

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
RESUMEN.....	X
GLOSARIO.....	XI
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN.....	4
2.1 BIOMASA.....	4
2.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS DE LOS RESIDUOS URBANOS DE TIPO ORGÁNICO (RUO).....	6
2.1.1.1 PROPIEDADES FÍSICAS.....	6
2.1.1.1.1 PESO ESPECÍFICO.....	6
2.1.1.1.2 CONTENIDO DE HUMEDAD.....	7
2.1.1.2 PROPIEDADES QUÍMICAS.....	8
2.1.1.2.1 ANÁLISIS FÍSICO.....	8
2.1.1.2.2 PUNTO DE FUSIÓN DE LAS CENIZAS.....	8
2.1.1.2.3 ANÁLISIS ELEMENTAL DE LOS COMPONENTES DE LOS RUO.....	9
2.1.1.2.4 CONTENIDO ENERGÉTICO DE LOS COMPONENTES DE LOS RUO.....	10
2.1.1.2.5 NUTRIENTES ESENCIALES Y OTROS ELEMENTOS.....	13
2.1.1.3 PROPIEDADES BIOLÓGICAS.....	13
2.1.1.3.1 BIODEGRADABILIDAD DE LOS COMPONENTES DE RESIDUOS ORGÁNICOS	14
2.1.1.3.2 PRODUCCIÓN DE OLORES.....	16
2.2 TECNOLOGÍAS PARA LA CONVERSIÓN DE LA BIOMASA EN ENERGÍA.....	16
2.2.1 PROCESOS TERMOQUÍMICOS.....	18
2.2.1.1 COMBUSTIÓN.....	18
2.2.1.2 GASIFICACIÓN.....	19
2.2.1.3 PIRÓLISIS.....	20
2.2.2 PROCESOS BIOQUÍMICOS.....	22

2.2.2.1 FERMENTACIÓN ALCOHÓLICA	23
2.2.2.2 DIGESTIÓN	25
2.2.2.3 COMPOST.....	26
2.2.2.3.1 FASES DEL PROCESO DE COMPOSTAJE	26
2.2.2.3.2 PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL PROCESO DE COMPOSTAJE	29
2.2.3 PROCESO DE EXTRACCIÓN QUÍMICA DIRECTA	31
2.2.4 TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLES	31
2.2.4.1 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS	31
2.2.4.2 BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS	32
2.2.4.3 BIOCOMBUSTIBLES GASEOSOS.....	33
2.3 DIGESTIÓN	34
2.3.1 DISEÑO DE UN DIGESTOR	36
2.3.1.1 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (TRH)	36
2.3.1.2 TAMAÑO DEL DIGESTOR Y DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DEL BIOGÁS	37
2.3.1.3 SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO	39
2.3.2 TIPOS DE DIGESTORES	41
2.3.2.1 DIGESTORES DE UNA ETAPA	41
2.3.2.2 DIGESTORES DE DOS ETAPAS.....	42
2.3.2.3 DIGESTORES DE DOS FASES	42
2.3.2.4 DIGESTORES DE CONTACTO ANAEROBIO	43
2.3.2.5 DIGESTORES DE PELÍCULA ADHERIDA O FILTRO ANAEROBIO	43
2.3.2.6 DIGESTORES DE FLUJO PISTÓN.....	43
2.3.2.7 DIGESTOR DE LECHO DE LODO	44
2.3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS DIGESTORES SEGÚN EL TIPO DE ALIMENTACIÓN	44
2.3.3.1 DIGESTOR DE LLENADO INTERMITENTE	44
2.3.3.2 DIGESTOR DE LLENADO CONTINUO	45
2.3.4 FACTORES QUE AFECTAN LA DIGESTIÓN.....	45
2.3.4.1 PROPORCIÓN DE CARBONO-NITRÓGENO	46
2.3.4.2 TEMPERATURA.....	46
2.3.4.3 ACIDEZ Y ALCALINIDAD	46
2.3.4.4 RELACIÓN PROPORCIONAL DE SÓLIDOS A LÍQUIDOS.....	47
2.3.4.5 PREPARACIÓN Y MEZCLA DE LOS MATERIALES	48

