinte forma:

$$P_g = \frac{\pi \cdot p \cdot D_g^2}{4} \dots\dots\dots(13)$$

O valor de P_g (kg) indica a massa do gasômetro necessária para manter a pressão p desejada. Quando a massa real do gasômetro, P_R , não coincide com o valor calculado por (13), há necessidade de calcular o valor do lastro (L).

$$L = P_g - P_R \dots\dots\dots(14)$$

Quando o valor encontrado para o lastro for menor que zero ($L < 0$), significa que o gasômetro construído tem massa superior a necessária, e o lastro deve ser colocado, no sentido de levantar o gasômetro.

Para Ortolani et al. (1991) é muito importante que o nível do substrato fique na superfície do solo, facilitando a abertura do buraco, o escoamento do efluente e o manejo do sistema, exigindo menor quantidade de materiais para a construção.

Segundo Ortolani et al. (1991) a altura entre o solo e o fundo da caixa de entrada, deverá ser de $a = 0,50$ m, pois este valor tem demonstrado ser satisfatório para o reabastecimento.

A altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato (b), depende da pressão máxima p , desejada, sendo esse valor numericamente igual a p , expresso em coluna d'água. Portanto $b = p = 0,15$ m.c.a. = 0,15 m.

O bom posicionamento dos tubos de entrada e saída além de garantir uma boa agitação no fundo do biodigestor por ocasião do reabastecimento, evitam que se originem espaços que impeçam a reciclagem de material e possibilitam saída normal do efluente. Os tubos devem ser retos, com as extremidades inferiores seccionadas tangencialmente à parede, a uma altura $e = 0,30$ m do fundo, com inclinação em torno de 30° em relação à parede, e com diâmetro que possibilite livre fluxo do substrato. Não se recomenda diâmetros menores que 100 mm. A extremidade superior do tubo de saída, deve ficar ao nível do substrato.

A parede divisória não pode ser muito baixa, pois impede uma boa reciclagem da biomassa na parte superior possibilitando a formação de uma espessa camada de sobrenadante, diminuindo o rendimento do biodigestor e contribuindo para a formação de crosta.

A altura da parede divisória h , em m, é dada pela equação:

$$h = H - h_2 \dots\dots\dots(15)$$

e deverá obedecer a relação:

$$h \geq \frac{2H}{3} \dots\dots\dots(16)$$

O volume da parede divisória V_p , em m^3 , é expressa pela equação:

$$V_p = h \cdot D_i \cdot \text{espessura} \dots\dots\dots(17)$$

onde, espessura = 0,24 m que é a espessura de um tijolo revestido.

O diâmetro interno da parede superior (D_s) deve ser 0,10m a mais que a medida do diâmetro do gasômetro, esta folga serve para a livre movimentação do gasômetro.

$$D_s = D_g + 0,10 \dots\dots\dots(18)$$

Para que a caixa de entrada seja dimensionada é preciso obter seu volume que é dado pela equação:

$$v_e = \frac{V}{n} \dots\dots\dots(19)$$

onde,

v_e = volume útil da caixa de entrada (m^3)

n = período de retenção (número de dias)

Para o dimensionamento da base de sustentação do biodigestor é necessário conhecer o valor da carga total (W) que irá suportar e as características do terreno, para evitar rachaduras.

O valor da carga total W , em kg, é dada pela soma de pelo menos quatro cargas.

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \dots\dots\dots(20)$$

onde,

W_1 = massa da própria base (kg)

W_2 = massa das paredes (kg)

W_3 = massa do gasômetro (kg)

W_4 = massa do substrato (kg)

A pressão sobre o solo P_s , em kgf/cm^2 , pode ser estabelecida por:

$$D_e = D_i + 2 \cdot \text{espessura} \dots \dots \dots (21)$$

$$D_b = D_e + 0,20 \dots \dots \dots (22)$$

$$P_s = \frac{4 \cdot W}{\pi \cdot D_b^2} \dots \dots \dots (23)$$

onde,

D_b = diâmetro da base

D_e = diâmetro externo

Para biodigestores com volume útil de até 25m^3 por dia, instalados em solos firmes e compactados, uma base simples de concreto com espessura não superior a 20 cm é suficiente desde que apresentem uma resistência superior a P_s .

5.1.2 Biodigestor modelo chinês

A metodologia de dimensionamento de biodigestores modelo chinês, mostrada em Ortolani et al. (1991), propõem alguns cuidados como: o volume do biodigestor deve ser igual ao volume do substrato que atende a demanda diária de biogás; o nível máximo do substrato, no interior do biodigestor, deve coincidir com a altura do corpo cilíndrico (H_c); o nível do fundo da caixa de saída, coincide com a altura do corpo cilíndrico; o nível mínimo do substrato, no interior do biodigestor, ocorre a $\frac{H}{3}$ do nível máximo, para assegurar, pelo

menos, $\frac{2}{3}$ do volume de substrato em produção efetiva; estas limitações visam manter a harmonia entre as dimensões, para que o rendimento dos biodigestores não se altere substancialmente.

Para a obtenção do volume de biogás e o volume do biodigestor é utilizado o mesmo processo proposto para o biodigestor modelo indiano (3).

$$V = K \cdot B$$

onde,

V = Volume útil do biodigestor (m^3)

K = fator de rendimento (m^3/m^3)

B = volume de biogás necessário por dia

Através da figura 8, é possível observar as dimensões do biodigestor modelo chinês mais detalhadamente.

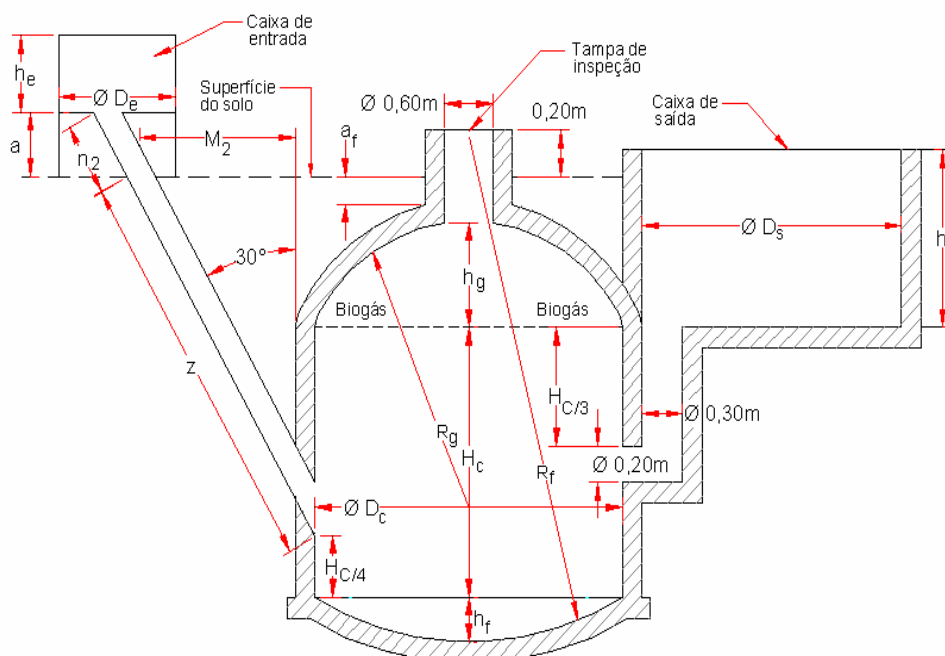


Figura 8. Croqui do Biodigestor Modelo Chinês

D_c → Diâmetro do corpo cilíndrico

H_c → Altura do corpo cilíndrico

h_g → Altura da calota do gasômetro

h_f → Altura da calota do fundo

R_g → Raio da calota do gasômetro

R_f → Raio da calota do fundo

D_e → Diâmetro da caixa de entrada

h_e → Altura da caixa de entrada

z → comprimento do tubo de PVC até a superfície do solo

D_s → Diâmetro da caixa da saída

h_s → Altura da caixa de saída

a_f → Afundamento da cúpula no solo

a → Altura do fundo da caixa de entrada

M_2 → Distância entre o meio da caixa de entrada e o corpo cilíndrico do biodigestor

n_2 → Comprimento do tubo de PVC acima da superfície do solo

O volume da calota do fundo (V_f), em m^3 , deve corresponder a sétima parte do volume útil do biodigestor (V), sendo dada pela equação:

$$\frac{V_f}{V} = \frac{1}{7} \dots\dots\dots(24)$$

O cálculo do volume do corpo cilíndrico (V_c) é dado pela equação:

$$V_c = V - V_f \dots\dots\dots(25)$$

Com o valor do volume do corpo cilíndrico, atribui-se um valor para o diâmetro do corpo cilíndrico (D_c) e acha o valor da altura do corpo cilíndrico (H_c), ou usa-se a metodologia proposta por Florentino(2003) a qual está descrita na seção 6.2, que fornece o valor exato para D_c e H_c .

$$V_c = \frac{\pi \cdot D_c^2 \cdot H_c}{4} \dots\dots\dots(26)$$

Os valores encontrados para D_c e H_c devem satisfazer a equação:

$$0,5 < \frac{H_c}{D_c} < 0,6 \dots \dots \dots (27)$$

Pela metodologia de Ortolani et al. (1991), caso os valores encontrados para D_c e H_c , não satisfizerem a restrição (27), os mesmos devem ser corrigidos e alguns cálculos devem ser refeitos. A correção dos valores altura da calota do fundo (h_f), volume da calota do fundo (V_f) e o raio da calota do fundo (R_f) são feitas pelas equações:

$$\frac{h_f}{D_c} = \frac{1}{8} \dots \dots \dots (28)$$

$$V_f = \frac{\pi \cdot h_f}{6} \cdot \left(\frac{3D^2}{4} + h_f^2 \right) \dots \dots \dots (29)$$

Com o valor corrigido do volume da calota do fundo (V_f), o volume do biodigestor (V) deve ser corrigido pela equação (25). Com o valor corrigido do volume do corpo cilíndrico (V_c), deve-se corrigir o valor da altura (H_c) pela equação (26). Com os valores de D_c e H_c corrigidos, verifica-se se eles satisfazem a equação (27). Se estes valores não atenderem esta relação, repete-se todo o cálculo a partir da equação (26). Se atenderem, os cálculos continuam. Isto não seria necessário, se fosse utilizada a metodologia proposta em Florentino (2003).

