

BIODIGESTORES

**MANUAL PRÁCTICO
DE DISEÑO**



**DIMENSIONAMIENTO, DISEÑO
Y CONSTRUCCIÓN DE
BIODIGESTORES Y
PLANTAS DE BIOGÁS**

**DIPL. ING. SANITARIO AMBIENTAL – ING. CIVL
GABRIEL MONCAYO ROMERO**

2020

Biodigestor en fabrica de lácteos



Biodigestor en fabrica de plasma





Créditos

Elaborado por:
AquaLimpia Engineering e.k.

Autor:
Dipl. Ing. Gabriel Moncayo Romero
Niendorferstr. 53b
29525 Uelzen
Alemania
0049-581-3890550
aqua@aqualimpia.com

Diseño y edición:
Maike Moncayo Hilmer

EDICIÓN: Aqualimpia Engineering e.K.
AUTOR: Dipl. Ing. Sanitario – Ing. Civil **Gabriel Moncayo Romero**
DISEÑO GRÁFICO: Maike Moncayo Hilmer
ILUSTRACIONES: GeoCad - Diseño gráfico
ISBN: 978-9942-01-719-2



Última revisión: 01/08/2020

Dipl. Ing. Gabriel Moncayo Romero

Su experiencia incluye 45 años de trabajos en la preparación de estudios de factibilidad, diseño conceptual, diseños detallados, construcción y supervisión de proyectos de aprovechamiento de biomasa, gestión de residuos, biodigestores, energías renovables, plantas depuradoras UASB, lagunas de oxidación, saneamiento ambiental y salubridad (redes de alcantarillado, rellenos sanitarios, reciclaje). Licitación, supervisión y construcción de obras en Latino América y Europa.

Estudios de ingeniería de recursos hidráulicos en Alemania en la Universidad Nord Ost Niedersachsen.

Actualmente ocupa el puesto de Director de Proyectos para la empresa Aqualimpia Engineering e.K. de Alemania.

Todas las fotografías que no tienen pie de fuente son propiedad intelectual de
Aqualimpia Engineering e.k. de Alemania
Fotografías propiedad intelectual de Aqualimpia Engineering e.K.
No es permitido el uso comercial en páginas web



PINCHANDO REGRESA A LA TABLA DE CONTENIDO



PINCHANDO REGRESA A INICIOS DEL CAPITULO



PINCHANDO SE PUEDE VER UN VIDEO EN YOUTUBE

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AGCL	Ácidos Grasos de Cadena Larga
AGV	Ácidos Grasos Volátiles
AG	Ácidos grasos
BG	Biogas
BHP	Boiler Horse Power
BTU	Boiler Thermal Units
C	Carbono
C:N	Relación Carbono - Nitrógeno
CDM	Clean Development Mechanism
CERs	Certificados de emisiones reducidas
CHP	Combined Heat and Power
CHV	Carga Hidráulica Volumétrica
CO&M	Costos de Operación y Mantenimiento
COV	Carga Orgánica Volumétrica
DQO	Demanda Química de Oxígeno
d	día
DBO5	Demanda Bioquímica de Oxígeno
EPDM	Etileno, Propileno, Dieno, Monómero
GEI	Biogás de Efecto Invernadero
GLP	Biogás Licuado Petróleo
HDPE	Membrana de alta densidad
MH	Masa húmeda
MS	Masa Seca
MV	Masa Volátil
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
POME	Palm Oil Mill Effluent
PCI	Poder Calorífico Inferior
PE	Polietileno
PFC	Perfluorcarbonos
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
ST	Sólidos Totales
RPM	Revoluciones por minuto
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UGM	Unidad de Ganado Mayor
UNFCCC	C. Marco Cambio Climático de la ONU

ELEMENTOS QUIMICOS

CH ₃ -COOH	Acido acético
CH ₃ -CH ₂ -COOH	Acido propiónico
H ₂ So ₄	Acido sulfúrico
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
H	Hidrógeno
H ₂ O	Agua
H ₂ S	Sulfuro de Hidrógeno
HCl	Ácido clorhídrico
K	Potasio
K ₂ O	Óxido de Potasio
pH	Potencial Hidrógeno (Acidez)
N	Nitrógeno
NH ₃	Amoniac
NH ₄	Amonio
HCO ₃	Bicarbonato de amonio
Ni	Níquel
Mg	Magnesio
Mn	Manganeso
N-NH ₄	Nitrógeno Amoniacal
O ₂	Oxígeno
P	Fósforo
P ₂ O ₅	Fosfatos
Pb	Plomo
S	Azufre
SO ₂	Dióxido de azufre
SO ₄	Sulfatos

UNIDADES DE MEDIDA

BTU	British Thermal Units
g/kg	Gramos por kilogramo
g/kg	Gramos por kilogramos
g/l	Gramos por litro
g/l DQO	Gramos por litro de DQO
Hz	hercios
kg	Kilogramos
kg/m ³ .d	Kilogramo por metro cúbico por día
kg.MV/m ³ .d	Kilogramo de masa volátil por metro cubico y por dia
kcal	Kilo calorías
kW	Kilovatios
kWh	Kilovatios hora
MW	Megavatios
MWh	Megavatios hora
m ³ /d	Metro cúbico por día
m ³ /kg	Metro cúbico por kilogramo
m ³ /m ³ *d	Metro cúbico por metro cúbico por día
m ³ /t	Metros cúbicos por toneladas
m ³ /h	Metros cúbicos por hora
m ³ /t.MH	Metros cúbicos por tonelada Masa Húmeda
m ³ /t	Metros cúbicos por toneladas
mg	Miligramos
mg/kg	Miligramos por kilogramo
mg/l	Miligramos por litro
MJ	Mega Joule
Nm ³ /kg	Volumen normado de biogás por kg
Pa	Pascal
MPa	Mega Pascal
ppm	Partes por millón

Tabla de contenido

1.	BIODIGESTORES TROPICALIZADOS	29
2.	SISTEMAS DE BIODIGESTION	35
2.1	PROCESO DE BIODIGESTIÓN	37
2.2	BENEFICIOS QUE APORTAN LOS BIODIGESTORES	40
3.	BIOMASA.....	45
4.	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	50
4.1	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE ESTIÉRCOL DE CERDO	53
4.2	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO.....	58
4.3	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE GALLINAZA Y POLLINAZA	63
4.4	RESIDUOS DE MATADEROS Y RASTROS (FRIGORIFICOS)	72
4.4.1	PRODUCCIÓN DE AGUAS ROJAS.....	76
4.4.2	PRODUCCIÓN DE AGUAS VERDES.....	79
4.4.3	PRODUCCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS.....	84
4.4.4	APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	89
4.4.5	PRODUCCIÓN DE BIOGÁS	91
4.5	APROVECHAMIENTO DE VINAZAS.....	96
4.6	AGUAS RESIDUALES EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA AFRICANA.....	101
4.7	RESIDUOS DOMICILIARIOS	107
4.9	APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS LÁCTEOS	115
4.9	APROVECHAMIENTO DE OTROS RESIDUOS AGROINDUSTRIALES	122
5.	DIMENSIONAMIENTO DE BIODIGESTORES	125
5.1	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	126
5.2	PARÁMETROS REQUERIDOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO.....	129
5.2.1	CARGA ORGÁNICA VOLUMÉTRICA (COV).....	130
5.2.2	MASA SECA (MS).....	131
5.2.3	MASA VOLÁTIL (MV)	133
5.3.4	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH)	133
5.3	DIMENSIONAMIENTO DE UN BIODIGESTOR	136
5.4	DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE MEZCLA Y ALIMENTACIÓN	152
5.5	DIMENSIONAMIENTO DE LAGUNA DE DESCARGA	155
5.6	DIMENSIONAMIENTO DE LECHO DE SECADO DE LODOS	161
5.6.1	GENERALIDADES	161
5.6.2	LECHOS DE SECADO	163
5.6.2.1	DIMENSIONAMIENTO	164
5.6.3	SEPARADORES DE SÓLIDOS	171