2.3.4.6 AGITACIÓN Y MEZCLADO	48
2.3.4.7 TIEMPO DE RETENCIÓN	48
2.3.5 DIGESTIÓN DE SÓLIDOS EN BAJA CONCENTRACIÓN	49
2.3.5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	49
2.3.5.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL PROCESO	50
2.3.6 DIGESTIÓN DE SÓLIDOS EN ALTA CONCENTRACIÓN	50
2.3.6.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	50
2.3.6.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL PROCESO	50
2.3.7 ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS DE DIGESTIÓN DE SÓLIDOS EN BAJAS Y ALTAS CONCENTRACIONES PARA LOS RUO.....	51
2.3.8 PRODUCTOS DE LA DIGESTIÓN	51
2.3.8.1 BIOGÁS	51
2.3.8.1.1 VALOR DE COMBUSTIÓN DEL BIOGÁS	58
2.3.8.1.2 ALMACENAMIENTO DEL BIOGÁS.....	58
2.3.8.1.3 USO DEL BIOGÁS	59
2.3.8.1.4 TRATAMIENTO DEL BIOGÁS EN FUNCIÓN DE SU USO.....	59
2.3.8.1.4.1 ELIMINACIÓN DE PARTÍCULAS	60
2.3.8.1.4.2 DESHIDRATACIÓN CONDENSADORES	61
2.3.8.1.4.3 ELIMINACIÓN DE H ₂ S.....	61
2.3.8.1.4.3.1 BIOLÓGICA	61
2.3.8.1.4.3.2 BIOFILTROS O BIOSCRUBBER	62
2.3.8.1.4.3.3 POR ADICIÓN DE CLORURO DE HIERRO	62
2.3.8.1.4.3.4 ÓXIDO DE HIERRO	62
2.3.8.1.4.3.5 VIRUTAS DE MADERA CUBIERTAS DE ÓXIDO DE HIERRO	63
2.3.8.1.4.3.6 PELLETS IMPREGNADOS DE ÓXIDO FÉRRICO.....	63
2.3.8.1.4.3.7 FILTROS MOLECULARES	63
2.3.8.1.4.3.8 MÉTODOS EN MEDIO LÍQUIDO	64
2.3.8.1.4.4 MÉTODOS DE CONCENTRACIÓN DEL BIOGÁS Y ELIMINACIÓN DE CO ₂	64
2.3.8.2 LODO DIGERIDO	64
CAPÍTULO 3 CASO DE ESTUDIO	66

3.1 RESIDUOS ORGÁNICOS DE CIUDAD UNIVERSITARIA.....	66
3.1.1 MANEJO DE RESIDUOS ORGÁNICOS EN CIUDAD UNIVERSITARIA.....	66
3.1.2 CUANTIFICACIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS DE CAFETERÍAS DE CIUDAD UNIVERSITARIA.....	67
3.2 CONDICIONES DE LA CAFETERÍA DE CASO DE ESTUDIO.....	70
3.3 GASTOS ENERGÉTICOS	72
CAPÍTULO 4 METODOLOGÍA.....	75
4.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE LOS DESECHOS	75
4.2 DISEÑO DEL REACTOR A NIVEL LABORATORIO	76
4.3 INÓCULO.....	78
4.4 ARRANQUE DEL DIGESTOR.....	79
4.5 PRESENCIA DE METANO EN EL BIOGÁS Y SU INFLAMABILIDAD	82
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	85
5.1 OPERACIÓN DEL REACTOR A FLUJO INTERMITENTE	85
5.1.1 PRIMERA ETAPA EXPERIMENTAL.....	85
5.1.2 SEGUNDA ETAPA EXPERIMENTAL.....	91
5.2 RESUMEN DE RESULTADOS	96
5.3 ANÁLISIS DE DE RESULTADOS.....	96
CAPÍTULO 6 ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA PROPUESTA	101
6.1 FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL RESTAURANTE CAFESÍN.....	101
6.1.1 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL REACTOR POR MÉTODO 1 A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES.	102
6.1.2. CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS POR MÉTODO 1 (A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES)	105
6.1.3 CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS AL DÍA POR MÉTODO 1 (A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES)	105
6.1.4 CÁLCULO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE LODOS DIGERIDOS POR MÉTODO 1. A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES	108
6.1.5 RESUMEN DE LOS CÁLCULOS DE FACTIBILIDAD TÉCNICA OBTENIDOS POR EL MÉTODO 1 A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES	109
6.1.6 CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS POR EL MÉTODO 2. A PARTIR DE PARÁMETROS TEÓRICOS.....	111
6.1.7 CÁLCULO DEL VOLUMEN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS PARA DATOS DEL EXPERIMENTO 1 Y 2 DEL MÉTODO 2 A PARTIR DE PARÁMETROS TEÓRICOS	114