O valor do raio da calota do fundo (R_f) é obtido pela equação:

$$R_f = \frac{\frac{D_c^2}{4} + h_f^2}{2 \cdot h_f} \dots \dots \dots (30)$$

Calculado a altura da calota do gasômetro h_g , em m, conforme equação (31), pode-se determinar o volume V_g e o raio R_g da calota do gasômetro, conforme equações (32) e (33):

$$\frac{h_g}{D_c} = \frac{1}{4} \dots \dots \dots (31)$$

$$V_g = \frac{\pi \cdot h_g}{6} \cdot \left(\frac{3D_c^2}{4} + h_g^2 \right) \dots\dots\dots(32)$$

$$R_g = \frac{\frac{D_c^2}{4} + h_g^2}{2 \cdot h_g} \dots\dots\dots(33)$$

Pode-se determinar as dimensões da caixa de saída (altura da caixa de saída (h_s) e diâmetro da caixa de saída (D_s)) através das equações:

$$h_s = h_g + af + 0,20 \dots\dots\dots(34)$$

$$D_s^2 = \frac{D_c^2 \cdot H_c}{3(h_s - 0,10)} \dots\dots\dots(35)$$

onde, $af = 0,25m$

O valor do afundamento da cúpula no solo (af), não necessita ser muito grande, basta ser o suficiente para que uma pequena camada de solo cubra a abóbada, junto à parede da boca de inspeção, para permitir a construção da calçada sem afetar a parede do gasômetro. São suficientes valores de 0,20 a 0,25 m para esse afundamento.

A constante 0,10 m da equação (35) é uma folga para não haver o transbordamento do efluente, quando o biogás atingir sua pressão máxima.

A caixa de entrada tem suas dimensões (volume de reabastecimento diário (v_e) e diâmetro da caixa de entrada (D_{ce})) através das equações:

$$v_e = \frac{V}{n}$$

$$v_e = \frac{\pi \cdot D_{ce}^2 \cdot (h_e - 0,10)}{4} \dots\dots\dots(36)$$

onde,

n = período de retenção

h_e = altura da caixa de entrada (m)

Deve-se atribuir um valor para h_e , levando em conta, que a boca dessa caixa não pode ficar muito alta, para não dificultar o reabastecimento. De acordo com Ortolani et al. (1991) alturas superiores a 1,0 m, já apresentam alguma dificuldade. O fundo dessa caixa deve ficar no mínimo 0,50 m acima do nível do solo ou da calçada.

Deve-se calcular o volume de biogás armazenado na pressão máxima, calculando-se primeiramente a pressão máxima que pode ser atingida pelo biogás do biodigestor, em metros de coluna d'água (m.c.a.), $P_{máx}$.

$$P_{máx} = \frac{H_c}{3} + (h_s - 0,1) \dots \dots \dots (37)$$

Obtendo o valor da pressão máxima é possível obter o volume de biogás que pode ser armazenado nessa pressão através da equação:

$$V_b = \left(\frac{\pi D_c^2}{4} \cdot \frac{H_c}{3} \right) + V_g + \left(\frac{\pi (0,6)^2 \cdot (a + 0,20)}{4} \right) \dots \dots \dots (38)$$

sendo,

V_b = volume de biogás armazenado na pressão máxima (m^3)

5.1.3 Biodigestor modelo batelada

De acordo com Ortolani et al. (1991) este modelo de biodigestor é abastecido de uma só vez e apresenta produção de biogás na forma de pico, provocando uma dificuldade em adequar estas premissas à necessidade energética.

Para que seja possível o dimensionamento do biodigestor modelo batelada trabalhando com um teor de sólidos totais, no substrato de 8%, é necessário de alguns dados como: período base para o cálculo (PBC) que é frequência em dias com que ocorre a disponibilidade da biomassa na propriedade; período útil de fermentação (PUF) e período

efetivo de produção (PEP) são determinados pelos estudos do potencial energético do substrato a ser utilizado, correspondendo aos tempos úteis, em dias, de produção.

Para obter o número mínimo de unidades biodigestoras (N) utiliza a equação:

$$N = \frac{PUF}{PBC} \dots\dots\dots(39)$$

O valor mínimo de unidades biodigestoras deve ser um número inteiro, quando isso não acontece, deve-se aproximar para maior.

Por este modelo ser abastecido de uma só vez, é importante saber a seqüência de enchimento e fase de produção das unidades biodigestoras para estabelecer o regime de operação e estabelecer quantas unidades estarão operando em baixa e em alta produção, para que não falte biogás no período de alta demanda.

O consumo de biogás durante o período base para os cálculos é dado pela equação:

$$CB = B \cdot PBC \dots\dots\dots(40)$$

sendo:

CB = Consumo de biogás durante o período base para os cálculos (m³)

B = Volume de biogás necessário por dia (m³)

O volume de biogás necessário por dia (B) é calculado da mesma maneira do biodigestor modelo indiano, estabelecendo também o valor do pico de consumo, durante as 24 horas do dia.

O potencial em biogás da biomassa durante o período efetivo de produção (PBPEP), é o valor que indica a produção média por dia da biomassa durante o período considerado de alta produção. Este valor é obtido através da razão entre o volume de biogás, produzido por 1kg de biomassa durante o período efetivo de produção e o valor correspondente ao período efetivo de produção, sendo expresso em m³ / kg dia.

$$PBPEP = \frac{BPEP}{PEP} \dots\dots\dots(41)$$

onde,

BPEP = Produção de biogás durante o período efetivo de produção
(m³)

É importante calcular o potencial em biogás da bateria (PBB). Este potencial representa a produção de biogás por kg de biomassa, durante o tempo que fica em produção na bateria. É calculado através da expressão:

$$PBB = PBPEP \cdot PBC \cdot N \dots \dots \dots (42)$$

onde,

PBPEP = Potencial em biogás da biomassa durante o período efetivo de produção

PBC = Período base para o cálculo (dias)

Para obter o valor da biomassa necessária para o enchimento de uma unidade biodigestora (E_u) aplica a equação:

$$E_u = \frac{CB}{PBB} \dots \dots \dots (43)$$

onde,

CB = volume de biogás consumido

PBB = potencial de biogás da bateria

E_u = biomassa ou biomassa úmida, ou “in natura”, que é utilizada para a formulação do substrato (kg).

O volume útil da unidade biodigestora (V_d) é calculado através das equações:

$$E_s = E_u \cdot S_{t1} \dots \dots \dots (44)$$

$$W = \frac{E_s}{S_{t2}} \dots \dots \dots (45)$$

$$V_d = \frac{W}{1000} \dots\dots\dots(46)$$

onde,

E_s = Biomassa seca que se pretende colocar no biodigestor (kg)

E_u = Biomassa ou biomassa úmida, ou “in natura”, que é utilizada para a formulação do substrato (kg)

S_{t1} = Taxa de sólidos da biomassa

W = Quantidade de substrato que se pretende colocar no biodigestor (kg)

S_{t2} = Taxa de sólidos totais no substrato

V_d = Volume útil da unidade biodigestora (m³)

Quando operamos com uma bateria de unidades biodigestoras, o volume útil do gasômetro é calculado dividindo-se o valor de V_2 , pelo número de unidades biodigestoras em produção efetiva. O valor de V_2 é calculado da mesma maneira para o modelo indiano (11) e as outras dimensões necessárias, apresentadas na figura 9 podem ser calculadas através das relações de (8) a (11).

$$D_g = D_i + 0,10$$

$$V_g = V_1 + V_2$$

$$V_1 = \frac{\pi \cdot D_g^2 \cdot h_1}{4}$$

$$V_2 = \frac{\pi(D_g)^2 \cdot h_2}{4}$$

onde,

V_g = volume do gasômetro (m³)

V_1 = volume existente entre a tampa do gasômetro e o nível da mistura do biodigestor (m^3)

V_2 = volume útil do gasômetro (m^3)

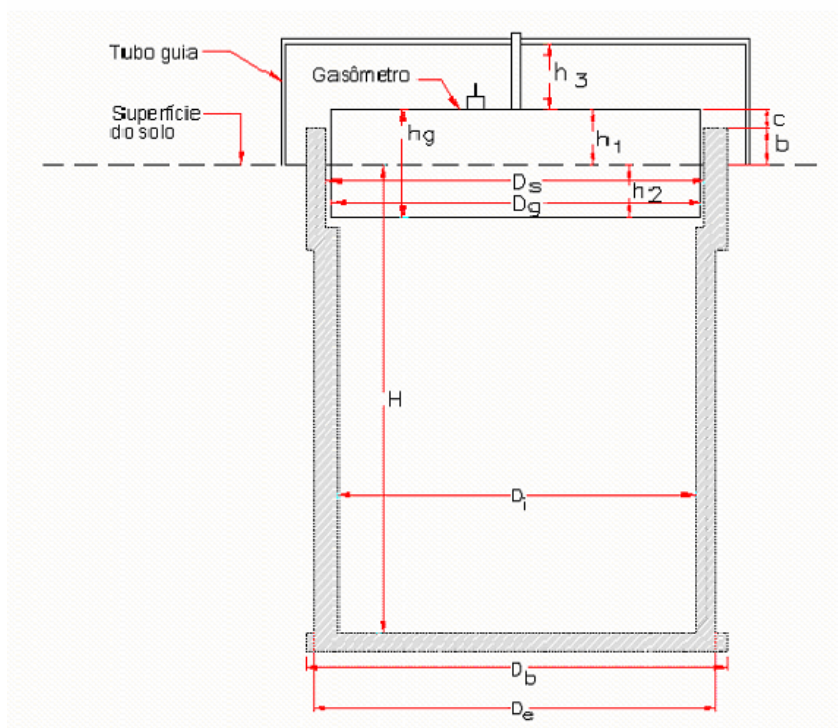


Figura 9. Croqui do Biodigestor Modelo Batelada

H → Altura do nível do substrato

h₁ → Altura ociosa do gasômetro

h₂ → Altura útil do gasômetro

h₃ → Altura livre para o deslocamento do gasômetro

h_g → Altura do gasômetro

c → Altura do gasômetro acima da parede do biodigestor

b → Altura da parede do biodigestor acima do nível do substrato

D_i → Diâmetro interno do biodigestor

D_g → Diâmetro do gasômetro

D_b → Diâmetro da base

D_e → Diâmetro externo da parede inferior

D_s → Diâmetro interno da parede superior

O biodigestor batelada possui características físicas muito parecidas com as do biodigestor indiano, sendo também importante calcular as dimensões h_1 , h_2 e h_3 .

$$h_1 = b + c \dots\dots\dots(47)$$

$$h_3 > h_2 \dots\dots\dots(48)$$

sendo,

b = altura da parede do biodigestor acima do substrato (m), devendo obedecer os mesmos critérios usados para o modelo indiano

c = altura do gasômetro acima da parede do biodigestor e deve ser suficiente para garantir o perfeito funcionamento da roldana

h_3 = altura livre para deslocamento do gasômetro (m)

A altura total do gasômetro (h_g) será $h_1 + h_2$.