6.	BIODIGESTORES TROPICALIZADOS TIPO LAGUNA	172
6.1	CONSTRUCCIÓN DE LA LAGUNA DEL BIODIGESTOR.....	176
6.2	MEMBRANA PARA LA IMPERMEABILIZACIÓN DE LA LAGUNA	182
6.3	MURO PERIMETRAL PARA SUJETAR LA MEMBRANA	192
6.4	INSTALACIÓN DE TUBERÍAS.....	206
6.4.1	TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN DE BIOMASA.....	206
6.4.2	TUBERÍAS DE ALIMENTACIÓN.....	207
6.4.2	TUBERÍAS DE DESCARGA.....	215
6.4.3	TUBERÍAS DE CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN DE BIOGÁS	219
6.4.3.1	CAPTACIÓN DE BIOGÁS.....	219
6.4.3.2	TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN DE BIOGÁS	223
6.4.3.3	INCORRECTA CAPTACIÓN DE BIOGÁS.....	230
6.4.3.3	CONDUCCIÓN DE BIOGÁS HACIA LA ANTORCHA	235
6.4.3.4	EXTRACCIÓN DE BIOGÁS EN EMERGENCIA.....	237
6.5	VÁLVULAS DE CONTROL DE PRESIÓN	238
6.6	MEMBRANAS PARA BIODIGESTORES	243
6.6.1	TÉCNICAS PARA SUJETAR LA MEMBRANA DE CUBIERTA	244
6.7	SISTEMAS DE AGITACIÓN	259
6.7.1	AGITACIÓN MECÁNICA	263
6.7.2	AGITACIÓN NEUMÁTICA.....	274
6.8	EXTRACCIÓN Y RECIRCULACIÓN DE LODOS.....	274
7.	EQUIPOS REQUERIDOS	279
7.1	MEMBRANAS DE FONDO Y CUBIERTA.....	279
7.5	SOPLADORES Y TREN DE CALIBRACIÓN.....	280
7.6	ANTORCHAS.....	286
7.7	MEZCLADORES Y AGITADORES	289
7.7	GENERADORES.....	293
8.	CONTROL DE PROCESO	296
8.1	CAUDAL DE BIOGÁS	300
8.2	CONCENTRACIÓN DE METANO	302
8.3	CALIBRACIÓN DEL BIOGÁS.....	303
8.4	CAPTACIÓN Y CONDUCCIÓN DE BIOGAS.....	303
8.5	TEMPERATURA.....	304
8.6	ACIDEZ (PH).....	305
8.7	ALCALINIDAD	306
8.8	POTENCIAL REDOX.....	307
8.9	ACIDOS GRASOS VOLÁTILES.....	307
8.10	SULFURO DE HIDROGENO (H ₂ S).....	308
8.11	NITRÓGENO AMONIAICAL	309
8.12	FOS/TAC	310
8.13	RELACIÓN C:N	311

8.14	DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGENO (DBO ₅)	314
8.15	DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO)	314
8.16	PORCENTAJE DE DEGRADACIÓN	315
9.	APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS	317
9.1	APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS EN GENERADORES	320
9.1.1	DIMENSIONAMIENTO DE GENERADORES A BIOGÁS	321
9.2	COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS EN CALDERAS.....	325
9.3	APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS PARA VEHICULOS	332
9.3.1	PLANTA DE BIOMETANIZACIÓN	334
9.3.1.1	SEPARACIÓN POR MEMBRANAS.....	336
9.3.1.2	SEPARACIÓN POR PROCESO PSA	338
9.2.1.3	MÉTODOS DE ABSORCIÓN	340
9.3.2	DESARROLLO DE PROYECTOS DE BIOMETANIZACIÓN	341
10.	PURIFICACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL BIOGÁS.....	345
10.1	REDUCCIÓN DE SULFURO DE HIDROGENO (H ₂ S).....	346
10.1.1	REMOCIÓN BIOLÓGICA DEL H ₂ S EN EL BIODIGESTOR	349
10.1.2	REMOCIÓN BIOLÓGICA DEL H ₂ S EN BIOFILTROS	355
10.1.3	REDUCCIÓN CON OXIDO DE HIERRO	358
10.1.4	REDUCCIÓN CON LECHADAS DE OXIDO DE HIERRO	361
10.1.5	REDUCCIÓN DE H ₂ S CON CARBÓN ACTIVADO	362
10.2	REDUCCIÓN DE HUMEDAD – ENFRIADORES DE BIOGÁS.....	368
10.2.1	ENFRIADORES DE BIOGÁS.....	368
10.2.1	TANQUES DE REDUCCIÓN DE CONDENSADOS	371
10.3	FILTROS DE RETENCIÓN DE ESPUMAS.....	372
10.4	FILTROS DE RETENCIÓN DE PARTICULAS.....	373
10.5	FILTROS DE GEL DE SILICE.....	375
11.	APROVECHAMIENTO DE EFLUENTES DEL BIODIGESTOR	377
12.	TRATAMIENTO DE EFLUENTES DEL BIODIGESTOR.....	388
12.1	HUMEDALES.....	388
12.2	VERMIFILTROS	390
12.3	REACTORES UASB.....	391
13.	ANÁLISIS COSTO - BENEFICIO.....	396
13.1	COSTOS DE INVERSIÓN	397
13.2	DEPRECIACIÓN DE LAS INSTALACIONES	398
13.3	COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO (O&M)	399
13.4	INGRESOS POR GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	400
13.5	INGRESOS POR VENTA DE FERTILIZANTE ORGÁNICO.....	400
13.6	ANÁLISIS COSTO BENEFICIO	401

14.	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE BIODIGESTORES.....	404
14.1	PUESTA EN MARCHA.....	405
14.2	ALIMENTACIÓN REGULAR.....	409
14.3	TAREAS DE MANTENIMIENTO.....	411
14.4	MANTENIMIENTO Y CONTINGENCIAS.....	415
14.5	INHIBIDORES DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	419
14.5.1	SOBRECARGA ORGÁNICA.....	420
14.5.2	SOBRECARGA HIDRÁULICA.....	420
14.6	INHIBIDORES DEL PROCESO.....	420
15.	SEGURIDAD INDUSTRIAL Y SEÑALIZACIÓN.....	422
15.1	HIGIENE Y SALUD.....	423
15.2	ZONAS DE RIESGO.....	425
15.3	PRECAUCIONES USOS DEL BIOGÁS.....	428
16.	MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y EQUIPOS.....	432
17.	PROPIEDADES DE LOS GASES.....	437
	BIBLIOGRAFIA.....	440