6.1.8 FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL CONJUNTO DE RESTAURANTES DE CU SELECCIONADOS	116
6.1.9 CÁLCULO DE LAS OPERACIONES UNITARIAS PARA EL TRATAMIENTO DE RUO DEL CAFESÍN	117
6.1.10 GAS LP AHORRADO ANUALMENTE POR LA CAFETERÍA CAFESÍN	121
6.2 FACTIBILIDAD AMBIENTAL	124
6.2.1. OTRAS VENTAJAS DE GENERAR ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA.	127
6.2.2 EMISIONES DE GEI EVITADAS POR LA CAFETERÍA CAFESÍN EN UN AÑO	128
6.2.3 EMISIONES DE GEI EVITADAS ANUALMENTE POR LA SUMA DE RUO GENERADOS EN LOS RESTAURANTES DE CU SELECCIONADOS.	130
6.3 FACTIBILIDAD POLÍTICA	132
6.4 FACTIBILIDAD ECONÓMICA	137
6.4.1 VALOR PRESENTE NETO	137
6.4.1.1 CÁLCULO DEL VALOR PRESENTE NETO DEL PROYECTO PROPUESTO	138
6.4.2 TASA INTERNA DE RETORNO TIR	142
6.4.2.1 CÁLCULO DEL LA TIR DEL PROYECTO	143
CAPÍTULO 7 CONCLUSIONES	145
ANEXO 1	148
ANEXO 2	150
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Procesos de conversión de la biomasa, productos y aplicaciones.....	17
Figura 2. 2 Procesos de gasificación.....	20
Figura 2. 3 Esquema global del proceso de obtención del etanol.	25
Figura 2. 4 Proceso de compostaje.	26
Figura 2. 5 Fases del proceso de compostaje.....	28
Figura 2. 6 Gasómetro de baja presión.	58
Figura 2. 7 Gasómetro inchable	59
Figura 2. 8 Valoración del biogás.	60
Figura 2. 9 Tratamientos de depuración del biogás de acuerdo a su uso.....	60
Figura 3. 1 Plano de localización de cafeterías sometidas a cuantificación de RUO.....	68
Figura 3. 2 Cafeterías sometidas a medición.	69
Figura 3. 3 Residuos de cafeterías sometidas a medición.	70
Figura 3. 4 Ubicación de la cafetería Cafesín.	71
Figura 3. 5 Vista aérea de la cafetería Cafesín.	71
Figura 3. 6 Fotografía del área propuesta de instalación del digestor.....	73
Figura 3. 7 Plano de la cafetería Cafesín.	73
Figura 3. 8 Cocina de la cafetería Cafesín	74
Figura 4. 1 Muestra de los residuos generados en el Cafesín.....	75
Figura 4. 2 Fotografía del reactor a nivel laboratorio utilizado como digestor.	77
Figura 4. 3 Bolsa aislante para el reactor.	77
Figura 4. 4 Recipiente recolector de biogás.....	78
Figura 4. 5 Válvula de de quema para el biogás.....	78
Figura 4. 6 Residuos preparados para la carga al digestor.....	79
Figura 4. 7 Digestor con carga completa en el arranque.	81
Figura 4. 8 Cubierta aislante del digestor.....	81
Figura 4. 9 Arreglo del reactor con cubierta aislante y almacenador del biogás.....	82
Figura 4. 10 Contenido de metano en el biogás y su inflamabilidad	84
Figura 5. 1 Registro de temperatura en la operación del digestor experimental.....	85
Figura 5. 2 Relación de la temperatura con la producción de biogás.....	86
Figura 5. 3 Relación de pH con la temperatura de operación.....	87
Figura 5. 4 Relación del pH con la producción de biogás.....	87
Figura 5. 5 Pruebas de inflamabilidad y la producción de biogás.....	88
Figura 5. 6 Combustión del biogás generado.....	88
Figura 5. 7 Producción de biogás acumulado en la operación del digestor experimental.	89
Figura 5. 8 Características del lodo digerido.	90
Figura 5. 9 Registro de la temperatura de operación en la etapa a flujo intermitente.	92
Figura 5. 10 Relación de temperatura con la producción de biogás en la etapa a flujo intermitente.	92
Figura 5. 11 Relación del pH con la temperatura en la etapa a flujo intermitente.	93
Figura 5. 12 Relación del pH y la producción del biogás en la etapa a flujo intermitente.....	94
Figura 5. 13 Relación producción de biogás e índice de inflamabilidad en la etapa a flujo intermitente.	94
Figura 5. 14 Combustión del biogás generado en la segunda etapa de experimentación.	95
Figura 5. 15 Biogás Acumulado en la etapa a flujo intermitente.....	95