A determinação e ajuste dos valores D_i , H , D_g , D_s , h_1 e h_2 , seguem o mesmo processo utilizado para o modelo indiano, ou também pode ser utilizada a metodologia descrita em 6.2.

5.2 Cálculo dos parâmetros iniciais utilizados no dimensionamento de biodigestores modelos indiano, chinês e batelada

Os modelos de otimização apresentados nesta seção auxiliam no dimensionamento de biodigestores modelo indiano, chinês e batelada e estão baseados nas técnicas propostas em Florentino (2003), as quais utilizam a programação não linear.

5.2.1 Programação não linear

A otimização consiste em uma técnica matemática que busca o melhor aproveitamento de todos os recursos disponíveis. Dentro da otimização, a Programação Não Linear, através dos diversos métodos computacionais, é uma ferramenta matemática utilizada

para este melhor aproveitamento, consistindo na modelagem e solução de problemas de otimização de uma função não linear, com ou sem restrições.

A formulação matemática do problema de programação não linear tem a seguinte forma:

Maximizar $f(x)$ (ou Minimizar $f(x)$)

Sujeito a

$x \in S$

onde,

x = vetor de variáveis do problema (x_1, \dots, x_n) ;

$f(x)$ = uma função real não linear (função objetivo);

S = conjunto de restrições, descrito por um conjunto de equações ou inequações.

O objetivo é determinar $x \in S$ tal que maximize a função $f(x)$ (ou minimize $f(x)$).

Para resolver estes problemas, alguns métodos matemáticos e computacionais são aplicados, explorando as características de $f(x)$ e S . Tais métodos podem ser vistos com detalhes em literatura apropriada, (LUENBERGER, 1984 e LASDON, 1970) e seu procedimento computacional é encontrado em vários programas comerciais, como exemplo o Sistema SAS e o Aplicativo MATLAB.

Para resolução dos problemas formulados na seção a seguir, pode ser utilizado o método das Penalidades da Programação Não Linear. Com a resolução destes modelos, são determinados a altura e o diâmetro que produzem o mínimo volume do biodigestor e com isto reduz-se a quantidade necessária de materiais de alvenaria, como tijolos, cimento, areia, pedra, tubos, canos, ferros e etc., e conseqüentemente o custo do biodigestor é diminuído. É importante salientar que são mantidos todas as características de funcionalidade, eficiência e atendimento à demanda de biogás prevista.

5.2.2 Biodigestores modelo indiano

O problema de programação apresentado a seguir determina os valores do diâmetro interno (D) e da altura (H) do biodigestor, tais que minimizam o volume do biodigestor modelo indiano, sujeito às restrições que garantem a demanda energética local e as demais que estão ligadas ao dimensionamento de um sistema próprio para pequenas propriedades rurais, fatores de rendimento e a funcionalidade do biodigestor, conforme discutido na seção 6.1.1.

Segundo Florentino (2003) para este modelo de biodigestor foi elaborado o seguinte:

$$\text{Minimizar } \frac{\pi}{4} D^2 H$$

Sujeito a

$$\frac{\pi}{4} D^2 H \geq x K B$$

$$D - H \leq 0$$

$$D - 0.6H \geq 0$$

$$3 \leq H \leq 6$$

onde,

D = variável que representa o diâmetro interno do biodigestor (m)

H = variável que representa a altura do biodigestor (m)

x = Porcentagem mínima a ser acrescentada no volume útil do biodigestor sendo seu valor 10%

K = fator de rendimento

B = demanda energética diária (m³)

K B = volume útil do biodigestor e obedece a relação $2 \leq K B \leq 25$

5.2.3 Biodigestor modelo chinês

Para o dimensionamento deste modelo é proposto em Florentino (2003) um modelo matemático que determina a altura (H) e o diâmetro (D), do corpo cilíndrico do biodigestor, levando-se em consideração as restrições para que o rendimento dos biodigestores não se altere substancialmente, e para garantir que a demanda seja suprida.

O modelo matemático proposto em Florentino (2003) é:

$$\text{Minimizar } \left(\frac{\pi}{4} D^2 H + \frac{49\pi}{3072} D^3 \right)$$

Sujeito a

$$\frac{\pi}{4} D^2 H + \frac{49\pi}{3072} D^3 \geq K B$$

$$0.5D - H \leq 0$$

$$0.6D - H \geq 0$$

$$D \geq 0$$

5.2.4 Biodigestor modelo batelada

O modelo de programação apresentado a seguir para o biodigestor tipo batelada, determina os valores do diâmetro interno (D) e da altura (H) do biodigestor, sujeito às restrições que garantem a demanda energética local e a funcionalidade do biodigestor, evitando um super dimensionamento conforme discutido na seção 6.1.3.

Para o biodigestor modelo batelada Florentino (2003) propõem:

$$\text{Minimizar } \frac{\pi}{4} D^2 H$$

Sujeito a

$$\frac{\pi}{4} D^2 H \geq V D$$

$$H - D \geq 0$$

$$0.6H - D \leq 0$$

$$0 < H < 6$$

5.3 Construção dos biodigestores

Segundo Ortolani et al (1991), os biodigestores indiano, chinês e batelada são construídos em alvenaria, com uma base de concreto para sustentação, caixas de entrada e saída (modelos indiano e chinês), gasômetro em aço (modelos indiano e batelada), parede divisória no caso do modelo indiano, tubos de PVC e outros materiais como mangueira cristal, registro, etc.

Na construção civil, são recomendados alguns itens que seguem:

- Base de concreto armado
 - concreto (traço 1:3:5): para cada m³ são utilizados:
 - 250 kg de cimento = 5 sacos de cimento
 - 0,53 m³ de areia grossa
 - 0,89 m³ de brita nº 2
 - armação (malha 20x20 cm): para cada m² são utilizados:
 - 4,5 kg de aço CA50 (10,0 mm)
 - 0,1 kg de arame recozido Nº 18
- Alvenaria
 - 1 tijolo: para cada m² são utilizados:
 - 140 tijolos de tamanho 5x11x23
 - 26,3 kg de cimento = 0,53 saco
 - 0,054m³ de areia grossa
 - 1/2 tijolo: para cada m² são utilizados:

70 tijolos de tamanho 5x11x23

10,7 kg de cimento = 0,22 saco

0,022 m³ de areia grossa

- Revestimento

- argamassa cimento e areia: para cada m² são utilizados:

12,2 kg de cimento = 0,24 saco

0,025 m³ de areia grossa

- Coluna de sustentação do tubo guia (11x15 cm)

- concreto (traço 1:2:3): para cada m³ são utilizados:

371 kg de cimento = 7,42 sacos

0,53m³ de areia grossa

0,80 m³ de brita nº 2

- armação: para cada m de pilar 4x15 cm são utilizados:

Aço CA50 (10,00 mm) = 2,25 kg

Aço CA50 (5,0 mm) = 0,35 kg

Arame recozido nº 18 = 0,1 kg

- forma de madeira: para cada m de pilar 11x15 cm, são utilizados:

Tábua (2,5x30,0 cm) = 2,0 m

Arame recozido nº 18 = 0,02 kg

Estes dados auxiliam na construção dos biodigestores modelos indiano, chinês e batelada.

5.3.1 Biodigestor modelo indiano

Para biodigestor modelo indiano seguem-se os cálculos abaixo:

Área mínima necessária para implantação do biodigestor (A_{li}), ou seja, a área mínima que deverá ser limpa para construção do biodigestor pode ser calculada como (veja figura 10):

$$A_{li} = \left(D_b + 2 \cdot C_{es} + 2 \cdot \left(\sqrt{\frac{V_e}{0,6}} + 0,58 \right) \right) \cdot D_b \dots\dots\dots(49)$$

onde;

A_{li} = área mínima necessária do terreno para limpeza do biodigestor modelo indiano (m^2)

C_{es} = espaço compreendido entre o biodigestor e as caixas de entrada e saída (m)

v_e = volume da caixa de abastecimento (ou caixa de entrada)

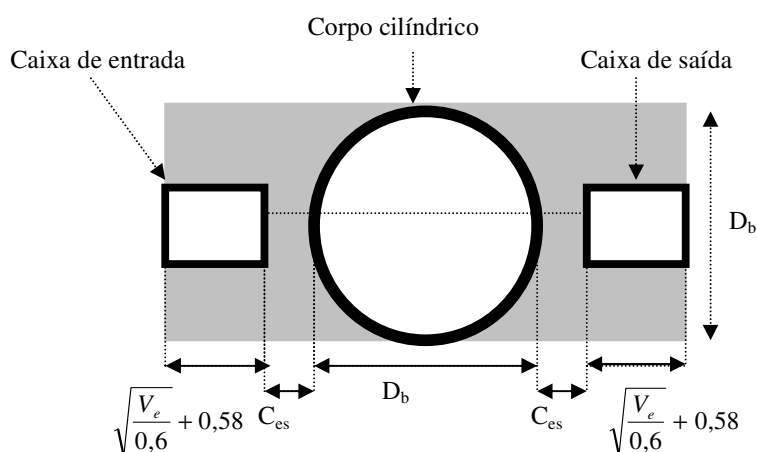


Figura 10. Área mínima necessária do terreno para a implantação do biodigestor modelo indiano