Índice de fotografías

FOTOGRAFÍA 1: PLANTA DE BIOGÁS CONSTRUIDA EN ALEMANIA.....	29
FOTOGRAFÍA 2: BODIGESTOR CONSTRUIDO EN ALEMANIA	29
FOTOGRAFÍA 3: BODIGESTOR REVESTIDO CON MATERIAL AISLANTE.....	30
FOTOGRAFÍA 4: BODIGESTOR TROPICALIZADO	32
FOTOGRAFÍA 5: BODIGESTOR SOBRE TIERRA PARA CLIMA FRIO	32
FOTOGRAFÍA 6: BODIGESTOR TROPICALIZADO PARA ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO	33
FOTOGRAFÍA 7: BODIGESTOR TROPICALIZADO	35
FOTOGRAFÍA 8: BODIGESTOR TROPICALIZADO	36
FOTOGRAFÍA 9: BODIGESTOR TROPICALIZADO PARA APROVECHAMIENTO DE GALLINAZA PURA	43
FOTOGRAFÍA 10: VERTIDO DE ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO AL MEDIO AMBIENTE	45
FOTOGRAFÍA 11: PRODUCCIÓN DE ESTIÉRCOL	46
FOTOGRAFÍA 12: RESIDUOS DEL PROCESO DE VERDURAS A NIVEL INDUSTRIAL.....	48
FOTOGRAFÍA 13: CONFINAMIENTO DE CERDOS TIPO "A"	53
FOTOGRAFÍA 14: CONFINAMIENTO DE CERDOS TIPO "B".....	54
FOTOGRAFÍA 15: FORMACIÓN DE ESPUMAS	55
FOTOGRAFÍA 16: ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO.....	58
FOTOGRAFÍA 17: ETIÉRCOL (MAJADA) - REQUIERE AGITACIÓN.....	59
FOTOGRAFÍA 18: ESTIÉRCOL DE GANADO CON ALTA MS.....	59
FOTOGRAFÍA 19: MAJADA DE GANADO VACUNO EN "FEEDLOT"	60
FOTOGRAFÍA 20: ESTIÉRCOL APLASTADO Y CON RESTOS DE PIENSO	60
FOTOGRAFÍA 21: FORMACIÓN DE COSTRAS EN BODIGESTOR.....	61
FOTOGRAFÍA 22: BODIGESTOR ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO	62
FOTOGRAFÍA 23: POLLOS DE ENGORDE SOBRE PISO	63
FOTOGRAFÍA 24: PONEDORAS DE HUEVOS.....	64
FOTOGRAFÍA 25: CARBONATO DE CALCIO	66
FOTOGRAFÍA 26: BODIGESTOR ALIMENTADO CON GALLINAZA PURA DE UN MILLÓN DE AVES.....	71
FOTOGRAFÍA 27: PRODUCCIÓN DE AGUAS ROJAS EN MATADERO DE RESES.....	72
FOTOGRAFÍA 28: AGUAS DE MATADEROS DE RESES.....	73
FOTOGRAFÍA 29: SEPARADOR DE SÓLIDOS EN MATADERO.....	74
FOTOGRAFÍA 30: DESCARGA DE AGUAS ROJAS.....	76
FOTOGRAFÍA 31: CUEROS DE RESES.....	77
FOTOGRAFÍA 32: AGUAS VERDES	79
FOTOGRAFÍA 33: RUMEN GANADO VACUNO.....	79
FOTOGRAFÍA 34: RUMEN FRESCO	80
FOTOGRAFÍA 35: ESTIÉRCOL EN PATIOS DE ESPERA	81
FOTOGRAFÍA 36: BODIGESTORES COLAPSADOS POR FORMACIÓN DE COSTRAS – FRIGORÍFICO EN BRASIL ...	82
FOTOGRAFÍA 37: BODIGESTOR LLENO DE COSTRAS Y COLAPSADO	82
FOTOGRAFÍA 38: BODIGESTOR COLAPSADO POR FALTA DE SISTEMAS DE AGITACIÓN.....	83
FOTOGRAFÍA 39: RESIDUOS NO COMESTIBLES	84
FOTOGRAFÍA 40: TRITURADOR DE CERDOS (SÓLIDOS) INSTALADO EN MATADERO EN PANAMÁ	85
FOTOGRAFÍA 41: GRASAS DE SEPARADORES	86
FOTOGRAFÍA 42: GRASAS DE SEPARADORES	87
FOTOGRAFÍA 43: PLANTA PILOTO ENSAYOS PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	93
FOTOGRAFÍA 44: AGUAS RESIDUALES MUY CONTAMINANTES EN MATADERO DE RESES	95
FOTOGRAFÍA 45: APROVECHAMIENTO DE VINAZAS	96
FOTOGRAFÍA 46: VINAZAS	98
FOTOGRAFÍA 47. PRODUCCIÓN DE VINAZAS.....	99
FOTOGRAFÍA 48: LAGUNA CON DESCARGAS DE POME.....	101
FOTOGRAFÍA 49: LAGUNA LLENAS DE ACEITE MEZCLADO CON POME.....	101

FOTOGRAFÍA 50: FORMACIÓN DE COSTRAS POR SOLIDIFICACIÓN DE POME.....	102
FOTOGRAFÍA 51: MEMBRANA DE FONDO LEVANTADA	104
FOTOGRAFÍA 52: BIODIGESTOR REVENTADO POR FALTA DE VÁLVULA DE CONTROL DE PRESIONES	104
FOTOGRAFÍA 53: BIODIGESTOR DESINFLADO	105
FOTOGRAFÍA 54: BIODIGESTOR CON MEMBRANA DE CUBIERTA INADECUADA	105
FOTOGRAFÍA 55: LAGUNA TRATAMIENTO DE POME	106
FOTOGRAFÍA 56: EJEMPLO DE CARACTERIZACIÓN DE RSU	108
FOTOGRAFÍA 57: TAMBOR PARA SEPARACIÓN DE ORGÁNICOS	110
FOTOGRAFÍA 58: CLASIFICACIÓN DE RSU	111
FOTOGRAFÍA 59: APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS DOMICILIARIOS	114
FOTOGRAFÍA 60: RESIDUOS LÁCTEOS EN TANQUE DE SEDIMENTACIÓN	115
FOTOGRAFÍA 61: DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES CON LODOS ACTIVADOS	116
FOTOGRAFÍA 62: BIODIGESTOR EN FÁBRICA DE LÁCTEOS	120
FOTOGRAFÍA 63: PLANTA DEPURADORA LODOS ACTIVADOS - CONSUMIDOR DE ENERGÍA.....	121
FOTOGRAFÍA 64: TANQUE DE MEZCLA AL PIE DE LA PRODUCCIÓN DE RESIDUOS	152
FOTOGRAFÍA 65: TANQUE DE MEZCLA EN CONSTRUCCIÓN	153
FOTOGRAFÍA 66: TANQUE DE MEZCLA EN OPERACIÓN	153
FOTOGRAFÍA 67: CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE DE MEZCLA FOTOGRAFÍA ANTERIOR	154
FOTOGRAFÍA 68: CONSTRUCCIÓN DE TANQUE DE MEZCLA	154
FOTOGRAFÍA 69: LAGUNA DE DESCARGA	155
FOTOGRAFÍA 70: LAGUNA DE DESCARGA	156
FOTOGRAFÍA 71: LAGUNA DE DESCARGA EN CONSTRUCCIÓN	158
FOTOGRAFÍA 72: CONSTRUCCIÓN DE LAGUNA DE DESCARGA	159
FOTOGRAFÍA 73: CONSTRUCCIÓN DE LA LAGUNA DE DESCARGA	160
FOTOGRAFÍA 74: LAGUNA DE DESCARGA EN OPERACIÓN.....	160
FOTOGRAFÍA 75: LODOS MINERALIZADOS DEL BIODIGESTOR.....	161
FOTOGRAFÍA 76: LECHO DE SECADO DE LODOS	161
FOTOGRAFÍA 77: LECHO DE SECADO EN OPERACIÓN	162
FOTOGRAFÍA 78: LODOS SECOS - LECHO DE SECADO	162
FOTOGRAFÍA 79: LECHO DE SECADO DE LODOS	164
FOTOGRAFÍA 80: LODO SECO	164
FOTOGRAFÍA 81: LODO SECO - FERTILIZANTE ORGÁNICO	165
FOTOGRAFÍA 82: ALTERNATIVA DE SECADO DE LODOS.....	165
FOTOGRAFÍA 83: LECHO DE SECADO DE LODOS	167
FOTOGRAFÍA 84: LECHO DE SECADO DE LODOS CON LODOS SECOS	168
FOTOGRAFÍA 85: CONSTRUCCIÓN DE LECHO DE SECADO DE LODOS	169
FOTOGRAFÍA 86: CONSTRUCCIÓN DE LECHO DE SECADO DE LODOS	170
FOTOGRAFÍA 87: SEPARADOR DE SÓLIDOS - PRODUCCIÓN DE FERTILIZANTE ORGÁNICO.....	171
FOTOGRAFÍA 88: SEPARADOR DE SÓLIDOS	171
FOTOGRAFÍA 89: BIODIGESTOR TROPICALIZADO PARA ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO	174
FOTOGRAFÍA 90: IMPLANTACIÓN Y TRAZADO DE LA LAGUNA DEL BIODIGESTOR	176
FOTOGRAFÍA 91: TRAZADO DE LA LAGUNA E INICIO DE EXCAVACIÓN	177
FOTOGRAFÍA 92: EXCAVACIÓN DE LA LAGUNA DEL BIODIGESTOR.....	177
FOTOGRAFÍA 93: REVESTIMIENTO DE TALUD CON MALLA	178
FOTOGRAFÍA 94: REVESTIMIENTO DE TALUD CON MALLA	178
FOTOGRAFÍA 95: ESTABILIZACIÓN DE TALUDES CON UNA PENDIENTE DE 65º	179
FOTOGRAFÍA 96: ESTABILIZACIÓN DE TALUDES EN LAGUNA.....	179
FOTOGRAFÍA 97: LAGUNA DE BIODIGESTOR REVESTIDA TOTALMENTE CON SUELO CEMENTO.....	180
FOTOGRAFÍA 98: REVESTIMIENTO DE FONDO Y TALUDES CON SUELO CEMENTO.....	180
FOTOGRAFÍA 99: REVESTIMIENTO DE TALUDES DE UNA LAGUNA	181