Figura 5. 16 Lodo Digerido	96
Figura 6. 1 Elementos del sistema de digestión propuesto.....	118
Figura 6. 2 Ubicación del sistema de digestión en la cafetería Cafesín	119
Figura 6. 3 Operación del sistema de digestión propuesto.....	119
Figura 6. 4 Diagrama de Flujos de efectivo del proyecto en el Cafesín.	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Datos típicos sobre peso específico y contenido de humedad para residuos orgánicos domésticos, comerciales, industriales y agrícolas.	9
Tabla 2. 2 Análisis próximo y datos energéticos típicos para materiales encontrados en los RUO..	11
Tabla 2. 3 Datos típicos sobre el análisis del material combustible presente en los RUO	12
Tabla 2. 4 Valores típicos de rechazos inertes y contenido energético de los RUO domésticos.	12
Tabla 2. 5 Análisis elemental de los materiales orgánicos utilizados como alimentación en los procesos de conversión biológica.	15
Tabla 2. 6 Datos sobre la fracción biodegradable de componentes seleccionados de RUO basándose en el contenido de lignina.	16
Tabla 2. 7 Temperaturas de inicio y fin del proceso de pirólisis.	21
Tabla 2. 8 Procesos de pirólisis.	22
Tabla 2.9 Consideraciones importantes de diseño para el proceso de compostaje aerobio. Parte 1.	29
Tabla 2. 10. Consideraciones importantes de diseño para el proceso de compostaje aerobio. Parte 2.	30
Tabla 2. 11 Clasificación de los procesos de digestión, en base a la temperatura a la que ocurren.	47
Tabla 2. 12 Consideraciones importantes de diseño para la digestión de sólidos en bajas concentraciones de los RUO.	52
Tabla 2. 13 Consideraciones importantes de diseño para la digestión anaerobia de sólidos en altas concentraciones de los RUO.	53
Tabla 2. 14 Análisis comparativo de los procesos de digestión de sólidos en bajas y altas concentraciones para los RUO (parte 1).	54
Tabla 2. 15 Análisis comparativo de los procesos de digestión de sólidos en bajas y altas concentraciones para los RUO (parte 2).	55
Tabla 2. 16 Análisis comparativo de los procesos de digestión de sólidos en bajas y altas concentraciones para los RUO (parte 3).	56
Tabla 2. 17 Componentes del biogás en función del sustrato utilizado.	57
Tabla 2. 18 Clasificación de biogás en base a la forma de producción.	57
Tabla 3. 1 Producción Diaria Promedio, Máximo y Mínimo de ROU generados en Restaurantes de CU.	69
Tabla 4. 1 Tipos y proporción de los residuos orgánicos generados con mayor frecuencia en la cafetería Cafesín.	75
Tabla 4. 2 Resultado de la caracterización física de los residuos generados en la cafetería Cafesín.	76
Tabla 4. 3 Resultados de la caracterización química de los residuos generados en la cafetería Cafesín.	76
Tabla 4. 4 Características físicas y químicas de excremento vacuno.	79
Tabla 4. 5 Proporción de volumen y peso de cada uno de los componentes en la carga para el arranque del digestor experimental.	80
Tabla 4. 6 Grado de inflamabilidad del biogás generado.	83
Tabla 5. 1 Características químicas del lodo digerido.	90
Tabla 5. 2 Resumen de Resultados Digestor en su arranque (experimento 1) y su operación a flujo intermitente (experimento 2).	97
Tabla 5. 3 Tiempo de retención hidráulica comparado con otros estudios en este trabajo.	99

Tabla 6. 1 Parámetros comunes de diseño para experimento 1 y experimento 2 (Método 1 a partir de datos experimentales).....	101
Tabla 6. 2 Parámetros de diseño específicos de Experimento 1 y Experimento 2.	102
Tabla 6. 3 Resumen de Cálculos de Factibilidad realizados por Método 1 para los Experimento 1 y 2.....	110
Tabla 6. 4 Parámetros Comunes de Diseño para Experimento 1 y Experimento 2.	112
Tabla 6. 5 Resumen de cálculos de factibilidad realizados por método 2 para los Experimento 1 y 2 (a partir de parámetros teóricos).....	115
Tabla 6. 6 Parámetros comunes de diseño para digestor de RUO de restaurantes de CU.....	116
Tabla 6. 7 Resumen de cálculos de factibilidad realizados por método 1 (a partir de datos experimentales) para los RUO de los restaurantes de CU.	117
Tabla 6. 8 Volúmenes de las operaciones unitarias para el Cafesín.	120
Tabla 6. 9 Poder calorífico de gas LP y biogás (Steadman, 1978; FES Iztacala UNAM).	123
Tabla 6. 10 Estimación de Gases de Efecto Invernadero, en México para el 2002 (GTZ, 2003). ...	126
Tabla 6. 11 Costos de suministros, mano de obra y puesta en marcha del sistema de digestión..	138
Tabla 6. 12 Porcentaje de incremento en el precio promedio anual del gas LP	139
Tabla 6. 13 Estimación del precio promedio anual estimado para el gas LP	139
Tabla 6. 14 Estimación del costo de operación y mantenimiento del sistema de digestión.	140
Tabla 6. 15 Ganancia monetaria por producción de biogás en el Cafesín	140