Volume de terra a ser escavado (V_{tebi}) para a implantação do corpo cilíndrico do biodigestor modelo indiano:

$$V_{tebi} = \pi \cdot \frac{D_b^2}{4} \cdot (H + esp_b) \dots\dots\dots(50)$$

onde,

esp_b = espessura da base de sustentação do biodigestor = 0,20m

Volume de terra a ser escavado para a implantação dos tubos de PVC (V_{tet}) (veja figura 11):

$$V_{tet} = (H - e) \cdot ((H - e) \cdot 0,58) \cdot D_t \dots \dots \dots (51)$$

onde,

D_t = diâmetro do tubo de PVC

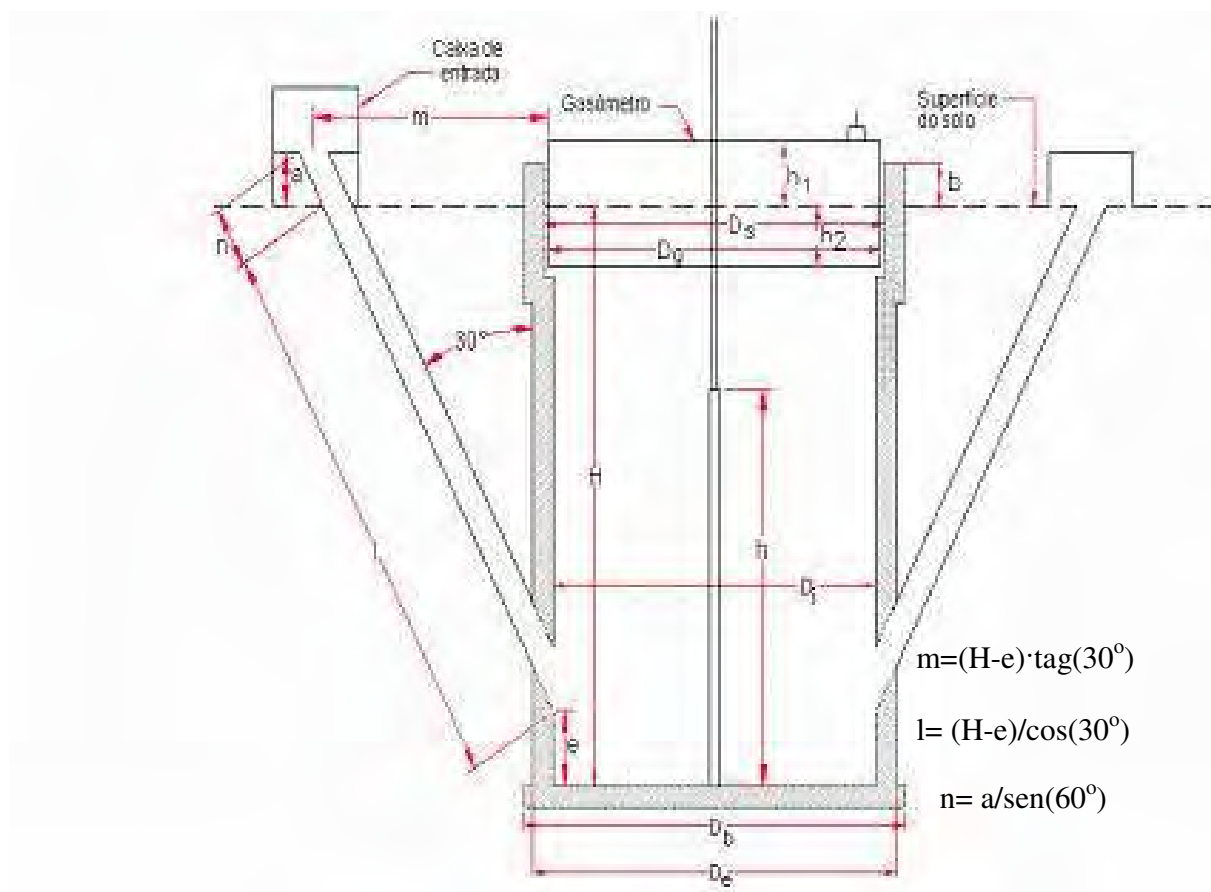


Figura 11. Croqui do biodigestor modelo indiano

Volume total de terra a ser escavado (V_{te}):

$$V_{te} = V_{tebi} + V_{tet} \dots \dots \dots (52)$$

Comprimento do tubo PVC (C_t):

$$C_t = C_{te} + C_{ts} \dots \dots \dots (53)$$

Comprimento do tubo de entrada (veja figura 11):

$$C_{te} = 1 + n = (H-e+ a)/ 0,86.....(54)$$

Comprimento do tubo de saída (veja figura 11)

$$C_{ts} = 1 = (H-e)/ 0,86.....(55)$$

O volume de concreto a ser utilizado para a base do biodigestor é calculado como:

$$V_{lc} = \pi \cdot \frac{D_b^2}{4} \cdot esp_b(56)$$

A área da superfície interna da parede cilíndrica inferior (A_{pci}) a ser revestida deve ser calculada pela equação:

$$A_{pci} = \pi \cdot D_i \cdot (H-h_2)(57)$$

A área da superfície interna da parede cilíndrica superior (A_{pcs}) a ser revestida é calculada como:

$$A_{pcs} = \pi \cdot D_s \cdot (h_1+h_2).....(58)$$

A área da superfície da parede divisória que deve ser revestida (A_{pd}) é a seguinte:

$$A_{pd} = 2 \cdot D_i \cdot h + 0,24 \cdot D_i.....(59)$$

onde,

h = altura da parede divisória

A caixa de abastecimento (ou caixa de entrada) deverá ter um volume igual ou superior ao volume de carga diária, e altura não superior a 0,60 m. Portanto para construção de uma caixa de entrada com base quadrada e 0,60 m de altura, deve-se calcular a medida dos lados (M_1) pela equação:

$$M_1 = \sqrt{\frac{v_e}{0,6}} \dots\dots\dots(60)$$

Por facilidade de operação, a altura total da caixa de abastecimento não deverá ultrapassar 1,40m (veja figura 8), sendo altura da base na superfície do solo igual a 0,20 m a caixa deverá estar suspensa 0,50 m da superfície do solo a ter uma base de fundo com 0,10 m de altura.

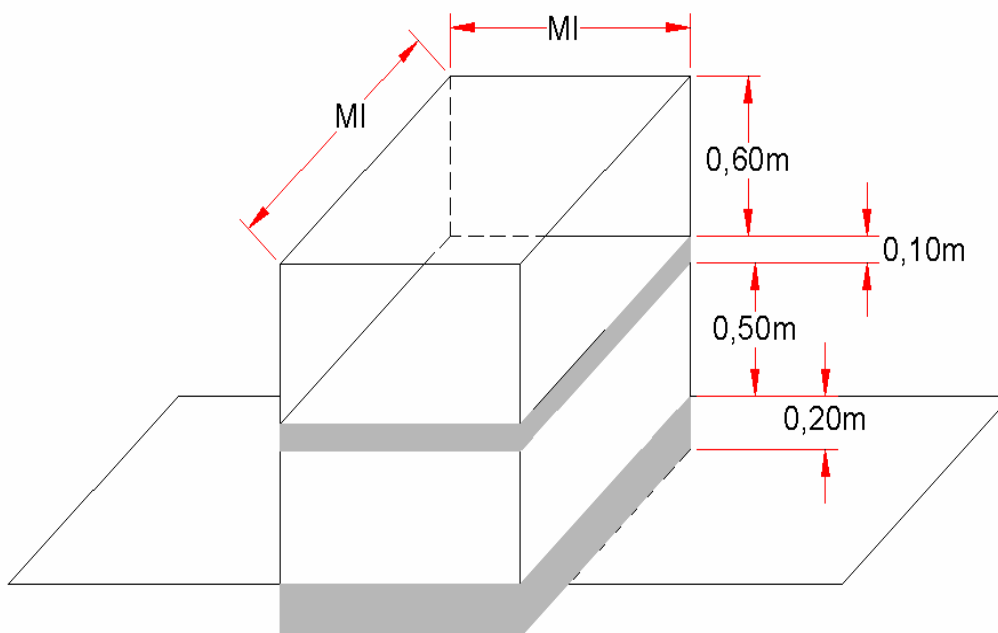


Figura 12. Caixa de abastecimento ou caixa de entrada

A área da superfície da caixa de abastecimento que deverá ser revestida será calculada por:

$$A_{\text{rca}} = 4(h_{\text{ca}} + \text{esp}_{\text{bfca}} + a) \cdot M_1 + 4h_{\text{ca}} \cdot M_1 + M_1^2 \dots \dots \dots (61)$$

onde,

A_{rca} = área da superfície da caixa de abastecimento a ser revestida

h_{ca} = altura total da caixa de abastecimento

a = altura acima da superfície

esp_{bfca} = espessura da base de concreto do fundo da caixa de abastecimento

Como a caixa de saída deve ter o mesmo volume da caixa de entrada, podem ser usadas as mesmas dimensões da caixa de abastecimento, sendo que esta deve ser instalada na altura da superfície do solo.