FOTOGRAFÍA 100: LAGUNA TERMINADA Y LISTA PARA REVESTIMIENTO CON MEMBRANA	181
FOTOGRAFÍA 101: IMPERMEABILIZACIÓN DE LA LAGUNA CON MEMBRANA EPDM.....	182
FOTOGRAFÍA 102: LAGUNA IMPERMEABILIZADA CON MEMBRANA EPDM	183
FOTOGRAFÍA 103: LAGUNA IMPERMEABILIZADA CON MEMBRANA EPDM	183
FOTOGRAFÍA 104: LAGUNA REVESTIDA CON MEMBRANA EPDM	184
FOTOGRAFÍA 105: LAGUNA REVESTIDA CON HDPE	184
FOTOGRAFÍA 106: LAGUNA REVESTIDA CON MEMBRANA HDPE	185
FOTOGRAFÍA 107: LAGUNA REVESTIDA	186
FOTOGRAFÍA 108: LLENADO DE LAGUNA PARA PRUEBA DE ESTANQUEIDAD	187
FOTOGRAFÍA 109: PRUEBAS DE ESTANQUEIDAD	188
FOTOGRAFÍA 110: PRUEBA DE ESTANQUEIDAD	189
FOTOGRAFÍA 111: FALLAS POR MAL SELLADO DE MEMBRANA DE FONDO	190
FOTOGRAFÍA 112: DESASTRE SIN PRECEDENTES POR MALA COLOCACIÓN DE MEMBRANA DE FONDO	191
FOTOGRAFÍA 113: MALA COLOCACIÓN DE LA MEMBRANA DE FONDO	191
FOTOGRAFÍA 114: COLOCACIÓN INCORRECTA DE MEMBRANA DE CUBIERTA.....	192
FOTOGRAFÍA 115: INSTALACIÓN INCORRECTA DE MEMBRANA DE CUBIERTA.....	193
FOTOGRAFÍA 116: MURO Y ACERA PERIMETRALES PARA BIODIGESTOR	194
FOTOGRAFÍA 117: CONSTRUCCIÓN DE ZANJA PARA DRENAJE PERIMETRAL.....	195
FOTOGRAFÍA 118: MURO TIPO "C"	196
FOTOGRAFÍA 119: ZAPATA DE MURO PERIMETRAL	196
FOTOGRAFÍA 120: CONSTRUCCIÓN DE MURO PERIMETRAL TIPO "B"	197
FOTOGRAFÍA 121: CONSTRUCCIÓN DE MURO PERIMETRAL TIPO "C"	198
FOTOGRAFÍA 122: MURO PERIMETRAL TIPO "A"	198
FOTOGRAFÍA 123: CONSTRUCCIÓN DE MURO PERIMETRAL TIPO "C"	199
FOTOGRAFÍA 124: MURO PERIMETRAL TIPO "C"	200
FOTOGRAFÍA 125: CONSTRUCCIÓN DE MURO PERIMETRAL TIPO "C"	200
FOTOGRAFÍA 126: CONSTRUCCIÓN DE MURO PERIMETRAL.....	201
FOTOGRAFÍA 127: FORRADO DE MURO PERIMETRAL.....	202
FOTOGRAFÍA 128: REFUERZO DE LAS ESQUINAS DEL MURO PERIMETRAL	203
FOTOGRAFÍA 129: REFUERZO DEL MURO PERIMETRAL ZONAS DE INSTALACIÓN DE AGITADORES.....	203
FOTOGRAFÍA 130: MURO PERIMETRAL TERMINADO.....	205
FOTOGRAFÍA 131: BIODIGESTOR TROPICALIZADO Y TANQUE DE ALIMENTACIÓN.....	207
FOTOGRAFÍA 132: TUBERÍAS DE ALIMENTACIÓN DE 150 MM.....	207
FOTOGRAFÍA 133: EXCAVACIÓN PARA LA COLOCACIÓN DE LAS TUBERÍAS DE ALIMENTACIÓN	208
FOTOGRAFÍA 134: TUBERÍAS DE ALIMENTACIÓN DE BIOGÁS	209
FOTOGRAFÍA 135: TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN	209
FOTOGRAFÍA 136: TUBERÍAS DE ALIMENTACIÓN.....	209
FOTOGRAFÍA 137: UBICACIÓN DEL TANQUE DE MEZCLA	211
FOTOGRAFÍA 138: UBICACIÓN DEL TANQUE DE MEZCLA	211
FOTOGRAFÍA 139: UBICACIÓN DEL BIODIGESTOR Y LAGUNA DE DESCARGA	212
FOTOGRAFÍA 140: TANQUE DE ALIMENTACIÓN INDICADO EN LA FOTOGRAFÍA ANTERIOR	213
FOTOGRAFÍA 141: POZO DE ALIMENTACIÓN Y PARA DESTAPAR TUBERÍAS	213
FOTOGRAFÍA 142: POZO DE ALIMENTACIÓN – RECIBE LA BIOMASA DESDE EL TANQUE DE MEZCLA.....	214
FOTOGRAFÍA 143: POZO DE ALIMENTACIÓN EN OPERACIÓN.....	214
FOTOGRAFÍA 144: TUBERÍAS DE DESCARGA	216
FOTOGRAFÍA 145: POZO DE DESCARGA	216
FOTOGRAFÍA 146: POZO DE DESCARGA EN OPERACIÓN	217
FOTOGRAFÍA 147: TUBERÍAS DE DESCARGA	217
FOTOGRAFÍA 148: TUBERÍAS DE DESCARGA.....	218
FOTOGRAFÍA 149: FUNDICIÓN DE TUBERÍAS DE BIOGÁS.....	220
FOTOGRAFÍA 150: INSTALACIÓN DE TUBERÍAS DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS	220