Para o gasômetro, construído por chapa de aço, deve ser calculada a área da superfície da chapa (A_{sc}) usando a equação a seguir:

$$A_{\text{sc}} = \left(\frac{\pi \cdot D_g^2}{4} \right) + \pi \cdot D_g \cdot (h_1 + h_2) \dots \dots \dots (62)$$

5.3.2 Biodigestor modelo chinês

Para biodigestor modelo chinês, seguem-se os cálculos a seguir:

A área mínima necessária para implantação do biodigestor modelo chinês (A_{ltc}), ou seja, a área mínima que deverá ser limpa para construção do biodigestor, como mostra a figura 13, pode ser calculada como:

$$A_{\text{ltc}} = (M_2 + D_c + D_s) \cdot D_c \dots \dots \dots (63)$$

onde,

M_2 = espaço entre a caixa de entrada e o biodigestor modelo chinês

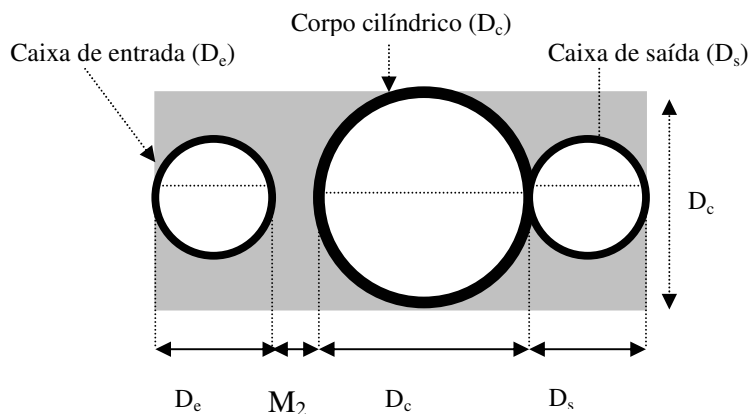


Figura 13. Área mínima necessária do terreno para a implantação do biodigestor modelo chinês

O volume de terra a ser escavado (V_{tec}) será a soma do volume de terra a ser escavado para a instalação do corpo cilíndrico, do gasômetro, da calota do fundo (V_{icc}), do tubo de PVC (V_{tct}) e o volume de terra a ser escavado para a caixa de saída (V_{ecs}):

$$V_{icc} = (h_g + H_c + h_f + 0,25) \cdot \pi \cdot \frac{D_c^2}{4} \dots\dots\dots(64)$$

$$V_{tct} = \frac{1}{2} M_2 \cdot \left(\frac{3}{4} H_c + H_g \cdot af \right) \cdot D_t \dots\dots\dots(65)$$

$$V_{ecs} = \pi \cdot \frac{D_s^2}{4} \cdot h_s + \pi \left(\frac{0,30}{2} \right)^2 \cdot \left(\frac{H}{3} + 0,20 \right) \dots\dots\dots(66)$$

$$V_{tec} = V_{icc} + V_{tct} + V_{ecs} \dots\dots\dots(67)$$

onde,

a_f = afundamento da cúpula no solo = 0,25 m

D_t = diâmetro do tubo de PVC

A área da superfície interna do biodigestor modelo chinês (A_{sic}) a ser revestido é calculada pela equação:

$$A_{sic} = 2 \cdot \pi \cdot R_g \cdot h_g - 0,09 \cdot \pi \dots \dots \dots (70)$$

A caixa de abastecimento deverá obedecer o critério de altura máxima de 1,40 m para facilitar a operação. Sendo o total dado pela soma de 0,20 m de altura da base na superfície do solo, 0,50 m altura em que a caixa deverá estar suspensa da superfície e 0,10 m para a altura do fundo da base de concreto da caixa de entrada.

A área da superfície da caixa de abastecimento que deverá ser revestida será calculada por:

$$A_{cac} = \pi \cdot D_e \cdot (h_e + esp_{bfca} + a + esp_b) \dots \dots \dots (71)$$

O volume de concreto a ser usado para o fundo da base da caixa de entrada é dada pela equação:

$$V_{cca} = \pi \cdot \frac{D_e^2}{4} \cdot esp_{bfca} \dots \dots \dots (72)$$

A área da superfície da caixa de saída a ser revestida é calculada pela equação:

$$A_{rcs} = \pi \cdot D_s \cdot h_s - 0,09\pi \dots \dots \dots (73)$$

5.3.3 Biodigestor modelo batelada

Para biodigestor modelo batelada seguem os cálculos:

Área mínima necessária que deverá ser limpa para implantação do biodigestor modelo batelada (A_{ltb}) (veja figura 15) pode ser calculada como:

$$A_{\text{tb}} = [N \cdot D_b + (N-1) \cdot 0,50] \cdot D_b \dots \dots \dots (74)$$

onde;

N = número de unidades biodigestoras que fazem parte da bateria

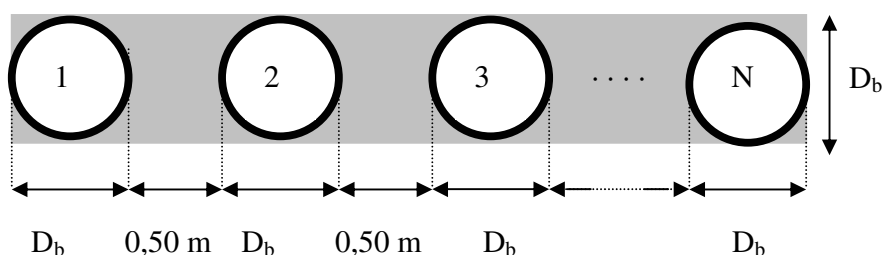


Figura 15. Área mínima necessária para a implantação do biodigestor modelo batelada

O volume de terra a ser escavado para a instalação das unidades biodigestoras (V_{bb}):

$$V_{\text{bb}} = N \cdot \left[\pi \cdot \frac{D_b^2}{4} \cdot (H + 0,20) \right] \dots \dots \dots (75)$$

O volume de concreto a ser usado na construção da base de cada unidade biodigestora (V_{icb}) é calculado como:

$$V_{\text{icb}} = N \cdot \pi \cdot \frac{D_b^2}{4} \cdot \text{esp}_b \dots \dots \dots (76)$$

A área da superfície interna da parede cilíndrica inferior (A_{pcib}) a ser revestido deve ser calculada pela equação:

$$A_{\text{pcib}} = \pi \cdot D_i \cdot (H - h_2) \dots \dots \dots (77)$$

A área da superfície interna da parede cilíndrica superior (A_{pcsb}) a ser revestida é calculada como:

$$A_{pcsb} = \pi \cdot D_s \cdot (h_1 + h_2) \dots \dots \dots (78)$$

Para o gasômetro, construído por chapa de aço, deve ser calculado a área da superfície da chapa (A_{cg}) calculada pela equação:

$$A_{cg} = \left(\frac{\pi \cdot D_g^2}{4} \right) + \pi \cdot D_g \cdot (h_1 + h_2) \dots \dots \dots (79)$$

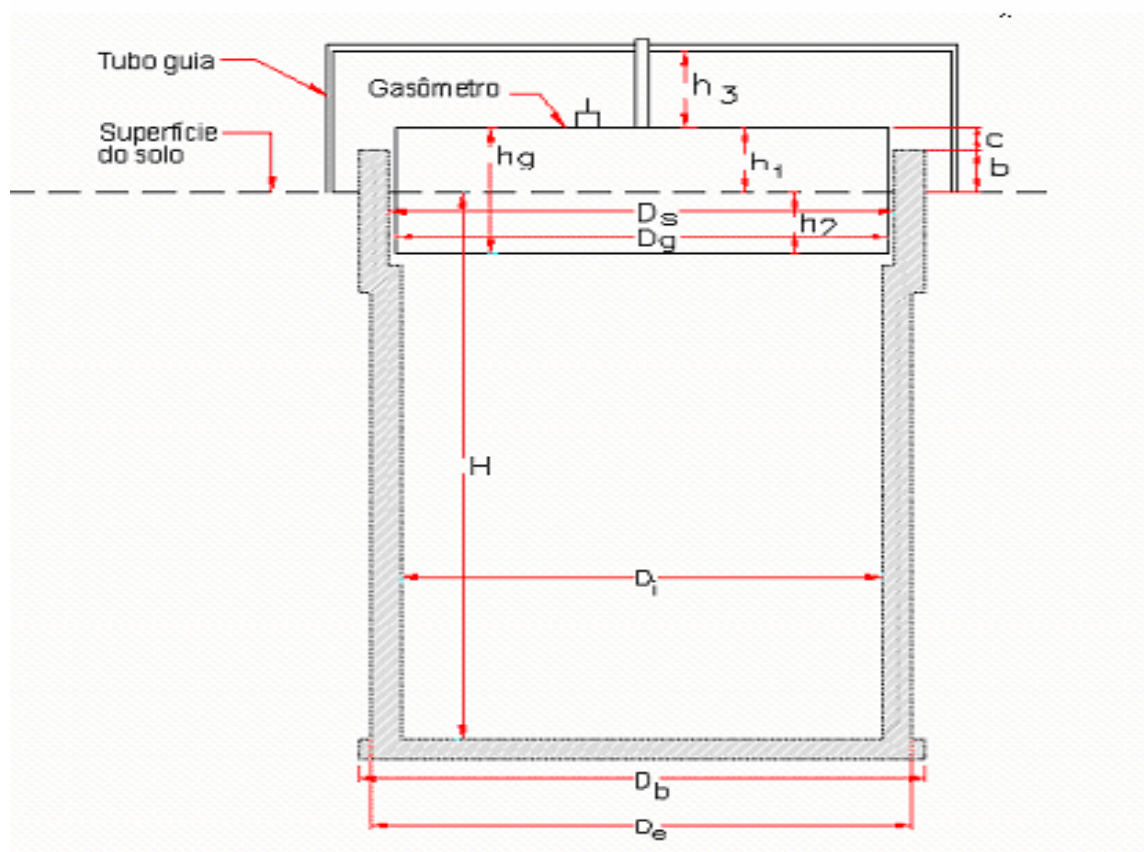


Figura 16. Croqui do biodigestor modelo batelada

5.4 Aplicativo computacional

Uma das propostas deste trabalho é a confecção de um aplicativo computacional que permite o desenvolvimento do projeto de construção de biodigestores rurais. Para isto, o usuário deste aplicativo deverá fornecer os dados de consumo de energia dos equipamentos a serem utilizados na propriedade, tais como número e potência de motores, número de pontos de iluminação, quantidade de cozimentos diários, aquecimento de chuveiros e torneiras, etc. Outros dados necessários são: número de pessoas na propriedade a serem beneficiadas pelo biogás e o tipo e a quantidade de matéria prima disponível diariamente ou em um determinado período de tempo na propriedade.

Com os dados fornecidos pelo usuário, o *software* escolhe o tipo de biodigestor que melhor se adapta as características da propriedade e faz os cálculos necessários, retornando como saída, os valores dos parâmetros do projeto e uma lista de materiais de construção a serem usados na execução deste projeto.

O aplicativo proposto contempla vários tipos de dejetos sólidos, contendo uma tabela com vários fatores de rendimento, para tipos mais comuns de matéria prima. Os tipos de biodigestores mais adaptáveis às características dos dejetos que serão considerados são indiano, chinês e batelada.