FOTOGRAFÍA 151: TUBERÍAS DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS	221
FOTOGRAFÍA 152: TUBERÍA DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS Y CHUPÓN	221
FOTOGRAFÍA 153: POZO PARA REDUCCIÓN DE CONDENSADOS	222
FOTOGRAFÍA 154: TUBERÍA DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS	223
FOTOGRAFÍA 155: FORMACIÓN DE SARRO EN TUBERÍAS DE BIOGÁS	223
FOTOGRAFÍA 156: PEGATINA PARA TUBERÍAS DE BIOGÁS	224
FOTOGRAFÍA 157: EJEMPLO DE SEÑALIZACIÓN DE TUBERÍA HACIA UNA CALDERA.....	224
FOTOGRAFÍA 158: TUBERÍAS DE CONDUCCIÓN DE BIOGÁS.....	225
FOTOGRAFÍA 159: ELIMINACIÓN DE CONDENSADOS	226
FOTOGRAFÍA 160: REMOCIÓN DE CONDENSADOS	227
FOTOGRAFÍA 161: TENDIDO DE TUBERÍA DE BIOGÁS	229
FOTOGRAFÍA 162: FALLAS EN CONDUCCIÓN DE BIOGÁS.....	229
FOTOGRAFÍA 163: INCORRECTA CAPTACIÓN DE BIOGÁS.....	230
FOTOGRAFÍA 164: INCORRECTA CAPTACIÓN DE BIOGÁS.....	230
FOTOGRAFÍA 165: INCORRECTA CAPTACIÓN DE BIOGÁS.....	231
FOTOGRAFÍA 166: INCORRECTA CAPTACIÓN DE BIOGÁS.....	232
FOTOGRAFÍA 167: SISTEMA DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS INCORRECTA E INSERVIBLE	233
FOTOGRAFÍA 168: BIODIGESTOR FUERA DE SERVICIO POR ESTAR LLENO DE COSTRAS	234
FOTOGRAFÍA 169: TUBERÍA DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS HACIA LA ANTORCHA	235
FOTOGRAFÍA 170: TREN DE CALIBRACIÓN CON SOPLADOR PARA CONDUCIR EL BIOGÁS.....	236
FOTOGRAFÍA 171: TUBERÍA DE EXTRACCIÓN DE BIOGÁS - CASO DE EMERGENCIA.....	237
FOTOGRAFÍA 172: MEMBRANA HDPE ESTIRADA	238
FOTOGRAFÍA 173: MEMBRANA HDPE ESTIRADA	238
FOTOGRAFÍA 174: VÁLVULA DE CONTROL DE PRESIONES	240
FOTOGRAFÍA 175: EJEMPLO DE INSTALACIÓN DE VÁLVULAS DE SEGURIDAD.....	242
FOTOGRAFÍA 176: MEMBRANA NO FLEXIBLE UTILIZADA PARA CUBRIR UN BIODIGESTOR.....	243
FOTOGRAFÍA 177: PLATINA DE ALUMINIO PREFABRICADA	245
FOTOGRAFÍA 178: PERNOS PARA SUJETAR MEMBRANA DE CUBIERTA.....	246
FOTOGRAFÍA 179: PERNOS SOLDADOS A UNA VARILLA DE ACERO	247
FOTOGRAFÍA 180: PERNOS PARA SUJETAR LA MEMBRANA DE CUBIERTA	248
FOTOGRAFÍA 181: PERNOS PARA SUJETAR LA MEMBRANA	248
FOTOGRAFÍA 182: NIVELACIÓN DE PERNOS PARA SUJETAR LA MEMBRANA DE CUBIERTA.....	249
FOTOGRAFÍA 183: CONTROL DE NIVELACIÓN DE PERNOS Y COLOCACIÓN DE TUBERÍA DE CAPT. BIOGÁS	249
FOTOGRAFÍA 184: COLOCACIÓN DE PERNOS PARA SUJETAR LA MEMBRANA DE CUBIERTA	250
FOTOGRAFÍA 185: COLOCACIÓN DE PERNOS PARA SUJETAR LA MEMBRANA DE CUBIERTA	250
FOTOGRAFÍA 186: PREPARACIÓN DEL ROLLO DE MEMBRANA EPDM	251
FOTOGRAFÍA 187: PREPARACIÓN DE AMARRES PARA JALAR LA MEMBRANA	251
FOTOGRAFÍA 188: INICIO DE COLOCACIÓN DE MEMBRANA EPDM.....	252
FOTOGRAFÍA 189: MEMBRANA EPDM CUBRIENDO LA LAGUNA	253
FOTOGRAFÍA 190: BIODIGESTOR CUBIERTO CON MEMBRANA EPDM	254
FOTOGRAFÍA 191: FIJACIÓN DE LA MEMBRANA AL MURO PERIMETRAL	255
FOTOGRAFÍA 192: FIJACIÓN DE LA MEMBRANA AL MURO PERIMETRAL	256
FOTOGRAFÍA 193: MEMBRANA COLOCADA.....	256
FOTOGRAFÍA 194: BIODIGESTOR TERMINADO Y EN OPERACIÓN	257
FOTOGRAFÍA 195: PROTECCIÓN DE LOS PERNOS PARA SUJETAR LA MEMBRANA	258
FOTOGRAFÍA 196: FORMACIÓN DE COSTRAS	259
FOTOGRAFÍA 197: BIODIGESTOR LLENO DE COSTRAS POR FALTA DE AGITACIÓN	261
FOTOGRAFÍA 198: TORTA DE RUMEN EN LAGUNA DE OXIDACIÓN	261
FOTOGRAFÍA 199: FORMACIÓN DE COSTRAS	262
FOTOGRAFÍA 200: FORMACIÓN DE COSTRAS EN BIODIGESTOR	262

FOTOGRAFÍA 201: UBICACIÓN DE AGITADORES MECÁNICOS Y BOMBAS DE EXTRACCIÓN DE LODOS	263
FOTOGRAFÍA 202: AGITADORES DE EJE LARGO.....	267
FOTOGRAFÍA 203: INSTALACIÓN DE AGITADOR EN EL MURO PERIMETRAL.....	268
FOTOGRAFÍA 204: CUBIERTA PARA AGITADOR	268
FOTOGRAFÍA 205: INSTALACIÓN DE AGITADORES.....	269
FOTOGRAFÍA 206: INSTALACIÓN DE AGITADORES.....	270
FOTOGRAFÍA 207: INSTALACIÓN DE AGITADORES – SE OBSERVA LA PLATINA QUE FIJA EL AGITADOR.....	271
FOTOGRAFÍA 208: AGITADORES INSTALADOS.....	272
FOTOGRAFÍA 209: AGITADORES INSTALADOS.....	273
FOTOGRAFÍA 210: COMPRESOR PARA AGITACIÓN NEUMÁTICA	274
FOTOGRAFÍA 211: BOMBAS PARA EXTRACCIÓN DE LODOS.....	275
FOTOGRAFÍA 212: TREN DE CALIBRACIÓN	281
FOTOGRAFÍA 213: TREN DE CALIBRACIÓN FABRICADO POR AQUALIMPIA ENGINEERING E.K.	282
FOTOGRAFÍA 214: DAÑOS A CARCAZA DE SOPLADOR POR EXCESO DE H ₂ S	284
FOTOGRAFÍA 215: TREN DE CALIBRACIÓN FABRICADO POR AQUALIMPIA ENGINEERING E.K.	285
FOTOGRAFÍA 216: QUEMADOR SIMPLE PARA COMBUSTIONAR EL BIOGÁS.....	286
FOTOGRAFÍA 217: ANTORCHA INDUSTRIAL	287
FOTOGRAFÍA 218: ANTORCHAS MARCA AQUALIMPIA ENGINEERING E.K.	288
FOTOGRAFÍA 219: MEZCLADOR PARA TANQUE DE ALIMENTACIÓN	289
FOTOGRAFÍA 220: AGITADOR PARA TANQUE ESTERCOLERO	291
FOTOGRAFÍA 221: AGITADOR PARA BIODIGESTOR	291
FOTOGRAFÍA 222: "AGITADOR" RUDIMENTARIO INSTALADO EN BIODIGESTOR.....	292
FOTOGRAFÍA 223: MEDIDOR DE BIOGÁS.....	301
FOTOGRAFÍA 224: SENSOR CONTINUO PARA MEDICIÓN DE CH ₄	302
FOTOGRAFÍA 225: MEDIDOR FOS/TAC	310
FOTOGRAFÍA 226: GENERADOR A BIOGÁS	318
FOTOGRAFÍA 227: CALDERA A BIOGÁS.....	329
FOTOGRAFÍA 228: PLANTA DE BIOMETANIZACIÓN.....	334
FOTOGRAFÍA 229: DAÑOS EN MOTORES A BIOGÁS	345
FOTOGRAFÍA 230: DAÑOS AL HORMIGÓN POR EL H ₂ S.....	347
FOTOGRAFÍA 231: AZUFRE ELEMENTAL	349
FOTOGRAFÍA 232: UNIDADES DE INYECCIÓN DE AIRE Y ACCESORIOS	354
FOTOGRAFÍA 233: FILTRO BIOLÓGICO DE REMOCIÓN DE H ₂ S.....	356
FOTOGRAFÍA 234: FILTRO BIOLÓGICO.....	357
FOTOGRAFÍA 235: FILTRO DE OXIDO DE HIERRO	360
FOTOGRAFÍA 236: CLORURO FÉRRICO	361
FOTOGRAFÍA 237: CARBÓN ACTIVADO	362
FOTOGRAFÍA 238: FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO.....	363
FOTOGRAFÍA 239: FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO.....	364
FOTOGRAFÍA 240: ENFRIADOR DE BIOGÁS	368
FOTOGRAFÍA 241: ENFRIADOR DE BIOGÁS - DESHUMIDIFICADOR.....	369
FOTOGRAFÍA 242: ENFRIADOR DE BIOGÁS	370
FOTOGRAFÍA 243: TANQUE DE CONDENSADOS.....	371
FOTOGRAFÍA 244: FILTRO RETENCIÓN DE ESPUMAS.....	372
FOTOGRAFÍA 245: FILTROS DE RETENCIÓN DE PARTÍCULAS.....	374
FOTOGRAFÍA 246: FILTRO DE GEL DE SILICE.....	375
FOTOGRAFÍA 247: PRODUCCIÓN DE FERTILIZANTE SECO LISTO PARA COMERCIALIZACIÓN.....	377
FOTOGRAFÍA 248: SUELOS EROSIONADOS.....	379
FOTOGRAFÍA 249: FERTILIZACIÓN CON BIOABONO, ANTES Y DESPUÉS	381
FOTOGRAFÍA 250: APLICACIÓN DEL BIOABONO POR INUNDACIÓN EN CULTIVOS.....	383

FOTOGRAFÍA 251: FERTILIZACIÓN DIRECTA CON BIOABONO	384
FOTOGRAFÍA 252: COMERCIALIZACIÓN DE FERTILIZANTE SECO.....	385
FOTOGRAFÍA 253: APROVECHAMIENTO DIRECTO DE EFLUENTES DE BIODIGESTOR EN PLANTACIONES	386
FOTOGRAFÍA 254: HUMEDAL PARA TRATAR EFLUENTES DE UN BIODIGESTOR	388
FOTOGRAFÍA 255: HUMEDAL PARA EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DEL BIODIGESTOR.....	389
FOTOGRAFÍA 256:VERMIFILTRO EN MATADERO DE RESES.....	390
FOTOGRAFÍA 257: REACTOR UASB EN MATADERO DE RESES EN NICARAGUA.....	392
FOTOGRAFÍA 258: CONSTRUCCIÓN DE BIODIGESTOR AL PIE DE LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA.....	409
FOTOGRAFÍA 259: VERIFICACIÓN DEL ESTADO DE LA MEMBRANA DE CUBIERTA.....	414
FOTOGRAFÍA 260: VÁLVULA DE CONTROL DE PRESIONES	415
FOTOGRAFÍA 261: REPARACIÓN DE MEMBRANAS EPDM	418
FOTOGRAFÍA 262: INCENDIO EN SOLDADURA DE MEMBRANA HDPE EN BIODIGESTOR.....	419
FOTOGRAFÍA 263: GRAVE ERROR QUE PUEDE COSTARLE LA VIDA A UN OPERADOR	425
FOTOGRAFÍA 264: DAÑOS EN PAREDES DE HORMIGÓNPLANTA DE BIOGÁS	427
FOTOGRAFÍA 265: SEÑALIZACIÓN EN BIODIGESTOR.....	430
FOTOGRAFÍA 266: DAÑOS EN PAREDES DE HORMIGÓNFUENTE: KARL-HEINZ WELLMANN, WIKIPEDIA	432
FOTOGRAFÍA 267: DAÑOS EN PAREDES DE HORMIGÓN	433
FOTOGRAFÍA 268: DAÑOS EN PAREDES DE HORMIGÓN.....	433
FOTOGRAFÍA 269: DAÑOS EN BOMBAS POR CORROSIÓN	433
FOTOGRAFÍA 270: CORROSIÓN EN BOMBA DE ALIMENTACIÓN	434
FOTOGRAFÍA 271: DAÑOS EN UN SOPLADOR POR CORROSION DEBIDO AL H2S	435
FOTOGRAFÍA 272: ESTIÉRCOL DE GANADO CON ALTA MS17.....	436

Índice de tablas

TABLA 1: COMPONENTES DEL BIOGÁS	36
TABLA 2: RESIDUOS APROVECHABLES EN UN BIODIGESTOR	47
TABLA 3: RESIDUOS AGROINDUSTRIALES APROVECHABLES EN UN BIODIGESTOR.....	48
TABLA 4: BIOGÁS DE DIFERENTES SUSTRATOS.....	51
TABLA 5: PRODUCCIÓN BIOGÁS - ESTIÉRCOLES COMUNES	51
TABLA 6: CARACTERÍSTICAS DEL PURÍN DE CERDO	55
TABLA 7: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS - ESTIÉRCOL GANADO VACUNO	61
TABLA 8: COMPOSICIÓN DE LA GALLINAZA.....	65
TABLA 9: BIOGÁS DE GALLINAZA % MS, MV.....	67
TABLA 10: CONSUMO ALIMENTO GALLINAS	67
TABLA 11: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO GALLINAZA.....	68
TABLA 12: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS – POLLOS Y GALLINAS	69
TABLA 13: ENSAYOS DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS - GALLINAZA.....	69
TABLA 14: ANÁLISIS DE MASA SECA - GALLINAZA	70
TABLA 15: INHIBICIÓN POR AMONIOS	71
TABLA 16: PRODUCCIÓN DE RESIDUOS EN UN MATADERO DE 800 RESES.....	75
TABLA 17: PRODUCCIÓN DE RESIDUOS EN UN MATADERO DE 400 RESES.....	76
TABLA 18: AGUAS RESIDUALES DE MATADEROS.....	78
TABLA 19: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO AGUAS RESIDUALES DE MATADERO.....	78
TABLA 20: CONTENIDO DE RÚMEN	81
TABLA 21: PORCENTAJES DE RESIDUOS EN UNA RES.....	84
TABLA 22: COMPOSICIÓN DE LA SANGRE, PLASMA LIQUIDO Y PAQUETE CELULAR (G/100ML)	90
TABLA 23: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE RESIDUOS DE MATADEROS	92
TABLA 24: EJEMPLO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y METANO EN UN MATADERO DE 500 RESES	92

TABLA 25: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN UN MATADERO UBICADO E SUECIA	94
TABLA 26: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS Y METANO EN UN MATADERO DE 500 RESES	94
TABLA 27: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO VINAZAS	100
TABLA 28: EJEMPLO DE CARACTERIZACIÓN DE RSU.....	108
TABLA 29: CARACTERIZACIÓN RSU	109
TABLA 30: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS - RESIDUOS DOMICILIARIOS.....	110
TABLA 31: PÉRDIDAS DE PRODUCTO GENERADAS EN INDUSTRIAS LÁCTEAS MODERNAS	117
TABLA 32: PÉRDIDAS DE PRODUCTOS EN INDUSTRIAS LÁCTEAS	117
TABLA 33: RESULTADOS DE UN ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE DESECHOS LECHEROS	118
TABLA 34: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO EN FÁBRICA DE LÁCTEOS	118
TABLA 35: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS - RESIDUOS LÁCTEOS	120
TABLA 36: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS SUSTRATOS AGROINDUSTRIALES	122
TABLA 37: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES.....	122
TABLA 38: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE VARIOS TIPOS DE ANIMALES	123
TABLA 39: MASA SECA DE DIFERENTES SUSTRATOS	132
TABLA 40: CÁLCULO DE LA MASA VOLÁTIL (MV) PARA MEZCLAS DE BIOMASA	137
TABLA 41: CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	147
TABLA 42: ANÁLISIS FQ - POME.....	276
TABLA 43: EJEMPLO DE ESPECIFICACIONES MEMBRANA EPDM.....	280
TABLA 44: COMPONENTES GENERALES DEL TREN DE CALIBRACIÓN	283
TABLA 45: PARÁMETROS PARA EL CONTROL DE PROCESO	298
TABLA 46: EJEMPLO DE BITÁCORA	299
TABLA 47: INTERPRETACIÓN DE LA RELACIÓN FOS/TAC	311
TABLA 48: RELACIÓN C:N DE BIOMASA	312
TABLA 49: RELACIÓN C:N DE ESTIÉRCOLES.....	313
TABLA 50: CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS Y COMPARACIÓN CON OTROS GASES	317
TABLA 51: CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES DEL BIOGÁS.....	317
TABLA 52: CONTENIDO DE CH4 Y CO2.....	318
TABLA 53: EQUIVALENCIAS ENERGÉTICAS BIOGÁS	319
TABLA 54: CÁLCULO DE POTENCIA DE GENERADOR	323
TABLA 55: SELECCIÓN DE GENERADOR A BIOGÁS.....	323
TABLA 56: PARÁMETROS DE CONVERSIÓN DE KWH-BHP	325
TABLA 57: COSTOS DE PRODUCCIÓN DE VAPOR.....	327
TABLA 58: EQUIVALENCIAS ENERGÉTICAS.....	328
TABLA 59: APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS EN UNA CALDERA	330
TABLA 60: COMPOSICIÓN DEL BIOMETANO DE ACUERDO A NORMA EN16723.....	333
TABLA 61: PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN DE BIOMETANO	335
TABLA 62: REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DEL BIOGÁS PARA SU APROVECHAMIENTOS.....	346
TABLA 63: CARACTERÍSTICAS DE LOS CARBONES ACTIVADOS	363
TABLA 64: PARÁMETROS DE DISEÑO FILTROS CAG.....	367
TABLA 65: FERTILIZACIÓN CON BIOABONO, ANTES Y DESPUÉS	378
TABLA 66: ANÁLISIS FQ DE LODOS DE BIODIGESTOR	379
TABLA 67: COMPOSICIÓN DEL BIOABONO	380
TABLA 68: RENDIMIENTO DE COSECHAS FERTILIZADA CON BIOABONO	383
TABLA 69: CONTENIDO DE NUTRIENTES EN BIOABONO DE GALLINAZA.....	385
TABLA 70: PORCENTAJES DE DEPRECIACIÓN.....	398
TABLA 71: COSTOS ANUALES PORCENTUALES DE O&M	400
TABLA 72: RESULTADOS DE ANÁLISIS FINANCIERO – ESTADO DE RESULTADOS.....	401
TABLA 73: FLUJO DE EFECTIVO	402
TABLA 74: ANÁLISIS DE TIR Y VAN FONDOS PROPIOS	402