Para o desenvolvimento do aplicativo, foram utilizados o software MATLAB 6.1.0.450 (R12.1) e computadores existentes no Laboratório Científico de Informática (LCI) do Departamento de Bioestatística do Instituto de Biociências da UNESP de Botucatu, adquiridos com projeto FAPESP (processo nº 01/10393-2).

A aquisição dos dados experimentais foi feita a partir de literatura específica (SMITH et al., 1979). Estes dados consistem no fator de rendimento da matéria prima a ser utilizada, ou seja, na quantidade de biogás em litros por quilograma de matéria prima, a ser produzida utilizando alguns tipos de resíduos agropecuários nos biodigestores. Segundo Smith et al. (1979) o fator de rendimento para o dejetos do tipo suíno é 3, galinhas poedeiras é 1,5; gado de corte é 4,5; gado leiteiro é 6.

5.4.1 Fluxograma

A seguir é apresentado o fluxograma para o aplicativo computacional desenvolvido nesta dissertação, para auxiliar no dimensionamento de biodigestores rurais.

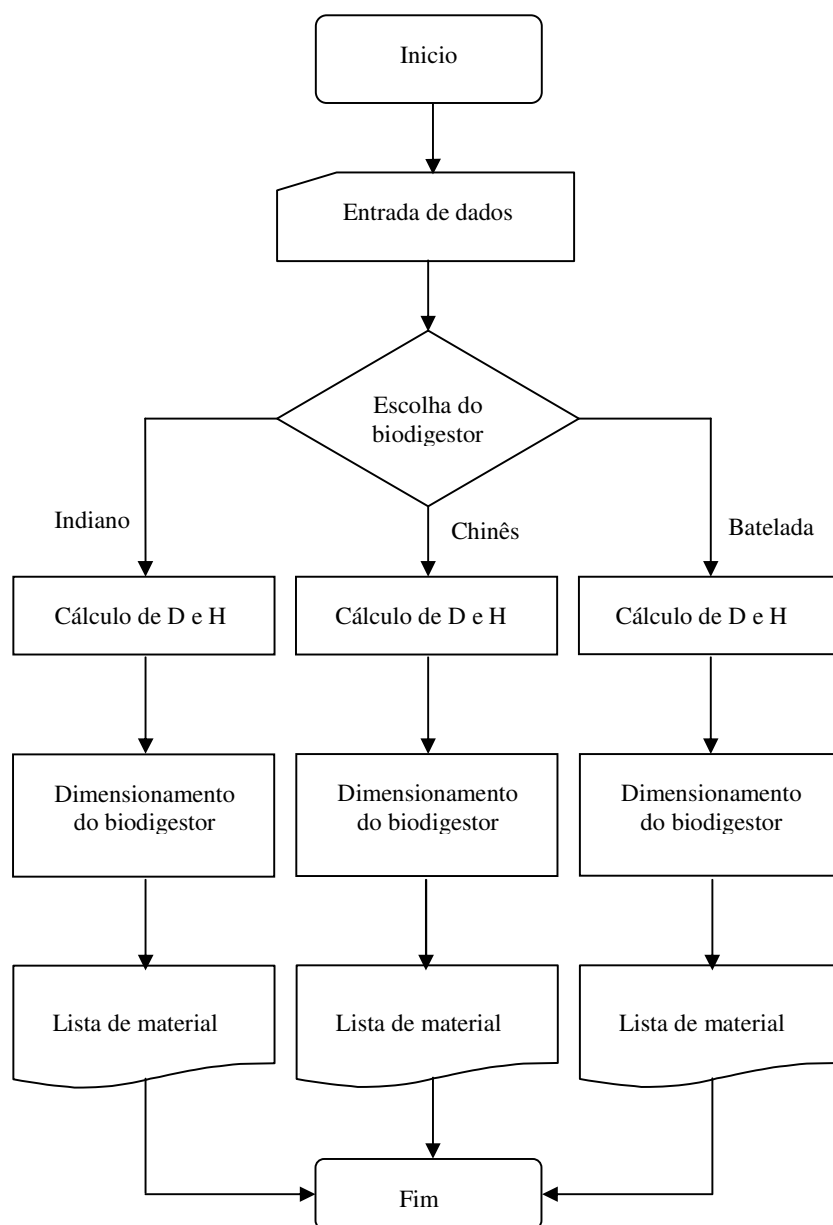


Figura 17. Fluxograma

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste trabalho buscou-se apresentar a importância dos biodigestores em áreas rurais como uma fonte alternativa de energia e um meio de reciclagem destes resíduos que se colocados em contato com o solo, de uma forma não controlada pode contaminar. Foi apresentado também uma metodologia para o cálculo dos parâmetros para projeto e edificação de biodigestores rurais, de acordo com a matéria prima e com as necessidades da área rural.

Para facilitar estes cálculos, foi confeccionado um aplicativo computacional com a seguinte estrutura:

1. Entrada de dados
2. Cálculo de B
3. Escolha do tipo de biodigestor
 - 3.1 Se biodigestor modelo Indiano
 - 3.1.1 Chama rotina para cálculo de D e H para biodigestor modelo Indiano
 - 3.1.2 Dimensionamento
 - 3.1.3 Saída
 - 3.2 Se biodigestor modelo Chinês
 - 3.2.1 Chama rotina para cálculo de D e H para biodigestor modelo Chinês

3.2.2 Dimensionamento

3.2.3 Saída

3.3. Se biodigestor modelo Batelada

3.3.1 Chama rotina para cálculo de D e H para biodigestor modelo Batelada

3.3.2 Dimensionamento

3.3.3 Saída

4.Fim

O aplicativo confeccionado possui uma interface gráfica de fácil acesso para o usuário (figura 18), contendo menus e janelas onde deve ser respondido um questionário de acordo com as necessidades da propriedade rural (figura 19).



Figura 18 Interface principal do aplicativo

O questionário a ser respondido, contém perguntas claras e objetivas, não dificultando o preenchimento. O usuário informa o tipo de resíduo que irá abastecer seu biodigestor, os aparelhos que farão uso do biogás e a frequência em dias que é retirado o

dejeito. Assim obterá o volume de biogás necessário para o funcionamento todos os equipamentos da propriedade.

The screenshot shows a MATLAB window titled 'Dimensionamento de Biodigestores Biogas'. The main window is titled 'Entrada de Dados' and contains the following fields:

Entre com os dados para que seja dimensionado e escolhido o tipo do biodigestor	
Tipo de resíduo =	Número de lâmpões =
(1) Gado leiteiro	Tempo (horas) de uso das lâmpões =
(2) Suíno	Número de chuveiros =
(3) Galinhas poedeiras	Número de refrigeradores =
(4) Gado de corte	Tempo (horas) de uso do refrigerador =
(5) Bovino fresco	Número de campanulas =
Número de animais da propriedade =	Tempo (horas) de uso das campanulas =
Número de pessoas que usam o biogas =	Número de incubadoras =
Número de motores =	Tempo (horas) de uso das incubadoras =
Potência do motor 1 =	Número de aquecedores =
Tempo (horas) de uso do motor 1 =	Tempo (horas) de uso dos aquecedores =
Potência do motor 2 =	Frequência (dias) de retirada do resíduo =
Tempo (horas) de uso do motor 2 =	
Potência do motor 3 =	
Tempo (horas) de uso do motor 3 =	

Buttons: Cancelar, Executar

Taskbar: Iniciar, MATLAB, Dimensionamento de Bio..., Entrada de Dados, quarta-feira, 7 de setembro de 2005, 12:20

Figura 19 Janela de entrada de dados

Ao preencher a entrada de dados, o aplicativo escolhe o modelo de biodigestor que melhor se adapta ao tipo de resíduo informado, realizando todos os cálculos necessários para o projeto. O aplicativo também fornece ao usuário uma lista de materiais de alvenaria para a construção do biodigestor e um croqui do modelo de biodigestor escolhido.

7 CONCLUSÃO

Uma alternativa bastante eficiente para problemas como escassez de energia, grande volume de dejetos animais e restos de culturas no meio rural é a reciclagem controlada dos resíduos em biodigestores. Os biodigestores podem promover o suprimento de energia e fertilizante para os produtores rurais. Desta forma, os biodigestores são muito importantes nas áreas rurais.

Neste trabalho foi apresentado técnicas que auxiliam os projetistas, os edificadores e os operadores de biodigestores, discutiu-se uma metodologia para os cálculos dos parâmetros para o projeto e construção de biodigestores, considerando os tipos e quantidades de resíduos presentes na propriedade rural e propôs um programa computacional para facilitar tais cálculos.

O aplicativo confeccionado é de grande importância no auxílio ao dimensionamento de biodigestores rurais, é de fácil manuseio e apresenta uma lista de materiais a serem utilizados na construção.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEOTI, O. et al. Engineering design and economic evaluation of a family-sized biogas project in Nigeria. **Technovation**, Essex, v. 20, p. 103 - 108, 2000.

AMARAL, L. A.; SCHOCKEN, D. B. L.; LUCAS JR., J. Redução de Bactérias Indicadoras de Poluição Fecal em Estrume de Aves de Postura Tratados por Biodigestão Anaeróbia. *Revista Brasileira de Ciência Avícola*, Campinas, v.2, n.1, p.27-30, 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-635X2000000100004&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 10 jun. 2004.

ANDRADE, M. A. et al. Biodigestores rurais no contexto da atual crise de energia elétrica brasileira e na perspectiva da sustentabilidade ambiental. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Anais...** Campinas: UNICAMP, 2002. 1 CD ROM.

BARI, S. Effect of carbon dioxide on the performance of biogas/diesel duel-fuel engine. In: WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS, 4., 1996, Denver, Colorado. **Anais...** Denver: NREL, 1996. p. 1007 – 1010.

BARRERA, P. **Biodigestores**: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural. São Paulo: Ícone, 1993. 106 p.

BAZARAA, M. S.; SHERALI, H. D.; SHETTY C. M. **Nonlinear programming**: theory and algorithms. 2. Ed. New York: John Wiley & Sons, 1993. 638 p.

BENINCASA, M.; ORTOLANI, A.F.; JUNIOR, J.L. **Biodigestores Convencionais?** Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal São Paulo, 1991. 25 p.