TABLA 75: ANÁLISIS DE TIR Y VAN CRÉDITO BANCARIO	402
TABLA 76: EJEMPLO DE COV PARA PUESTA EN MARCHA DEL BIODIGESTOR	407
TABLA 77: REMEDIACIÓN DE PROBLEMAS	416
TABLA 78: REMEDIACIÓN DE PROBLEMAS EN EQUIPOS	417
TABLA 79: INHIBIDORES DE PROCESO	421
TABLA 80: ZONAS DE SEGURIDAD	426
TABLA 81: SEÑALIZACIÓN	427

Índice de diagramas

DIAGRAMA 1: IMPLANTACIÓN DE BIODIGESTOR.....	31
DIAGRAMA 2: IMPLANTACIÓN DE PLANTA DE BIOGÁS.....	35
DIAGRAMA 3: PROCESO ANAERÓBICO	38
DIAGRAMA 4: ETAPAS DEL PROCESO ANAERÓBICO.....	38
DIAGRAMA 5: BENEFICIOS DE LOS BIODIGESTORES.....	40
DIAGRAMA 6: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS.....	50
DIAGRAMA 7: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE VARIOS SUSTRATOS.....	50
DIAGRAMA 8: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS - VINAZAS.....	100
DIAGRAMA 9: ESQUEMA DE FLUJO BIODIGESTOR EN FÁBRICA DE LÁCTEOS	119
DIAGRAMA 10: FLUJOGRAMA BIODIGESTOR	125
DIAGRAMA 11: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS - TRH	134
DIAGRAMA 12: RELACIÓN COV – BIOGÁS	134
DIAGRAMA 13: ÁRBOL DE DECISIÓN PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL BIODIGESTOR.....	136
DIAGRAMA 14: LECHO DE SECADO DE LODOS	166
DIAGRAMA 15: CONCEPTO BÁSICO DE DISEÑO DE BIODIGESTOR TROPICALIZADO	173
DIAGRAMA 16 : ESQUEMA CONCEPTUAL DE IMPLANTACIÓN DE BIODIGESTORES.....	174
DIAGRAMA 17: GASÓMETRO FORMADO POR EL MURO PERIMETRAL.....	194
DIAGRAMA 18: MURO Y DRENAJE PERIMETRAL	195
DIAGRAMA 19: TIPOS DE MURO PERIMETRAL	196
DIAGRAMA 20: ZAPATA CON "DIENTE"	196
DIAGRAMA 21: PROPUESTA PARA REFUERZOS DE ACERO BLOQUES DE HORMIGÓN PARA MURO PERIME. ...	197
DIAGRAMA 22: IMPLANTACIÓN DE MUROS Y POZOS.....	204
DIAGRAMA 23: MURO DE HORMIGÓN ARMADO	204
DIAGRAMA 24: ESQUEMA DE UBICACIÓN DE TUBERÍAS DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA.....	207
DIAGRAMA 25: ESQUEMA DE TUBERÍA DE DESCARGA DEL BIODIGESTOR	215
DIAGRAMA 26: CAPTACIÓN DE BIOGÁS	219
DIAGRAMA 27: CAPTACIÓN DE BIOGÁS	219
DIAGRAMA 28: ESQUEMA DE CAPTACIÓN DE BIOGÁS	222
DIAGRAMA 29: ACUMULACIÓN DE CONDENSADOS	225
DIAGRAMA 30: VÁLVULAS AUTOMÁTICAS PARA REDUCCIÓN DE CONDENSADOS	227
DIAGRAMA 31: ZANJAS PARA INSTALACIÓN DE TUBERÍAS DE BIOGÁS.....	228
DIAGRAMA 32: FUNCIONAMIENTO DE VÁLVULA DE SEGURIDAD	241
DIAGRAMA 33: PERNOS SIN CABEZA SOLDADOS A VARILLA PARA SUJETAR LA MEMBRANA DE CUBIERTA....	246
DIAGRAMA 34: PERNOS CON CABEZA SOLDADOS A VARILLA.....	247
DIAGRAMA 35: SISTEMAS DE AGITACIÓN	259
DIAGRAMA 36: PRINCIPIO DE AGITACIÓN MECÁNICA	260
DIAGRAMA 37: SIMULACIÓN COMPUTARIZADA PARA DETERMINAR UBICACIÓN Y POTENCIA DE AGITADOR	264
DIAGRAMA 38: SIMULACIÓN PARA DETERMINAR UBICACIÓN Y POTENCIA DE AGITADORES.....	265
DIAGRAMA 39: ÁREA DE INFLUENCIA DE AGITADORES	266

DIAGRAMA 40: EXTRACCIÓN Y RECIRCULACIÓN DE LODOS.....	275
DIAGRAMA 41: EXTRACCIÓN DE LODOS.....	276
DIAGRAMA 42: TREN DE CALIBRACIÓN	281
DIAGRAMA 43: TREN DE CALIBRACIÓN	283
DIAGRAMA 44: ESQUEMA MEDIDOR DE CAUDAL Y CARACTERÍSTICAS DE BIOGÁS	300
DIAGRAMA 45: MEDIDOR PORTÁTIL DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS - CH ₄ - CO ₂ - H ₂ S - O ₂	302
DIAGRAMA 46: PRODUCCIÓN DE METANO EN RELACIÓN A LA TEMPERATURA	304
DIAGRAMA 47: POTENCIAL REDOX	307
DIAGRAMA 48: COSTOS DE INVERSIÓN PLANTA DE BIOMETANO	336
DIAGRAMA 49: PROCESO DE MEMBRANA	336
DIAGRAMA 50: PROCESO SIMPLIFICADO TECNOLOGÍA MEMBRANAS	337
DIAGRAMA 51: PROCESO SIMPLIFICADO DE BIOMETANIZACIÓN CON MEMBRANAS.....	338
DIAGRAMA 52: PROCESO DE ADSORCIÓN - PRODUCCIÓN DE BIOMETANO.....	339
DIAGRAMA 53: PROCESO SIMPLIFICADO DE ABSORCIÓN.....	341
DIAGRAMA 54: REDUCCIÓN BIOLÓGICA DEL BIOGÁS	350
DIAGRAMA 55: INYECCIÓN MÍNIMA DE OXIGENO EN DEPENDENCIA DEL CONTENIDO DE H ₂ S	352
DIAGRAMA 56: INYECCIÓN MÍNIMA DE OXIGENO EN DEPENDENCIA DEL VOLUMEN DE BIOGÁS	352
DIAGRAMA 57: INYECCIÓN DE AIRE EN % EN DEPENDENCIA DEL VOLUMEN DE BIOGÁS Y DEL H ₂ S	353
DIAGRAMA 58: PURIFICACIÓN BIOLÓGICA DEL BIOGÁS EN FILTRO EXTERNO	355
DIAGRAMA 59: ESQUEMA DE FLUJO FILTRO BIOLÓGICO.....	356
DIAGRAMA 60: DISEÑO DE FILTRO DE CAG	365
DIAGRAMA 61: ESQUEMA DE REACTOR UASB	391
DIAGRAMA 62: REACTOR UASB Y ZONAS DE TRATAMIENTO.....	393
DIAGRAMA 63: FLUJOGRAMA DE APROVECHAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN UN MATADERO.....	393
DIAGRAMA 64: FLUJOGRAMA ALTERNATIVO APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS EN MATADERO	394
DIAGRAMA 65: ZONAS DE RIESGO EN BIODIGESTORES TIPO LAGUNA.....	426