BERTSEKAS, D. P. **Nonlinear programming**. 2. Ed. Belmont, Massachusetts: Athena Scientific, 1999. 777 p.

BISCARO, A. F. V. **Modelagem matemática para determinação da eficiência da conservação de material orgânico para metano na biodigestão anaeróbia**. 2003. 63 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

CARIOCA, J. O. B.; ARORA, H. L. **Biomassa**: fundamentos e aplicações tecnológicas. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 1984. 644 p.

CÉZAR, V. R. S. **Efeito da biodigestão anaeróbia sobre a solubilização e a eficiência agrônômica de diferentes fontes de fósforo**. 2001. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**: princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Editora Segrac, 1997. v. 5, 246 p.

COLEN, F. **Caracterização de reatores de chicanas com utilização de substrato sintético.** 2000. 120 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

COMO FAZER e usar: biodigestor, biogás, bioadubo. Produção e distribuição de Agrodata – Vídeo. Curitiba: Vídeo Par, s.d. 1 videocassete (60 min), VHS, son., color.

COMPANHIA AUXILIAR DE EMPRESAS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **O biogás e sua tecnologia.** Rio de Janeiro, 1981. 36 p. (Série estudos e pesquisas, 2).

DANGOGGO, S. M., ALIYU, M., ATIKU, A. T. The effect of seeding with bacteria on biogas production rate. In: WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS, 4., 1996, Denver, Colorado. **Anais...** Denver: NREL, 1996. p. 1045-1048. 1996.

FLORENTINO, H.O. Mathematical tool to size rural digesters. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, p. 185-190, 2003.

HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. **MATLAB versão do estudante:** guia do usuário. São Paulo: Makron Books, 1997. 305 p.

HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. **MATLAB 6:** curso completo. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 676 p.

HARDOIM, P. C. **Efeito da temperatura de operação e da agitação mecânica na eficiência da biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos.** 1999. 88 f. Tese (Doutorado em Zootecnia/Produção Animal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1999.

HARDOIM, P. C.; LUCAS JÚNIOR, J. Efeito da temperatura e da agitação na produção de biogás na fase de partida de biodigestor anaeróbio operados com estrume de bovinos. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997, Campina Grande, Paraíba. **Anais...** Campina Grande: UFPb/SBEA, 1997. p. 394 – 396.

JASH, T. BASU, S. Development of a mini-biogas digester for lighting in India. **Energy**, Oxford, v. 24, p. 409-411, 1999.

KIRSOP, B. H.; HILTON, M. G.; POWELL, G. E.; ARCHER, D. B. Methanogenesis in the anaerobic treatment of food – processing wastes. In: **MICROBIOLOGICAL METHODS FOR ENVIROMENTAL BIOTECHNOLOGY**. 1984, Orlando: Academic Press, 1984. p. 139-157.

LALLAI, A.; MURA, G.; ONNIS, N. The effects of certain antibiotics on biogas production in the anaerobic digestion of pig waste slurry. **Bioresource Technology**, New York, v. 82, p. 205 – 208, 2002.

LASDON, L. S. **Optimization theory for large systems**. New York: Macmillan, 1970. 523 p.

LASTELLA, G. et al. Anaerobic digestión of semi-solid organic waste: biogas production and its purification. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 43, p. 63 – 75, 2002.

LEITE, V. D.; POVINELLI, J. Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, Paraíba, v. 3, n. 2, p. 229-232, 1999.

LUCAS JÚNIOR, J. **Estudo comparativo de biodigestores modelos indiano e chinês**. 1987. 114 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1987.

LUCAS JÚNIOR, J. **Algumas considerações sobre o uso do estrume de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios**. 1994. 137 f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 1994.

LUCAS JÚNIOR, J. & SILVA, F. M. Aproveitamento de resíduos agrícolas para a geração de energia. Simpósio – Energia, Automação e Instrumentação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 27., 1998, Poços de Caldas, Minas Gerais. **Anais...** Lavras/MG: UFLA, SBEA, 1998. p. 63-67.

LUCAS JÚNIOR, J.; GALBIATTI, J. A.; ORTOLANI, A. F. Produção de biogás a partir de estrume de ruminantes e monogástricos com e sem inóculo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 16., 1987, Jundiaí, São Paulo. **Resumos...** Jundiaí: DEA/IA/SBEA, 1987. p. 65.

LUENBERGER, D. G. **Linear and nonlinear programming**. 2. ed. Massachusetts: Addison – Wesley Publishing Company, 1984. 491 p.

MAGALHÃES, A. P. T. **Biogás**: um projeto de saneamento urbano. São Paulo: Nobel, 1986. 120 p.

MANDAL, T.; KIRAN, B. A.; MANDAL, N. K. Determination of the quality of biogas by flame temperature measurement. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 40, p. 1225 – 1228, 1999.

MATSUMOTO, E. Y. **MATLAB 6**: fundamento de programação. São Paulo: Érica, 2001. 314 p.

NAMIUCHI, N. N. **Biodigestão anaeróbia e características da cama de frangos obtida sob diferentes quantidades iniciais de casca de arroz e três tipos de cobertura de galpões em Dourados MS**. 2002. 122 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

NASCIMENTO, E. F. **Biodigestão anaeróbia: efeito do tempo de retenção hidráulica e recirculação do efluente, em substrato com estrume de suínos**. 1995. 86 f. Dissertação

(Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1995.

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

OGATA, K. **Projeto de sistemas lineares de controle com MATLAB.** Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1996. 202 p.

ORTOLANI, A.F.; BENINCASA, M. ; JUNIOR, J.L. **Biodigestores Rurais: modelos indiano, chinês e batelada.** Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal São Paulo, 1991. 35 p.

QUEIROZ, S. C. **Modelagem da produção acumulada de biogás em biodigestores tipo batelada segundo a porcentagem de inoculo adicionada utilizando os modelos de regressão não-linear de Gampertz e exponencial.** 2003. 112 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.

SCHOCKEN – ITURRINO, R. P.; et al., Biodigestores contínuos: isolamento de bactérias patogênicas no efluente. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 15, p. 105 – 108, 1995.

SEIXAS, J.; FOLLE, S.; MACHETTI, D. **Construção e funcionamento de biodigestores.** Brasília: Embrapa - DID, 1980. 60 p.

SMITH, R. J.; HEIN, M. E.; GREINER, T. H. Experimental methane production from animal excreta in pilot-scale and farm-size units. *Journal of animal science.* v. 48, n. 1, p. 202 – 217. 1979.

SOUZA, C. F. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: obtenção de dados e aplicação no desenvolvimento de um modelo dinâmico de simulação da produção de biogás.** 2001.

140 f. Tese (Doutorado em Zootecnia/Produção Animal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2001.

STEIL, L. **Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos.** 2001. 109 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2001.

STERLING JR., M. C.; LACEY, R. E.; ENGLER, C. R.; RICKE, S. C. Effects of ammonia nitrogen on H₂ and CH₄ production during anaerobic digestion of dairy cattle manure.

Bioresource Technology, New York, v. 77, p. 9-18. 2001.

THE MATHWORKS INC., MATLAB, high performance numeric computation and visualization software: Reference Guide, *The Mathworks Inc.*, 1992. 548 p.

VIJAY, V. K.; PRASAD, R.; SING., J. P.; SORAYAN, V. P. S. A case for biogas energy application for rural industries in India. In: WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS, 4., 1996, Denver, Colorado. **Anais...** Denver: NREL, 1996. p. 993 – 996. 1996.

APÊNDICE

MANUAL PARA UTILIZAÇÃO DO APLICATIVO

O conjunto de programas que formam o aplicativo desse trabalho foi desenvolvido com o MATLAB na versão 6.1.0.450 (R12. 1) sobre a plataforma do Windows. Segue o processo de instalação, utilização dos programas, exemplo e algumas observações sobre o funcionamento.

A.1 Como utilizar o aplicativo

1. Primeiramente, inicie o MATLAB, considerando que o aplicativo esteja no disco flexível (drive A): em seguida mude de diretório digitando no prompt dele:

- `cd a:\`

e tecle **Enter**.

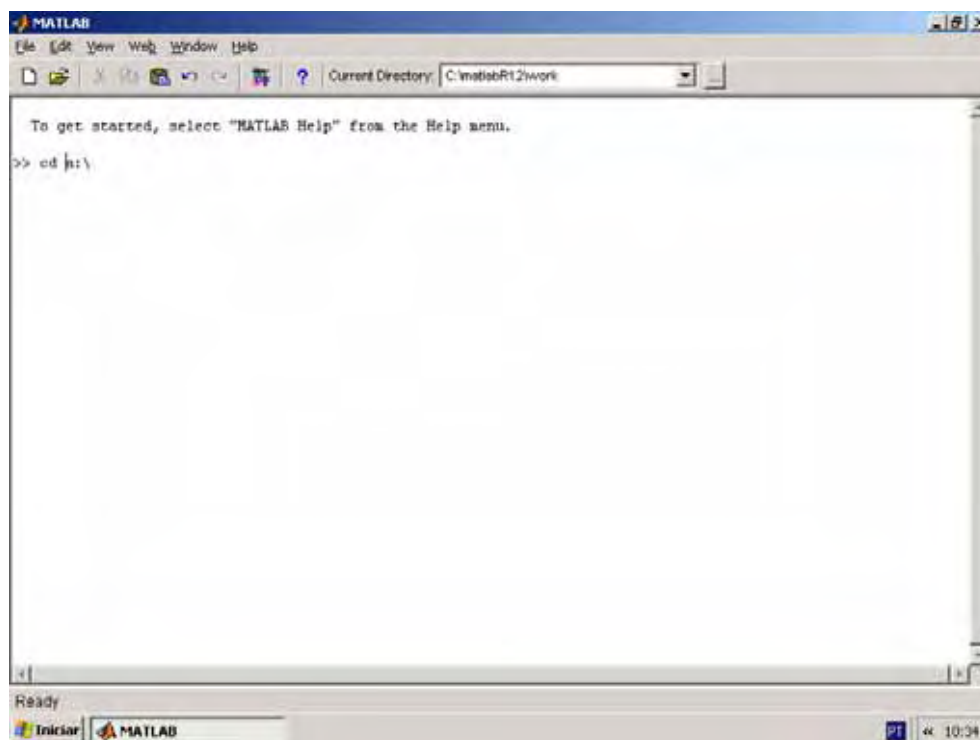


Figura A1. Janela de comandos do MATLAB

2. Em seguida digite **bio** e tecle **Enter**. Essa seqüência de comandos fará aparecer a interface principal do aplicativo.

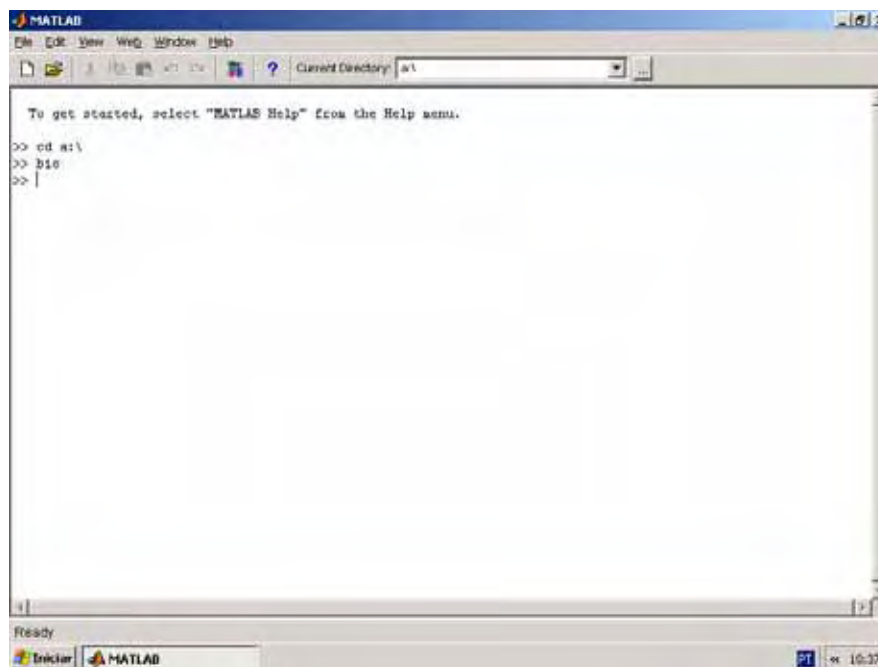


Figura A2. Janela de comandos do MATLAB chamando a interface principal



Figura A3. Interface principal

3. Clique em ARQUIVOS e a seguir aparecerá as opções INICIAR ou FECHAR.



Figura A4. Janela INICIAR ou FECHAR

4. Clicando em INICIAR, aparecerá uma janela de entrada de dados.

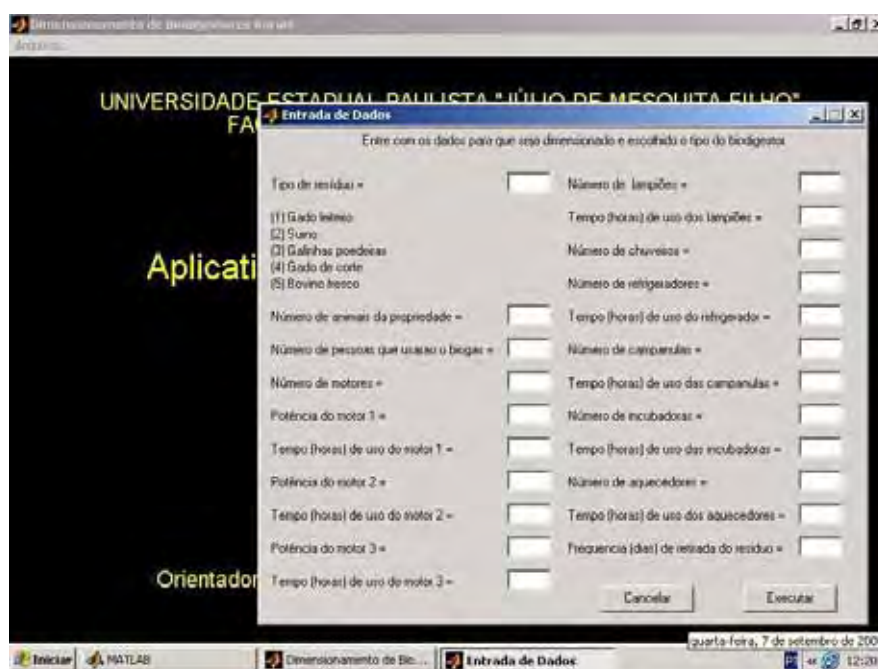


Figura A5. Janela de entrada de dados

5. Para preencher cada uma das lacunas em branco, posicione o cursor com o mouse dentro das mesmas ou aperte a tecla TAB para mudar de posição. Preencha as lacunas com todos os dados corretamente, não deixando faltar nenhum valor tendo os seguintes cuidados:
 - Os números decimais devem ser separados por ponto (.).
 - Caso tenha aparelhos que não farão uso do biogás preencher com zero.
6. Aperte o botão EXECUTAR e espere a execução dos cálculos, até que apareça os resultados no WORDPAD. Se desejar cancelar a entrada de dados, aperte o botão CANCELAR.
7. Para voltar à interface principal, clique em ARQUIVOS e depois em SAIR. Isso pode também ser feito apertando o botão X no canto superior direito da janela.
8. Para voltar ao MATLAB, clique em ARQUIVOS e depois em FECHAR. Isso pode também ser feito apertando o botão X no canto superior direito da janela.

Segue, a apresentação de um exemplo do procedimento para utilização do aplicativo, desde a entrada de dados até a visualização das dimensões do biodigestor obtido.

A.2 Exemplo

Dimensionar um biodigestor, em alvenaria de tijolo, com gasômetro de chapa de ferro, para atender as seguintes necessidades energéticas diárias:

- Cozimento para 5 pessoas.
- Um motor de 5 HP, 1 h/dia.
- Iluminação com 6 lâmpadas de 40 W durante 4 h/dia.
- Banho para 5 pessoas.

1. Clique a seguinte seqüência: ARQUIVOS → INICIAR.



Figura A6. Janela para iniciar os cálculos

2. Em seguida preencha cuidadosamente o questionário (ENTRADA DE DADOS).

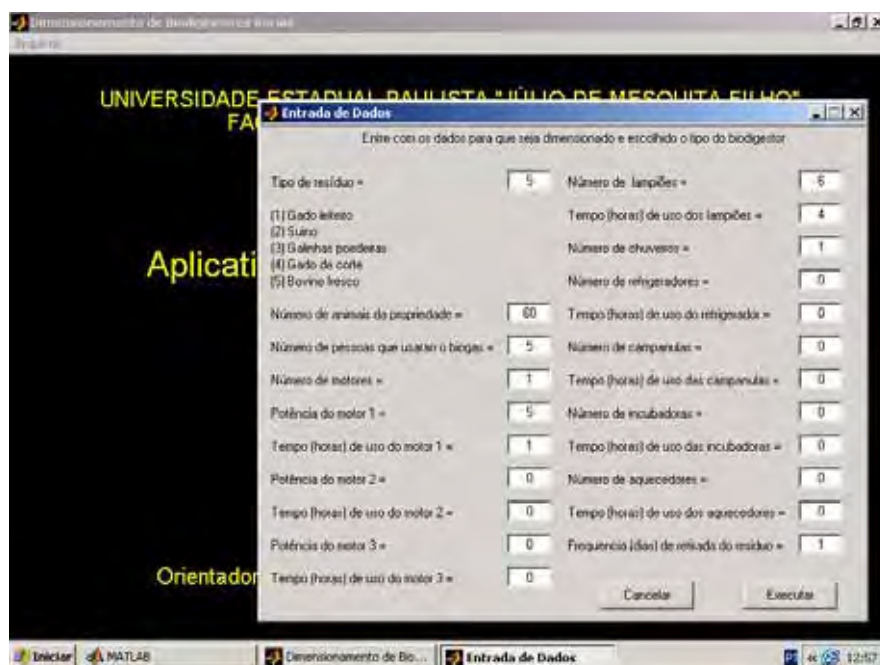


Figura A7. Janela de entrada de dados preenchida

3. Após preencher o questionário, tecler em EXECUTAR, em seguida aparecerá o modelo de biodigestor mais favorável ao tipo de resíduo, os resultados obtidos para as dimensões do biodigestor e a lista de material.

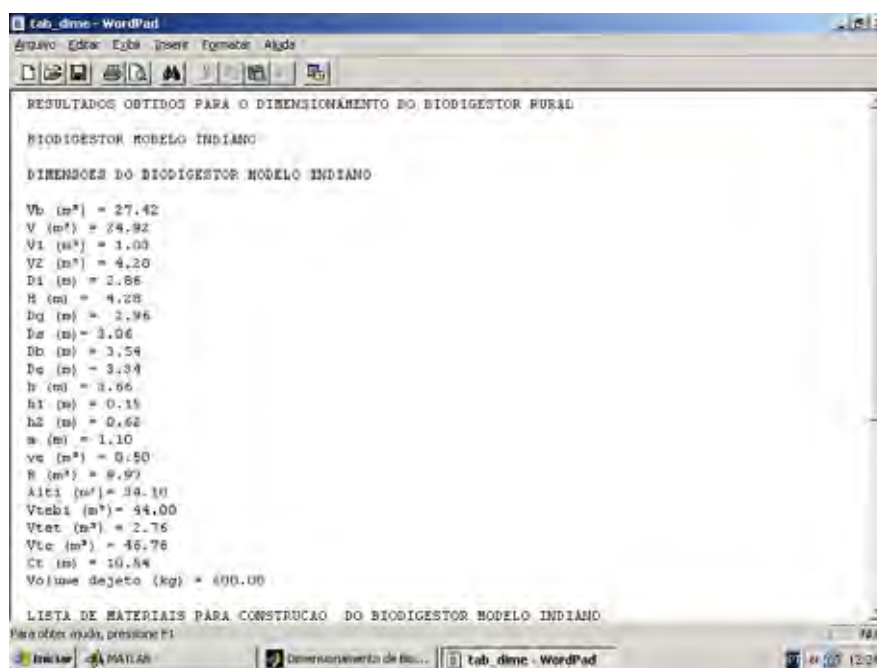


Figura A8. Janela de resultados