Índice de ejemplos

EJEMPLO 1: CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE PURÍN DE CERDO	56
EJEMPLO 2: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS DE ESTIÉRCOL DE 2.000 VACAS LECHERAS.....	62
EJEMPLO 3: PRODUCCIÓN DE GALLINAZA.....	67
EJEMPLO 4: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS APROVECHAMIENTO DE VINAZAS.....	98
EJEMPLO 5: PRODUCCIÓN DE BIOGÁS APROVECHAMIENTO DE POME.....	103
EJEMPLO 6: DIMENSIONAMIENTO DE BIODIGESTOR PARA MEZCLAS DE VARIOS TIPOS DE BIOMASA.....	137
EJEMPLO 7: DIMENSIONAMIENTO DE BIODIGESTOR PARA 2.000 VACAS LECHERAS	139
EJEMPLO 8: DIMENSIONAMIENTO DE BIODIGESTOR PARA 2.000 CERDOS	140
EJEMPLO 9: BIODIGESTOR PARA ESTIÉRCOL DE GANADO VACUNO	143
EJEMPLO 10: DIMENSIONAMIENTO DE UN BIODIGESTOR PARA PURÍN DE CERDO Y GALLINAZA.....	146
EJEMPLO 11: DIMENSIONAMIENTO DE CALDERA PARA COMBUSTIONAR BIOGÁS	148
EJEMPLO 12: CÁLCULO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN BASE A LA DQO	149
EJEMPLO 13: DIMENSIONAMIENTO DE LAGUNA DE DESCARGA	157
EJEMPLO 14: DIMENSIONAMIENTO DE LECHO DE SECADO DE LODOS	165
EJEMPLO 15: CÁLCULO DEL VOLUMEN DE INYECCIÓN DE AIRE PARA REDUCCIÓN.....	353
EJEMPLO 16: DIMENSIONAMIENTO DE FILTRO DE REMOCIÓN DE H ₂ S POR	359

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: PROCESO ANAERÓBICO EN LA NATURALEZA.....	37
ILUSTRACIÓN 2: TAMBOR SEPARACIÓN DE ORGÁNICOS BIANNARECYCLING.....	111
ILUSTRACIÓN 3: EJEMPLO DE UBICACIÓN LAGUNA DE DESCARGA	157
ILUSTRACIÓN 4: LAGUNA DE DESCARGA.....	158
ILUSTRACIÓN 5: TUBERÍA CON TAMPÓN PARA LIMPIEZA.....	226
ILUSTRACIÓN 6:: FILTRO DE OXIDO DE HIERRO.....	358
ILUSTRACIÓN 7: TANQUE DE REDUCCIÓN DE CONDENSADOS	371

Biodigestor en granja avícola



Biodigestor en hacienda ganadera



Introducción

Este manual se ha escrito para los profesionales interesados en el dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores industriales apropiados para países de clima tropical, aplicando tecnologías apropiadas, de bajo costo, pero tan seguros y eficientes como los biodigestores que se construyen en países industrializados.

Contiene ejemplos de dimensionamiento de biodigestores para los tipos de biomasa más comunes existentes en países tropicales, tales como estiércoles de animales, vinazas, aguas residuales de la extracción de aceite de palma africana (POME), desechos de mataderos, residuos de mercados, etc.

Los biodigestores que se construyen en países de clima tropical tienen que aprovechar al máximo la radiación solar, las altas temperaturas ambientales, deben ser económicos, se deben construir con materiales locales de construcción, tener bajos costos operativos y deben ser sencillos para operar. En los países tropicales rigen altas temperaturas ambientales con un promedio de 25 - 32°C durante casi todo el año, lo que no ocurre en países de clima frío.

En el caso de Alemania y otros países nórdicos, el clima predominante es frío y, rige durante 250 – 300 días al año. Las temperaturas máximas sobre los 30°C se alcanzan escasamente durante un máximo de 45 - 60 días al año. Las temperaturas mínimas, pueden bajar a -30°C y la temperatura promedio anual no sobrepasa los 9°C.

En estos países de clima frío se construyen biodigestores sobre tierra, en acero inoxidable, hormigón armado o con partes prefabricadas. Son costosos y aislados para protegerlos del clima frío. Este tipo de biodigestor es inadecuado para países tropicales y con bajo desarrollo industrial, debido a su alto costo de construcción, vulnerabilidad a temblores y huracanes y porque no aprovechan al máximo la radiación solar.

Lamentablemente muchas empresas no tienen el personal preparado técnicamente para el diseño y construcción de biodigestores y sus estructuras auxiliares. Generalmente experimentan con los clientes y “aprenden” con ellos en base a los errores que van cometiendo.

Particularmente, ya durante el diseño y construcción de los biodigestores se cometen errores al no instalar equipos para su agitación y extracción de lodos. La instalación de agitadores es imprescindible para evitar a corto plazo el colapso del biodigestor debido a la formación de costras. Si no se instalan equipos de agitación el biodigestor no producirá la cantidad requerida de biogás y se corre el peligro de formación de costras en su superficie y de la acumulación de sedimentos en el fondo.

Todos los residuos orgánicos con los que se alimenta un biodigestor tienen un contenido de materia inorgánica que no se digiere y que se sedimenta en el fondo. Generalmente en la mayoría de los biodigestores que se construyen en Latino América y El Caribe no se instalan equipos de bombeo para la extracción de lodos. Simplemente los sedimentos no se extraen y se dejan acumular en el fondo del biodigestor.

Con el pasar de los años, los sedimentos se van acumulando en el fondo del biodigestor y van reduciendo paulatinamente su volumen útil con la consiguiente reducción del tiempo de retención. Al disminuir el tiempo de retención la biomasa se extrae del biodigestor sin que esta haya cumplido su tiempo de residencia, lo que ocasiona una reducción considerable de la producción de biogás. Adicionalmente el biodigestor se va llenando de sólidos hasta formar capas de varios metros de espesor que pueden ocasionar el colapso de su operación.

A continuación, se detallan los errores mas comunes encontrados en varios biodigestores evaluados por el autor de este libro.

- Mal dimensionamiento de los biodigestores. Volumen del biodigestor demasiado grande o muy pequeño para la biomasa disponible.
- Biodigestores cubiertos con membranas inadecuadas.
- Amarre o fijación de la membrana de cubierta en una zanja llena de tierra mezclada con cemento.
- Falta de un sistemas de agitación para evitar la formación de costras.
- Ausencia de sistemas para la extracción de lodos.
- Captación de biogás en la membrana de cubierta.
- Instalación de tuberías de captación o conducción de biogás que no permiten la descarga de condensados sino mas bien acumulan condensados los que obstruyen la extracción de biogás.
- Enredos complicados con tuberías de conducción de biogás que suben y bajan sin ninguna función aparente.
- Instalación de tanques vacíos en el sistema de captación de biogás que no tienen alguna función.
- Falta de seguridades industriales y control de parámetros operativos.

Este libro también contiene fotografías y detalles técnicos de como no se deben construir biodigestores, las captaciones de biogás, conducción de biogás, etc. y uso de equipos de mala calidad y no diseñados para su uso en biodigestores o conducción o compresión de biogás. Estas fotografías han sido tomadas por el autor de este libro en varios de los proyectos que ha evaluado y rehabilitado durante varios años de trabajo.

Es importante que el lector también observe como no se deben construir soluciones para la captación de biogás y reducción de condensados, con soluciones enredadas o laberintos de tuberías que suben y bajan sin que ocasionen algún efecto o tengan alguna función.

En algunas fotografías se muestra el uso o diseño inadecuado de membranas de cubierta que por falta de mecanismos para el control de presiones máximas, se estiran, pierden su resistencia y se rasgan o se vuelven porosas.

Cuando se diseña y construye biodigestores, siempre hay que tener en cuenta que son estructuras para la producción de un combustible renovable de alto poder calorífico. Si se cometen errores en la selección de materiales adecuados o si por mala selección de equipos hay fugas o escapes de biogás, pueden ocurrir graves siniestros que ponen en juego la vida de los operadores y del entorno donde se construyen estas obras.

La explosión de un biodigestor puede generar una onda de explosión con una presión de cerca 6 bar en pocos milisegundos. Esta onda de explosión puede matar a personas que estén cerca del área de explosión y destrozarse completamente el digestor y todo el equipo electromecánico. De igual manera la dispersión de partes del digestor por causa de la onda de explosión puede también ocasionar grandes destrozos en los alrededores. El fuego y la onda de calor pueden también ocasionar incendios en la cercanía de un biodigestor siniestrado a un radio de 100 m.

Este libro contiene fotografías de los proyectos desarrollados por la empresa Aqualimpia Engineering e.K. con soluciones correctas realizadas en proyectos reales. Las fotografías muestran la construcción correcta de la laguna del biodigestor, del muro perimetral para el amarre de la membrana, captación y conducción de biogás, adecuada selección de materiales de construcción y equipos, etc.

El libro contiene también varios ejemplos de dimensionamiento de biodigestores, lecho de secado de lodos, laguna de descarga, selección de potencia de generadores y calderas.